

ANNEXE 2

Rapport de Vladimir Koutitonsky (2005)



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 Havre 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 HAVRE AUX MAISONS.



V. G. Koutitonsky, Ph.D.

Rapport de recherche LHE-05-2
Laboratoire d'hydraulique environnementale.

Pour le Groupe Conseil GÉNIVAR Inc.

Avril 2005

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
REMERCIEMENTS.....	IX
RÉSUMÉ	1
1. LA ZONE D'ÉTUDE	6
2. OBJECTIFS	10
3. DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE	11
3.1 MESURES EN MER.....	11
3.1.1 Analyses des mesures	12
3.1.1.1 Analyses des courants, des niveaux d'eau et des vents.	12
3.1.1.2 Analyse des vagues.....	13
3.1.1.3 Analyse des sédiments.....	13
3.1.2 Le milieu physique.....	14
3.1.2.1 Vents.....	14
3.1.2.2 Vagues.....	15
3.1.2.3 Marées et niveaux d'eau.....	16
3.1.2.4 Courants	19
3.1.2.5 Sédiments.....	20
3.2 MODÉLISATION INTÉGRÉE DU MILIEU PHYSIQUE.....	21
3.2.1 Propagation de la marée	21
3.2.1.1 Approche.....	21
3.2.1.2 Modèle hydrodynamique MIKE21-HD	22
3.2.1.3 Grilles de calcul.....	22
3.2.1.4 Simulation numérique	23
3.2.1.5 Validation de la simulation	24
3.2.1.6 Résultats	24
3.2.2 Effet du vent	25
3.2.3 Transport de sédiment.....	26
3.2.3.1 Approche.....	26
3.2.3.2 Simulations numériques intégrées.....	28
4. IMPACTS DES PILES DU NOUVEAU PONT	33
4.1 PARAMÉTRISATION DE L'IMPACT D'UNE PILE	34
4.2 IMPACT SUR LA PROPAGATION DE LA MARÉE	35
4.3 IMPACT SUR LE TRANSPORT DE SÉDIMENT	36
5. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	37

TABLEAUX	41
FIGURES.....	49
ANNEXE A : STATIONS DE MESURE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES.....	95
LISTE DES FIGURES – ANNEXE A.....	96
A.1 INTRODUCTION	97
A.2 OBJECTIF	97
A.3 MISSIONS 2001	98
A.3.1 Dates.....	98
A.3.2 Membres	98
A.3.3 Logistique.....	98
A.4 DÉPLOIEMENT ET RÉCUPÉRATION DES INSTRUMENTS DE MESURE	99
A.4.1 Station M : Paramètres météorologiques	100
A.4.2 Station 1 : Marégraphe, houlographe et thermistor.....	100
A.4.3 Station 2 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor ...	101
A.4.4 Station 3 : Marégraphe et thermistor.....	102
A.4.5 Station 4 : Marégraphe et thermistor.....	102
A.4.6 Station 5 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor ...	103
A.4.7 Station 6 : Marégraphe et thermistor.....	104
A.4.8 Station 7 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor ...	104
A.4.9 Station 8 : Courantomètre	105
A.4.10 Station 9 : Marégraphe et thermistor.....	106
A.4.11 Station 10 : Marégraphe et thermistor.....	106
A.4.12 Station 11 : Marégraphe et thermistor.....	107
A.4.13 Station 12 : Marégraphe et thermistor.....	107
A.4.14 Station 13 : Marégraphe et thermistor.....	108
A.5. PRÉLÈVEMENTS DE SÉDIMENTS	109
ANNEXE B : MÉTHODES D'ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN.....	128
B.1 SÉRIES DES NIVEAUX, COURANTS ET DES VENTS.....	130
B.1.1 Extraction de la tendance.....	131
B.1.2 Lissage et décimation	131
B.1.3 Analyse harmonique	132
B.1.4 Analyse spectrale.....	135
ANNEXE C : MODÈLE NUMÉRIQUE DE VAGUES (MIKE21-NSW).....	140
C.1 PROPAGATION ET RÉFRACTION	144
C.2 GÉNÉRATION ET DISSIPATION	144
C.2.1 Génération par le vent	146
C.2.2 Dissipation par le fond	147
C.2.3 Dissipation par déferlement	150

ANNEXE D : MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE (MIKE21-HD)	152
D.1 INTRODUCTION	153
D.2 ÉQUATIONS DE BASE:.....	153
D.3 INTRANTS AU MODÈLE	155
D.4 SORTIES DU MODÈLE	156
D.5 RÉFÉRENCES:	156
ANNEXE E : MODÈLE NUMÉRIQUE DE TRANSPORT DE SÉDIMENTS NON-COHÉSIFS (MIKE21-ST)	159

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des Îles de la Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent.	50
Figure 2: Photo aérienne de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons datant du 22 juillet 1992, indiquant la présence des deltas interne et externe et l'emplacement du pont actuel en 2002.	51
Figure 3 : Bathymétrie reconstituée des lagunes du Havre aux Maisons et de Grande Entrée aux Iles-de-la-Madeleine. La zone de la passe d'entrée du Havre aux Maisons identifiée par le rectangle rouge est présentée en détail au bas de la figure.....	52
Figure 4 : Dimensions des passes de Grande-Entrée (haut), du Havre aux Maisons (centre) et du Pont du Déroit (bas). À noter que les passes ne sont pas présentées à la même échelle spatiale.	53
Figure 5: Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 12 juillet 2001.....	54
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).....	55
Figure 7 : Vitesses et directions des vents mesurées à la station M de mai à juillet 2001.....	56
Figure 8 : Rose des vents mesurés à la station M de mai à juillet 2001.	57
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.....	58
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.	59
Figure 11 : Niveaux d'eau mesurés à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes du Havre aux Maisons et Grande-Entrée du 23 mai au 12 juillet 2001.....	60
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 Havre 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.....	61
Figure 13 : Variations des niveaux d'eau sous le pont du Havre 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.	62
Figure 14 : Données de courants (m/s) à la passe du Havre 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).	63
Figure 15 : Données de courants et niveaux d'eau à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons (courant 2 V et niveau 1) et à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée (courant 8 V et niveau 9).....	64

Figure 16 : Relation temporelle entre les niveaux d'eau à la station 1 à l'extérieur de la passe du Havre aux Maisons et les niveaux et courants sous le pont à la station 2 durant un cycle de marée diurne.....	65
Figure 17: Grilles de calcul G0 (mailles de 90m), G1 (mailles de 30m), G4 (mailles de 30m) et G2 (mailles de 10m) utilisées pour les simulations des courants et niveaux sous l'influence des marées et des vents dans les lagunes et à la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.....	66
Figure 18 : Amplitudes et phases de l'onde de marée diurne K1 dans les lagunes du Havre aux Maisons et Grande Entrée aux Îles de la Madeleine.	67
Figure 19: Amplitudes et phases de l'onde de marée diurne M2 dans les lagunes du Havre aux Maisons et Grande Entrée aux Îles de la Madeleine.	68
Figure 20 : Amplitude (haut) et phase (bas) de la composante harmonique K1 de la marée à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.	69
Figure 21 : Amplitude (haut) et phase (bas) de la composante harmonique M2 de la marée à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.	70
Figure 22 : Maximum du flot à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents de l'Est à 21:20 le 4 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.	71
Figure 23: Maximum du jusant à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents de l'Est à 13:50 le 5 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.....	72
Figure 24: Maximum du flot à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents du Nord-Ouest à 09:20 le 8 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.	73
Figure 25: Maximum du jusant à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents du Nord-Ouest à 17:20 le 8 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.....	74
Figure 26 : Approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiments non cohésifs.	75
Figure 27 : Grilles utilisées pour les simulations de la réfraction des vagues (G0w, G1w, G2w), des courants sous l'influence des marées, des vents et des vagues (G0-90m, G1-30m, G4-30m, G2-10m) et du transport de sédiments non-cohésif (G2-10m), avec les positions des stations 1 et 9 (points rouges).	76
Figure 28 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives, pour des vagues de 2.5 m de hauteur en provenance de l'Est, de la frontière vers la zone d'étude, par vents d'Est de 11 m/s. Les résultats de cette simulation seront imposés à la frontière de la grille de calcul G1w (rectangle vert).	77
Figure 29 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives des vagues en obtenues de G0w et imposées à la frontière Est par vents d'Est	

de 11 m/s. Les résultats ci haut seront interpolés vers la grille plus fine G2m10.	78
Figure 30 : Hauteurs significatives et des périodes détaillées dans la zone d'étude calculées sur la grille G1w par le modèle NSW.	79
Figure 31 : Courants maximums 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.	80
Figure 32 : 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.....	81
Figure 33 : Transport net (m ³ /s/m) de sédiments non cohésifs calculé par le modèle MIKE21-ST sur une période d'exactly deux cycles de marée diurne, soit du 4 au 6 juin 2001.	82
Figure 34 : Positions en coordonnées UTM (zone 20) des quatre piles du nouveau pont (points et ligne bleu clair) à l'extérieur de l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons. Le trait de côte est en rouge et les isobathes en mauve sont indiquées en mètres (vert) sous le niveau des mers les plus basses.....	83
Figure 35: Paramètres géométriques servant aux calculs de la tension de cisaillement équivalente imposée par une pile de pont à l'écoulement.....	84
Figure 36 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée K1, sans les piles en haut et avec les piles bas.....	85
Figure 37 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	86
Figure 38 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée K1, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	87
Figure 39 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée M2, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	88
Figure 40 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée K1 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	89
Figure 41 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée K1 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	90
Figure 42 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	91
Figure 43 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.....	92
Figure 44 : Profondeurs (haut) et transport net de sables durant 48 heures par vents d'Est, sans piles (bas).....	93
Figure 45 : Profondeurs (haut) et transport net de sables durant 48 heures par vents d'Est, avec piles (bas).....	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions des passes du Havre 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).....	42
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).	43
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 Havre aux Maisons et Grande-Entrée et à l'extérieur dans le Golfe, avec leurs intervalles de confiance à 95%.	44
Tableau 4 : Résultats des analyses granulométriques, Lagune du Havre aux Maisons.....	45
Tableau 5 : Grilles de calcul utilisées pour les simulations de propagation de la marée (section 3.2.1), de l'influence du vent (section 3.2.2) et du transport de sédiments dans la zone d'étude sous l'influence des marées, des vents et des vagues (section 3.2.3).	47
Tableau 6 : 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.....	48

REMERCIEMENTS

Je remercie Sylvain Leblanc et Gilles Desmeules de l'ISMER pour la préparation des mouillages et des instruments de mesures, pour les opérations de déploiement et de récupération de ces instruments, pour l'extraction, les contrôle de qualité et l'analyse des données. Thomas Guyondet, étudiant au doctorat à l'ISMER a aussi contribué à diverses étapes de l'analyse des données de terrain.

Je remercie aussi Jean Boudreault et les collègues du Groupe Conseil Génivar Inc. pour leur entière collaboration tout au long de cette étude.

RÉSUMÉ

La construction d'un nouveau pont sur piles dans la zone d'écoulement de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons pourrait avoir des impacts sur le milieu physique des lagunes du Havre aux Maisons et de Grande-Entrée. Par exemple, ces piles 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. Ces piles pourraient aussi modifier le transport de sédiments dans la zone immédiate de l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

Cette étude décrit les paramètres physiques du milieu en l'absence de piles 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. Les modèles numériques développés ont ensuite été utilisés en tenant compte de la présence de quatre piles de pont dans la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons et les impacts de ces piles sur la propagation de la marée et le transport de sédiment ont été évalués.

Des mesures 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 Havre 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 aux Iles-de-la-Madeleine soufflent du cadran Sud-Ouest en été et Nord-Ouest en hiver. Ainsi, la baie de Plaisance et la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons seront protégées des vagues générées par ces vents. Par contre, des vents du cadran Est produiront des vagues qui vont être réfractées par les hauts

fonds dans la baie de Plaisance vers la zone d'étude. Ceci a été confirmé par des mesures de vagues. Cependant, les hauteurs de ces vagues d'Est diminuent rapidement avant d'arriver dans la zone d'étude à cause du déferlement sur les hauts fonds.

Des 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 composantes semi-diurnes M2 et diurnes K1. La propagation de la marée du Golfe vers la lagune du Havre aux Maisons est fortement influencée par l'étranglement de la passe à l'entrée de la lagune. 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 la lagune. Des piles construites dans la passe pourront amplifier ce retard de phase et changer la circulation résiduelle dans la lagune. L'analyse de la réponse des niveaux d'eau aux 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 μm . 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 (i) la propagation de la marée dans les deux lagunes et (ii) le transport

de sédiment dans la zone d'étude, sous l'effet combiné des marées, des vents et des vagues.

La simulation de la propagation de la marée dans les deux lagunes a été effectuée à l'aide du modèle hydrodynamique en 2D MIKE21-HD de l'institut hydraulique Danois (www.dhi.dk) qui permet de découvrir les zones littorales à marée basse et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées (*Nested grids* en anglais). Ceci a permis de bien définir la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons et la passe du Pont du Détroit. Les phases et les amplitudes des composantes M2 et K1 aux points de mesure de niveau d'eau ont été bien reproduites par le modèle numérique, 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. On remarque par exemple que la marée du Golfe met environ trois heures à atteindre le pont du Détroit situé à l'intersection des deux lagunes. La lagune de Grande Entrée semble être du type « coulante » c'est-à-dire que l'onde de marée y pénètre sans trop de retard de phase. Par contre, la lagune du Havre aux Maisons est plutôt du type « restreinte », c'est-à-dire que la passe d'entrée offre une résistance significative à la progression de la marée. En fait, la marée prend un retard considérable de sa phase juste au large d'un des endroits où est prévue la construction du nouveau pont. Les deux principales harmoniques de la marée, soit la composante semi-diurne M2 et la composante diurne K1 voient leur amplitude diminuer d'environ 20 cm à l'extérieur des lagunes à environ 10 à 13 cm à l'intérieur des lagunes.

Les simulations du transport de sédiment ont été réalisées 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 utilisés sont respectivement les modèles MIKE21-HD, MIKE21-NSW et MIKE21-ST du système intégré de modélisation MIKE21 développés par l'institut hydraulique Danois.

Le transport des sédiments nécessite une connaissance de la distribution de l'énergie des vagues dans la région et la courantologie sous l'effet combiné des marées, des vents et des vagues. La propagation de l'énergie des vagues a été simulée à l'aide du modèle numérique NSW 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 sont toutes réfractées vers la zone de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons à cause des hauts fonds qui s'y retrouvent. Cependant, 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 à ceux qui sont générés par la marée et des vents de l'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 et ils se manifestent à la passe d'entrée de la lagune du Havre 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 affichent 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 enfin calculés dans la zone d'étude à l'aide du modèle numérique de transport de sédiments non cohésifs MIKE21-ST. 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.

Le transport net de sédiment en $m^3/s/m$ durant exactement deux cycles de marée diurne sous l'effet de vagues en provenance de l'Est dans le Golfe suggère une dérive littorale du sable de l'Est vers l'Ouest et une zone d'érosion potentielle dans le chenal de navigation aux abords des changements abrupt de profondeur.. Il ne semble pas y avoir de transport net de sédiments en travers de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

Les modèles ayant servi à décrire le milieu physique en l'absence de piles de point sont ensuite utilisés de la même façon, mais cette fois en simulant numériquement la présence de quatre piles d'un nouveau pont à l'extérieur du chenal d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

Ces simulations ont révélé que les piles n'auront pas d'impact significatif sur la propagation de la marée dans les lagunes ni sur le taux de transport de sédiment dans la région de la passe de la lagune du Havre aux Maisons.

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 Havre aux Basques au Sud-Ouest et les lagunes Le Bassin et Havre Aubert au Sud.

Ces lagunes sont des lieux de refuge pour plusieurs espèces marines 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 Havre 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 piles 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.

La lagune du Havre 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. Il est même rapporté localement que, sous certaines conditions de vents et marées, une eutrophisation locale se manifeste à cet endroit (Tiphane, 1976). Au Nord-Est, la lagune de Grande-Entrée communique

avec le Golfe Saint-Laurent par la passe de la Grande-Entrée (figure 1). En somme, les eaux des deux lagunes s'échangent entre elles par la passe du Pont du Déroit, et avec les eaux du Golfe Saint-Laurent par les passes de Grande-Entrée et de Havre aux Maisons.

La bathymétrie de la lagune du Havre 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 Havre 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 Havre aux Maisons. Cette bathymétrie est présentée à la figure 3. Tiphane (1976) a aussi mesuré les profils des profondeurs en travers des passes du Havre aux Maisons, du Pont du Déroit et de la Grande-Entrée et il les présente graphiquement sur ses cartes bathymétriques. Ces profils ont été numérisés et sont détaillés à la figure 4 et au tableau 1. Le niveau de référence des profondeurs n'étant pas clairement défini dans la référence, les 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 Havre 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 le 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 3.2.1) et du transport des sédiments à la passe d'entrée (section 3.2.3). Toute étude quantitative du transport de sédiment dans la région devra prévoir une nouvelle couverture bathymétrique de la région.

La circulation des eaux dans les lagunes du Havre 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 agissant 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 piles du nouveau pont dans la zone de la passe de la lagune du Havre 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 du Havre 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 Havre 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 piles 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 Havre 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 hydrosédimentaire équivalente pour la passe du Havre aux Maisons. 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.

2. OBJECTIFS

Les objectifs de la présente étude sont

- (i) de décrire le milieu physique dans la zone d'étude;
- (ii) évaluer l'impact des piles du nouveau pont sur ce milieu physique.

Les paramètres du milieu physique considérés sont :

- La circulation des eaux dans les lagunes du Havre 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 piles.
- La circulation détaillée des eaux dans la zone de la passe du Havre aux Maisons avant et après la construction des piles.
- Les vagues dans la zone d'approche de la passe du Havre aux Maisons pour le calcul du transport des sédiments.
- Le transport des sédiments non cohésifs dans la région de la passe du Havre aux Maisons avant et après la construction des piles du nouveau pont.

Les impacts à évaluer sont :

- Des changements des amplitudes et phases de la marée à la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons et ailleurs dans les deux lagunes à cause des piles du nouveau pont;
- Des changements du taux de transport de sédiments dans la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons à cause des piles du nouveau pont.

3. DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE

3.1 MESURES EN MER

Des mesures de terrain ont été effectuées en 2001 par l'ISMER pour décrire le milieu physique de la zone d'étude et, plus généralement, celui des lagunes du Havre aux Maisons (HAM) et de Grande-Entrée (GE). Ces 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. Elles ont été complétées par des mesures spatiales de la taille des sédiments dans la zone d'étude.

Les positions des stations de mesure sont indiquées à la figure 5 et au tableau 2. Ce tableau présente les dates et les 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 bref, la vitesse et la direction du vent et la pression atmosphérique ont été mesurés au Cap Alright à Havre aux Maisons. Les niveaux d'eau ont été enregistrés à 13 stations disposées juste à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons (station 1), à la passe sous le pont existant (station 2), à l'intérieur de la lagune du Havre aux Maisons du côté Sud-Ouest (station 3) et Nord-Est (station 4), à l'intersection des lagunes du Havre aux Maisons et Grande Entrée sous le Pont du Déroit (station 5), au Sud-Ouest de la lagune de Grande Entrée (station 6), au Nord-Est à l'entrée de la baie de Clarke (station 7), à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune de Grande Entrée (station 9), au large de l'entrée de la lagune 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 Havre aux Basques dans la baie de Plaisance (station 12) et dans le Golfe Saint-Laurent du côté Ouest de la

lagune du Havre aux Basques (station 13). Les courants ont été mesurés aux entrées des deux lagunes (stations 2 et 8) et à leur jonction sous le Pont du Détroit (station 5). Les vagues ont été enregistrées à la station 1 à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

3.1.1 ANALYSES DES MESURES

3.1.1.1 Analyses 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 est constituée des composantes suivantes :

$$y(t) = y_T(t) + y_A(t) + y_M(t) + y_R(t)$$

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.

3.1.1.2 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.

3.1.1.3 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 Havre 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.

3.1.2 LE MILIEU PHYSIQUE.

3.1.2.1 Vents

Les vents mensuels aux Iles-de-la-Madeleine ont été analysés par McLaren Plansearch Ltd., (1991) et sont présentées à la figure 6 sous forme de roses des vents. Ces 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 Havre aux Maisons vers la lagune de Grande-Entrée. Ceci favorise une entrée des eaux de la baie de Plaisance vers la lagune du Havre 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 Havre aux Maisons. A l'intérieur des lagunes, les vents produisent des courants près des deux rives dans la même direction du vent et un retour d'eau quelque part au milieu dans les zones plus profondes des lagunes (Koutitonsky, 2004).

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 Havre aux Maisons 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 Havre 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 (figure 5) sont présentés à la figure 7 alors que la rose des vents correspondante est présentée à la figure 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, soit 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 (de l'Est) 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. La période du 4 au 6 juin 2001 sera donc ciblée lors de l'étude du transport de sédiments sous l'effet combiné des vagues, des marées et des vents à la section 3.2.3.

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 étant donné que les vagues du Golfe déferlent par faibles profondeurs au cours de leurs trajectoires d'approche. Cependant, même si ces hauteurs 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 gradients de pression associés aux tensions

de radiation (*radiation stresses*) des vagues et aux courants littoraux par vents d'Est vont causer le transport des sédiments qui est 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.

3.1.2.3 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 la marée est la principale cause des variations du niveau de l'eau aussi bien à l'extérieur qu'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). Cette atténuation est mise en évidence à la figure 12 qui présente les variations du niveau de l'eau sur une période de 15 jours. Les lignes verticales en pointillés montrent 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 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), tel que constaté auparavant par Mayzaud et al.(1991) et par 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 séries de niveau (Foreman, 1977, annexe B) 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 présentés au tableau 3 pour les composantes K1 et M2 avec l'intervalle de confiance de 95%. 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 :

$$\text{Retard de phase} = (289 - 247) / 360 \times 23.928 = 2,79 \text{ heures.}$$

Un calcul équivalent pour l'onde M2 donne un retard de 2.2 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 3.52 et 2.76 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 Havre 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 Havre 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 légère baisse du niveau sous le pont. Finalement, la vitesse des vents diminue le 5 juin et les vents du Nord-Ouest apparaissent. Ceci provoque une relaxation du niveau dans la lagune du Havre aux MAisons, 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 Havre aux Maisons.

En résumé, la surface mouillée de la passe du Havre aux Maisons 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 de près de deux heures à la propagation de la marée.

Tout changement de la surface de la passe, par la présence de piles d'un nouveau pont à cet endroit, pourra occasionner un changement de la phase de la marée à l'intérieur de la lagune du Havre aux Maisons. 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 piles de pont sur les phases et les amplitudes des marées dans les lagunes est 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.

3.1.2.4 Courants

Des mesures de courant à 1 m au-dessus du fond ont été enregistrées à la passe du Havre aux Maisons (station 2), à la passe du Pont du Déroit (station 5) et à la passe de Grande Entrée (station 8). Même si les mesures à la passe du Havre aux Maisons ont été enregistrées de mai à juillet 2001, seules les données du 25 mai au 4 juin 2001 sont de bonne qualité. 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 quelques jours après le début de l'immersion et une inspection de routine par un plongeur a permis de rétablir le trépied en le consolidant au fond. Cependant, le trépied s'est renversé à nouveau le 4 juin 2001 lors de forts courants et cette situation n'a pas été rectifiée. 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 Déroit 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 Havre aux Maison et de Grande Entrée se renversent régulièrement avec la marée et leurs vitesses dépassent 1 m/s. Les courants à la passe du Havre aux Maisons 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 Havre aux Maisons accuse un retard par rapport à celle du courant à la passe de Grande Entrée. 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 la lagune du Havre aux Maisons, 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.

3.1.2.5 Sédiments.

Les résultats des analyses granulométriques des 46 échantillons de sédiments recueillis aux alentours de la passe de la lagune du Havre aux Maisons 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 μm . Les déviations standard sont de l'ordre de 50 à 100 μm . 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 Havre aux Maisons.

3.2 MODÉLISATION INTÉGRÉE DU MILIEU PHYSIQUE

L'objectif général de l'étude étant d'évaluer l'impact des piles du nouveau pont sur le milieu physique des lagunes, l'approche adoptée consiste à simuler ce milieu physique sans les piles et ensuite avec les piles. Ceci permettra d'évaluer à la section 4 l'impact de des piles sur le milieu de façon comparative.

Cette section traite donc des simulations du milieu physique sans les piles. Ces simulations sont divisées en trois blocs :

- (i) Simulation de la propagation de la marée dans les deux lagunes durant 30 jours afin d'estimer les phases et amplitudes des principales composantes de la marée (K1 et M2) dans les deux lagunes (section 3.1.1);
- (ii) Simulation de l'effet du vent sur les courants durant le flot et le jusant dans la lagune du Havre aux Maisons (section 3.1.2);
- (iii) Simulation du transport de sédiment dans la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons, sous l'effet des marées, des vents et des vagues, durant deux cycles complets de marées diurnes (section 3.1.3).

Les simulations (i) et (iii) seront répétées à la section 4, avec les piles du nouveau pont pour évaluer les impacts.

3.2.1 PROPAGATION DE LA MARÉE

3.2.1.1 Approche

La propagation de la marée dans les deux lagunes est étudiée à l'aide d'un modèle hydrodynamique de circulation des eaux. Étant donné que la stratification verticale de la densité est négligeable dans les deux lagunes

(Koutitonsky et al., 2002), le modèle choisi est un modèle en deux dimensions sur le plan horizontal (2DH).

L'approche consiste à forcer le domaine des deux lagunes avec des niveaux d'eau mesurés à l'extérieur des passes d'entrée de chaque lagune, c'est-à-dire aux stations 1 et 9 (figure 5), et cela sans l'effet des vents. La période de simulation est d'une durée de trente jours. Cette période permettra de bien caractériser les amplitudes et les phases des principales composantes de la marée à toutes les mailles de la grille de calcul, à l'aide de la méthode d'analyse harmonique (Foreman, 1977).

3.2.1.2 Modèle hydrodynamique MIKE21-HD

Le modèle hydrodynamique utilisé est le modèle MIKE21-HD de l'institut hydraulique Danois (www.DHI.dk). Ce modèle offre l'option de découvrir à marée basse les zones intertidales peu profondes et de les recouvrir à marée montante. L'option a été activée dans chacune des simulations effectuées dans cette étude. Le modèle MIKE21-HD offre aussi l'option d'inclure dans la grille initiale du domaine des grilles dont les mailles de calcul sont plus petites que celles de la maille du domaine et cela afin de mieux définir certains passages restreints tels que la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons ou le passage sous le Pont du Déroit. Les dimensions des mailles des grilles dites « imbriquées » doivent cependant être exactement trois fois plus petites que celles des mailles de la grille où elles sont imbriquées. Par exemple, si la grille du grand domaine a des mailles de 90m x 90m, les mailles de la grille imbriquée devront avoir des dimensions de 30m x 30m. Les calculs numériques procèdent simultanément dans les deux grilles, avec des échanges appropriés de variables entre les deux grilles. Cette option a été utilisée dans la présente étude. Une description détaillée du modèle MIKE21-HD est fournie à l'annexe D.

3.2.1.3 Grilles de calcul

Les grilles de calcul utilisées pour l'étude de la propagation de la marée dans les deux lagunes sont les grilles G0-90m, G1-30m, G4-30m et G2-10m (figure 17). Des détails sur chaque grille, incluant le nombre de mailles dans l'axe X et dans

l'axe Y et leurs dimensions, sont donnés au tableau 4. Ce tableau présente aussi les grilles utilisées lors des calculs de réfraction des vagues (section 3.2.3).

La grille G0 a des mailles de 90m de côté et couvre l'ensemble des deux lagunes ainsi que la Baie de Plaisance. La grille G1 a des mailles de 30 m et elle est imbriquée à la maille $x = 50$ et $y = 80$ de la grille G0. Elle couvre la grande région de l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons. La grille G4 a aussi des mailles de 30m. Elle est imbriquée dans G0, à sa maille $x = 138$ et $y = 307$, et couvre la région du Pont du Déroit. Ainsi, la passe sous le pont est représentée par deux mailles. Finalement, la grille G2 a des mailles de 10m et couvre en détails la région d'intérêt de cette étude. Elle est imbriquée à la maille $x = 30$ et $y = 78$ de la grille G1. Elle offre une résolution spatiale de 9 mailles en dessous du pont actuel à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

3.2.1.4 Simulation numérique

La simulation numérique débute à 07 :00 le 4 juin 2001 et se termine à 8 :00 le 2 juillet 2001.. Le pas temporel de calcul est de 4 secondes (nombre de Courant = 4.6). Les solutions des 120 premiers pas de calcul sont multipliées par un facteur grandissant de 0 à 1 afin d'assurer une stabilité numérique aux calculs initiaux.

Les frontières ouvertes du modèle se situent à l'extérieur des passes du Havre aux Maisons (station 1)et de Grande-Entrée (station 9). 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. 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 égal à 32. L'exécution de cette simulation sur un ordinateur avec un système d'exploitation Windows 2000 du type Toshiba Satellite muni d'un processeur Intel P4 de 3.2 Ghz, possédant 2Mgb de mémoire vive a été de 72 heures de calcul, à un taux de 348739 points de calcul (toutes les variables dans une maille) par secondes.

3.2.1.5 Validation de la simulation

L'exactitude d'une simulation hydrodynamique effectuée dans une zone côtière soumise à des marées peut être évaluée de façon objective en calculant d'abord les amplitudes et les phases des principales composantes harmoniques (e.g. K1 et M2) des niveaux d'eau obtenus du modèle aux mailles qui correspondent à la position des stations de mesures (figure 5) et en les comparant à celles qui sont calculées à partir des niveaux d'eau mesurés à ces stations. Le tableau 5 présente cette comparaison. La comparaison est satisfaisante, compte tenu des intervalles de confiance à 95%, excepté peut-être pour les phases à la station 2 sous le pont actuel dans la passe de la lagune du Havre aux Maisons. En effet, les phases simulées à la station 2 sont en bien retard par rapport aux phases observées. Cependant, les phases simulées aux stations 1 et 3, soit des deux côtés de la station 2, étant similaires aux phases observées (tableau 5), suggère que la bathymétrie assignée aux mailles du modèle dans le delta interne est, en moyenne, trop profonde. 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.

3.2.1.6 Résultats

Le modèle ayant été validé, il est maintenant possible d'étudier les distributions spatiales des amplitudes et des phases de la marée dans les deux lagunes. Ces distributions ont été calculées et les amplitudes et les phases des composantes K1 et M2 sont présentées aux figures 18 et 19, respectivement. Ces mêmes données sont aussi présentées en détail pour la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons aux figures 20 et 21.

On constate que la passe de la lagune du Havre aux Maisons présente un obstacle majeur à la propagation de la marée dans cette lagune. Les amplitudes des ondes K1 et M2 dans le Golfe sont de 0.19 m et 0.20 m, respectivement, alors que dans la lagune elles sont atténuées à 0.11 m et 0.10 m. Les retards de phase entre le Golfe et l'intérieur de la lagune sont d'environ 50 degrés pour l'onde K1 (≈ 3.3 heures) et d'environ 70 degrés pour l'onde M2 (≈ 2.4 heures). La région du Pont du Détroit offre déjà moins de résistance à la propagation des

marées, tout comme celle de la passe de Grande-Entrée. Ces résultats suggèrent que la lagune du Havre aux Maisons offre une plus grande résistance à la pénétration de la marée que la lagune de Grande-Entrée. Ceci fut aussi observé par Koutitonsky et al. (2002) qui ont qualifié la lagune du Havre aux Maisons de « lagune étouffée » et la lagune de Grande Entrée de « lagune coulante » - en référence à la terminologie proposées par Kjerfve and Magill (1989). Ainsi, la marée se manifeste d'abord dans la lagune de Grande-Entrée et ensuite dans la lagune du Havre aux Maisons. Les amplitudes de la marée dans la lagune du Havre aux Maisons sont aussi plus amorties que celles de la lagune de Grande-Entrée.

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

3.2.2 EFFET DU VENT

Il est aussi intéressant de décrire une autre composante du milieu physique, soit la circulation dans la lagune du Havre aux Maisons durant le flot et le jusant, sous l'effet de vents différents. Une simulation hydrodynamique similaire à la précédente, sans la grille G2-10m mais en y ajoutant les vents mesurés à la station météorologique M (figure 5) a été effectuée, La période choisie pour cette simulation s'étend du 2 au 9 juin 2001 puisqu'elle comprend des événement de vents de l'Est (3-4 juin) et du Nord-Ouest (8-9 juin).

Les courants et les niveaux d'eau calculés au maximum du flot et du jusant sont présentés aux figures 22 et 23 pour des vents d'Est et aux figures 24 et 25 pour des vents du Nord-Ouest, respectivement. On y retrouve en référence les niveaux d'eau mesurés à la station 1, les 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, 2004).

On aperçoit à la figure 22 que des vents d'Est produisent effectivement des courants près des deux rives de la lagune du Havre aux Maisons, dirigés vers l'Ouest, et cela même lorsque les courants entrent dans la lagune durant le flot. Les courants simulés mettent aussi en évidence des tourbillons cycloniques dans la zone centrale de la lagune. Ces tourbillons sont cycloniques durant les deux phases de marée et, par conséquent, ils sont causés par les vents d'Est. Les courants près des rives et les tourbillons au centre sont aussi présents par vents du Nord-Ouest. Dans ce cas, les tourbillons sont anti-cycloniques. Finalement, le niveau de la surface subit un empilement dans le sens de la direction vers laquelle souffle le vent.

Cependant, il est peu probable que les piles du niveau pont auront une influence sur la circulation locale produite par les vents étant donné que ceux-ci génèrent des courants par cisaillement à la surface de l'eau et que l'ajout de piles dans l'eau ne changera pas le champ horizontal de cisaillement. Cette simulation ne sera donc pas répétée en présence de piles à la section 4.

3.2.3 TRANSPORT DE SÉDIMENT

3.2.3.1 Approche

La modélisation intégrée du transport de sédiments dans la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons 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 complexe et 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 MIKE21-NSW (*Near-shore Spectral Wave model*), MIKE21-HD (*Hydrodynamic model*) et MIKE21-ST (*Sand*

Transport model) du système MIKE21. Ces modèles se prêtent bien à une approche intégrée car ils opèrent dans le même environnement du système MIKE21. Ces modèles sont décrits en détails aux annexes C, D, et E respectivement.

Les étapes successives de l'approche intégrée de modélisation sont schématisées à la figure 26. 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 MIKE21-NSW 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 ensuite 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 piles du pont dans la région de la passe de la lagune du Havre aux Maisons, 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.

3.2.3.2 Simulations numériques intégrées

Les grilles requises pour effectuer les calculs du transport des sédiments selon l'approche prescrite ci haut sont présentées à la figure 27. 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 paramètres de vagues qui proviennent de la direction Est dans le Golfe et qui se propagent vers la zone d'étude. La raison du choix de 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 imposées 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 MIKE21-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 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 graphique.

Un résultat de cette simulation est présenté à la figure 28. 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 27).

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 27). Ces séries temporelles ont été imposées comme conditions aux frontières ouvertes 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, la simulation a permis de calculer les tenseurs du cisaillement de la radiation des vagues. 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 10 m x 10 m afin de les ajouter aux calculs des courants et du transport de sédiments effectués sur la grille G2-10m.

Un résultat de la simulation des vagues sur la grille G1w est présenté à la figure 29, et avec plus de détails à la figure 30. Il en ressort que les hauteurs des vagues en provenance du quadrant Est (c'est-à-dire du Nord-Est, de l'Est et du 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 quand même 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 calculés 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 Havre aux Maisons jusqu'au Pont du Détroit. Par conséquent, si l'on doit effectuer un calcul de transport net de sédiments durant 48 heures, le calcul de la moyenne doit débuter 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 calculés à l'aide des grilles télescopiques G0-90m, G1-30m, G4-30m et G2-10m (voir figure 27) 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 de la lagune du Havre aux Maisons.

Les résultats des calculs de courants obtenus dans la grille d'intérêt G2-10m sont présentés à la figure 31. 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 alors que les plus forts courants du jusant surviennent 2.5 heures avant la marée basse à cette station. Ces forts courants se manifestent à la passe 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. Ces mêmes courants peuvent être comparées aux courants simulés sans l'effet de vagues aux figures 22 et 23.

Il est maintenant 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 G2-10m, 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 G2-10m. Cette simulation a duré exactement 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 μm (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 32 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 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 dérive littorale 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 sédiment durant exactement deux cycles de marée diurne, sous l'effet des vagues et des vents d'Est, est présenté à la figure 33. La dérive littorale du sédiment de l'Est vers l'Ouest et la zone d'érosion potentielle dans le chenal de navigation sont évidentes. Il ne semble pas y avoir de transport net de sédiments en travers de la passe d'entrée de la lagune.

L'impact des piles 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 piles à l'écoulement aux mailles appropriées dans la grille G2-10m.

4. IMPACTS DES PILES DU NOUVEAU PONT

Un des sites retenus par la firme Génivar Ltd. pour la construction d'un nouveau pont est localisé à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons (figure 34). Selon la firme, un pont à cet endroit serait supporté, entre autre, par quatre piles situées dans l'eau. Les positions de ces piles en coordonnées UTM, zone 20, sont :

Pile 1 :	587476 m Est	5250514 m Nord
Pile 2 :	587544 m Est	5250550 m Nord
Pile 3 :	587619 m Est	5250591 m Nord
Pile 4 :	587687 m Est	5250628 m Nord

On constate à la figure 34 que deux quatre piles seront disposées de chaque côté du chenal principal, près de la rive gauche, alors que les deux autres sont disposées de chaque côté du chenal secondaire près de la rive droite. Les piles à leur base auront une forme rectangulaire de 3 m x 9 m dans l'eau, la longueur de 9 m étant orientée parallèle à l'écoulement, à un angle de 333 degrés par rapport au Nord.

Cette section débute par un exposé de la méthode proposée par l'institut hydraulique Danois pour le calcul de la résistance offerte par une pile à l'écoulement dans le modèle MIKE21-HD (section 4.1). Ensuite, elle adresse les impacts des piles du nouveau pont (section 4.1) sur :

- Le transport des sédiments non-cohésifs à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons (section 4.2);
- La propagation de la marée dans les deux lagunes (section 4.3).

4.1 PARAMÉTRISATION DE L'IMPACT D'UNE PILE

L'impact d'une (ou de plusieurs) pile(s) sur l'écoulement peut être pris en considération lors d'une simulation hydrodynamique en 2D en ajoutant dans la cellule où se trouve la pile une tension τ_p dite « équivalente ». Cette tension est alors ajoutée à la tension habituelle associée à la friction au fond. Elle est proportionnelle à la surface occupée par la (les) pile(s) dans la cellule et elle s'exprime par (DHI, 2000) :

$$\tau_p = \frac{n \cdot F}{\Delta x \cdot \Delta y}$$

où τ_p : Tension de cisaillement équivalente de la pile ;
 F : Force d'entraînement (opposée au courant) ;
 n : Nombre de piles à l'intérieur d'une maille ;
 $\Delta x, \Delta y$: Dimensions des mailles en x et y dans la grille.

La force d'entraînement F est à son tour calculée en fonction des dimensions géométriques des piles selon l'expression suivante (DHI, 2000):

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

où C_D : Coefficient d'entraînement ;
 ρ : Densité de l'eau ;
 B_e : Largeur effective de la pile ;
 H_e : Hauteur de la pile exposée au courant ;
 V : Vitesse de l'écoulement.

Les dimensions géométriques considérées par le modèle MIKE21-HD lors du calcul de la force d'entraînement sont illustrées à la figure 35.

4.2 IMPACT SUR LA PROPAGATION DE LA MARÉE

L'impact des piles du nouveau pont sur la propagation de la marée dans les deux lagunes est évalué à l'aide de deux simulations hydrodynamiques identiques chacune d'une durée de 30 jours, une fois sans les piles et une autre fois avec les piles. Les vents sont exclus de cette simulation, étant donné que seule la propagation de la marée dans les lagunes et les courants résiduels qu'elle engendre peuvent être modifiés par la présence de piles.

Des analyses harmoniques des niveaux d'eau obtenus des deux simulations permettront de déceler avec précision tout changement dans les amplitudes et/ou les phases des composantes M2 et K1 de la marée résultant de la présence des piles à l'embouchure de la lagune.

4.2.1 Simulations de propagation de la marée

La simulation de la propagation de la marée dans les deux lagunes a été réalisée sur une période de 30 jours, de façon identique à la simulation présentée à la section 3.2.1, mais cette fois-ci avec les quatre piles du nouveau pont insérées dans la grille G2 et avec les vents exclus de la simulation.

Les niveaux d'eau calculés à chaque maille des grilles ont été analysés par analyse harmonique (Foreman, 1977) afin d'estimer les phases et amplitudes des ondes M2 et K1 dans les lagunes. Un changement dans la phase ou l'amplitude de ces deux ondes de marée en présence de pile indiquerait un effet des piles sur la propagation de la marée.

Les phases et les amplitudes des composantes harmoniques M2 et K1 de la marée dans la région de la grille G2 calculées pour les cas de simulations sans et avec piles sont présentées aux figures 36 à 39. Cette comparaison est étendue à l'ensemble des deux lagunes aux figures 40 à 43.

On ne constate pas de différence visible entre les résultats en présence et en l'absence de pile. Les piles n'auront donc aucun effet sur la phase ou sur l'amplitude de la marée dans les lagunes.

4.3 IMPACT SUR LE TRANSPORT DE SÉDIMENT

La simulation du transport de sédiment effectuée en l'absence de piles à la section 3.2.3 a été répétée ici avec les quatre piles prises en considération tel que décrit à la figure 26. Le but de cette simulation est d'estimer le transport net de sédiments non cohésifs (sables) en présence des piles du nouveau pont, sous l'effet des marées et des vents d'Est qui ont soufflé durant 48 heures, du 04 au 06 juin 2001. Ceci permet de comparer les transports net de sable en l'absence et présence des piles.

Les résultats des simulations du transport net de sédiments sont présentés aux figures 44 et 45. Les profondeurs du chenal de navigation y sont rajoutées à titre d'information. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les transports nets de sédiments en l'absence et en présence de piles. À peine si l'on décèle à la figure 11 (flèche rouge) un effet minime de la deuxième pile à partir de la rive gauche sur le transport net. Cet effet est négligeable en comparaison avec les transports observés où la profondeur change beaucoup (e.g. à l'approche du pont actuel). De façon générale, Les transports nets de sédiments à l'entrée de la lagune semblent être beaucoup plus influencés par les gradients horizontaux de profondeurs.

5. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a démontré que la propagation des marées du Golfe vers les lagunes du Havre aux Maisons et de Grande Entrée ne sera pas perturbée par les piles d'un nouveau pont situé au large de l'embouchure de la lagune du Havre aux Maisons. Il ne sera donc pas nécessaire d'effectuer un suivi à long terme des niveaux d'eau après la construction du pont afin de s'assurer que les amplitudes et les phases de la marée ne changeront pas.

L'étude a aussi démontré que les piles du nouveau pont ne perturberont pas les taux de transport de sédiments dans la région des piles. Il se peut fort bien par contre que les sédiments tout près de la base d'une pile soit remaniés quelque peu, dans un diamètre d'environ 5-10 m autour des piles, selon le mouvement résiduel des eaux à cet endroit.

De façon générale, les transports de sédiments dans la région de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons sont causés indirectement par les vagues en provenance du cadran Est. En effet, même si les vents du quadrant Est (i.e. Nord-Est, Est et Sud-Est) sont moins fréquents, ils sont plus intenses, et ils constituent-ils une source d'énergie pour le transport de sédiments d'Est en Ouest au niveau de la passe de la lagune de Hâvre-aux-Maisons. Ce transit est probablement en équilibre entre le transport entrant et sortant de la lagune durant les flots et jusants d'une part et le transport littoral net vers l'Ouest d'autre part.

Une étude détaillée de la dynamique sédimentaire dans la zone d'étude serait recommandée. Elle nécessitera des mesures hydrosédimentaires qui n'ont pu être réalisées au cours de la présente étude. Par exemple, les taux de transport de sédiment aux abords de l'embouchure d'une lagune changent souvent de façon abrupte, sous l'effet d'une forte tempête de longue durée survenant dans des conditions de marée de vives-eaux par exemple. En fait, de telles conditions

sont bien plus susceptibles de changer la configuration quasi-permanente du delta externe de la lagune du Havre aux Maisons que la présence des piles du nouveau pont. Un suivi bathymétrique des chenaux de navigation dans la région du nouveau pont est donc recommandé, surtout après de violentes tempêtes.

Il a été mentionné que la région du Pont du Déroit souffre à l'occasion de problèmes d'eutrophisation. Il serait relativement facile, avec les modèles numériques développés pour les deux lagunes dans cette étude d'étudier la meilleure configuration d'un élargissement de la passe au niveau du Pont du Déroit. Ceci pourrait être réalisé par exemple en refaisant les simulations hydrodynamiques avec une grille G4-30m comprenant plusieurs passes sous la route actuelle et évaluer le taux de renouvellement des eaux dans cette région à l'intersection des deux lagunes.

Par contre la réouverture de l'embouchure de la lagune de Hâvre-aux-Maisons, au niveau du pont de Hâvre-aux-Maisons, à l'état naturel n'est pas à envisager car ceci pourrait compromettre sérieusement la stabilité de cette passe, une stabilité qui est actuellement assurée artificiellement par les culées en béton qui supportent le vieux pont. Ces culées doivent rester en place, à moins d'entreprendre au préalable une étude détaillée de la dynamique sédimentaire de la passe naturelle par la modélisation numérique supportée par des mesures hydrosédimentaires exhaustives.

Finalement, la bathymétrie de la lagune du Havre-aux-Maisons a été reconstituée pour la présente étude d'impact à partir des cartes marines et de relevés bathymétriques effectués en 1976 et 1998. Cette bathymétrie demeure imprécise, surtout au niveau du delta interne. Ceci a eu pour conséquence de fausser la phase de la marée simulée par le modèle sous le pont actuel (station 2). Donc, une meilleure bathymétrie de la lagune de Hâvre-aux-Maisons serait nécessaire pour améliorer les performances de toute modélisation numérique des deux lagunes. Ceci, cependant, ne changera pas sensiblement les conclusions de cette étude.

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. 2004. Three-dimensional structure of wind-driven currents in coastal lagoons. P. 371-386, Chapter 9: Case studies, in (Eds. E. Gonenc and J. Woflin) *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Sustainable Use and Development*. CRC Press, Florida, 500 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 Havre 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.

TABLEAUX

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

Passé	Havre aux Maisons	Pont du Déroit	Grande-Entrée
Largeur	84 m	62 m	460 m
Profondeur	-7.4 m	-4.8 m	-7.2 m
Surface mouillée	622 m ²	298 m ²	3312 m ²

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 Havre aux Maisons et Grande-Entrée et à l'extérieur dans le Golfe, avec leurs intervalles de confiance à 95%.

Station	Marée diurne K1		Marée semi-diurne M2	
	Amplitude (m)	Phase (deg)	Amplitude (m)	Phase (deg)
1	0.19 ± 0.01	247 ± 4	0.20 ± 0.01	286 ± 1
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 Havre aux Maisons.

Ech	%	%	%	%	Moy.	Median	Dev.Std.	Skewness	Kurtosis
	Gravier	Sable	Silt	Argile	(μm)	(μm)	(μm)		
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 Havre aux Maisons.

Ech	%	%	%	%	Moy.	Median	Dev.Std.	Skewness	Kurtosis
	Gravier	Sable	Silt	Argile	(μm)	(μm)	(μm)		
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

Tableau 5 : Grilles de calcul utilisées pour les simulations de propagation de la marée (section 3.2.1), de l'influence du vent (section 3.2.2) et du transport de sédiments dans la zone d'étude sous l'influence des marées, des vents et des vagues (section 3.2.3).

Grille	Nombre de mailles NX x NY	Dimensions DX x DY (m)	Localité
G0m90 (Courants)	466 x 507	90 m x 90 m	Baie de Plaisance et les deux lagunes
G1m30 (Courants)	228 x 204	30 m x 30 m	Approche passe du Havre aux Maisons
G2m10 (Courants) (Vagues) (Sédiments))	514 x 280	10 m x 10 m	Zone d'étude, Passe du Havre aux Maisons
G4m30 (Courants)	115 x 208	30 m x 30 m	Passe du Pont du Détroit
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 du Havre aux Maisons

Tableau 6 : 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.

St	K 1				M 2			
	AMPLITUDE		PHASE		AMPLITUDE		PHASE	
	OBS	M	OBS	M	OBS	M	OBS	M
1	0.19 ± 0.01	0.19	247 ± 4	247	0.20 ± 0.01	0.20	294 ± 4	295
2	0.12 ± 0.01	0.13	270 ± 5	287	0.11 ± 0.01	0.08	316 ± 6	353
3	0.11 ± 0.01	0.13	289 ± 3	290	0.10 ± 0.01	0.09	350 ± 21	359
4	0.11 ± 0.01	0.13	294 ± 3	291	0.10 ± 0.01	0.09	352 ± 3	360
5	0.13 ± 0.01	0.12	300 ± 3	305	0.12 ± 0.01	0.10	6 ± 3	358
6	0.13 ± 0.01	0.13	278 ± 3	287	0.14 ± 0.01	0.13	329 ± 2	337
7	0.13 ± 0.01	0.13	278 ± 4	278	0.13 ± 0.01	0.13	322 ± 4	325
9	0.15 ± 0.01	0.16	245 ± 2	246	0.19 ± 0.01	0.17	283 ± 2	283

FIGURES

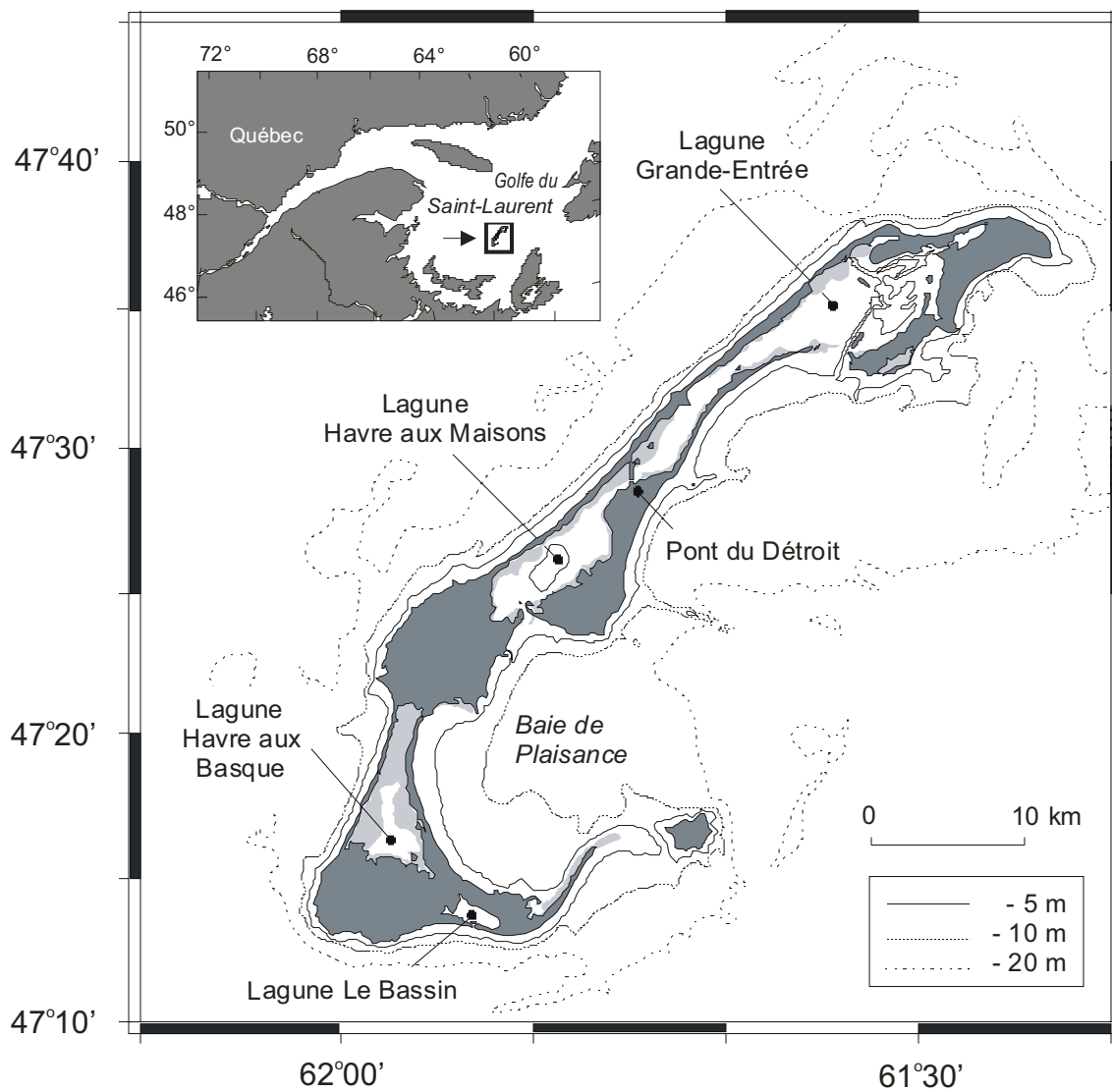


Figure 1 : Carte des Îles de la Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent.

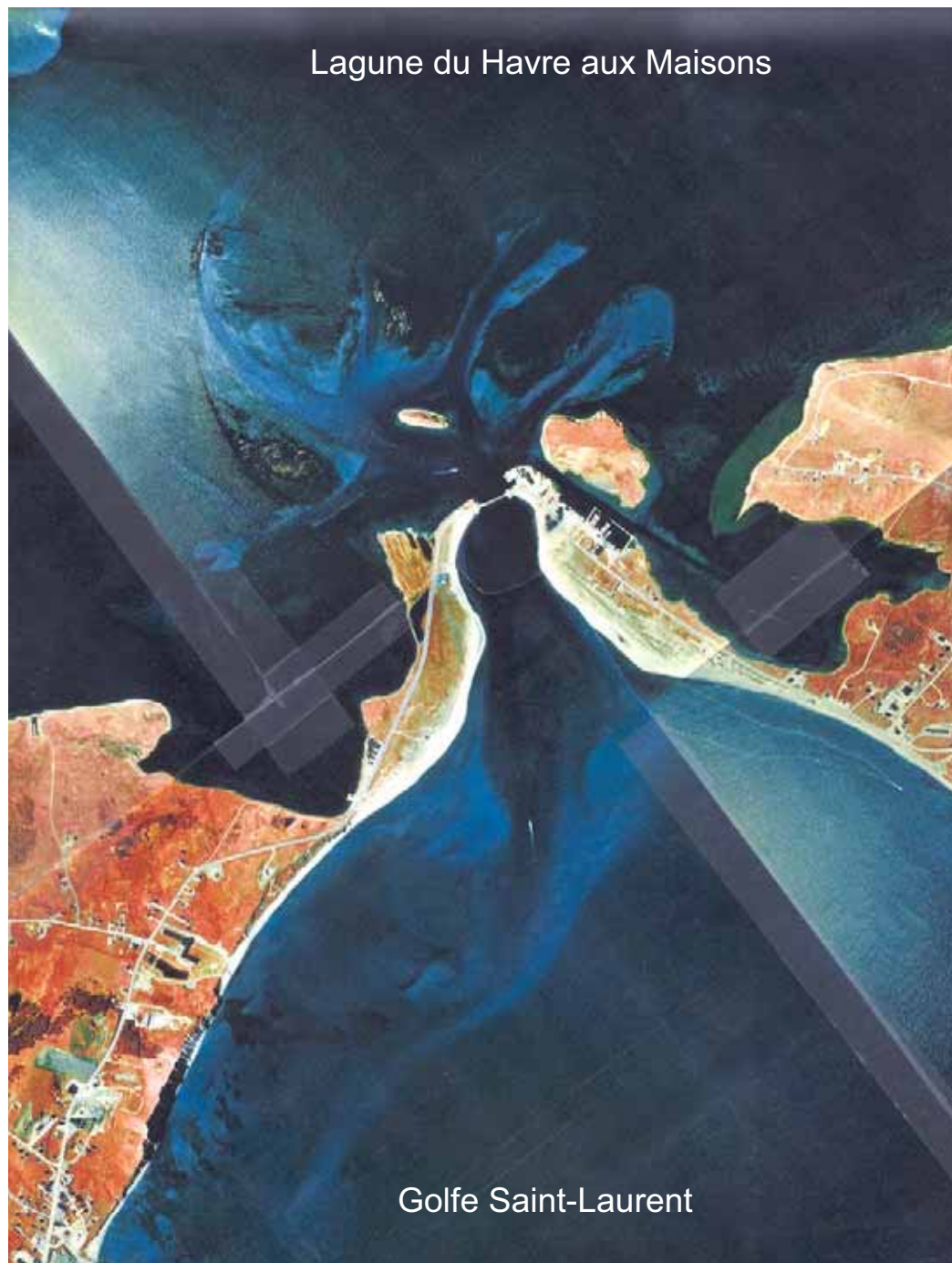


Figure 2: Photo aérienne de la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons datant du 22 juillet 1992, indiquant la présence des deltas interne et externe et l'emplacement du pont actuel en 2002.

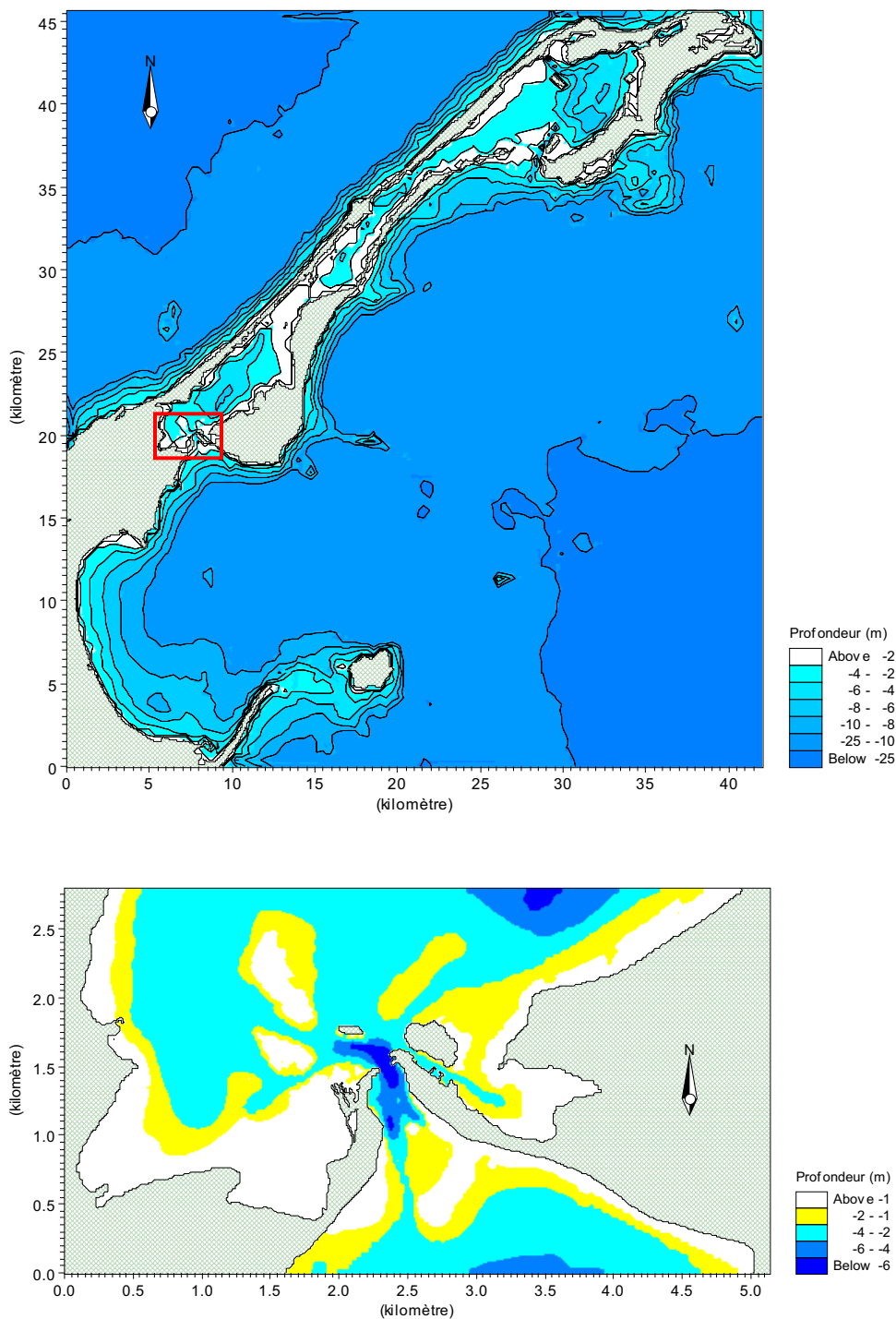


Figure 3 : Bathymétrie reconstituée des lagunes du Havre aux Maisons et de Grande Entrée aux Iles-de-la-Madeleine. La zone de la passe d'entrée du Havre aux Maisons identifiée par le rectangle rouge est présentée en détail au bas de la figure.

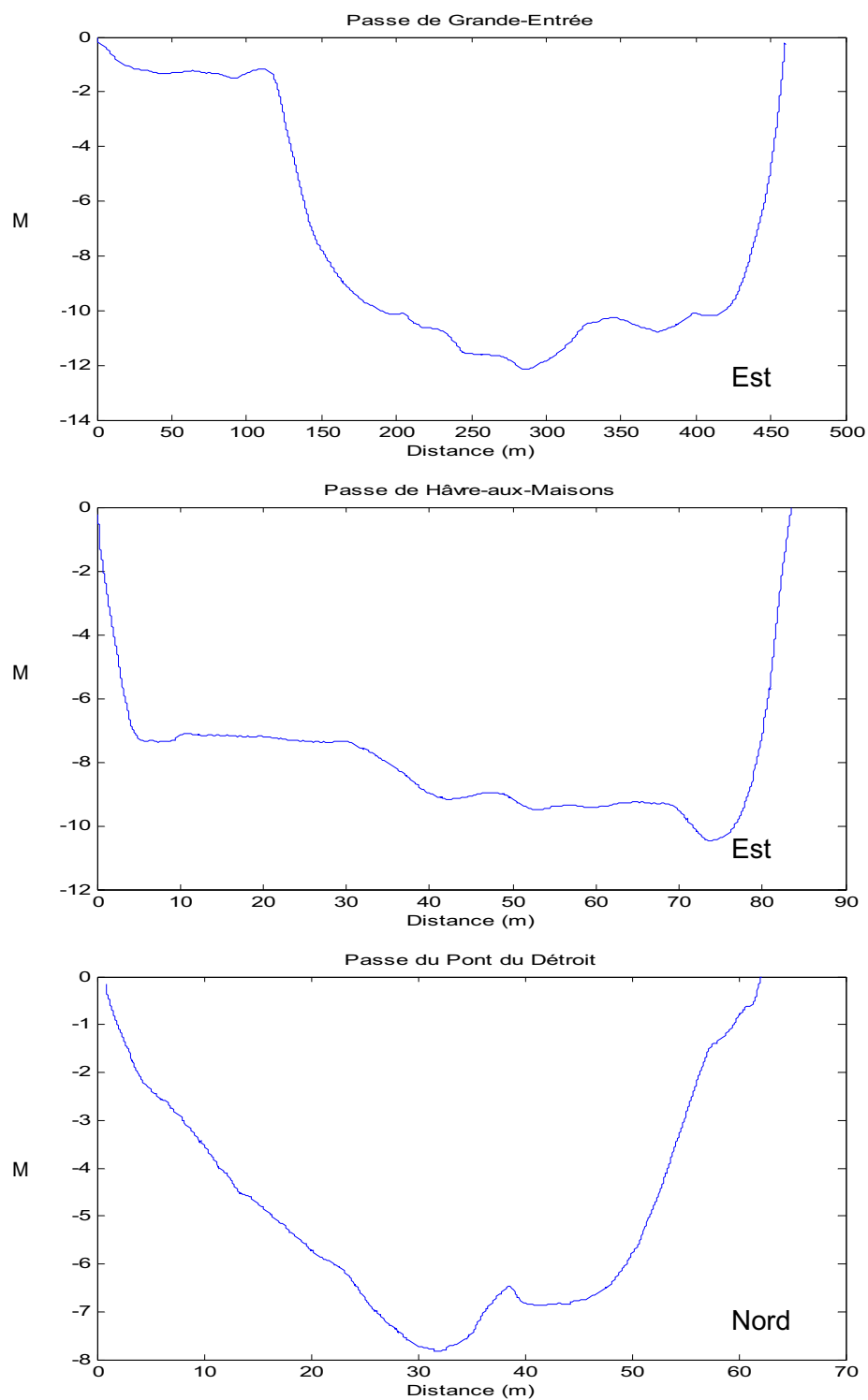


Figure 4 : Dimensions des passes de Grande-Entrée (haut), du Havre aux Maisons (centre) et du Pont du Déroit (bas). À noter que les passes ne sont pas présentées à la même échelle spatiale.

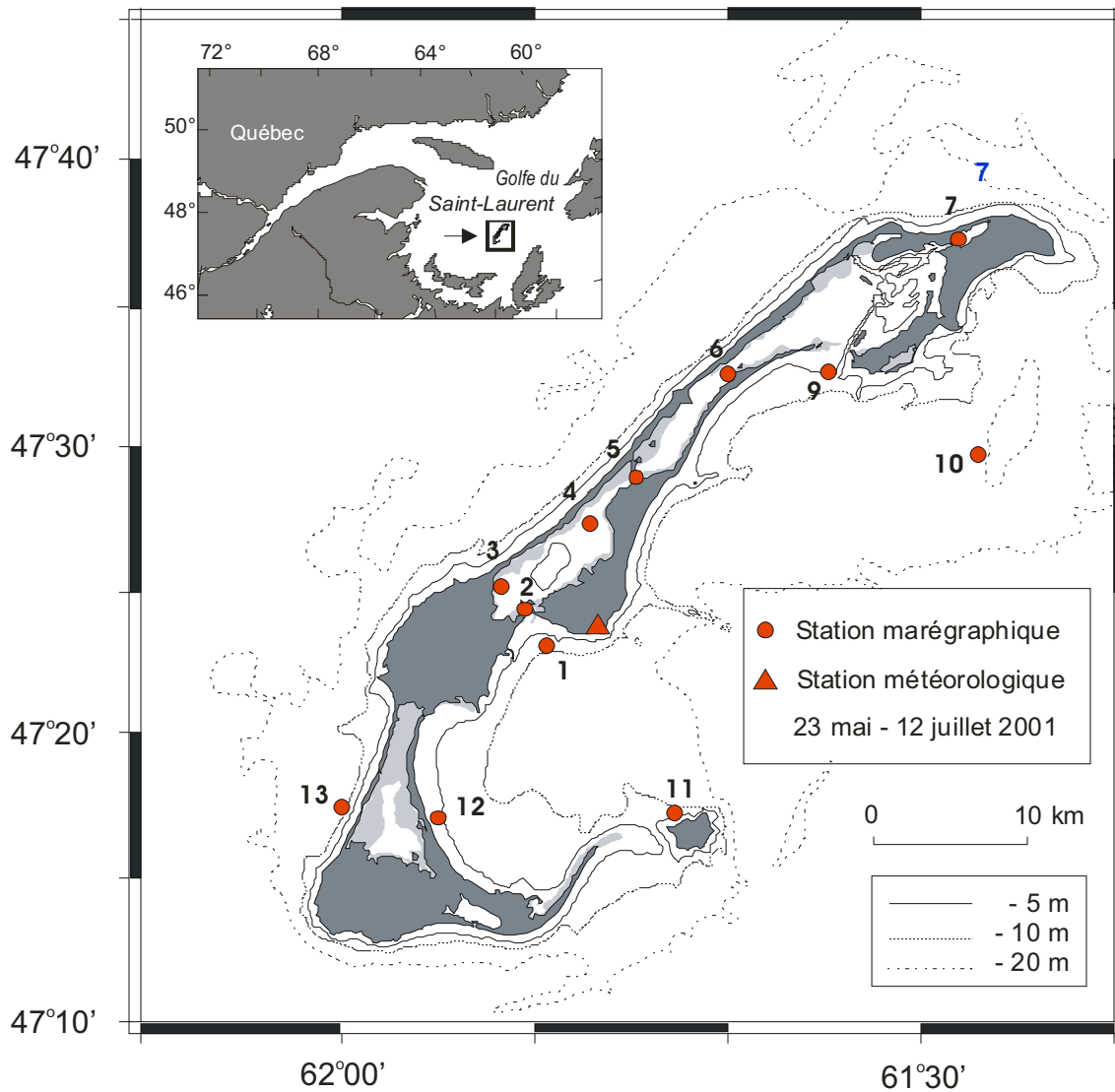


Figure 5 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 12 juillet 2001.

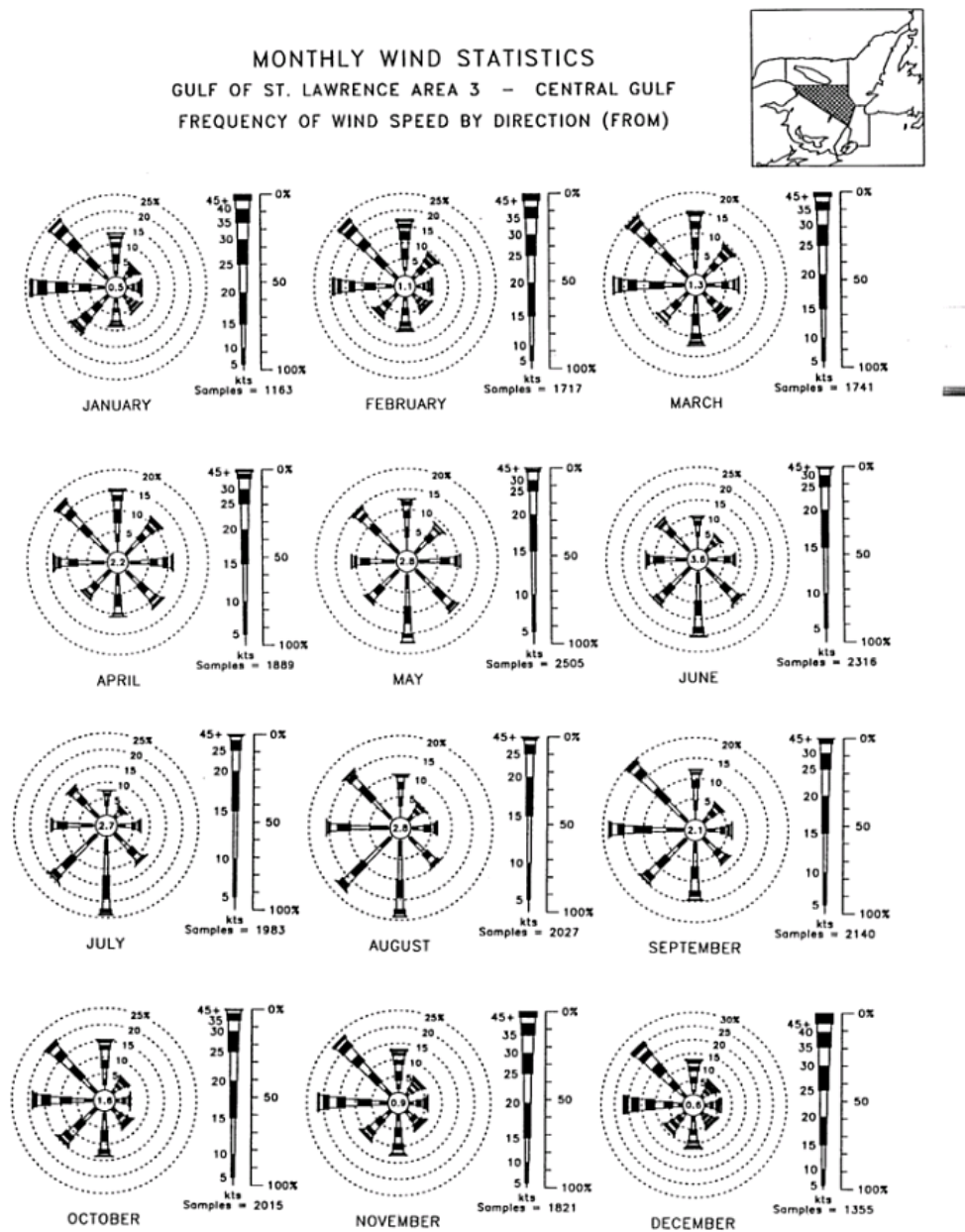


Figure 6 : Statistiques mensuelles des vents : fréquence d'occurrence (%) par classe de vitesse des vents en provenance de huit points cardinaux dans la région centrale du Golfe Saint-Laurent (McLaren Plansearch Ltd., 1991).

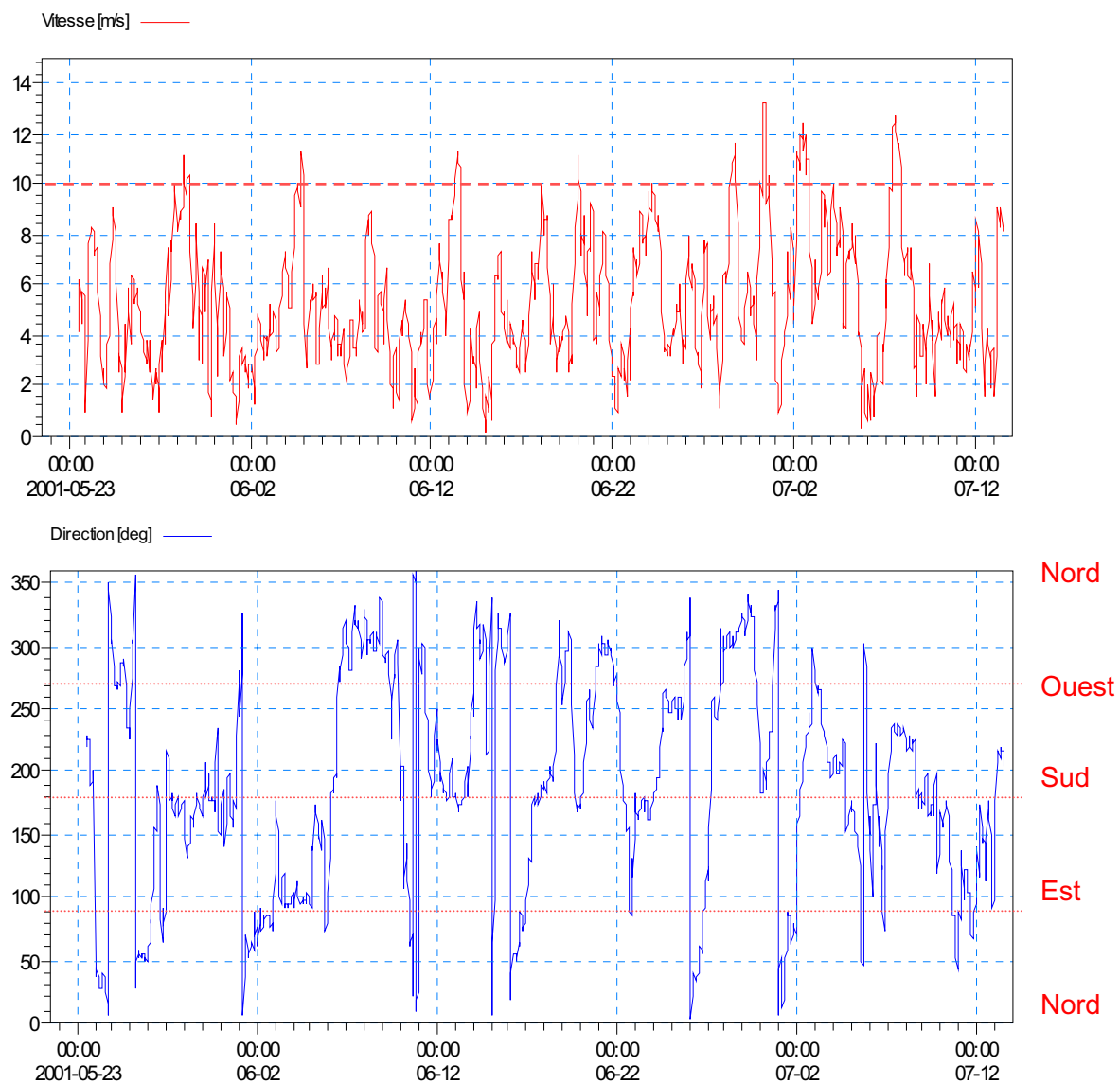


Figure 7 : Vitesses et directions des vents mesurées à la station M de mai à juillet 2001.

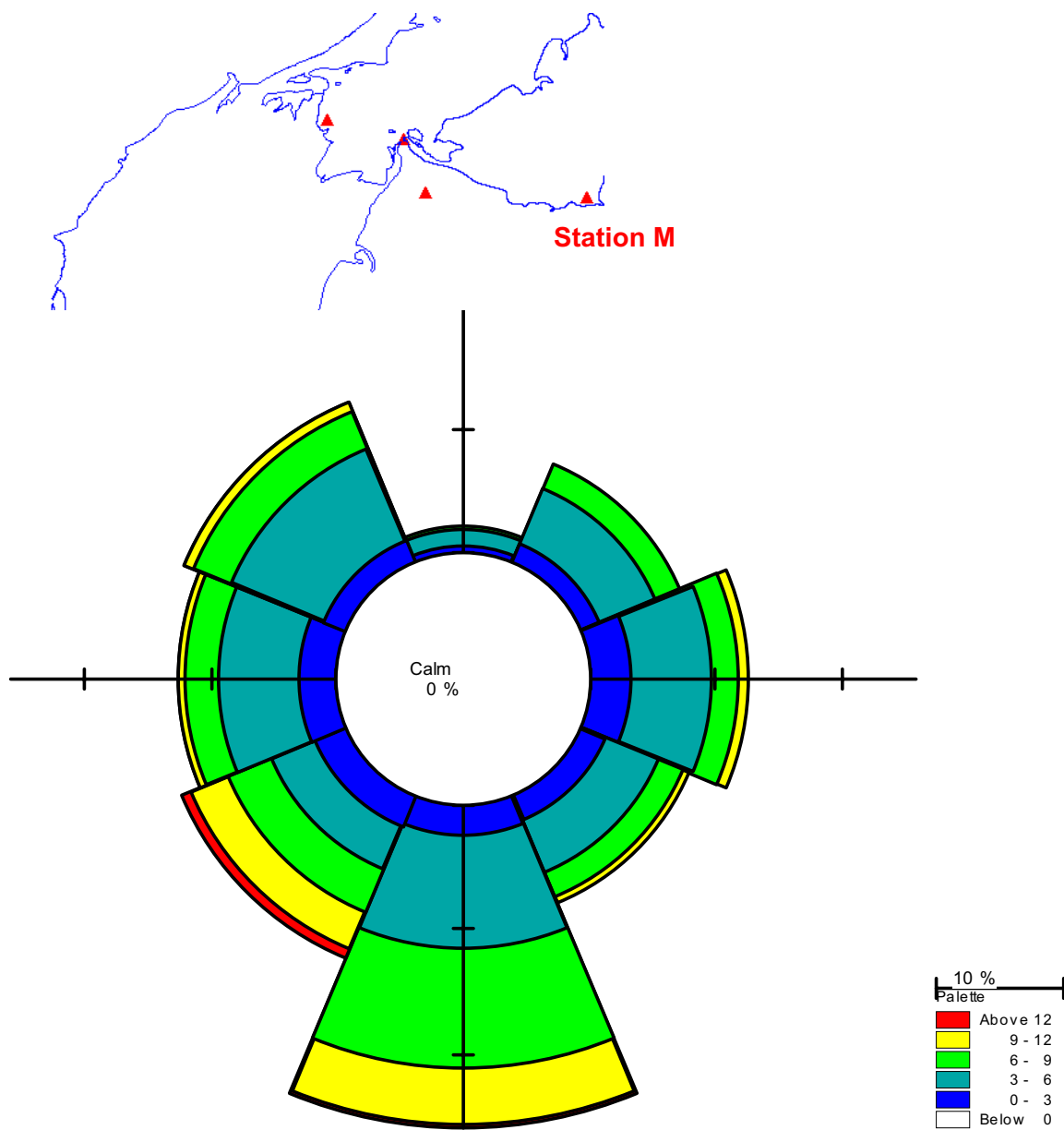


Figure 8 : Rose des vents mesurés à la station M de mai à juillet 2001.

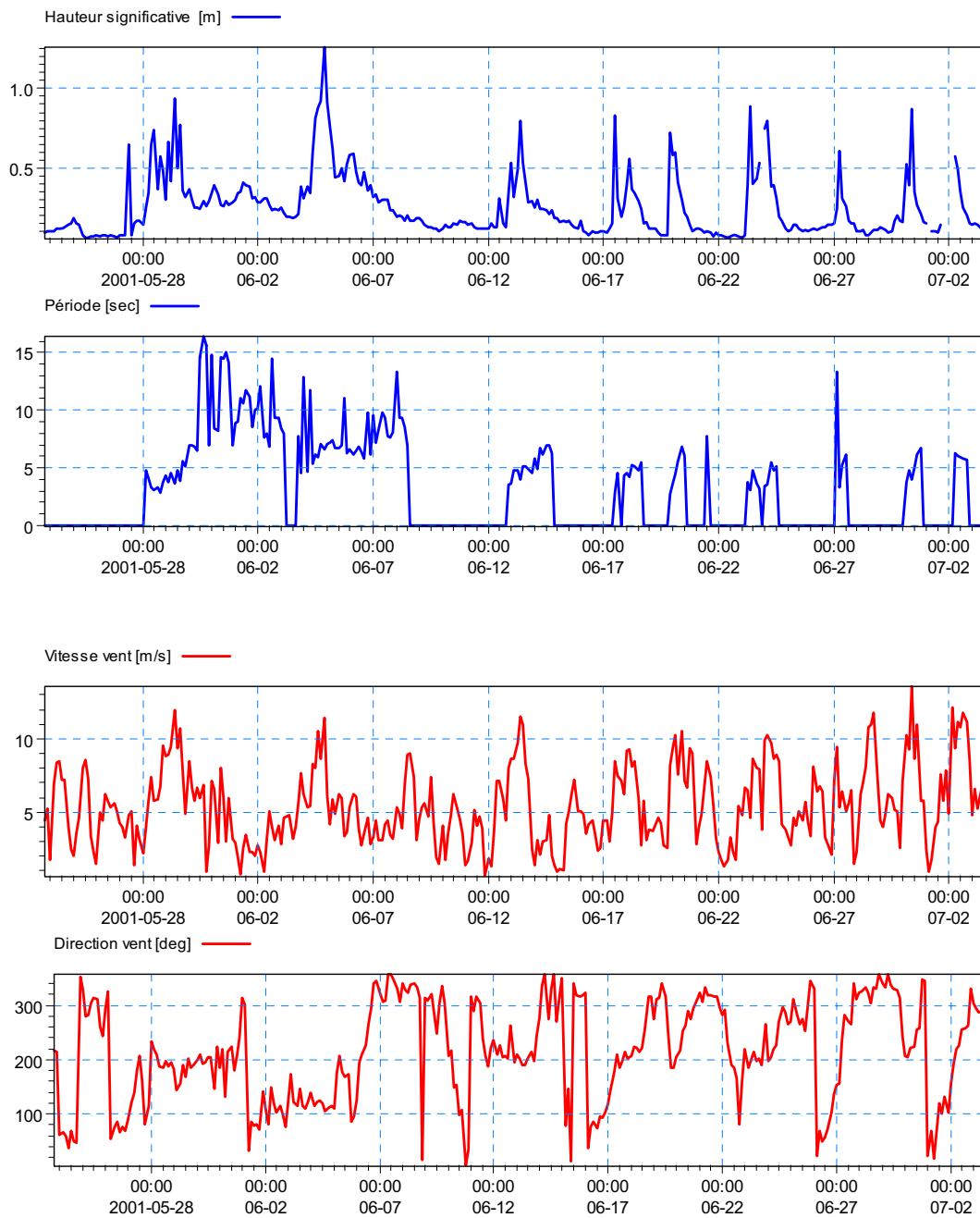


Figure 9 : Hauteurs significatives et périodes des vagues mesurées à la station 1 (bleu) et données de vent à la station M (rouge) de mai à juillet 2001.

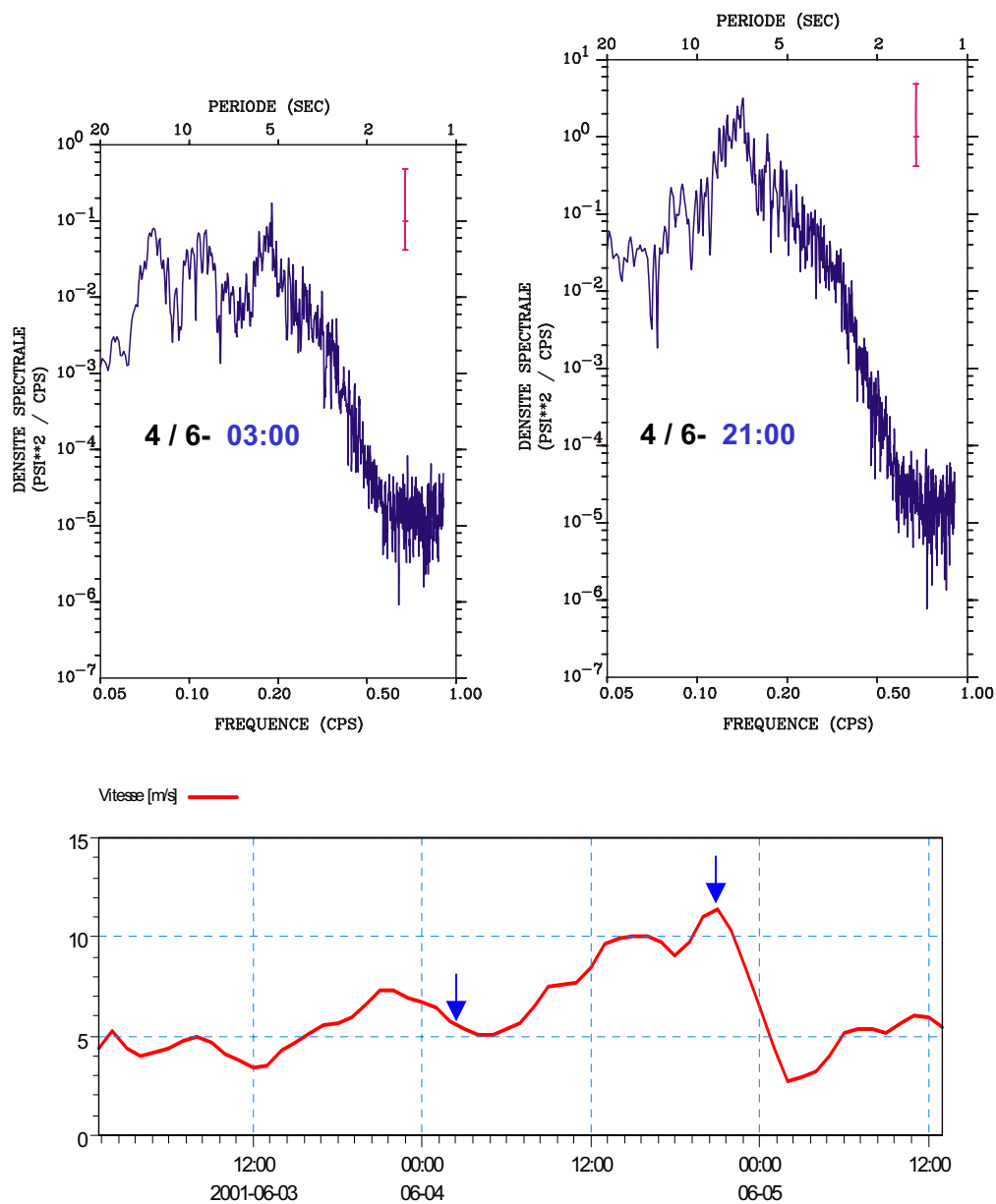


Figure 10 : Densité spectrale de la variance des vagues enregistrées à 03:00 et à 21:00 le 4 juin 2001 à la station 1 en fonction de la vitesse des vents d'Est.

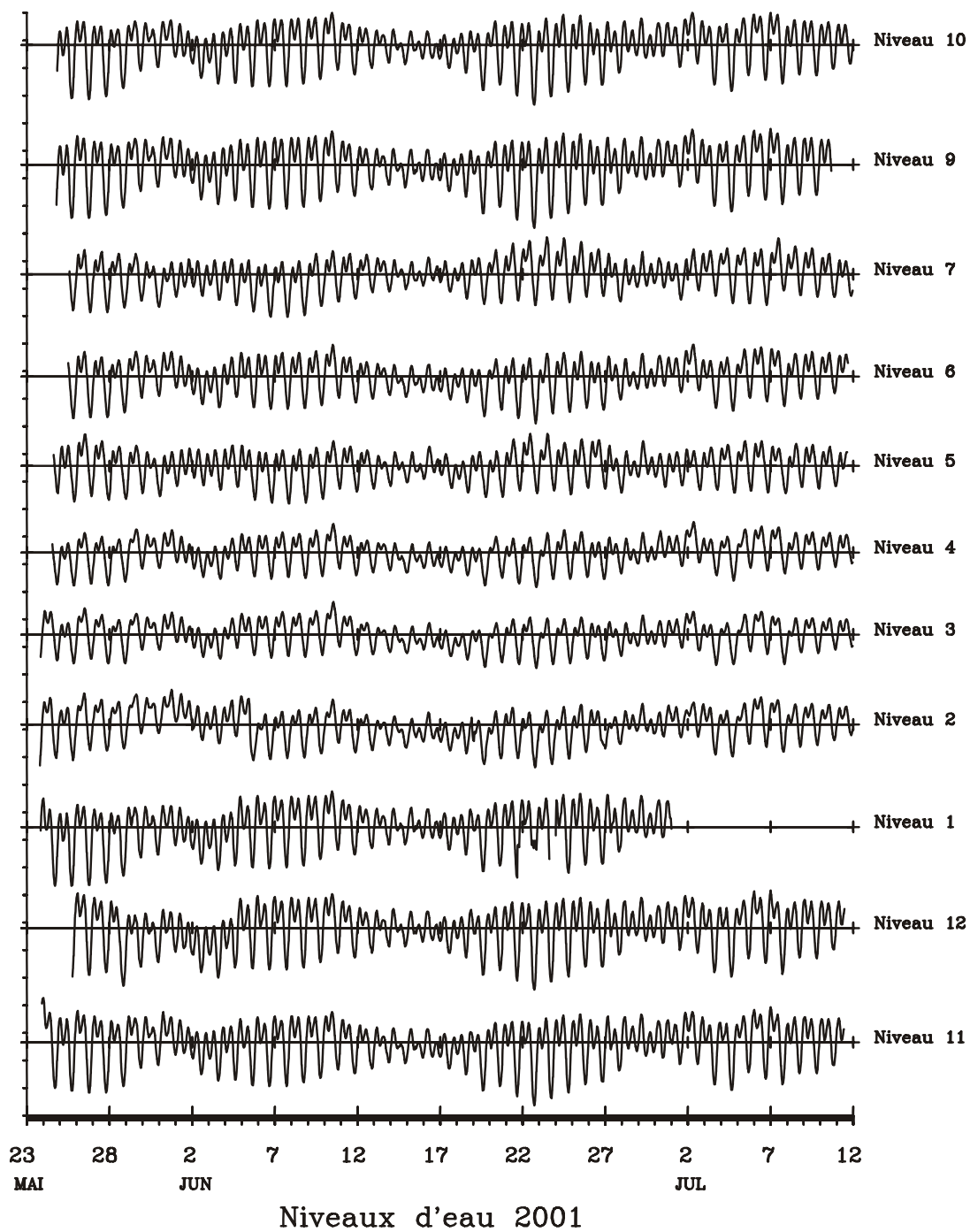


Figure 11 : Niveaux d'eau mesurés à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes du Havre aux Maisons et Grande-Entrée du 23 mai au 12 juillet 2001.

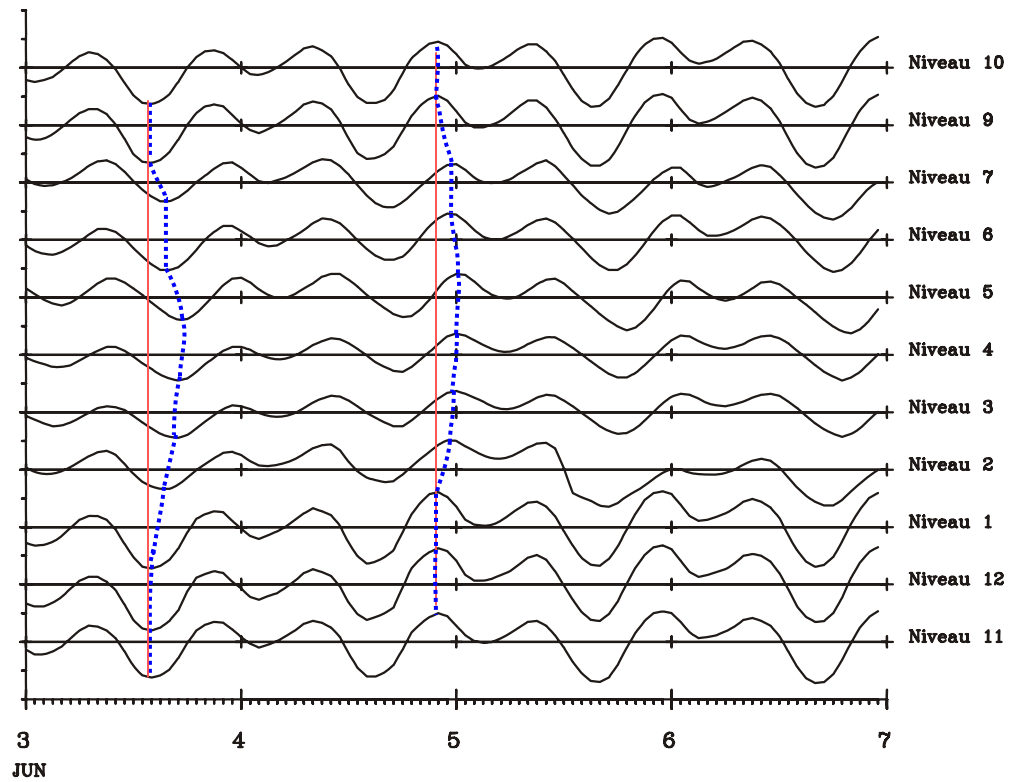
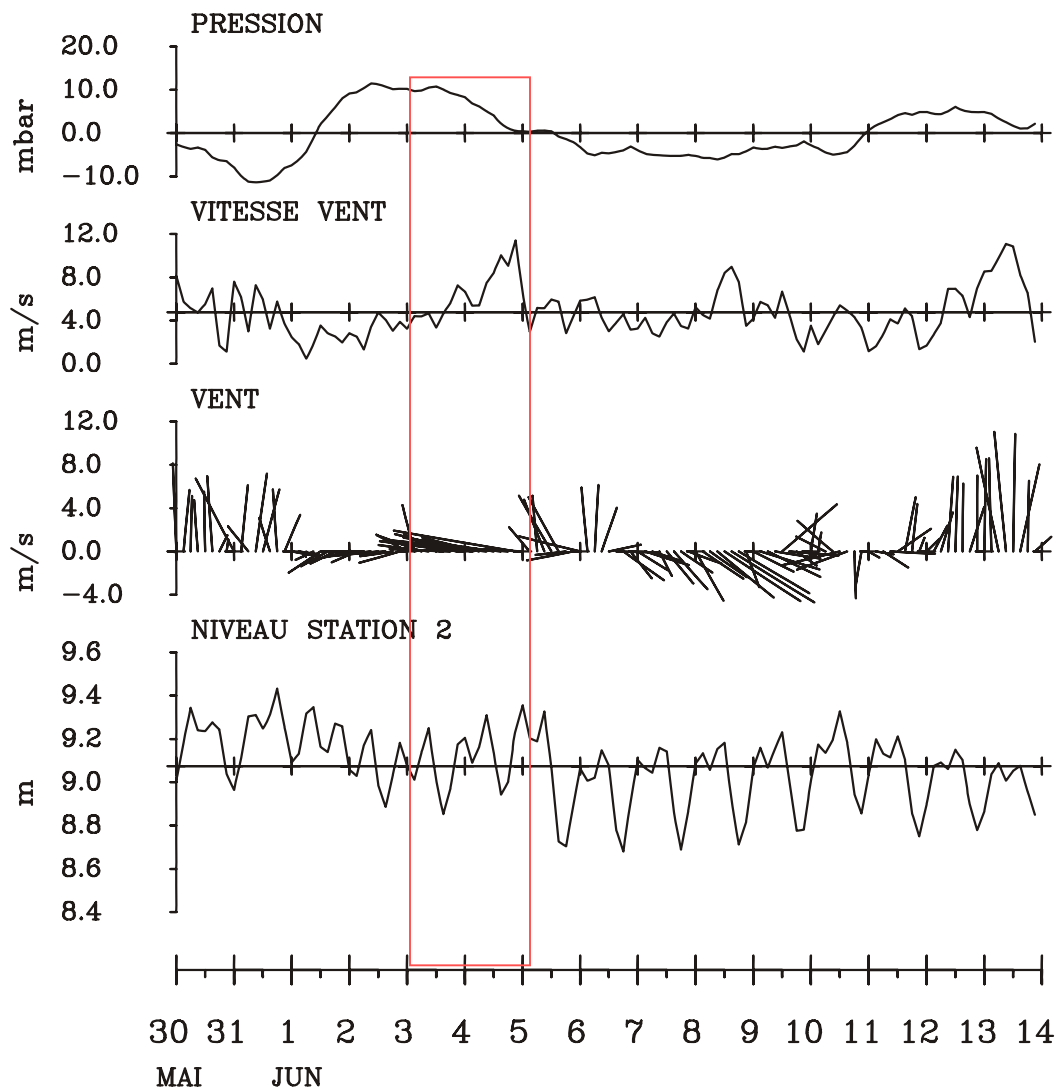


Figure 12: Variations des niveaux d'eau par rapport à la moyenne à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes du Havre aux Maisons et de Grande-Entrée du 3 au 6 juin 2001. L'intervalle en ordonnée est de 0.5 m. Les lignes verticales en pointillés sont des lignes d'égales phases et la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



Station Meteorologique ISMER

Figure 13 : Variations des niveaux d'eau sous le pont du Havre 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.

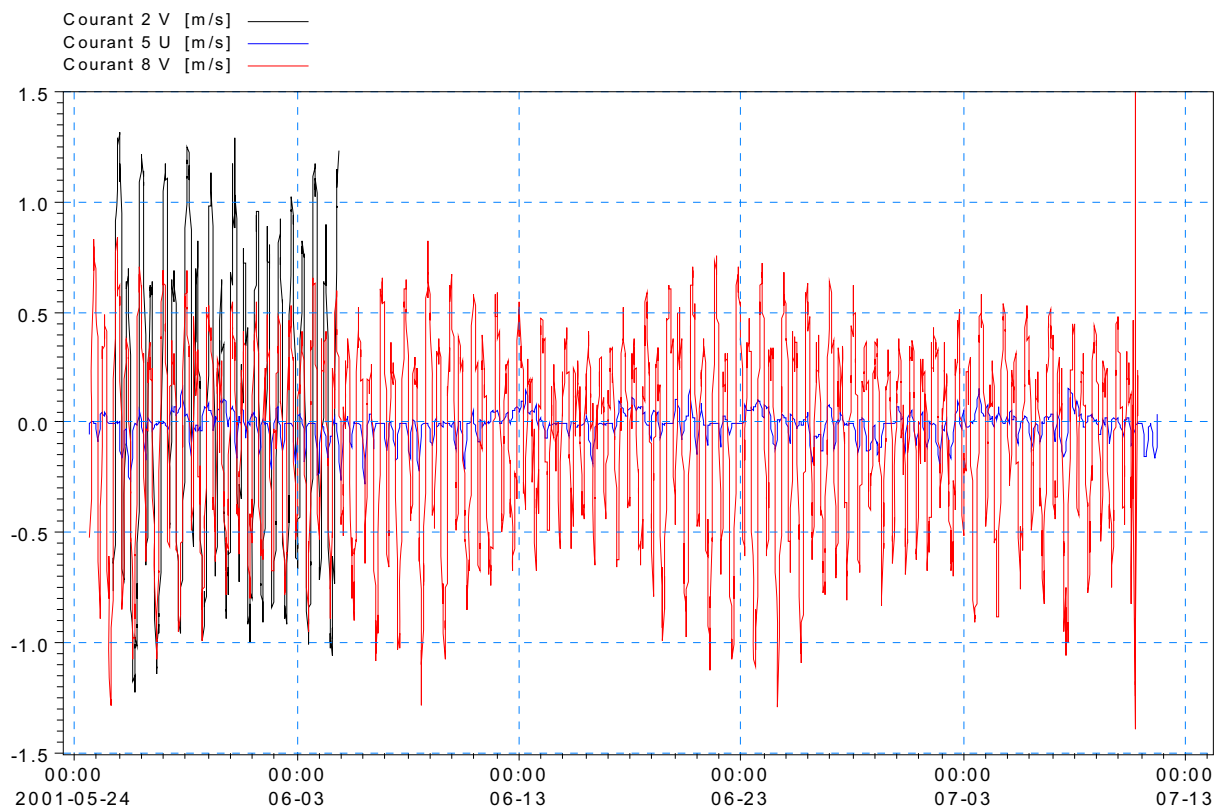


Figure 14 : Données de courants (m/s) à la passe du Havre aux Maisons (courant 2 V, positif vers le Nord), à la passe du Pont du Déroit (courant 5 U, positif vers l'Est) et à la passe de Grande-Entrée (courant 8 V, positif vers le Nord).

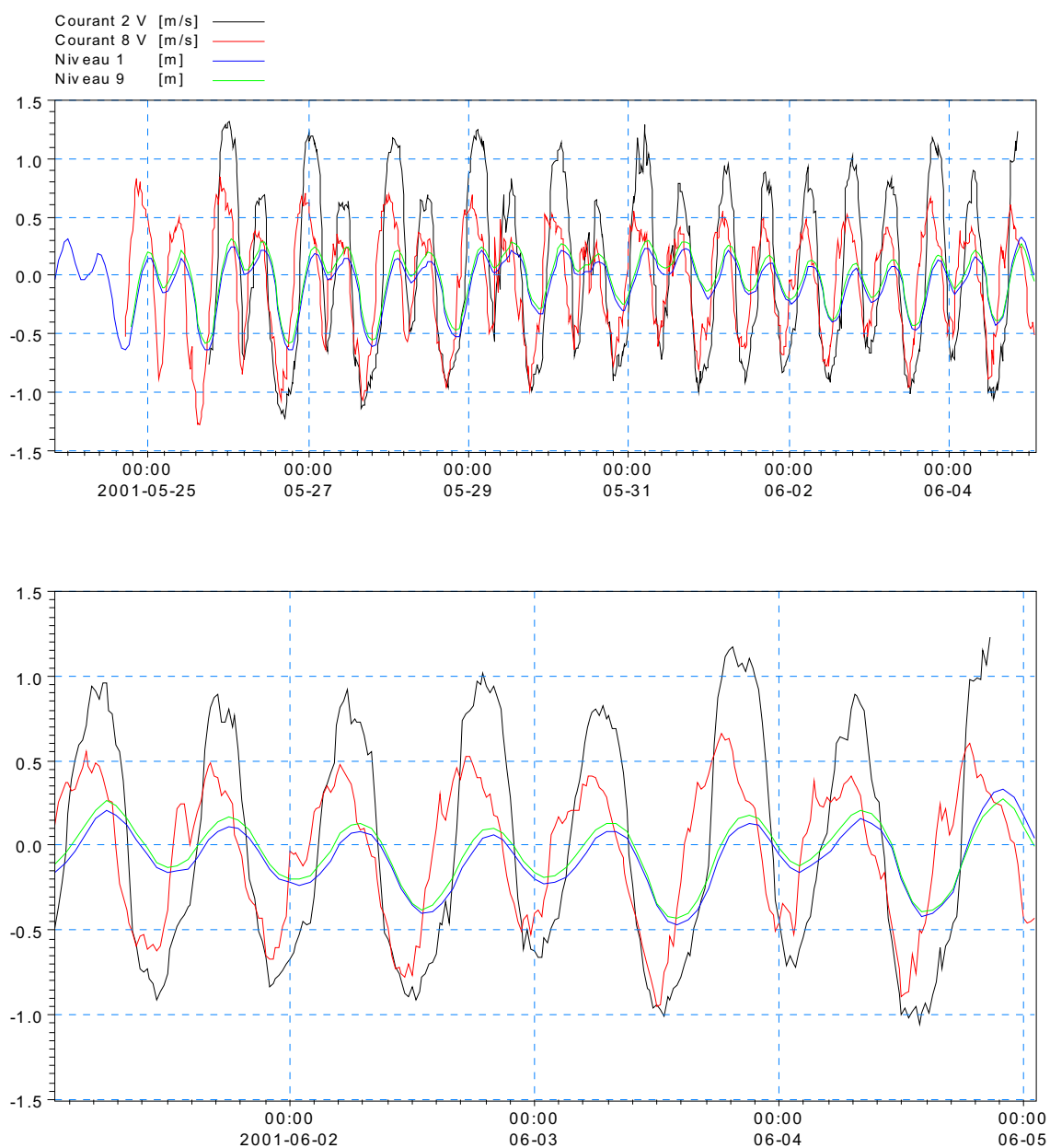


Figure 15 : Données de courants et niveaux d'eau à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons (courant 2 V et niveau 1) et à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée (courant 8 V et niveau 9).

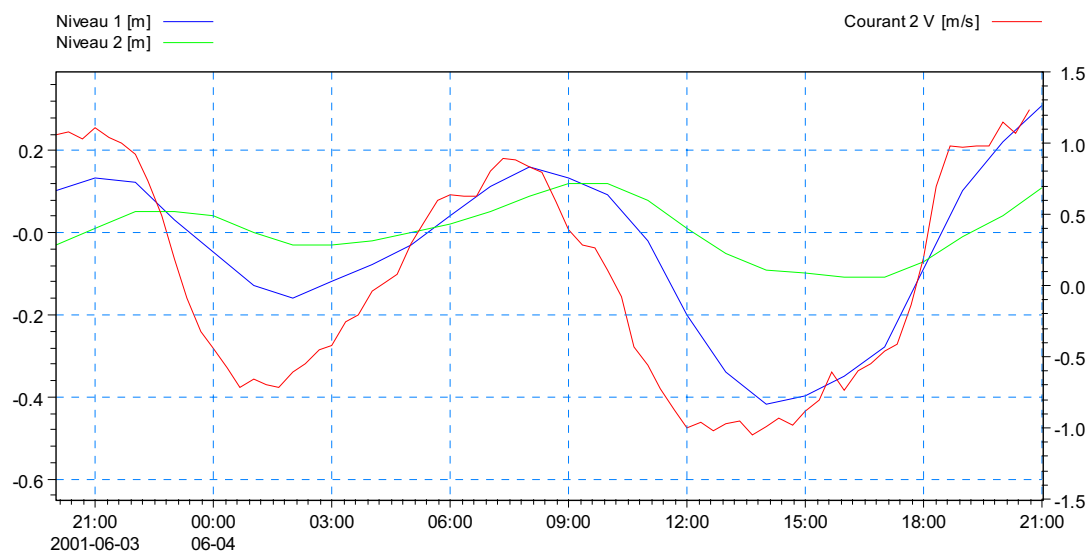


Figure 16 : Relation temporelle entre les niveaux d'eau à la station 1 à l'extérieur de la passe du Havre aux Maisons et les niveaux et courants sous le pont à la station 2 durant un cycle de marée diurne.

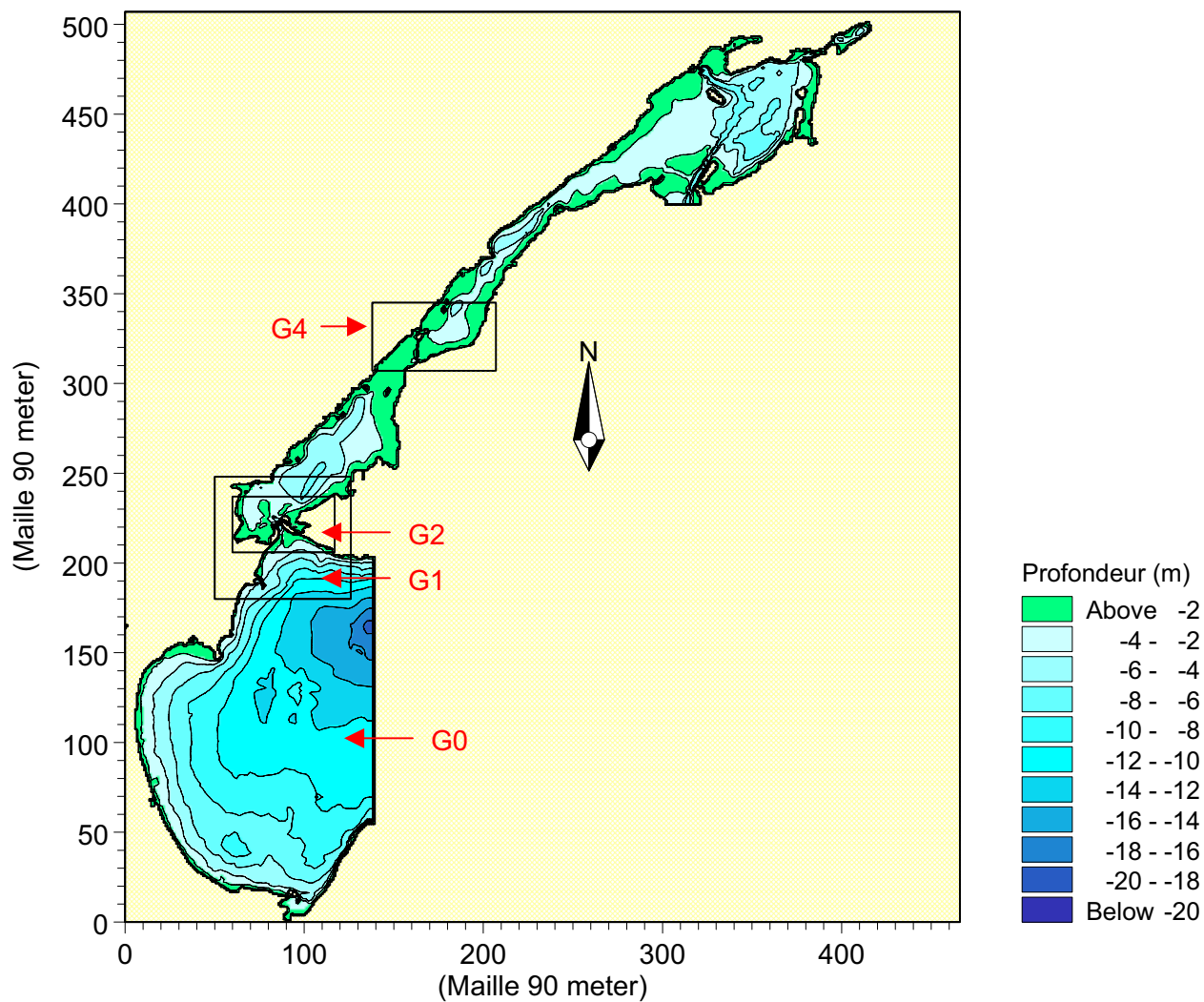


Figure 17: Grilles de calcul G0 (mailles de 90m), G1 (mailles de 30m), G4 (mailles de 30m) et G2 (mailles de 10m) utilisées pour les simulations des courants et niveaux sous l'influence des marées et des vents dans les lagunes et à la passe d'entrée de la lagune du Havre aux Maisons..

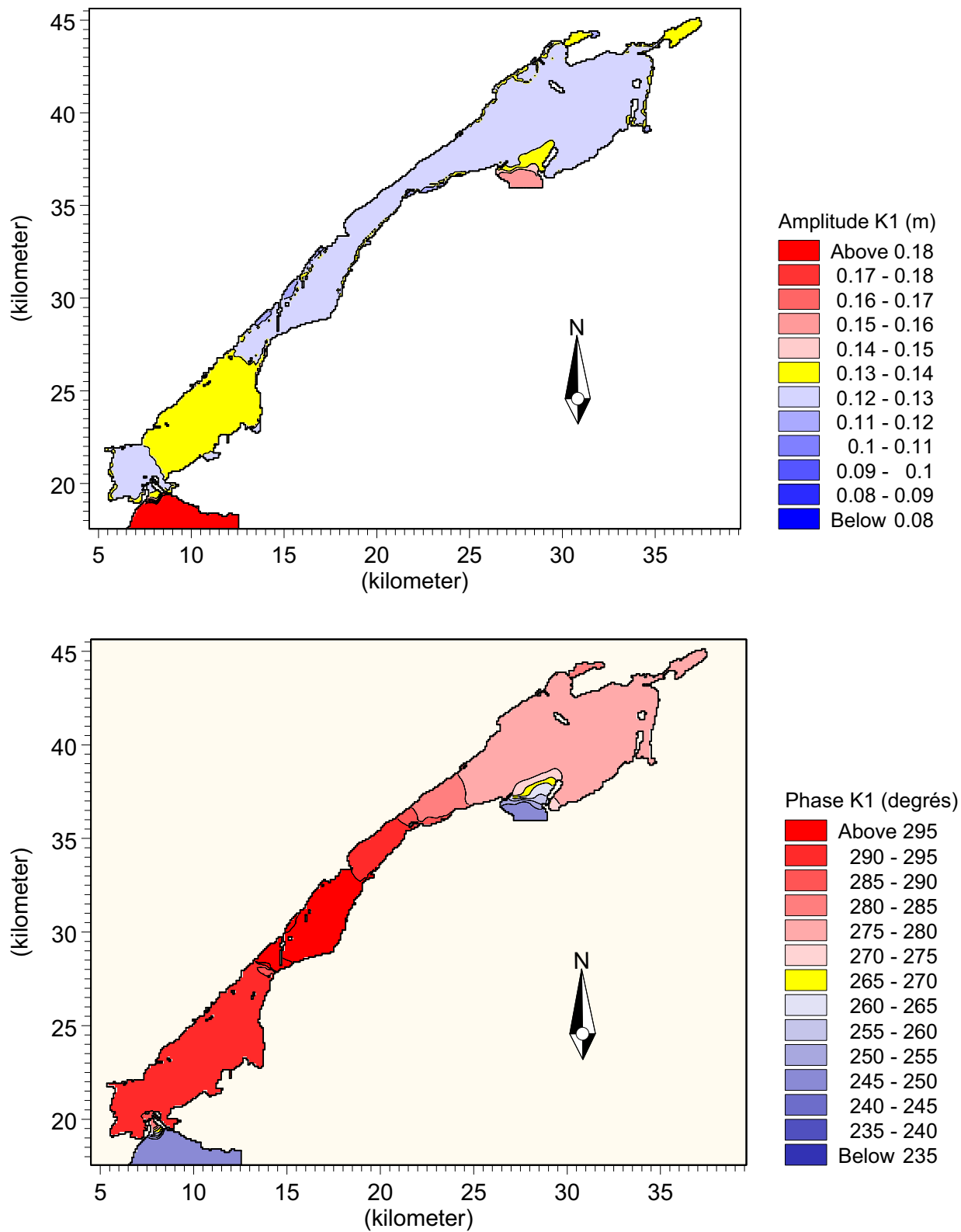


Figure 18 : Amplitudes et phases de l'onde de marée diurne K1 dans les lagunes du Havre aux Maisons et Grande Entrée aux Îles de la Madeleine.

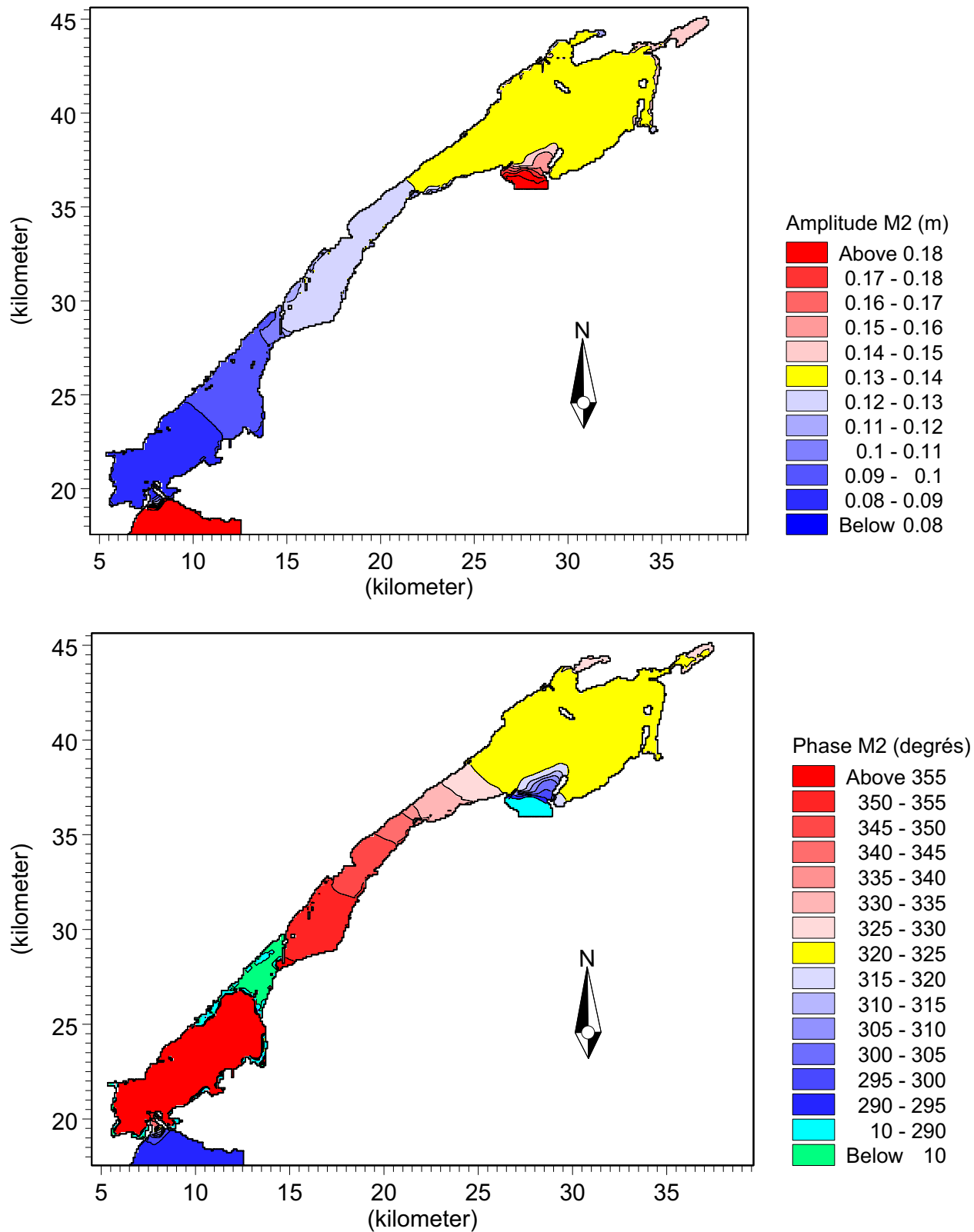


Figure 19: Amplitudes et phases de l'onde de marée diurne M2 dans les lagunes du Havre aux Maisons et Grande Entrée aux Îles de la Madeleine.

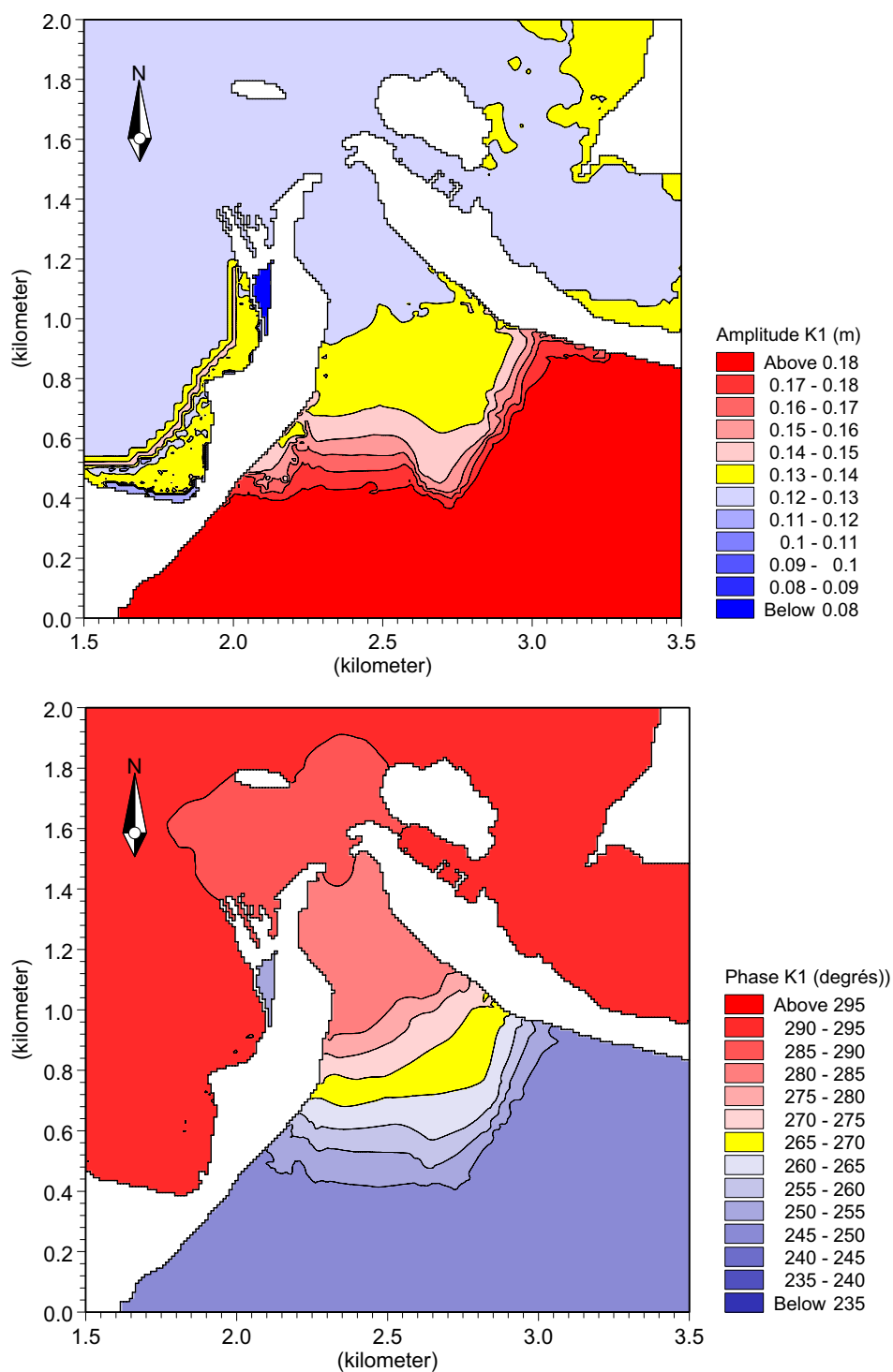


Figure 20 : Amplitude (haut) et phase (bas) de la composante harmonique K1 de la marée à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

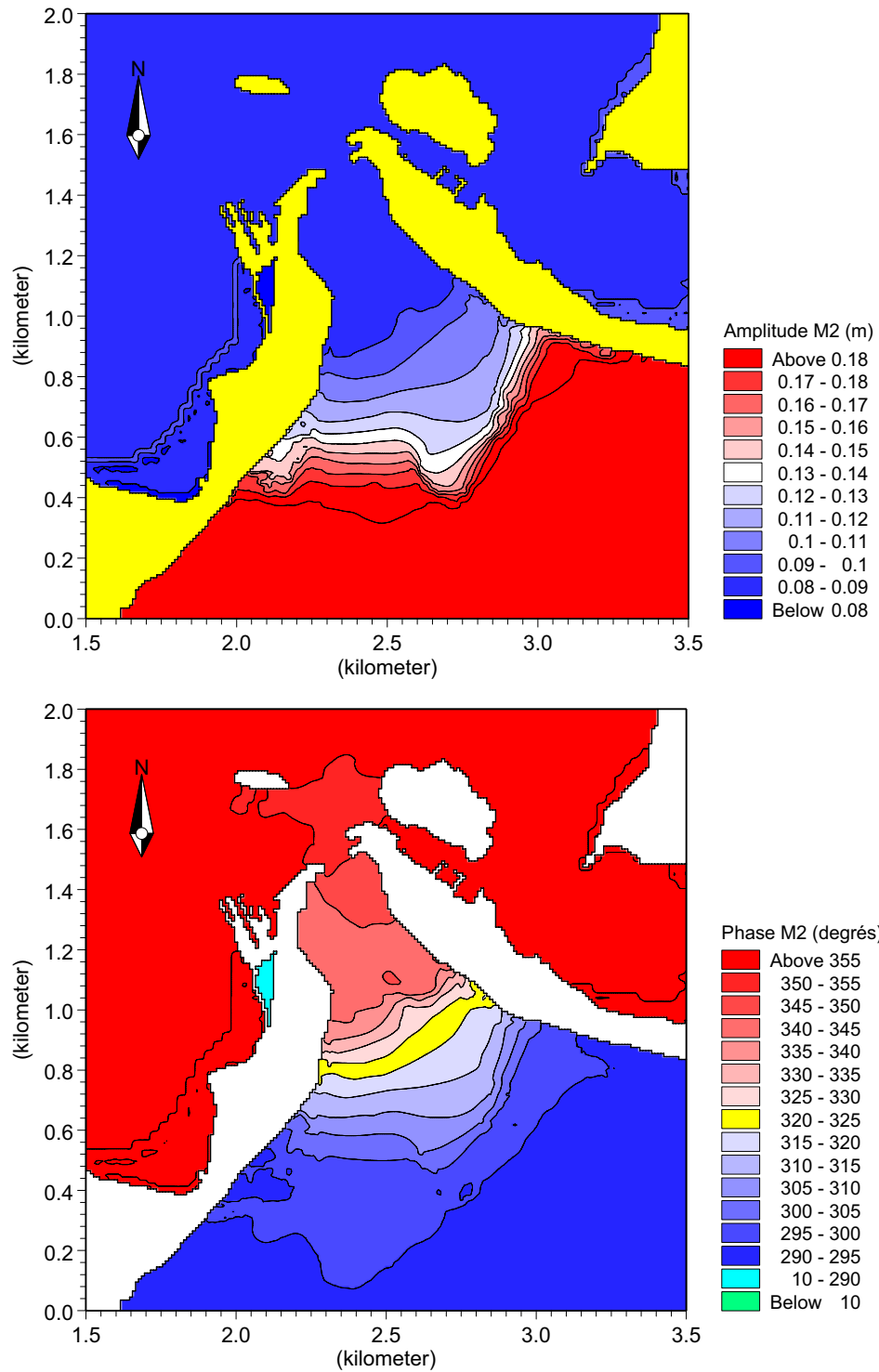


Figure 21 : Amplitude (haut) et phase (bas) de la composante harmonique M2 de la marée à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons.

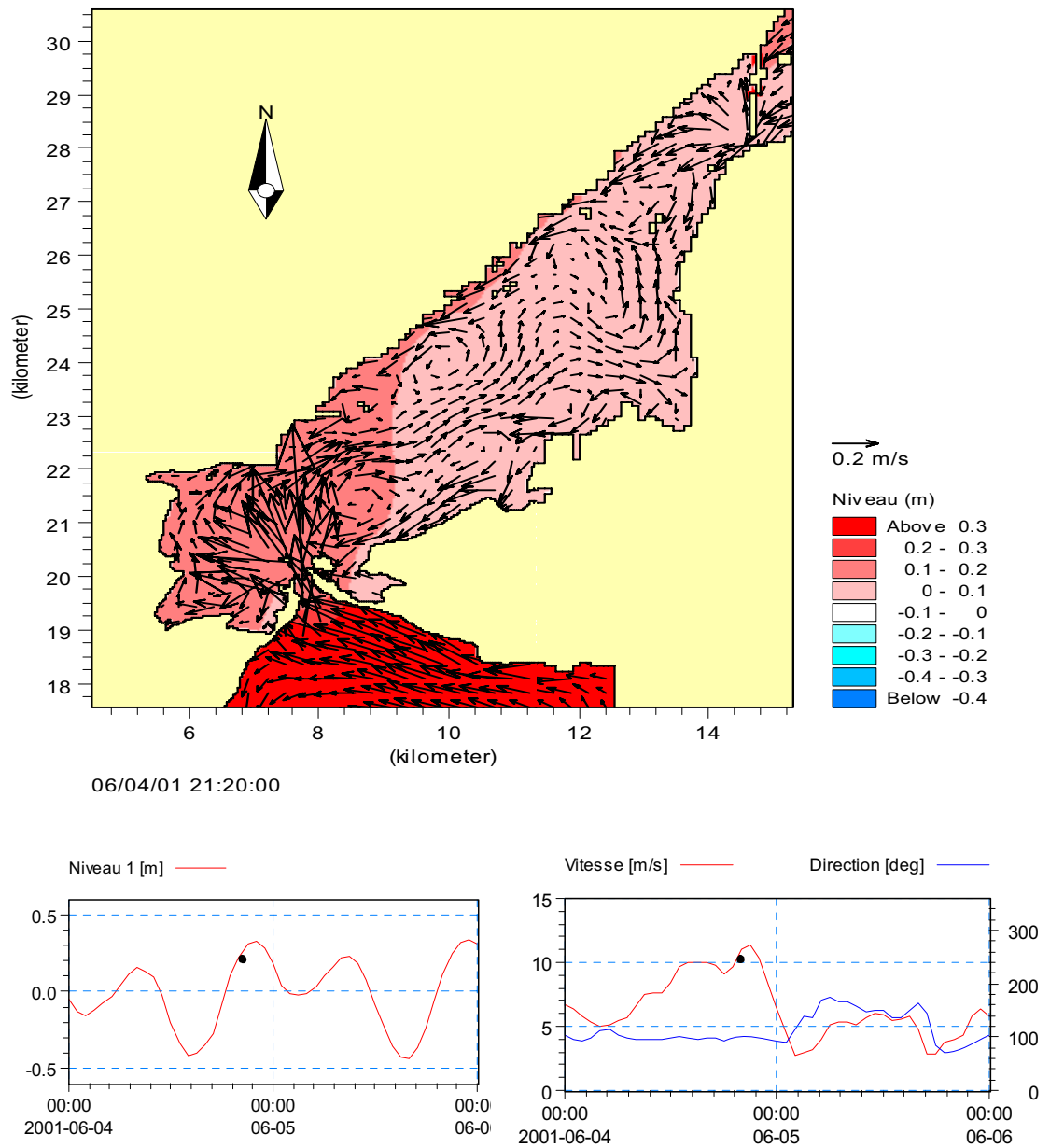


Figure 22 : Maximum du flot à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents de l'Est à 21:20 le 4 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.

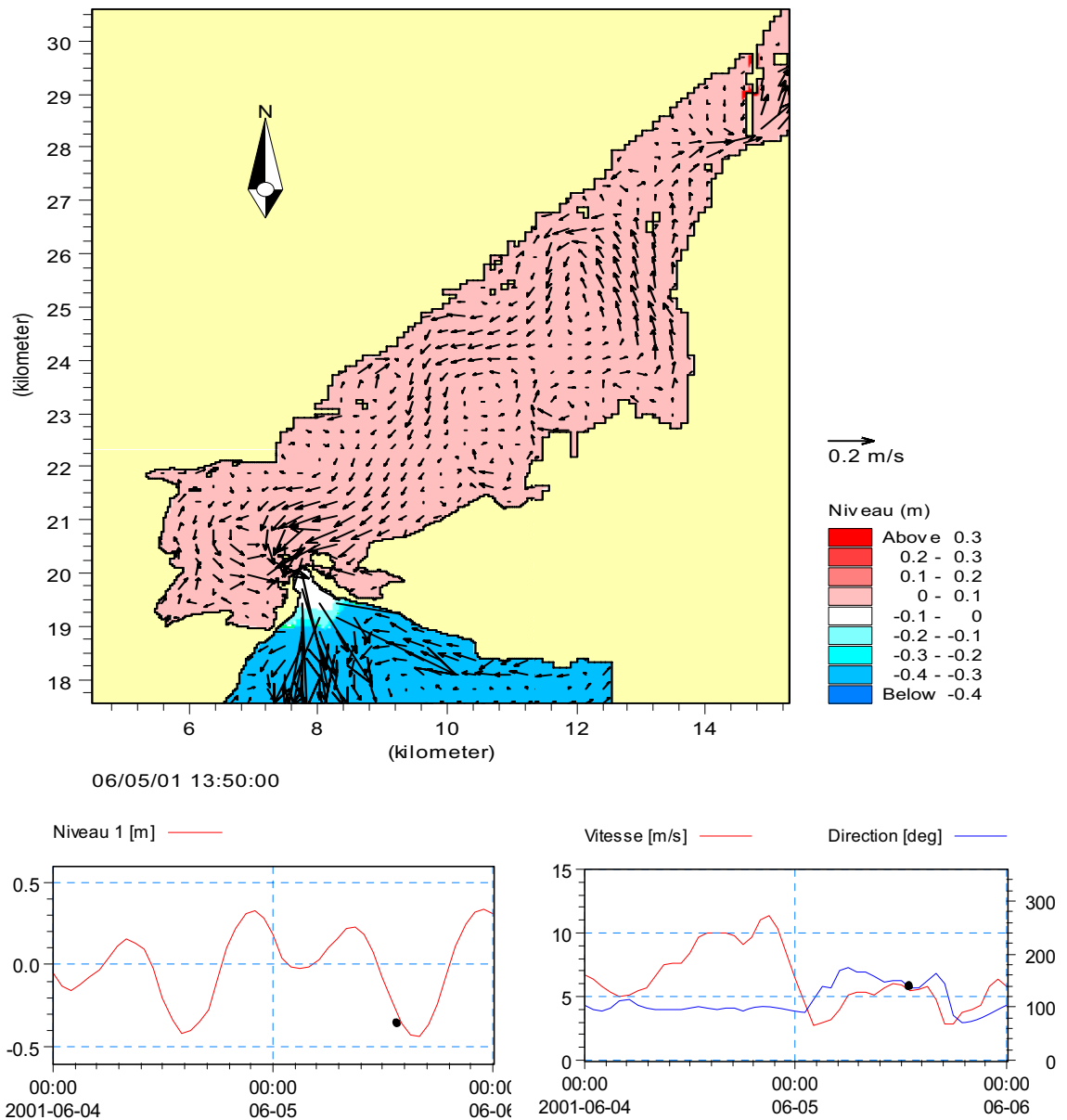


Figure 23: Maximum du jusant à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents de l'Est à 13:50 le 5 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents..

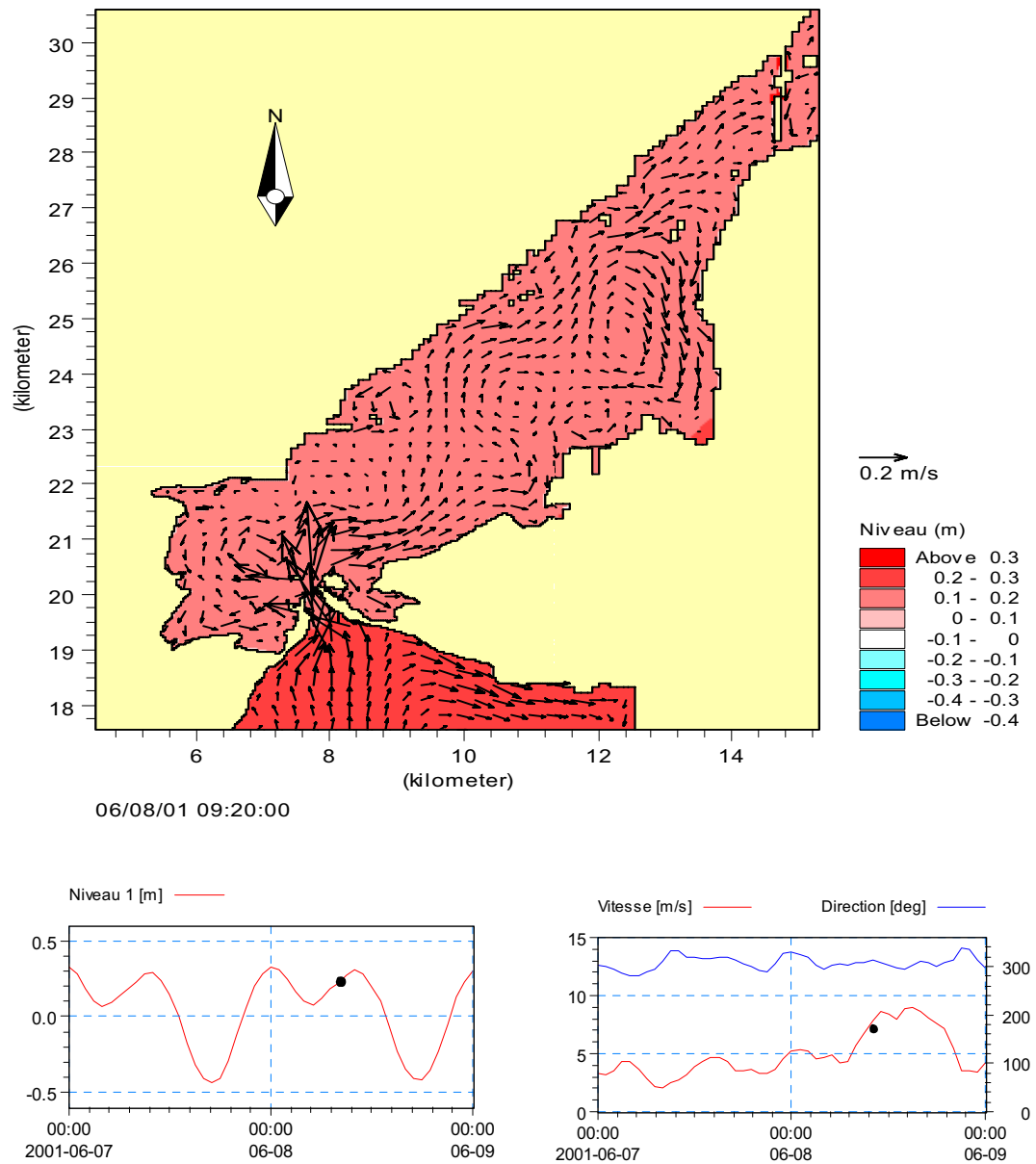


Figure 24: Maximum du flot à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents du Nord-Ouest à 09:20 le 8 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.

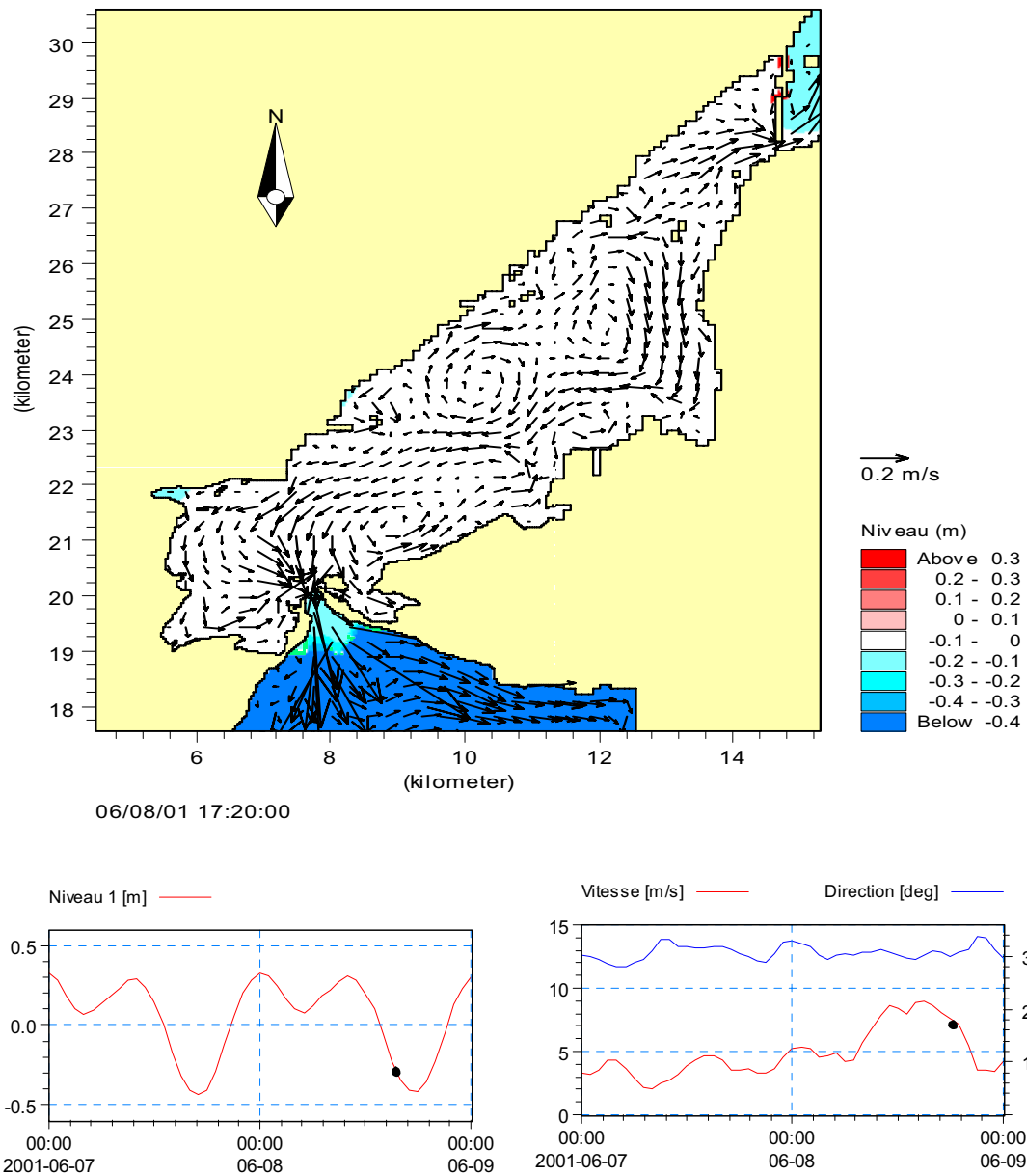


Figure 25: Maximum du jusant à la passe d'entrée et niveaux d'eau simulés par vents du Nord-Ouest à 17:20 le 8 juin 2001, avec la référence temporelle (point noir) sur les niveaux mesurés à la station 1 et les vitesses et directions des vents.

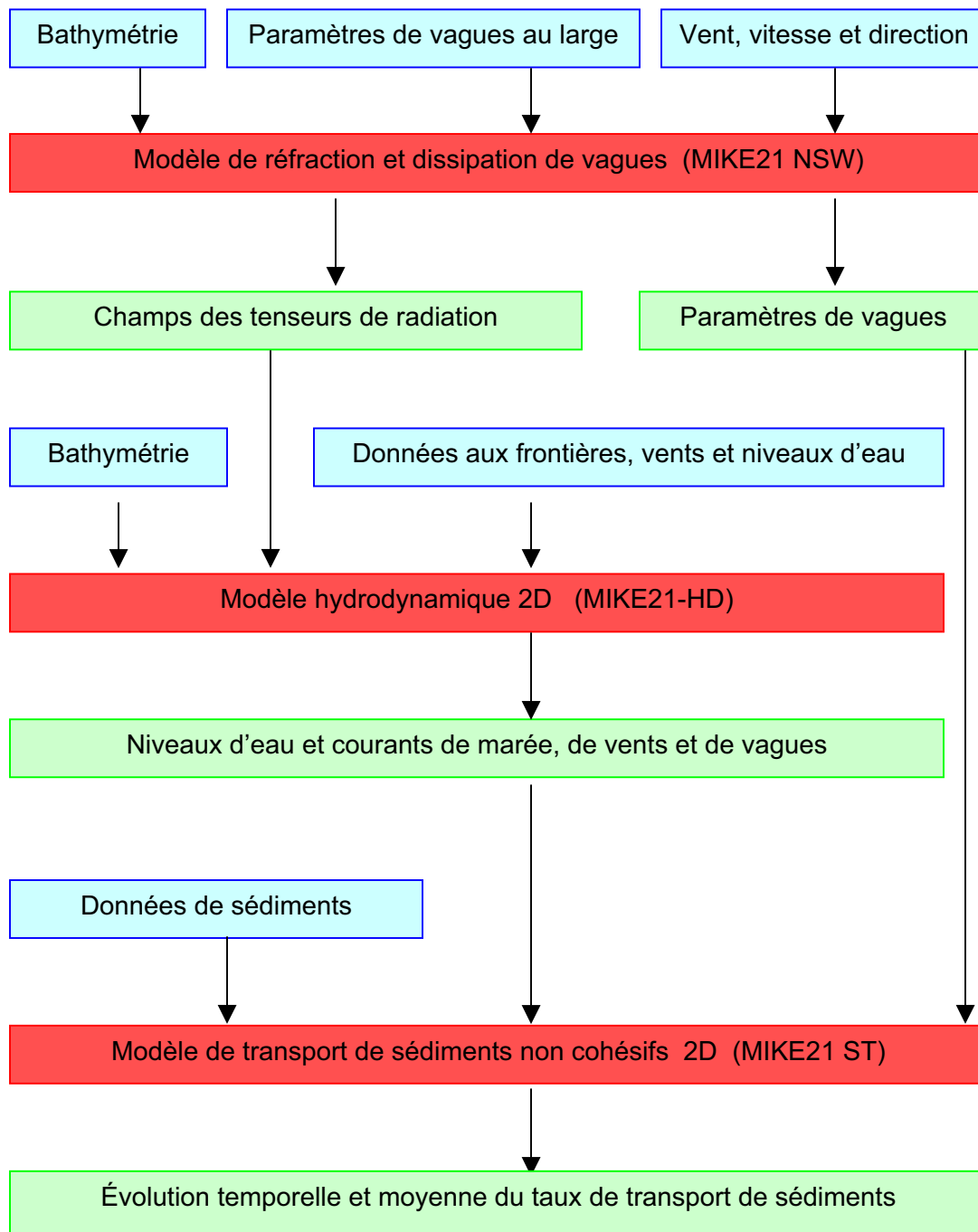
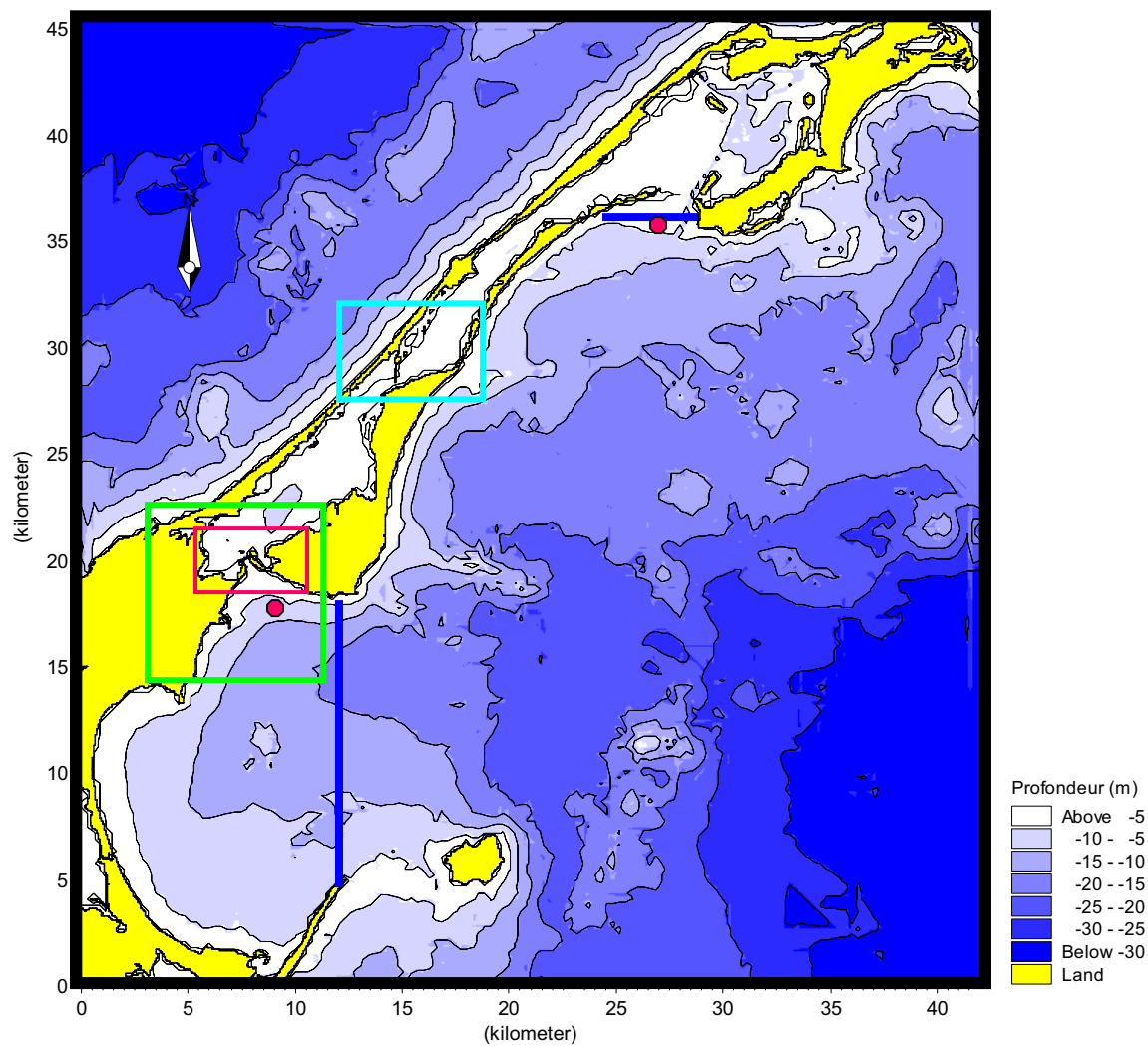


Figure 26 : Approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiments non cohésifs.



Vagues

G0w ————

G1w ————

G2m10 ————

Hydrodynamique

G0m90 ————

G1m30 ————

G2m10 ————

G4m30 ————

Transport de sédiments

G2m10 ————

Figure 27 : Grilles utilisées pour les simulations de la réfraction des vagues (G0w, G1w, G2w), des courants sous l'influence des marées, des vents et des vagues (G0-90m, G1-30m, G4-30m, G2-10m) et du transport de sédiments non-cohésif (G2-10m), avec les positions des stations 1 et 9 (points rouges).

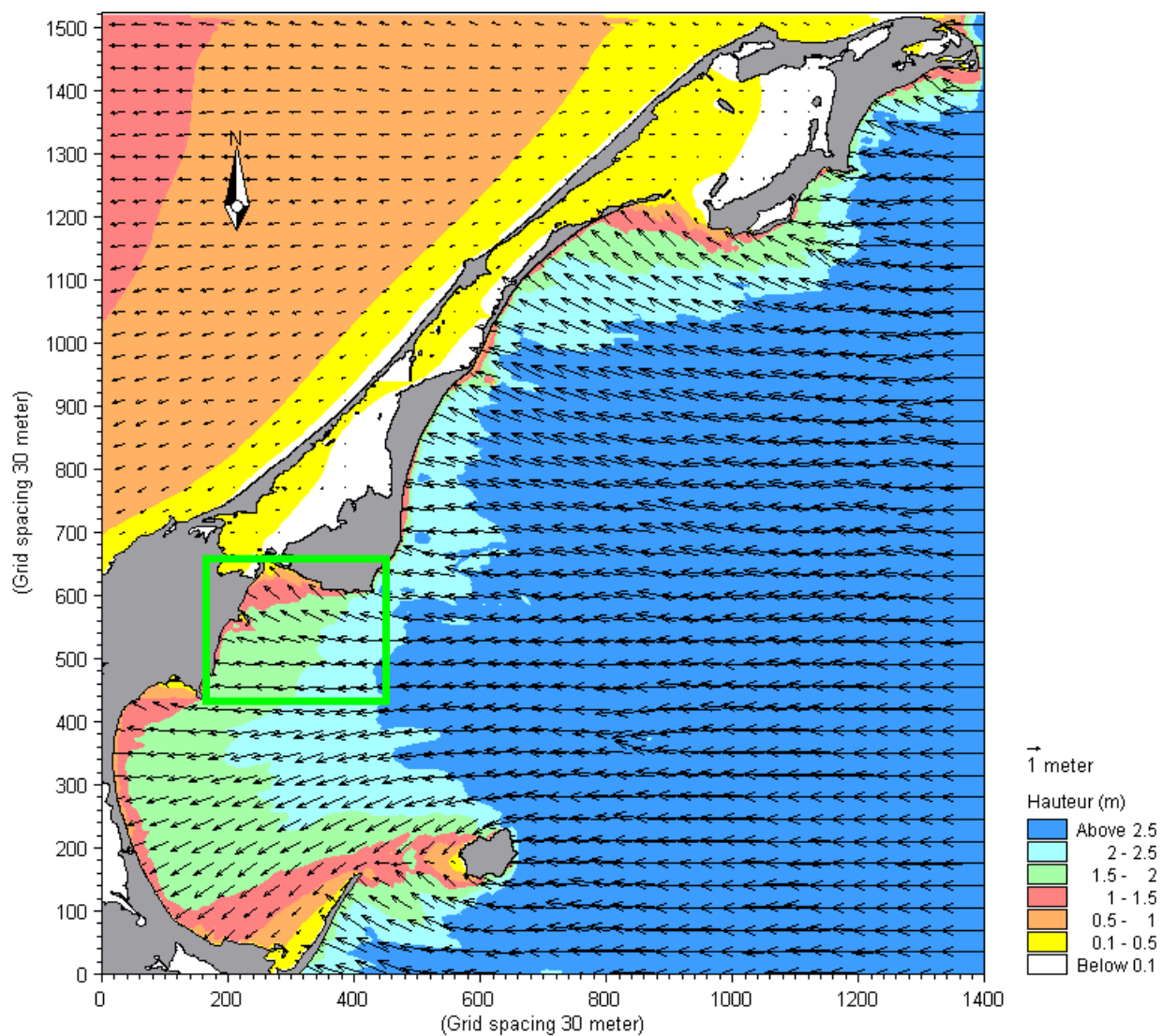


Figure 28 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives, pour des vagues de 2.5 m de hauteur en provenance de l'Est, de la frontière vers la zone d'étude, par vents d'Est de 11 m/s. Les résultats de cette simulation seront imposés à la frontière de la grille de calcul G1w (rectangle vert).

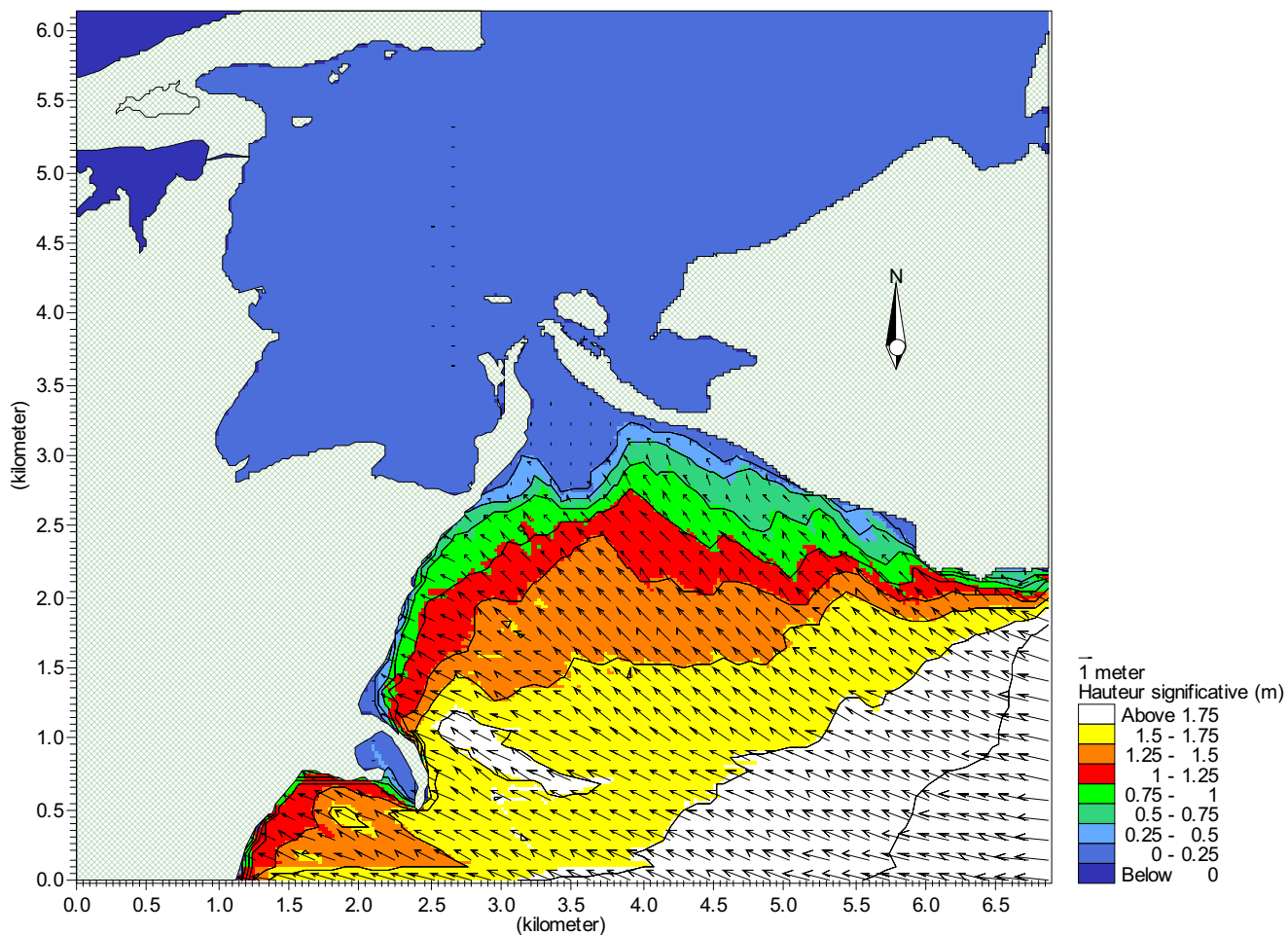


Figure 29 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives des vagues en obtenues de G0w et imposées à la frontière Est par vents d'Est de 11 m/s. Les résultats ci haut seront interpolés vers la grille plus fine G2m10.

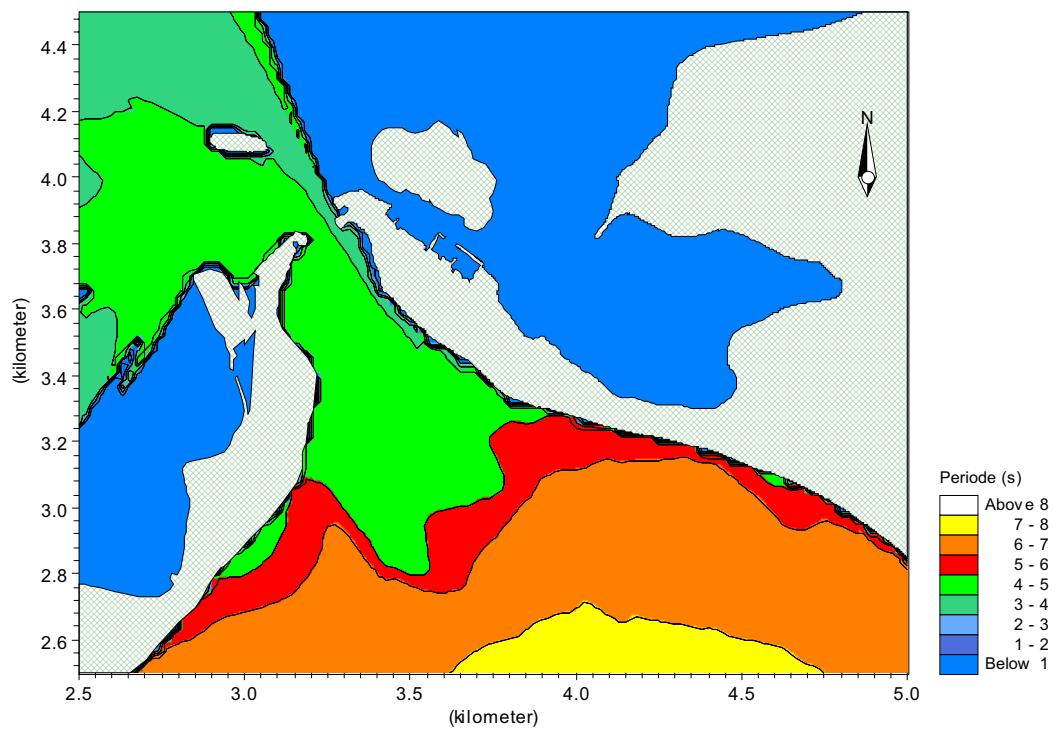
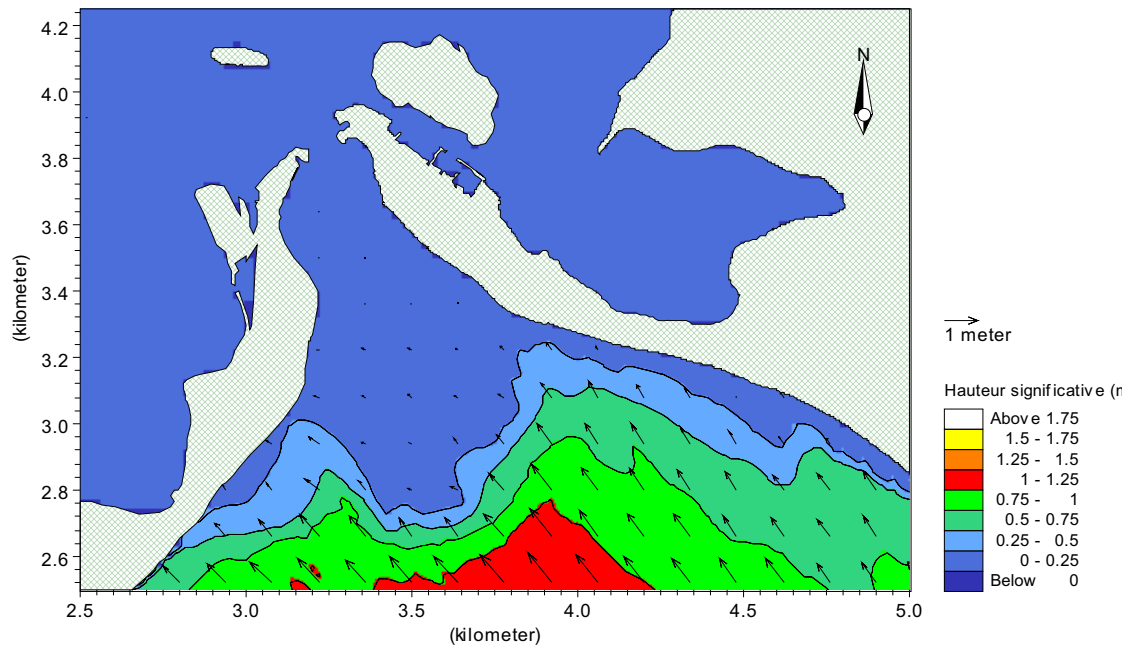


Figure 30 : Hauteurs significatives et des périodes détaillées dans la zone d'étude calculées sur la grille G1w par le modèle NSW.

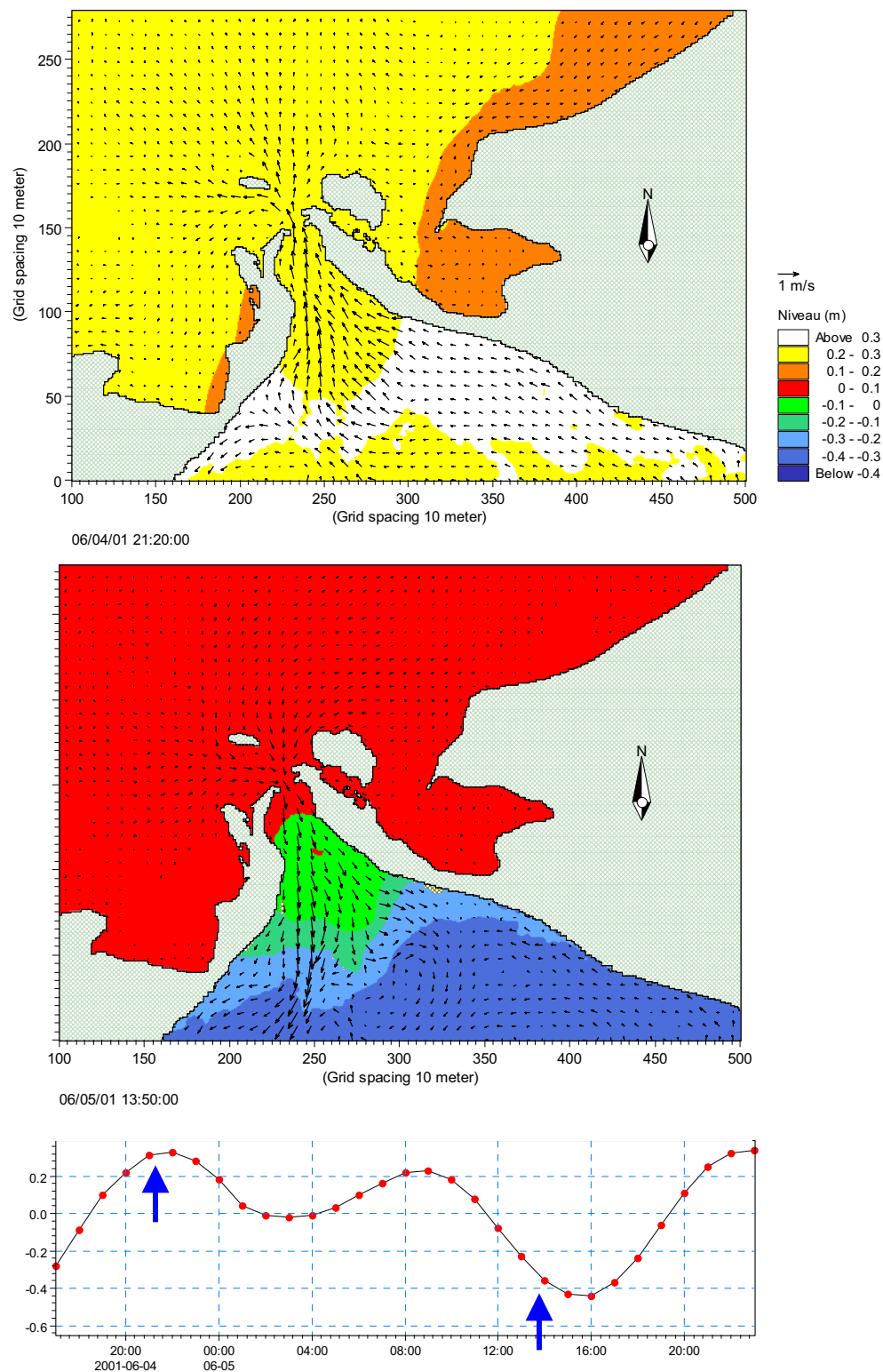


Figure 31 : Courants maximums et niveaux d'eau aux alentours de la passe de la lagune du Havre aux Maisons, sous l'effet combiné des vents d'Est, des marées hautes (haut) et basses (bas) et des vagues en provenance de l'Est dans le Golfe.

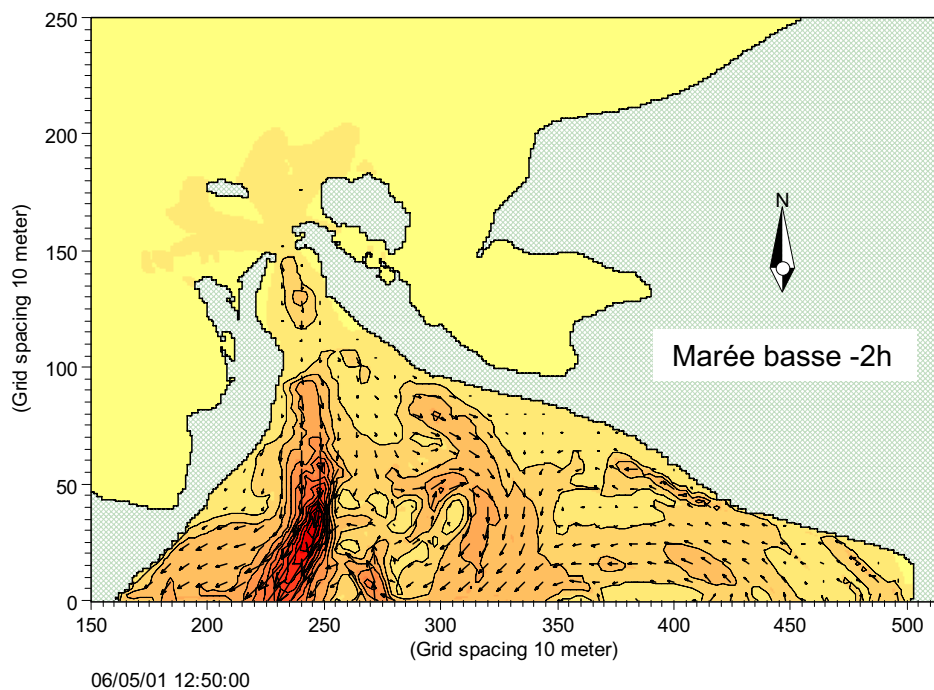
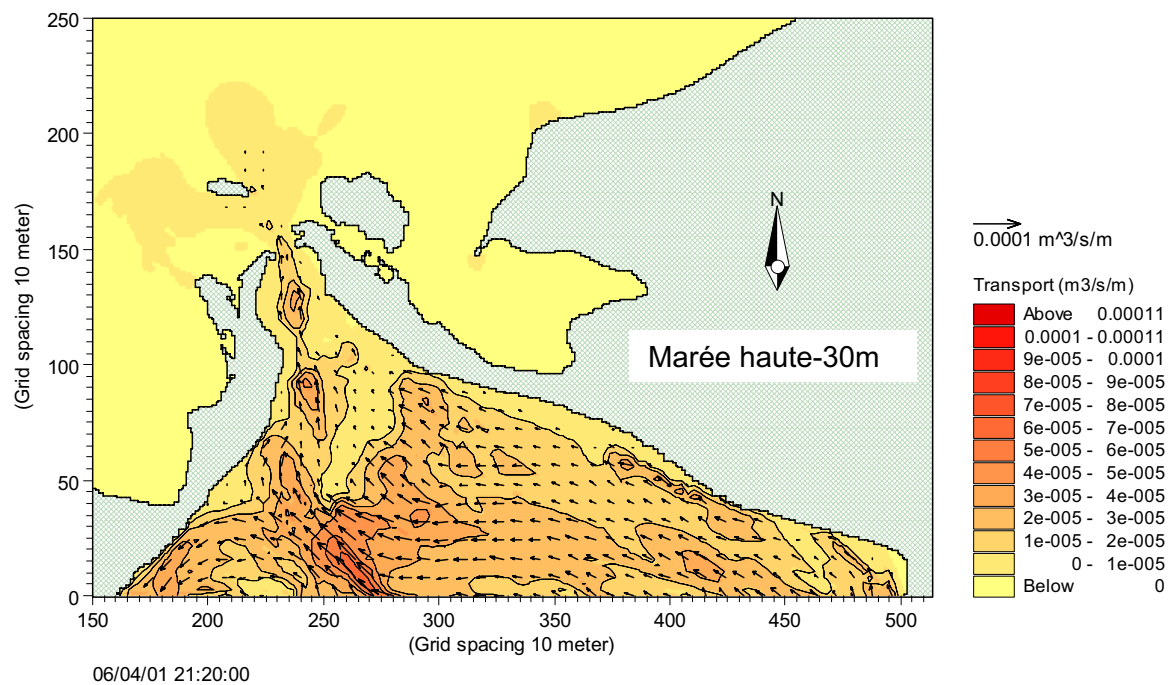


Figure 32 : Transport de sédiment instantané calculé par le modèle ST sur la grille G2m10 lors des plus forts courants de flot (haut) et de jusant (bas) calculés par le modèle HD sur la même grille, voir figure précédente.

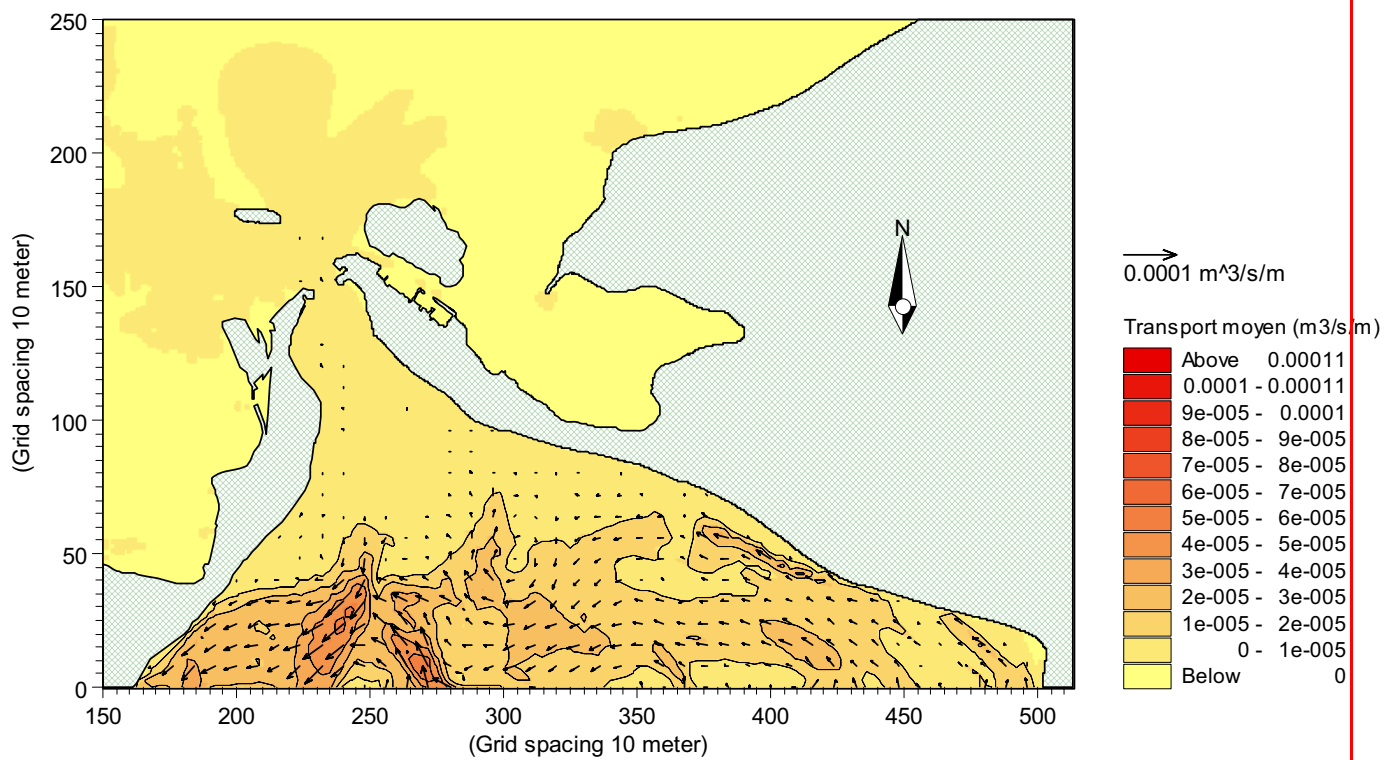


Figure 33 : Transport net (m³/s/m) de sédiments non cohésifs calculé par le modèle MIKE21-ST sur une période d'exactly deux cycles de marée diurne, soit du 4 au 6 juin 2001.

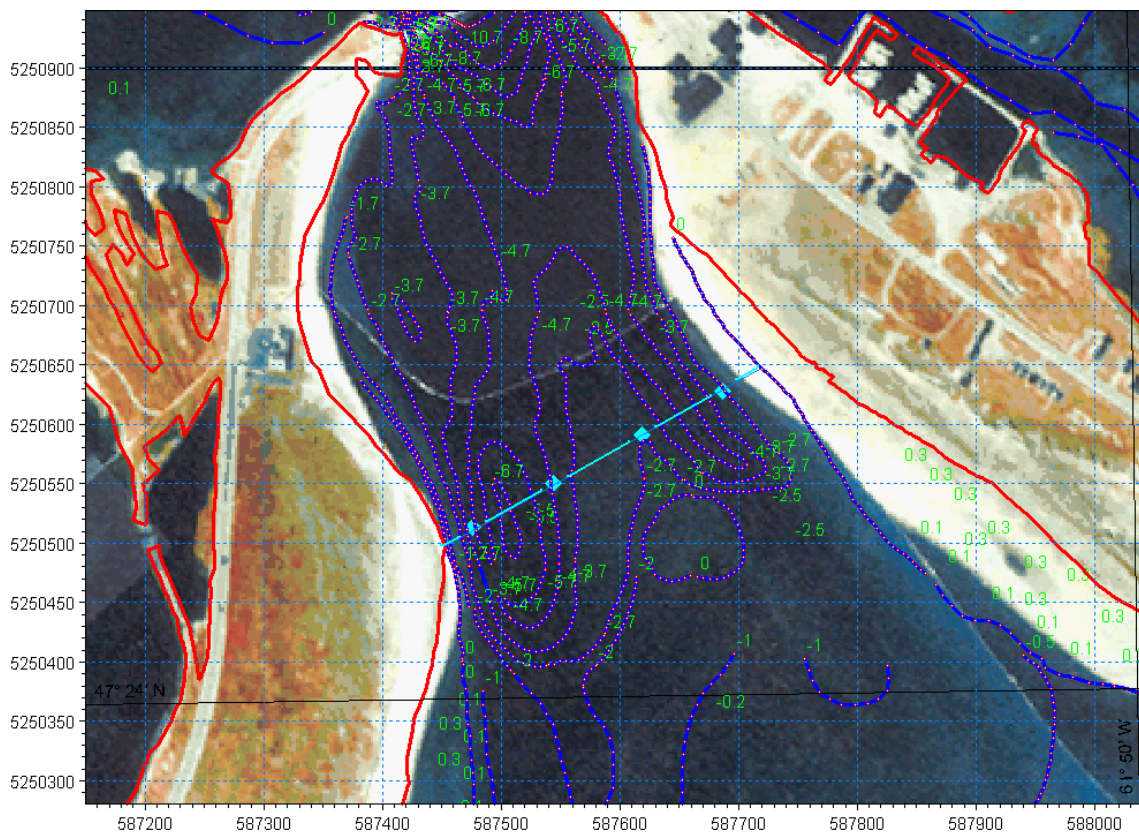


Figure 34 : Positions en coordonnées UTM (zone 20) des quatre piles du nouveau pont (points et ligne bleu clair) à l'extérieur de l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons. Le trait de côte est en rouge et les isobathes en mauve sont indiquées en mètres (vert) sous le niveau des mers les plus basses.

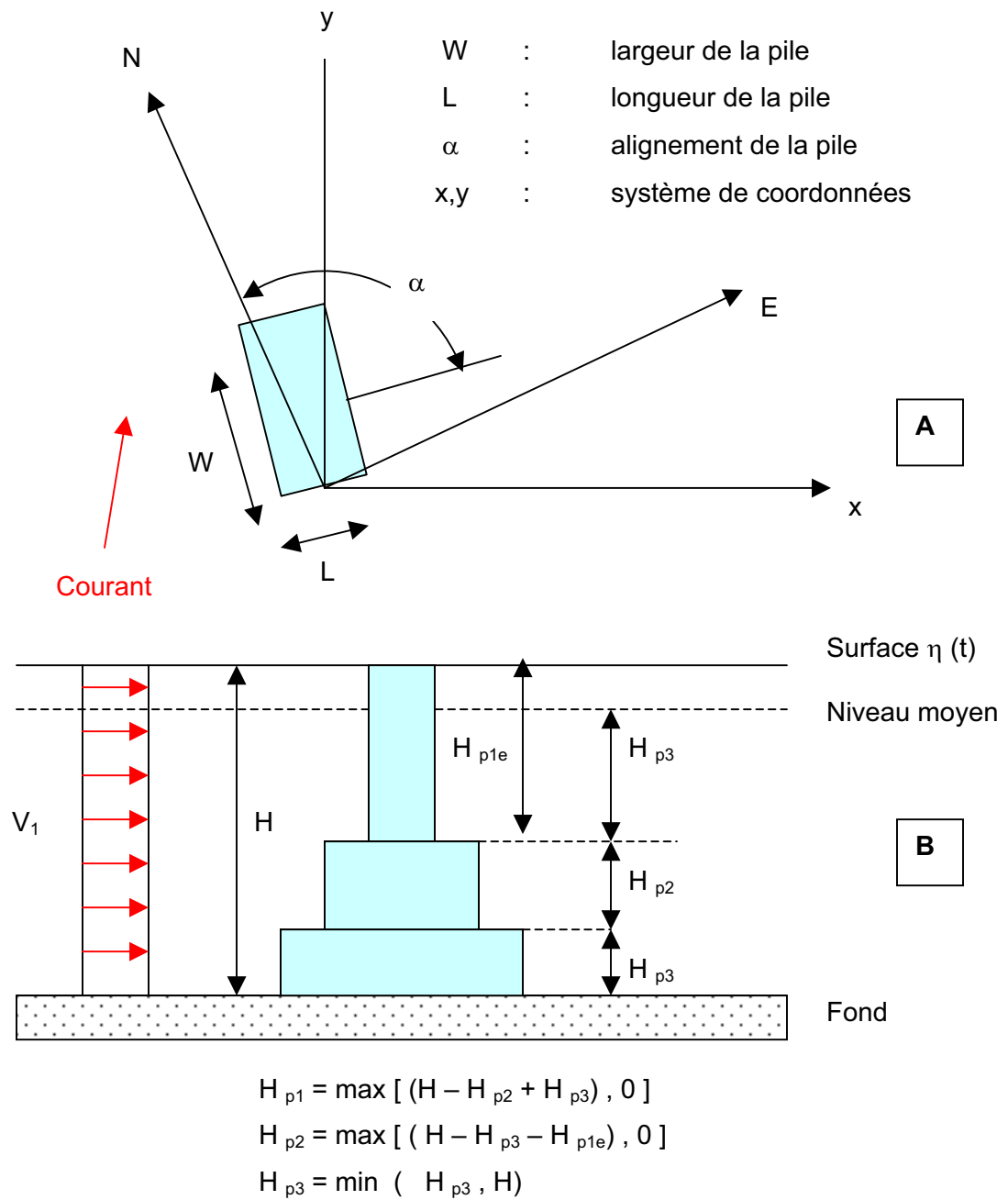


Figure 35: Paramètres géométriques servant aux calculs de la tension de cisaillement équivalente imposée par une pile de pont à l'écoulement.

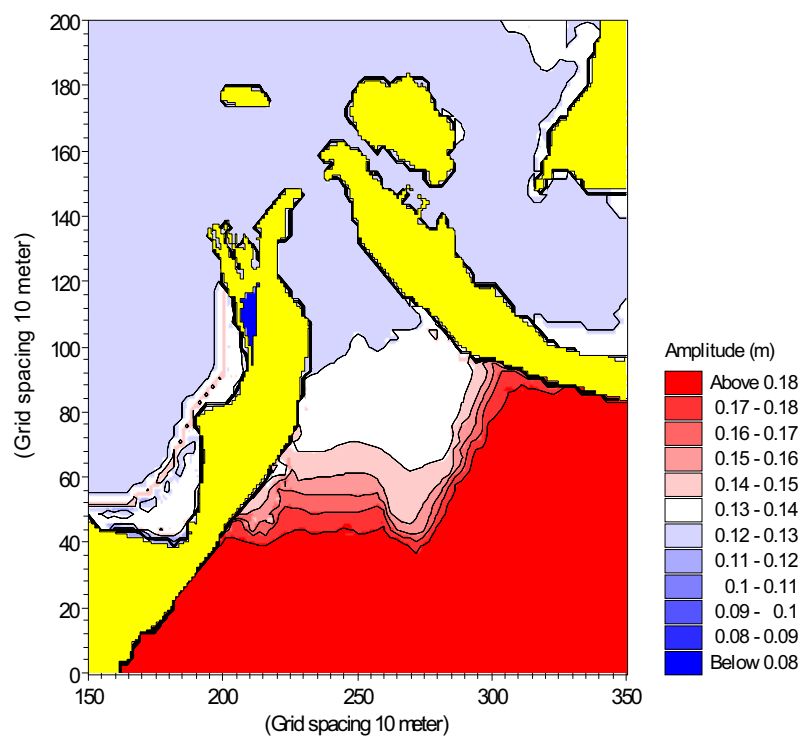
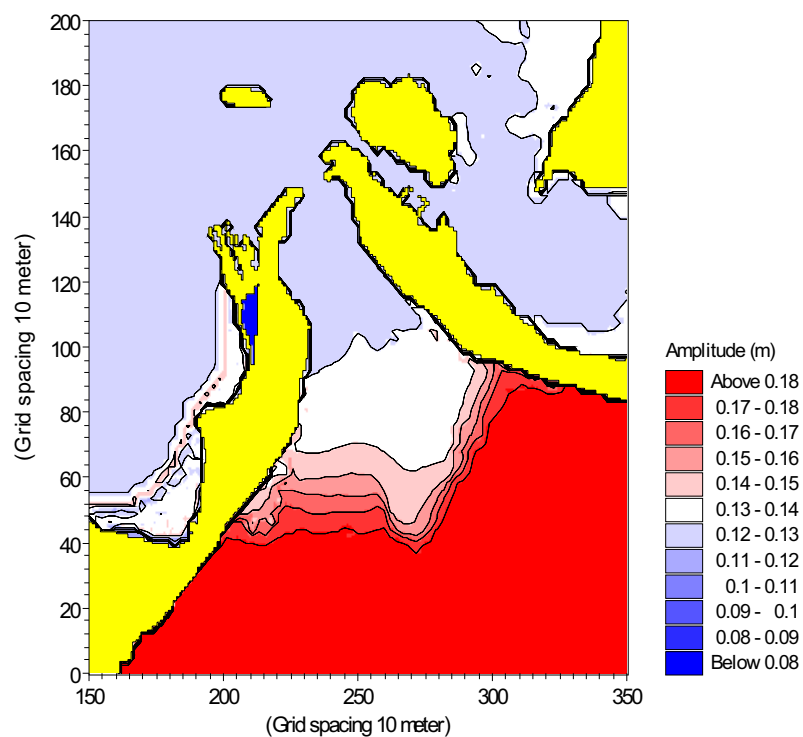


Figure 36 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée K1, sans les piles en haut et avec les piles bas.

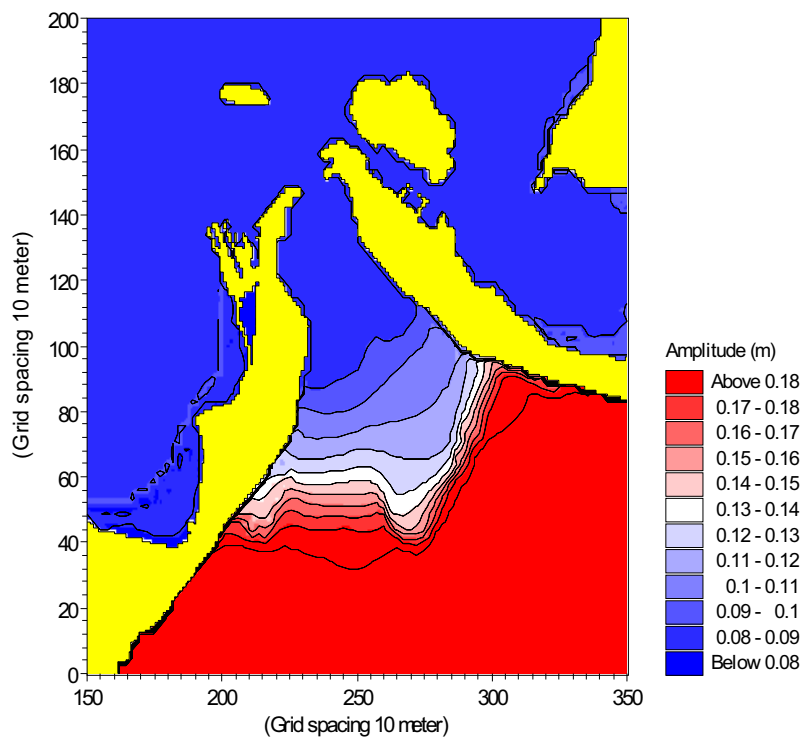
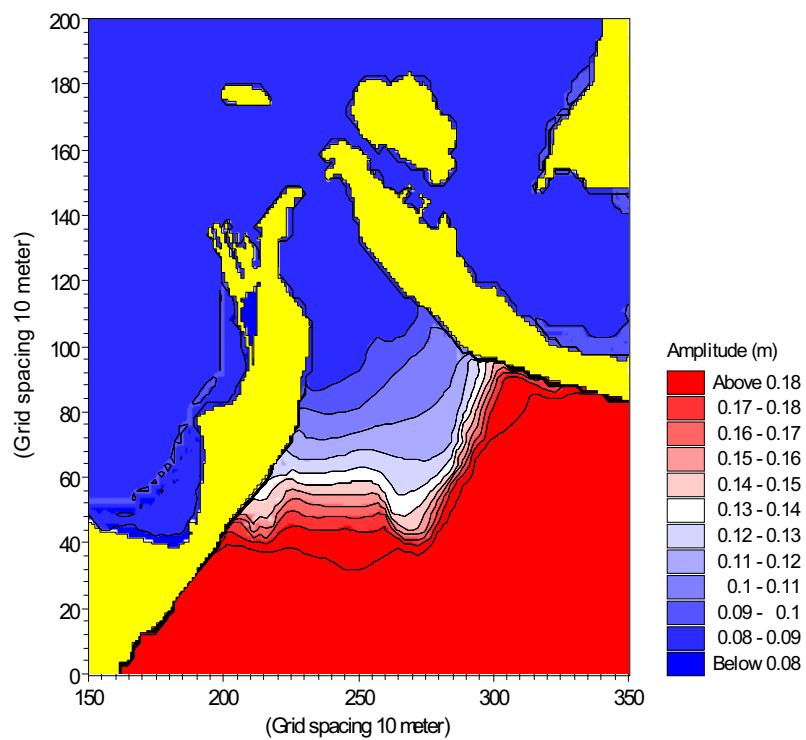


Figure 37 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

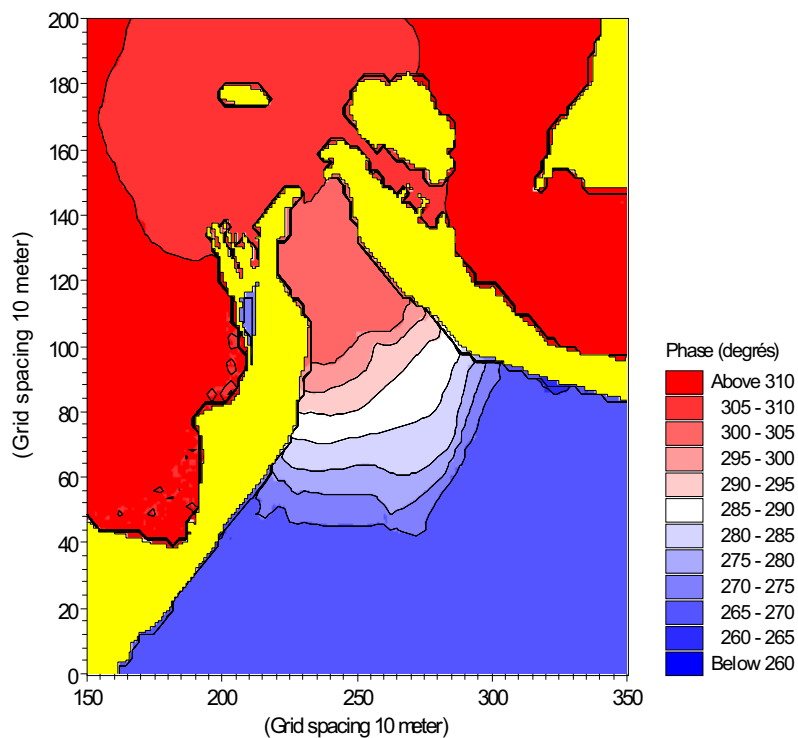
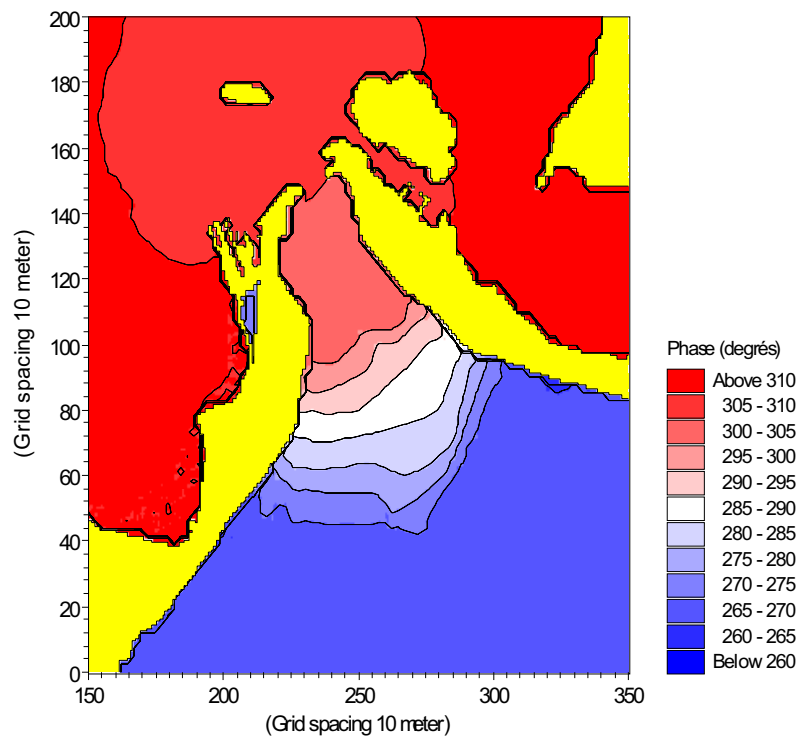


Figure 38 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée K1, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

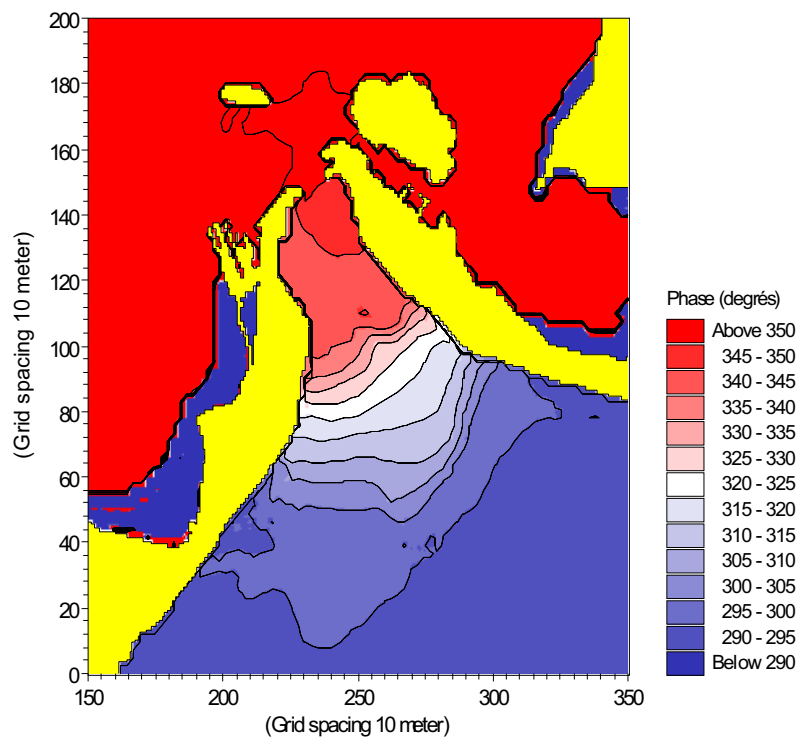
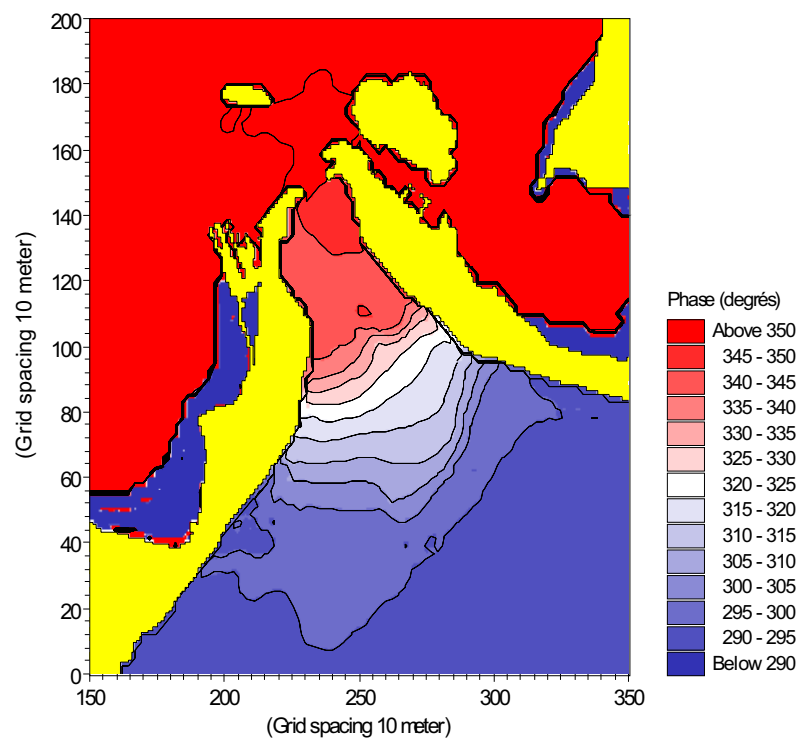


Figure 39 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée M2, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

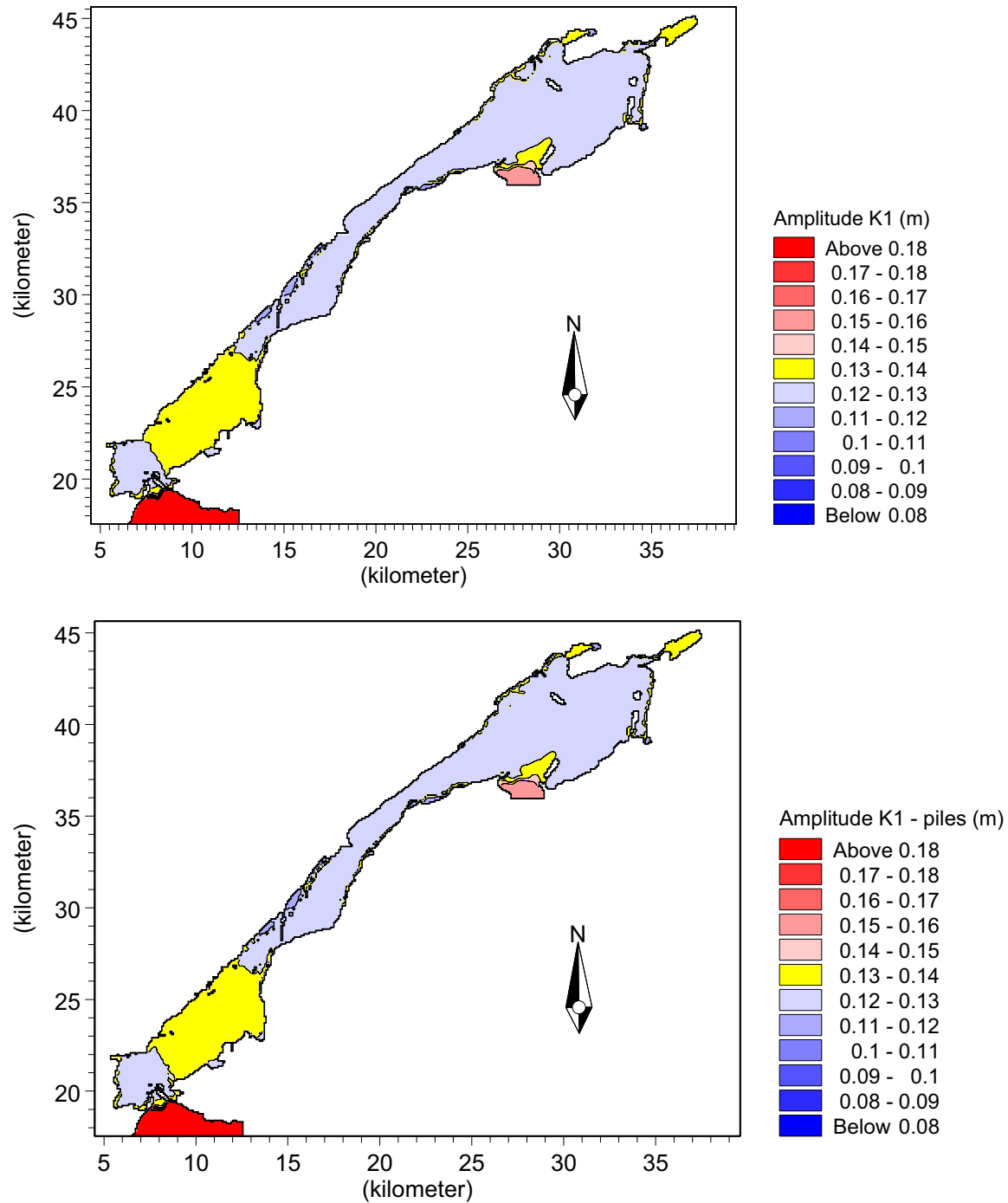


Figure 40 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée K1 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

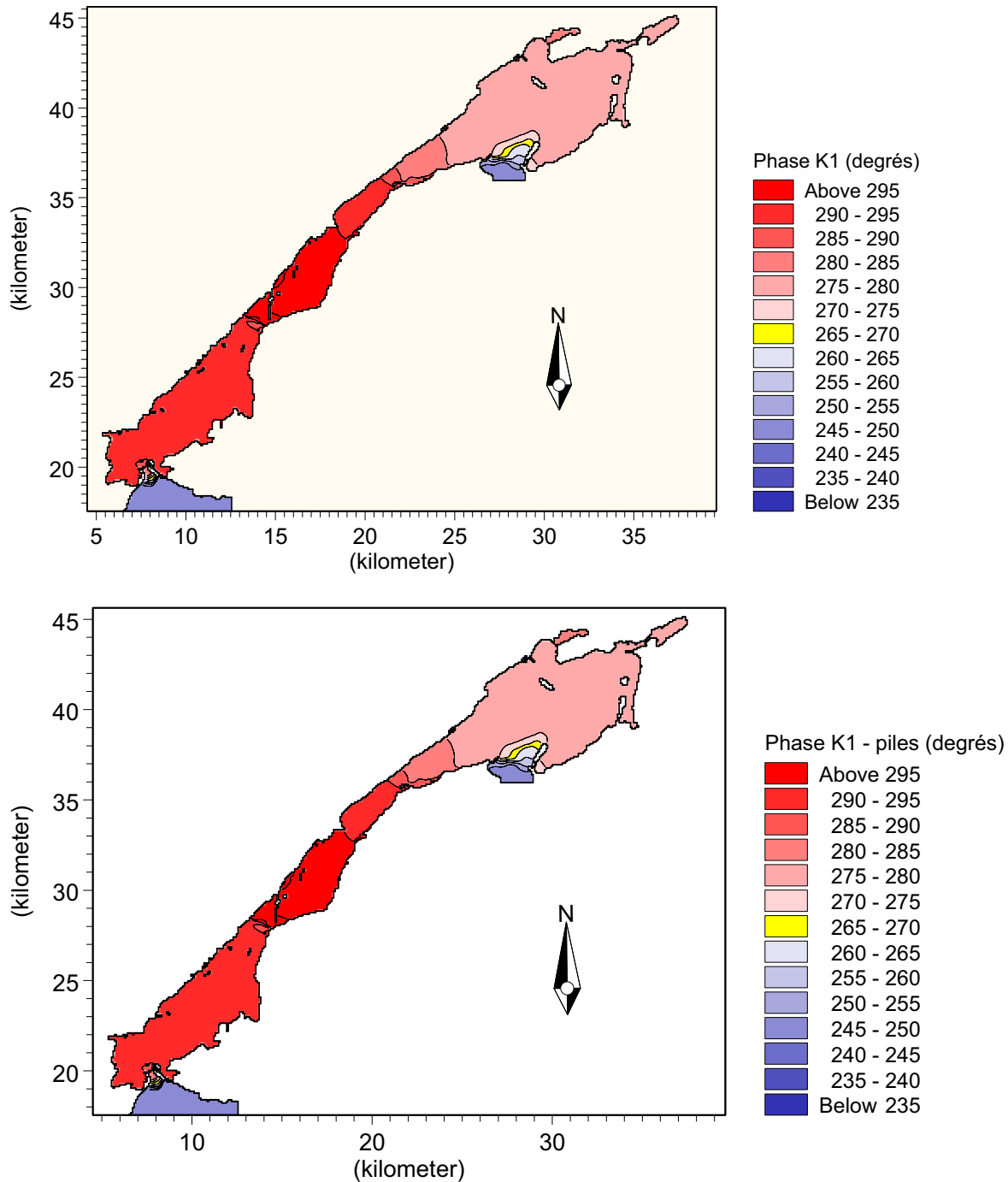


Figure 41 : Comparaison des phases de l'harmonique de marée K1 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

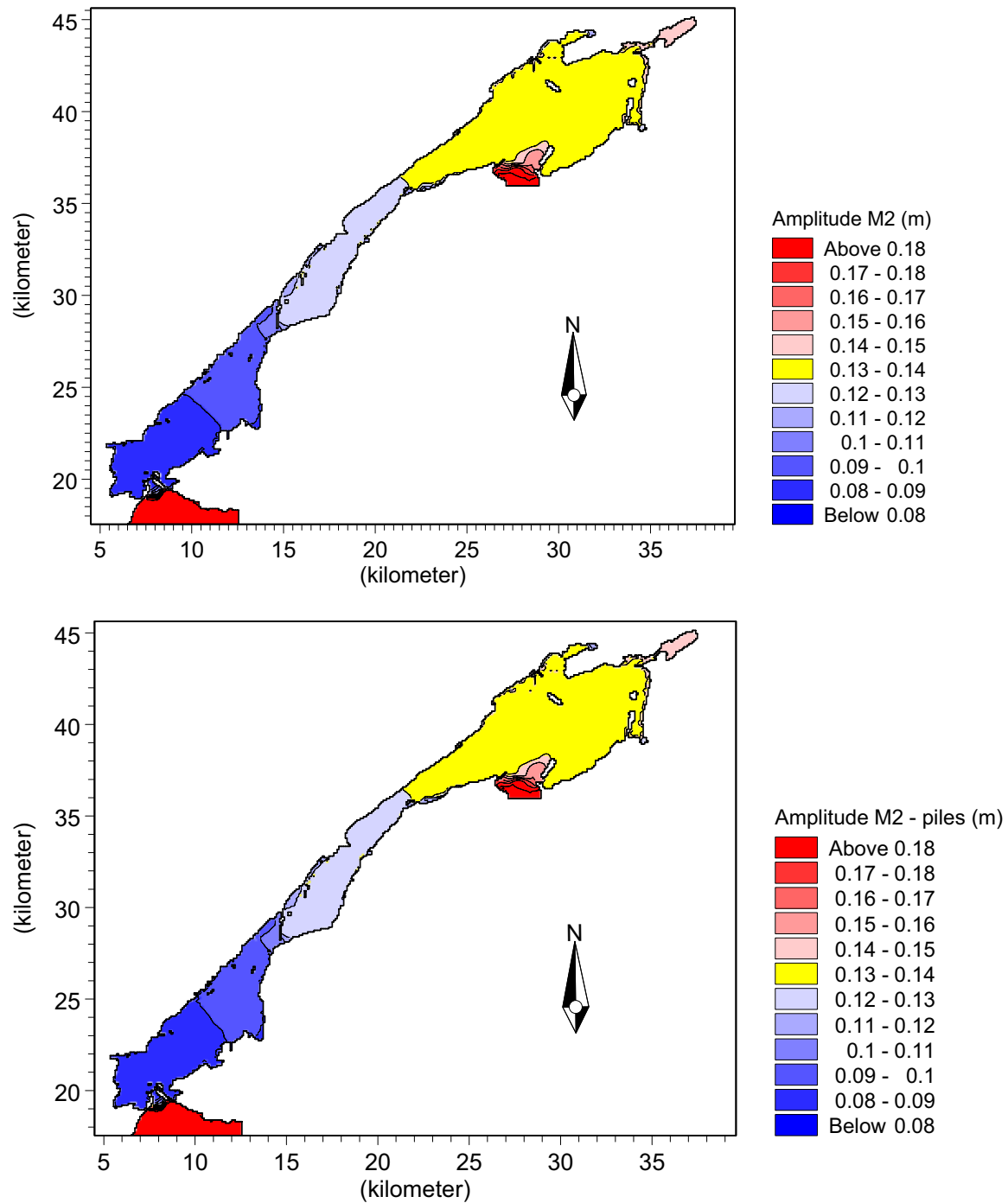


Figure 42 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

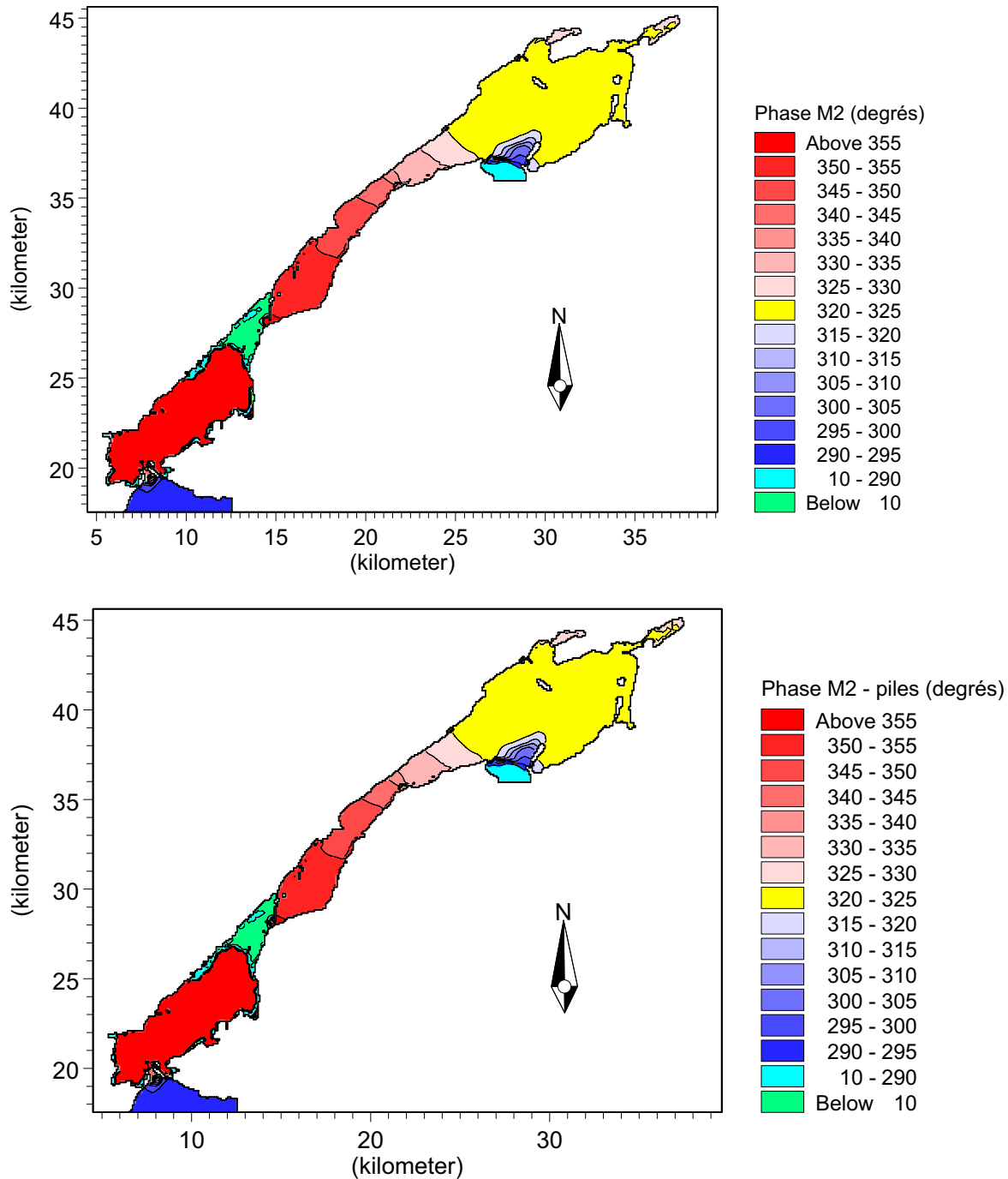


Figure 43 : Comparaison des amplitudes de l'harmonique de marée M2 dans les deux lagunes, sans les piles en haut et avec les piles en bas.

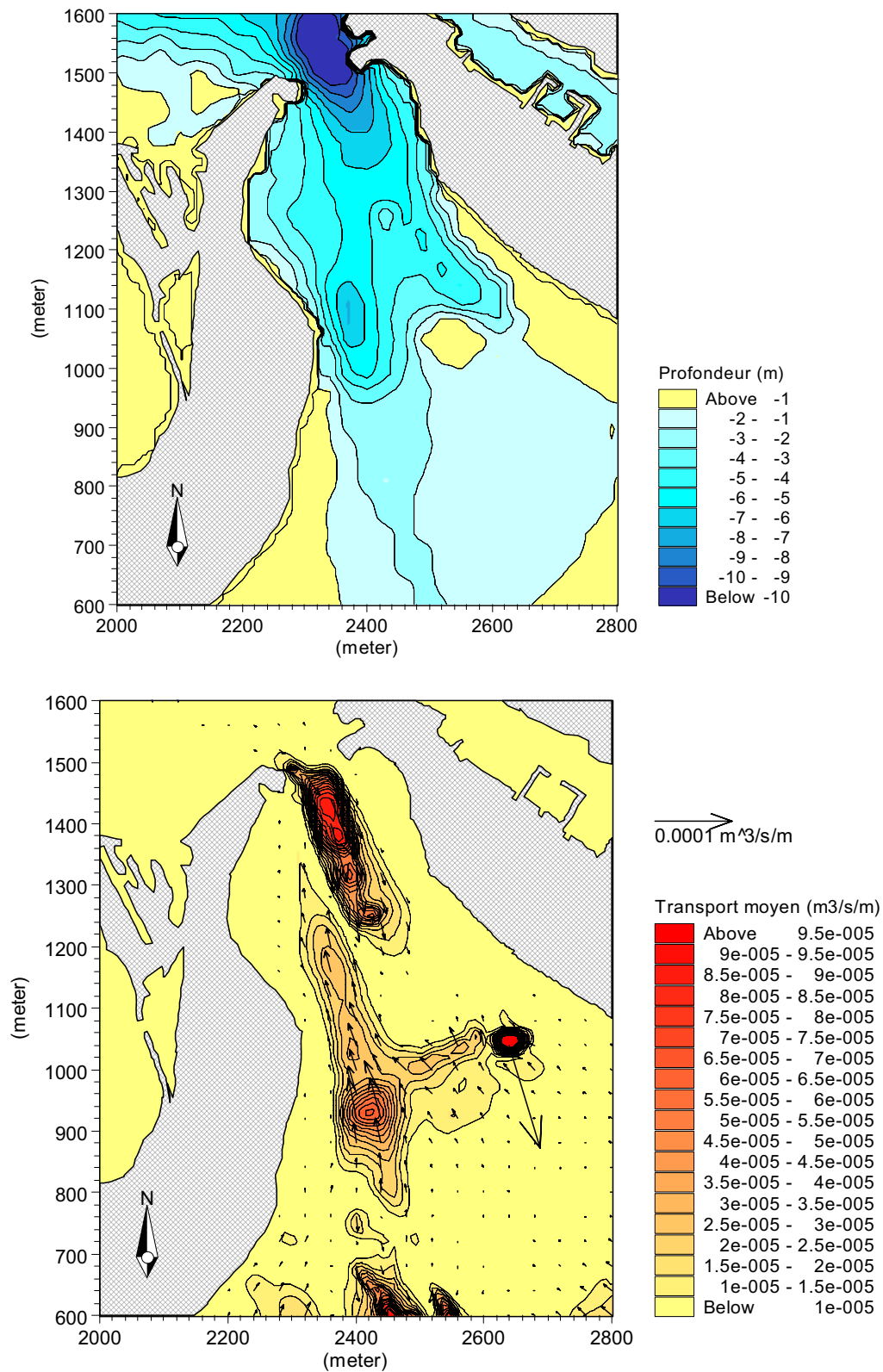


Figure 44 : Profondeurs (haut) et transport net de sables durant 48 heures par vents d'Est, sans piles (bas).

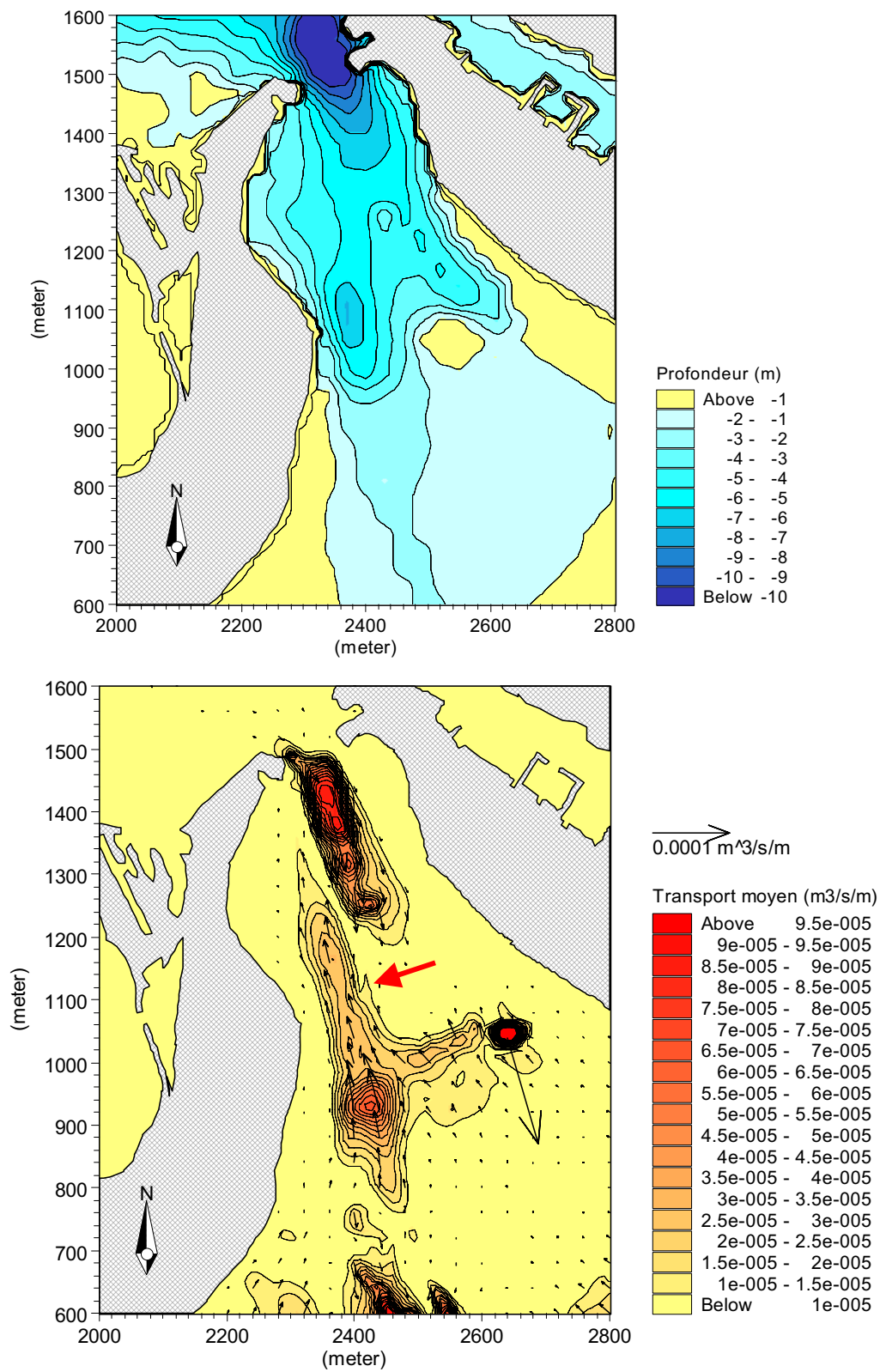


Figure 45 : Profondeurs (haut) et transport net de sables durant 48 heures par vents d'Est, avec piles (bas).

**ANNEXE A : STATIONS DE MESURE DES PARAMÈTRES
PHYSIQUES.**

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).	110
Figure A 2: Position de la station météorologique M.	111
Figure A 3: Station météorologique M sur le Cap Alright, Havre aux Maisons.	112
Figure A 4: Positions des stations 1, 2 et 3 dans la zone d'étude.	113
Figure A 5: Marégraphe-houlographe déployé à la station 1.	114
Figure A 6: Courantomètre Sontek ADCP déployé à la station 2 sous le pont de Havre aux Maisons.	115
Figure A 7: Marégraphe Coastal Leasing déployé à la station 3.	116
Figure A 8: Position des stations 4, 5 et 6.	117
Figure A 9: Position de la station 5, sous le pont du Déroit. Le mouillage se situe entre la première et la deuxième pile. Le Nord est à l'extrémité éloignée du pont.	118
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.	119
Figure A 11: Position de la station 7 dans la Baie de Clark.	120
Figure A 12: Mouillage du courantomètre S4 installé à la station 7 à l'entrée de la Baie Clarke.	121
Figure A 13: Positions des stations 8 et 9 dans la passe de Grande-Entrée.	122
Figure A 14: Mouillages de marégraphe Aanderaa WLR7 installés aux stations 9 et 10.	123
Figure A 15: Position de la station 10 dans le Golfe Saint-Laurent. Voir A-13.	124
Figure A 16: Position de la station 11 à l'île d'Entrée, Golfe Saint-Laurent.	125
Figure A 17: Position des stations 12 et 13 des deux côtés de la lagune du Havre-aux-Basques.	126
Figure A 18: Positions des stations de prélèvement d'échantillons de sédiment à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons, le 26 mai 2001.	127

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 Havre 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 du Havre 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 Havre 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 Groupe Conseil GÉNIVAR Inc. 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 du 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 Îles 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 du 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'une des piles latérales 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 du 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 capteur 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 du Havre-aux-Maisons, dans le chenal à l'approche du Pont du Détroit (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 capteur 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 la deuxième et la troisième pile (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'une des piles 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 Havre aux Maisons dans la baie de Plaisance, près de la passe d'entrée de la lagune du 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. La benne était du type « Petite Ponar » vendue par Wildco. L'ouverture est de 6" x 6" et le volume est d'environ 3 litres. 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.

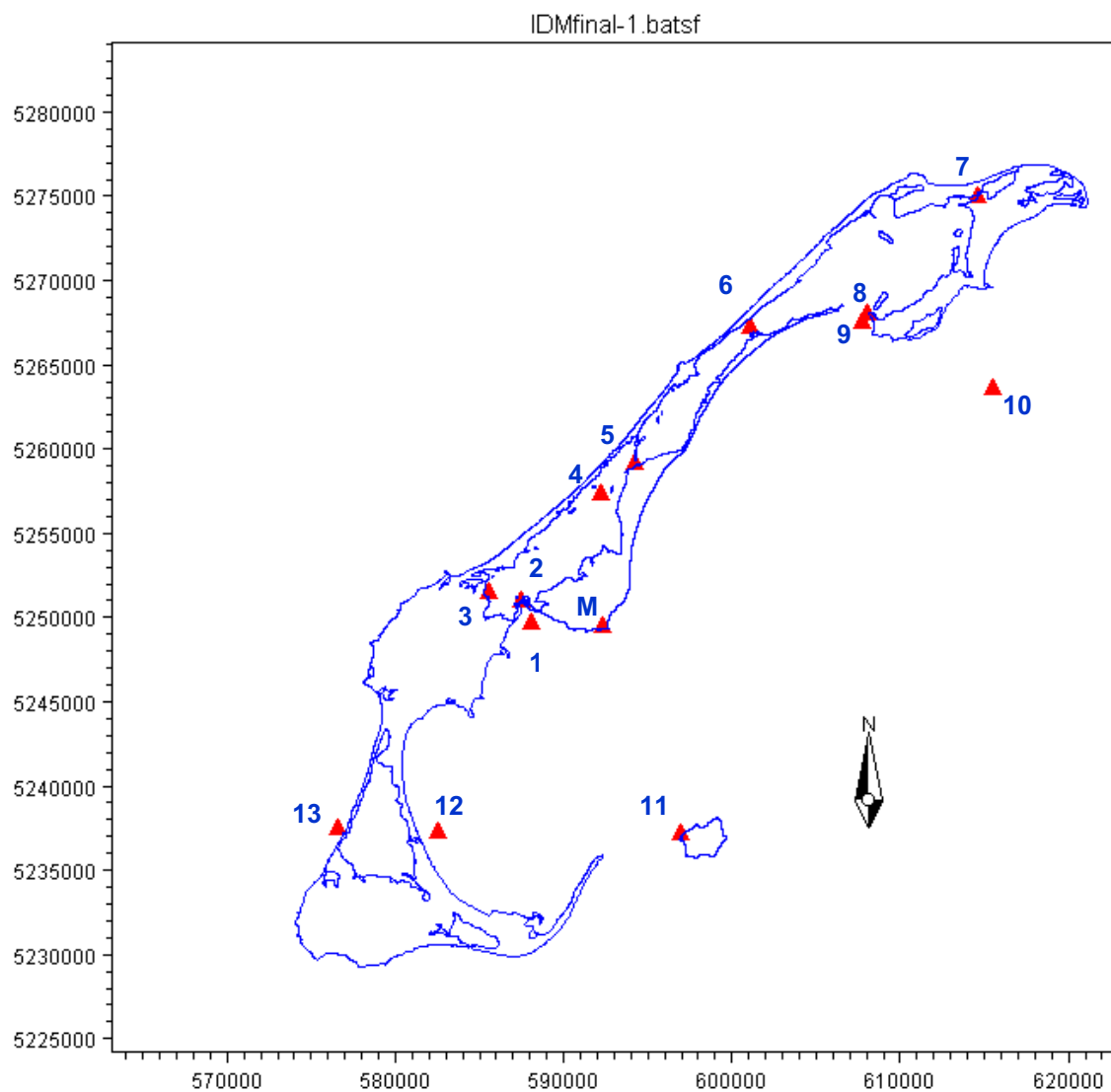


Figure A 1 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 13 juillet 2001. Les coordonnées sont en unités UTM (Universal Transverse Mercator).

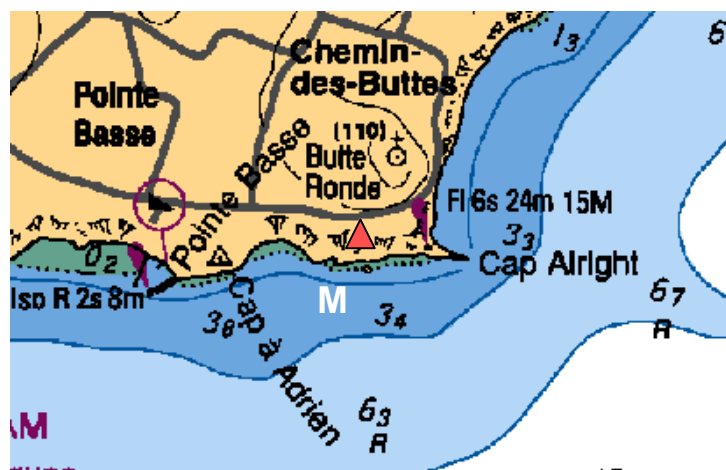
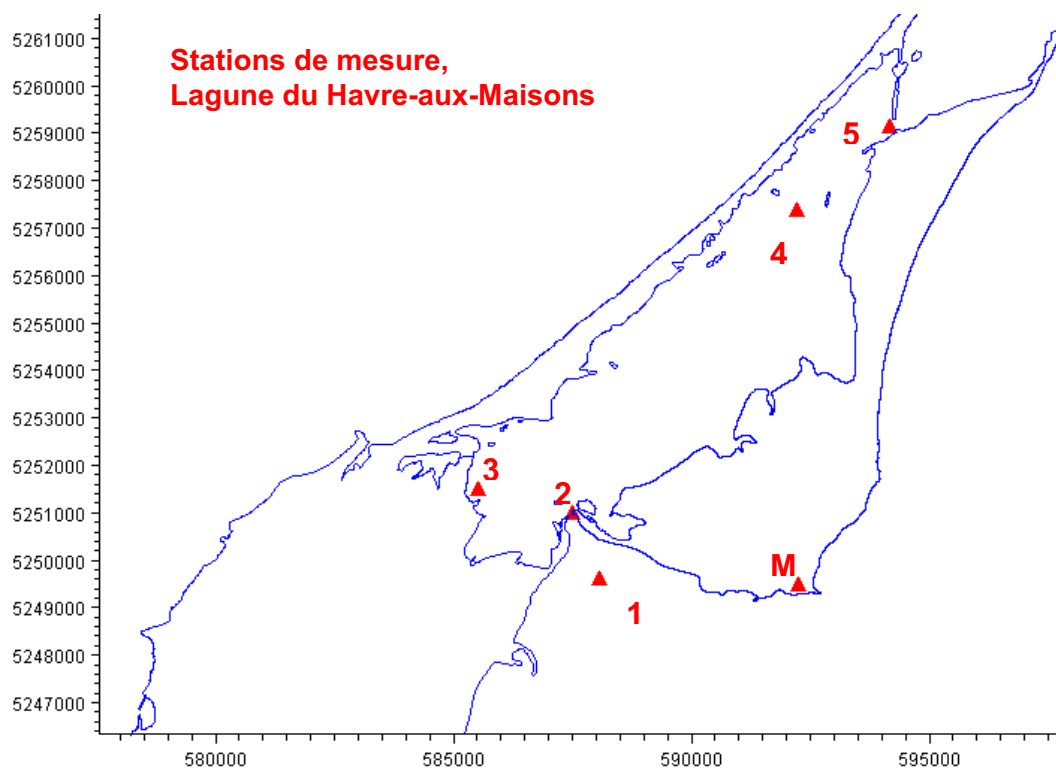


Figure A 2: Position de la station météorologique M.



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

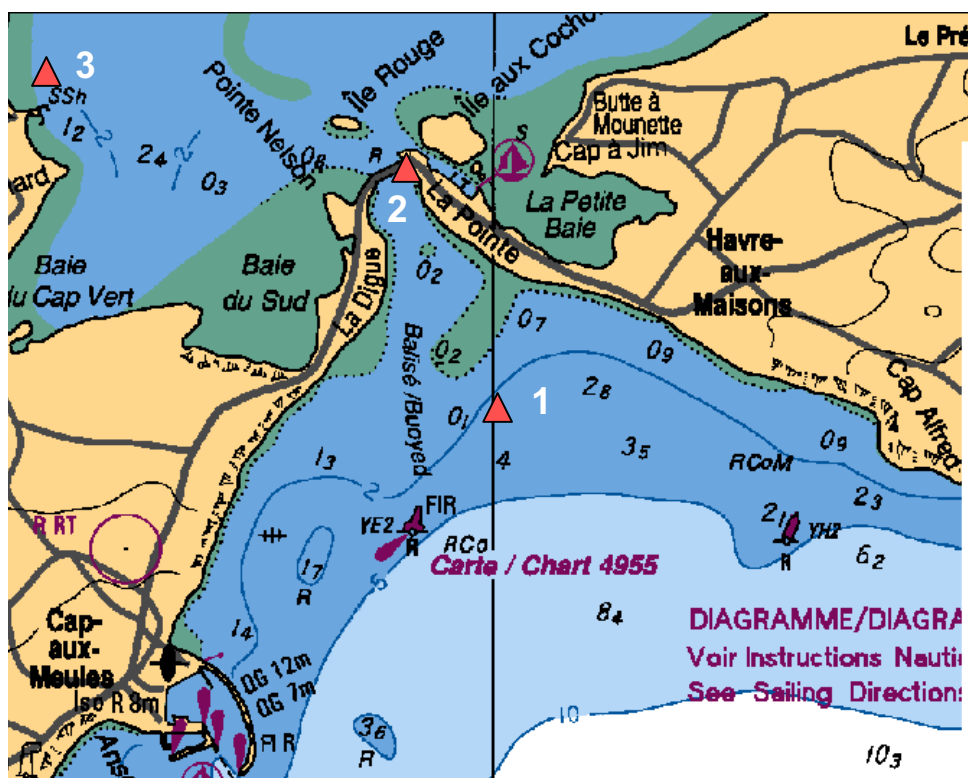


Figure A 4: Positions des stations 1, 2 et 3 dans la zone d'étude.



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



Figure A 6: Courantomètre Sontek ADCP déployé à la station 2 sous le pont du Havre aux Maisons.



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

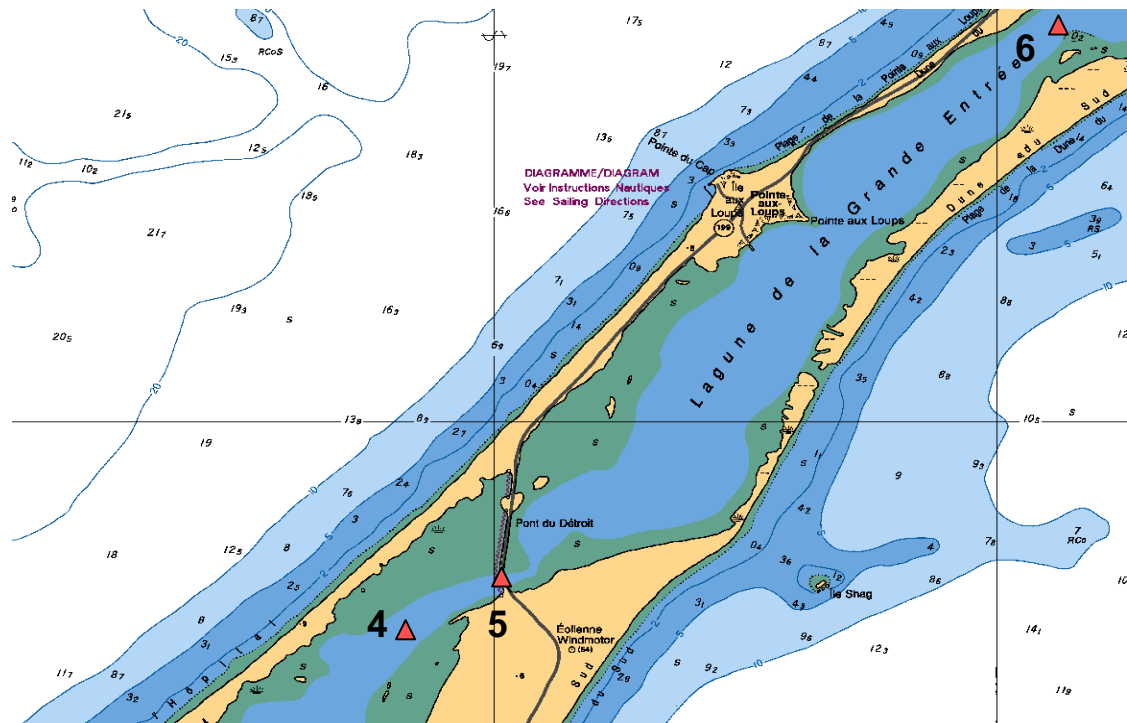


Figure A 8: Position des stations 4, 5 et 6.



Figure A 9: Position de la station 5, sous le pont du Déroit. Le mouillage se situe entre la première et la deuxième pile. 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.

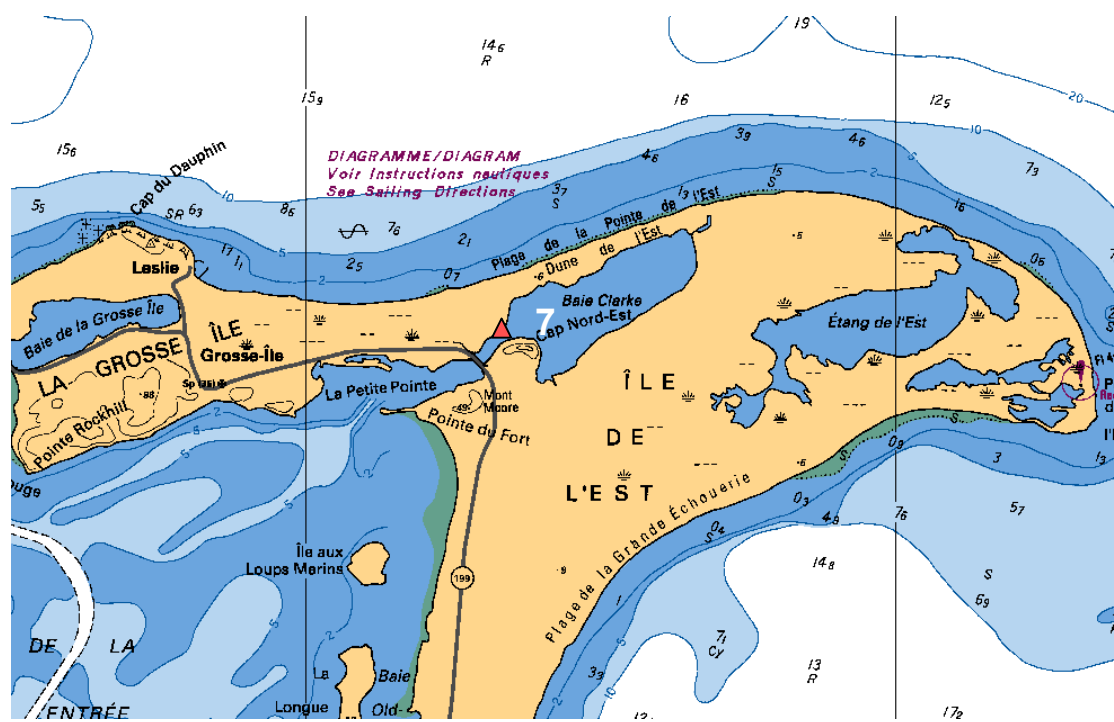


Figure A 11: Position de la station 7 dans la Baie de Clark.



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

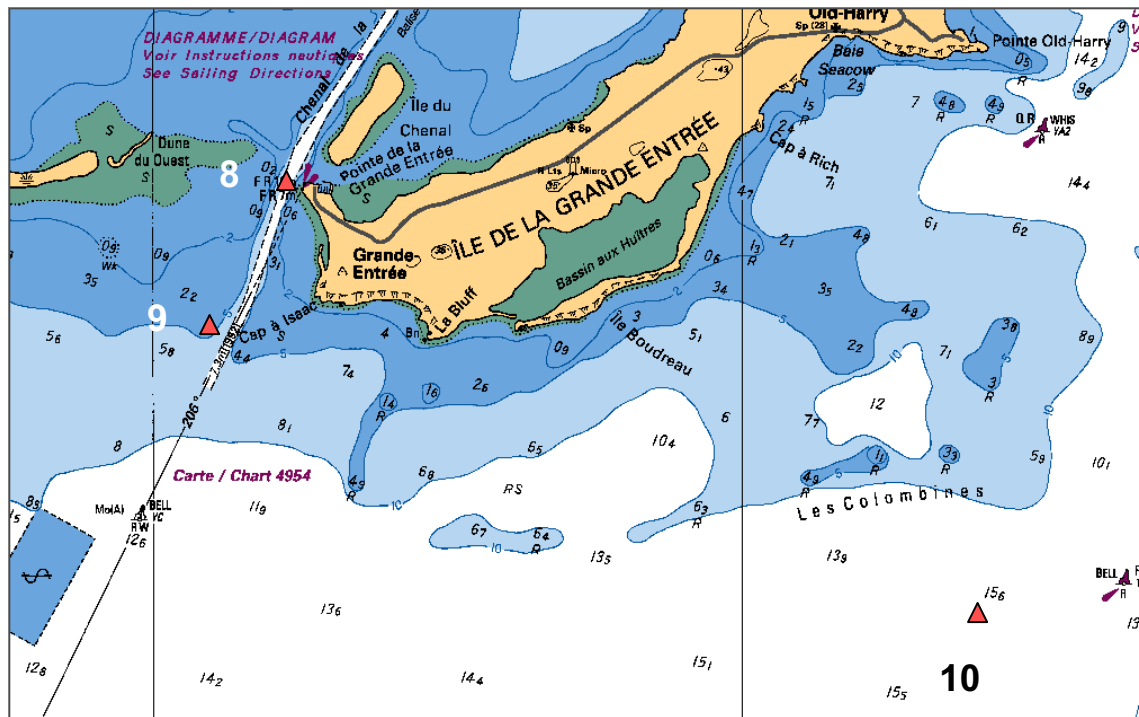


Figure A 13: Positions des stations 8 et 9 dans la passe de Grande-Entrée.



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

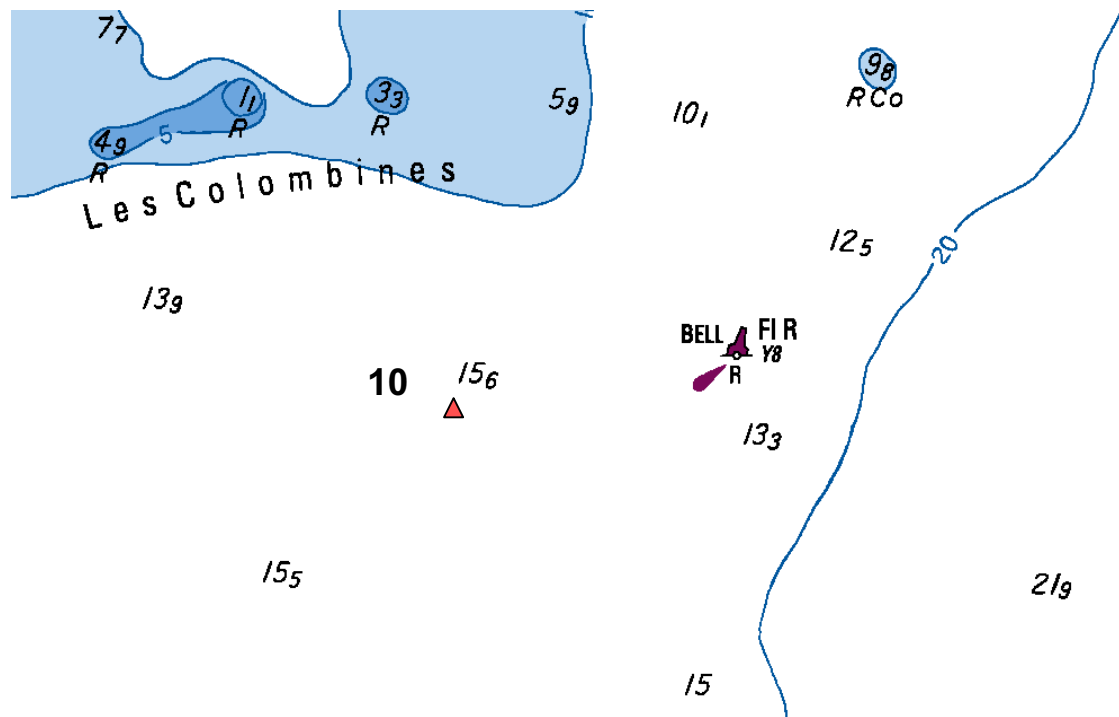


Figure A 15: Position de la station 10 dans le Golfe Saint-Laurent. Voir A-13.

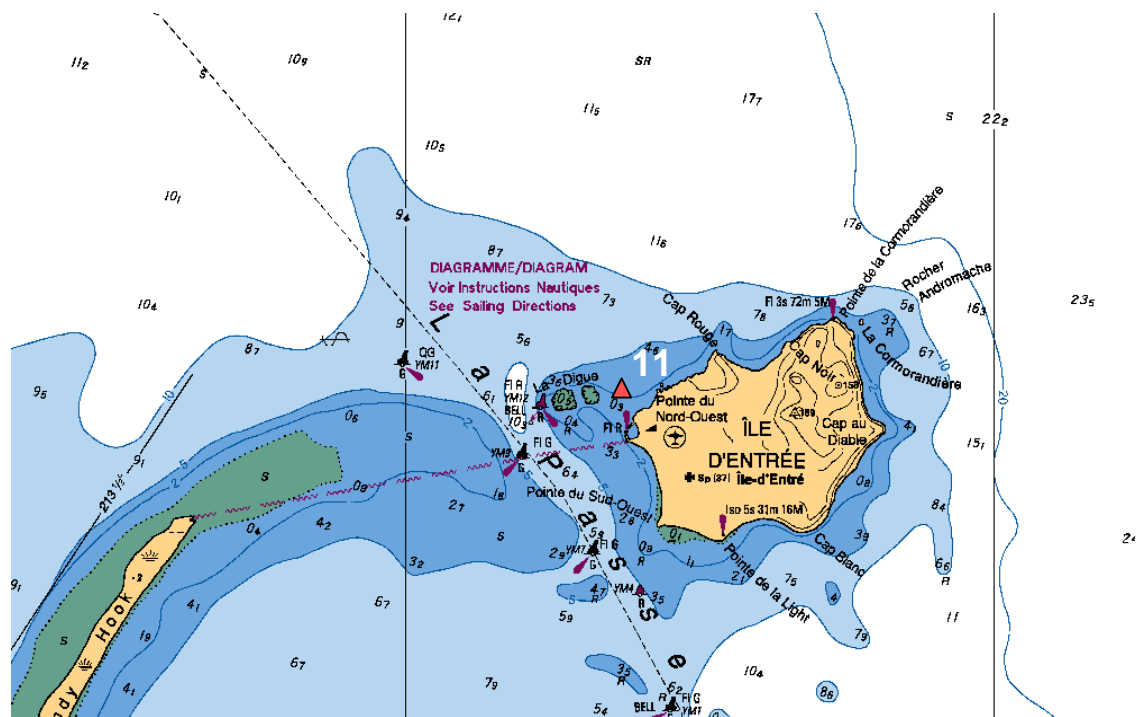


Figure A 16: Position de la station 11 à l'île d'Entrée, Golfe Saint-Laurent.

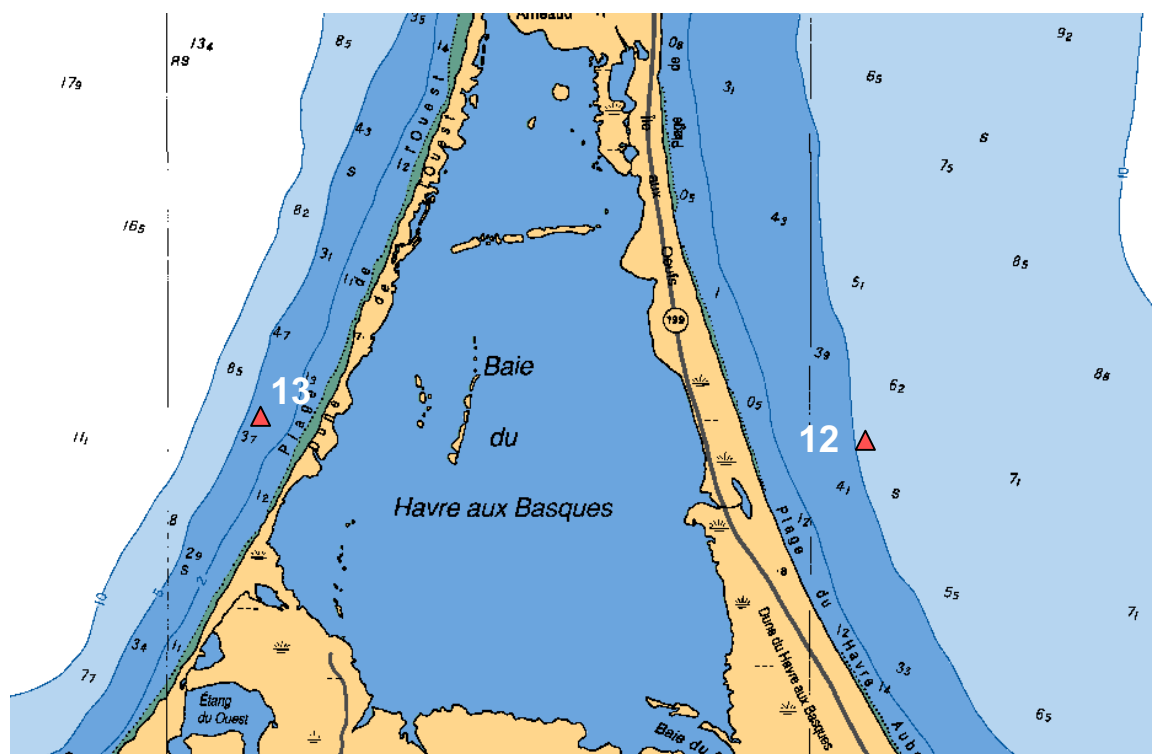


Figure A 17 : Position des stations 12 et 13 des deux côtés de la lagune du Havre-aux-Basques.

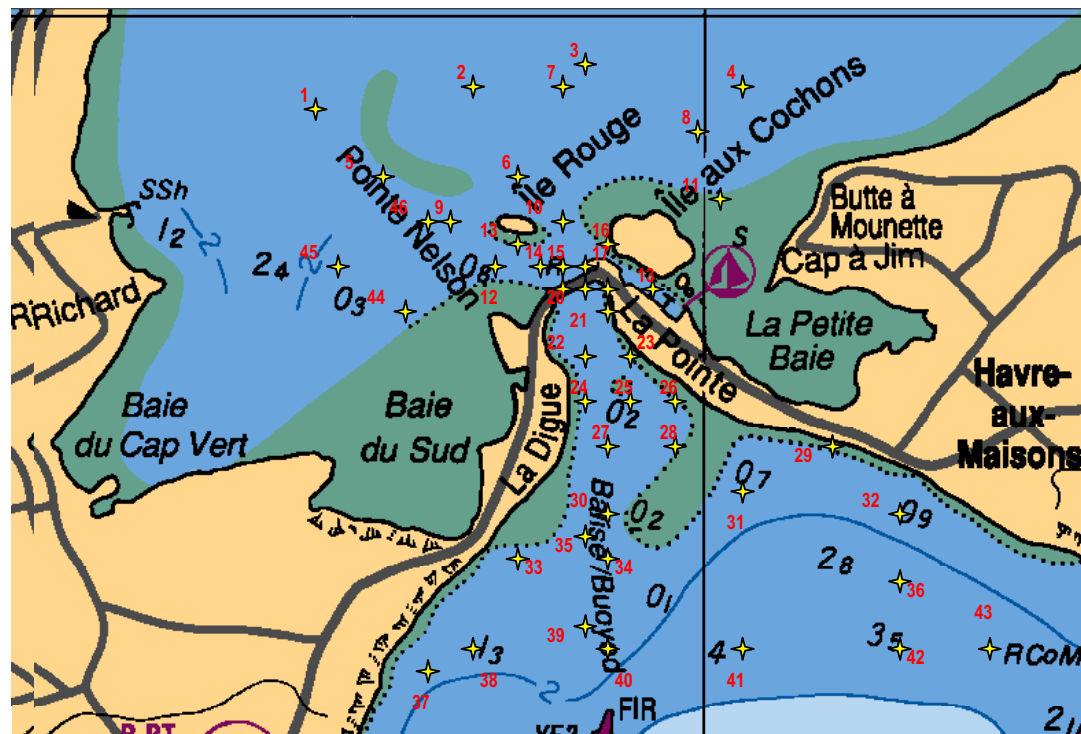


Figure A 18: Positions des stations de prélèvement d'échantillons de sédiment à l'entrée de la lagune du Havre aux Maisons, le 26 mai 2001.

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.....	138
Tableau B-2 : Principales composantes harmoniques de la marée, leurs périodes et leur origine (soleil ou lune) :.....	139

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 Δt . 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 débuter 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

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 σ_j est la phase de cette composante. Ici, σ_j est la phase de la composante statique à Greenwich (longitude 0°) à l'heure de Greenwich, et ϕ_j est le retard de phase de la composante locale sur sa phase à Greenwich σ_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, σ_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 ϕ_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 ϕ_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 :

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

(B-8)

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):

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

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

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

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

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 $\sigma^2 I$, où I est la matrice unitaire, la variance de \hat{x} sera de $(A^T A)^{-1} \sigma^2$. Étant donné que MSE est un estimé non biaisé de σ^2 , l'estimé de la déviation standard de \hat{x}_i , le i me terme de \hat{x} , sera :

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

où μ_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 φ_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 φ_j sont :

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

et (B-12)

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

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 Δt , 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 densité 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 θ_{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.

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

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 : MODÈLE NUMÉRIQUE DE VAGUES (MIKE21-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 ω et de la direction θ 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 σ de la vague est :

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

où \mathbf{k} est le vecteur du nombre d'onde de la vague dans la direction θ et \mathbf{V} est le vecteur du courant ambiant.

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.

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 (θ) 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.

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 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). Cette 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).

L'équation de la conservation de la vague est exprimée par:

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

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 , θ et ω respectivement. Le terme T à droite est la fonction « source » qui varie en fonction de x , y , θ et ω . 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 :

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

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 θ , c'est-à-dire la direction perpendiculaire à la crête de la composante de la vague (θ, ω) .

Selon la théorie linéaire, la vitesse de propagation c_θ associée à la réfraction est:

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

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

Finalement, la vitesse de propagation c_ω 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 (θ) , ces équations sont :

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

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

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_θ est la vitesse de propagation du changement de l'action de la vague dans l'axe directionnel θ . 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.

C.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 ω_0 :

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

où \mathbf{k}_0 est le nombre d'onde correspondant à la fréquence moyenne $\omega_0(\theta)$ dans la direction θ , 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 :

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

C.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_ω :

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

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

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 Ω_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 :

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

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

C.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 Ω_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 , Ω_1 et t pour un vent de vitesse 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 θ .

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:

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

où θ_w est la direction du vent et A est une constante.

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

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

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).

C.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 ω (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_{rms} est la hauteur « rms » (*Root Mean Square*, équivalent à la déviation standard) de la vague $H_{rms} = 2(2 E_1)^{1/2}$. 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 τ 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_θ de ce

courant dans la direction θ 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 $S_E(\theta)_{friction}$:

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

Le calcul du deuxième terme source, $S_{\Omega}(\theta)_{friction}$, 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 :

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

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 :

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

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

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

En remplaçant ω_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) :

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

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

C.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_{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_{mx} est définie par le critère de déferlement de Miche (1944) :

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

où γ_1 est un paramètre qui contrôle l'escarpement (« *steepness* » en anglais) qui provoque le déferlement de la vague en eau profonde, alors que γ_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 :

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

où Q_b est la fraction des vagues déferlantes et α_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} :

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

Les valeurs des constantes α_1 , γ_1 et γ_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 : MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE (MIKE21-
HD)**

D.1 INTRODUCTION

MIKE 21 HD est le module de calcul numérique à la base du système de modélisation intégrée MIKE 21. Ce module simule les variations du niveau d'eau et du transport de volume en deux dimensions horizontales (2DH), en réponse à une multitude de forces, et cela dans les lacs, les lagunes, les estuaires, les baies et la zone côtière. Des exemples d'application du module MIKE 21 - HD sont :

- courants de marée et échanges de volumes d'eau,
- empilements de tempêtes (storm surge), tsunamis,
- circulations secondaires, tourbillons, etc.,
- sèches et résonance du niveau dans les ports,
- bris de barrages, tsunamis.

Les niveaux d'eau et le transport de volume sont calculés à chaque cellule rectangulaire d'une grille de calcul couvrant l'aire du domaine d'intérêt. Des modules MIKE21-HD adaptés à des mailles curvilinéaires ou en éléments finis sont aussi disponibles. Cette étude a été réalisée à l'aide du module MIKE21-HD en différences finies. La formulation mathématique du système MIKE 21 HD inclut:

- les termes non linéaires du mouvement,
- le cisaillement au fond,
- le cisaillement du vent en surface,
- le gradient de pression atmosphérique,
- la force de Coriolis,
- la dispersion du mouvement (e.g. formulation de Smagorinsky),
- les courants induits par les vagues,
- les additions et soustractions de masse et du mouvement,
- l'évaporation,
- le découverture et le recouvrement des cellules intertidales.

D.2 ÉQUATIONS DE BASE:

Le modèle MIKE21-HD simule l'évolution temporelle des courants et niveau d'eau en intégrant les équations de la conservation du mouvement et de la masse intégrées sur l'axe vertical. Ces équations sont :

Continuité

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S - e$$

Momentum en X

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - fq =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h} + C_D |W| W_x + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + S_{ix}$$

Momentum en Y

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + fp =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h} + C_D |W| W_y + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + S_{iy}$$

où:

t	temps (s)
x,y	coordonnées Cartésiennes horizontales (m)
$\eta(x,y,t)$	niveau de la surface au-dessus du niveau de référence (m)
$p(x,y,t)$	densité de flux dans la direction x ($m^2 \cdot s^{-1}$)
$q(x,y,t)$	densité de flux dans la direction y ($m^2 \cdot s^{-1}$)
$h(x,y,t)$	profondeur de l'eau (m)
S	débit de la source par unité de surface horizontale ($m \cdot s^{-1}$)
e	taux d'évaporation ($m \cdot s^{-1}$)
S_{ix}, S_{iy}	momentum de la source dans les directions x et y ($m^2 \cdot s^{-2}$)
g	accélération de la gravité ($m \cdot s^{-2}$)
f	paramètre de Coriolis (s^{-1})
C	nombre de frottement de Chezy ($m^{1/2} \cdot s^{-1}$)
W	vitesse du vent ($m \cdot s^{-1}$)
W_x, W_y	vitesse du vent dans les directions x et y ($m \cdot s^{-1}$)
P_a	pression atmosphérique ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$)
ρ	densité de l'eau ($kg \cdot m^{-3}$)
$E_x(x,y), E_y(x,y)$	coefficients de viscosité turbulente dans les directions x et y ($m^2 \cdot s$)

Les conditions aux frontières ouvertes peuvent être spécifiées soit par un niveau constant ou variable dans l'espace et le temps ou bien par un flux de volume dans une direction spécifiée. Une source et/ou un retrait de masse ou de volume n'importe où dans le domaine peuvent aussi être spécifiés, et une surface initiale du niveau peut être imposée à toute la grille de calcul.

Ces équations sont résolues par des méthodes numériques implicites à différences finies où les variables h, p et q sont définies sur des mailles du type Arakawa-C. Pour éviter les itérations, on utilise la méthode dite à « pas de temps fractionné » combinée avec l'algorithme « implicite de direction alternative (ADI) ». La précision du deuxième ordre est assurée par le centrage

en temps et en espace de tous les coefficients et dérivées. L'algorithme ADI implique que les équations sont résolues à chaque pas de temps d'abord en suivant la direction x en utilisant les équations de continuité et de momentum, puis de la même façon dans la direction y. à titre d'exemple, l'expression de la différence finie de la dérivée par rapport au temps de la densité du flux (débit p par unité de largeur) est :

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \left(\frac{p^{n+1} - p^n}{\Delta t} \right) - \frac{\Delta t^2}{24} \cdot \frac{\partial^3 p}{\partial t^3}$$

On voit que le terme de correction est du troisième ordre. L'application de la méthode implicite de différence finie conduit à un système d'équations tri-diagonales pour chaque ligne de maille dans le modèle. La solution est obtenue en inversant la matrice tri-diagonale en utilisant l'algorithme « Double-passage (ou *double sweep*) », une forme rapide et précise de la méthode d'élimination de Gauss. Cette méthode implicite est utilisée dans MIKE21-HD de telle façon que les problèmes de stabilité sont évités si les données d'entrée sont raisonnables physiquement. Le pas de temps utilisé dans les calculs n'est ainsi limité que par la précision désirée.

D.3 INTRANTS AU MODÈLE

Paramètres de base

- Domaine du modèle et dimension des mailles
- Pas de temps et longueur de la simulation
- Type des résultats désirés et leur fréquence
- Latitude et orientation du modèle

Bathymétrie

Facteur de calibration

- Frottement au fond
- Coefficient de viscosité turbulente
- Coefficient de frottement du vent

Conditions initiales

- Niveau initial de la surface de l'eau
- Densité de flux dans les directions x et y

Conditions aux limites

- Niveaux d'eau ou taux d'écoulement
- Direction du courant

Autres forces motrices

- Vitesse et direction du vent
- Gradient de pression atmosphérique
- Débit de source/de drain
- Tensions de radiations des vagues

D.4 SORTIES DU MODÈLE

Les résultats calculés par le modèle en fonction de l'espace x,y et du temps sont :

- Profondeur de l'eau
- Élévation de la surface
- Densités des flux
- Vitesses et direction des courants

Finalement, le module MIKE21-HD fournit l'information hydrodynamique requise pour les autres modules du système MIKE21:

- MIKE 21 AD (Advection - dispersion)
- MIKE 21 WQ (Qualité des eaux)
- MIKE 21 EU (Eutrophication)
- MIKE 21 ME (Métaux traces)
- MIKE 21 PA (Particules)
- MIKE 21 ST et MT (transport non-cohésif et cohésif)

D.5 RÉFÉRENCES:

Sur l'hydraulique générale:

- Chow, T V (1959) Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York.
 Lamb, H (1945) Hydrodynamics, Dover, New York.
 Milne-Thomson, L M (1950) Theoretical Hydrodynamics, Macmillan, New York.
 Phillips, O M (1966) The Dynamics of the Upper Ocean, Cambridge University Press.
 Rouse, H (1946) Elementary Mechanics of Fluids, John Wiley and Sons, New York.
 Rouse, H (editor) (1959) Advanced Mechanics of Fluids, Wiley, New York.
 Schlichting, H (1960) Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York.
 Streeter, V L (1961) Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill, London.
 Svendsen, I A & Jonsson, I G (1976) Hydrodynamics of Coastal Regions, Technical University of Denmark.
 U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1984) Shore Protection Manual.

Sur le calcul numérique en hydraulique:

- Abbott, M B (1979) Computational Hydraulics, Elements of the Theory of Free Surface Flows, Pitman, London.
 Abbott, M B & Basco, D R (1989) Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers, Longman, London, and Wiley, New York.
 Abbott, M B & Cunge, J A (1982) Engineering Applications of Computational Hydraulics, Pitman, London.

Abbott, M B, McCowan, A D & Warren, I R (1981) Numerical Modelling of Free-Surface Flows that are Two-Dimensional in Plan. Transport Models for Inland and Coastal Waters, edited by Fischer, H.B., Academic Press, New York.

Sur la viscosité turbulente (Eddy Viscosity) :

- Abbott, M B & Larsen, J (1985) Modelling Circulations in Depth-integrated Flows. Journal of Hydraulic Research, 23, pp 309-326 and 397-420.
- Aupoix, B (1984) Eddy Viscosity Subgrid Scale Models for Homogeneous Turbulence. In Macroscopic Modelling of Turbulent Flow, Lecture Notes in Physics, Proc. Sophie-Antipolis, France.
- Falconer, R A & Mardapitta-Hadjipandeli (1987) Bathymetric and Shear Stress Effects on an Island's Wake: A computational Study. Coastal Engineering, 11, pp 57-86.
- Horiuti, K (1987) Comparison of Conservative and Rotational Forms in Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow. Journal of Computational Physics, 71, pp 343-370.
- Leonard, A (1974) Energy Cascades in Large-Eddy Simulations of Turbulent Fluid Flows. Advances in Geophysics, 18, pp 237-247.
- Lilly, D K (1966) On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence. NCAR Manuscript No. 123, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Madsen, P A, Rugbjerg, M & Warren, I R (1988) Subgrid Modelling in Depth Integrated Flows. Coastal Engineering Conference, 1, pp 505-511, Malaga, Spain.
- Smagorinsky, J (1963) General Circulation Experiment with the Primitive Equations. Monthly Weather Review, 91, No. 3, pp 99-164.
- Wang, J D (1990) Numerical Modelling of Bay Circulation. The Sea, Ocean Engineering Science, 9, Part B, Chapter 32, pp 1033-1067.

Sur l'analyse des marées:

- Doodson, A T & Warburg, H D (1941) Admiralty Manual of Tides, Her Majesty's Stationary Office, London.
- Dronkers, J J (1964) Tidal Computations, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Godin, G (1972) The Analysis of Tides, Liverpool University Press.
- Pugh, D T (1987) Tides, Surges and Mean Sea-Level, A Handbook for Engineers and Scientists, Wiley, UK.
- Schwiderski, E W (1978) Global Ocean Tides, Part I-X, Naval Surface Weapons Center, Virginia, USA.

Sur l'effet des vents:

- Duun-Christensen, J T (1975) The Representation of the Surface Pressure Field in a Two-Dimensional Hydrodynamic Numerical Model for the North Sea, the Skagerak and the Kattegat. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 28, pp 97-116.

- NOAA, National Weather Service (1972) Revised Standard Project Hurricane Criteria for the Atlantic and Gulf Coasts of the United States, Hurricane Research Memorandum HUR 7-120.
- Smith, S D & Banke, E G (1975) Variation of the Sea Drag Coefficient with Wind Speed. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101, pp 665-673, 1975.
- US Weather Bureau (1968) Meteorological Characteristics of the Probable Maximum Hurricane, Atlantic and Gulf Coasts of the United States, Hurricane Research Interim Report, HUR 7-97 and HUR 7-97A.

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

Le module MIKE21 ST est un modèle numérique qui calcule les taux de transport de sédiments non cohésifs (e.g. sable) sous l'action combinée des courants et des vagues. Les sédiments étudiés peuvent initialement avoir des tailles différentes et une gradation spatiale. Les courants qui transportent les sédiments sont causés par les marées, les vents, les vagues ou une combinaison des trois. L'effet des vagues déferlantes et non déferlantes est inclus dans le calcul des taux de transport.

Les taux de transport de sédiments sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau, les tailles et la gradation spatiale des sédiments et les variations spatio-temporelles des courants et des vagues dans la région étudiée. L'érosion et la déposition des sédiments peuvent ensuite être calculées par l'utilisateur à partir des gradients spatiaux des taux de transport de sédiments fournis par le modèle ST.

Deux formulations du transport de sédiment en présence de courants et de vagues sont offertes par le module ST: la formulation de Bijker et celle de l'institut hydraulique Danois (DHI) appelée formulation STP. C'est cette dernière qui a été adoptée dans la présente étude. Elle offre à son tour deux façons de calculer les taux de transport de sédiments. La première façon est basée sur une approche de plan bidimensionnel horizontal (2DH) dans lequel les taux sont calculés dans la direction du courant moyen, avec une composante transversale résultante de la pente du fond. La deuxième façon est basée sur une description quasi-tridimensionnelle (Q3D) de l'hydrodynamique et du transport de sédiment qui décompose le transport dans des directions perpendiculaire et parallèle au courant, et au rivage dans la zone de déferlement des vagues.

La méthode STP utilise des valeurs de transport de sédiment interpolées dans une « table de sédiment » avant la simulation à l'aide d'utilitaires de génération de table de sédiment offerts avec le module MIKE21-ST. Les valeurs de transport interpolées au préalable sont utilisées au cours de la simulation numérique et évitent l'effort de calcul additionnel si les mêmes transports doivent être calculés chaque fois que les mêmes paramètres de grains de sable, de vagues et de courants se présentent aux différents pas temporels de calcul.

Les données spatio-temporelles de courants et de vagues requises pour le calcul des taux de transport de sédiments doivent être calculées au préalable par les modules MIKE21-HD et MIKE-NSW (ou autres), respectivement.

Le schéma illustrant les différentes étapes du couplage entre les modules MIKE21-HD, MIKE21-NSW et MIKE21-ST, ainsi que les intrants et les extrants de chaque module, a été présenté à la figure 27.

La méthode STP est une méthode déterministe de calcul du transport de sédiment non cohésif sous l'effet combiné des courants et des vagues dans l'environnement côtier. La méthode a été documentée dans plusieurs publications scientifiques fournies à la fin de cette annexe. Cette méthode dite « intra-vague », c'est-à-dire qui décrit la situation de transport instantanée au

sein d'une période de vague, permet de tenir compte de l'influence des différences de phase entre l'écoulement ambiant, la tension de cisaillement sur le fond et la concentration de sédiment en suspension sur le transport de ce sédiment en suspension.

La base hydrodynamique du modèle ST repose sur la caractérisation de l'écoulement turbulent dans la couche limite du fond proposée par le modèle de Fredsoe (1984). Dans ce modèle, la tension de cisaillement sur le fond et le profil vertical du coefficient de viscosité turbulente dépendent tout deux de l'interaction non linéaire entre les courants côtiers et les courants près du fond associés aux vagues. Le modèle Fredsoe tient compte des variations temporelles de la tension de cisaillement sur le fond et de la turbulence associée aux vagues dans la couche limite du fond. Fredsoe suppose que le courant à l'extérieur de la couche limite dans son modèle adopte une distribution verticale logarithmique.

Les hauts niveaux de turbulence associés aux vagues près du fond offrent une résistance accrue aux courants. Cette résistance est paramétrée par un facteur de rugosité apparente k_w , associé aux vagues, supérieur au facteur de rugosité normalement associé au diamètre du grain de sédiment.

Dans l'approche classique 2DH, les profils verticaux du courant dans la colonne d'eau, pris en moyenne sur une période de vague, sont calculés à partir d'un profil logarithmique à l'intérieur et à l'extérieur de la couche limite de vagues. Dans l'approche Q3D, ces profils verticaux moyens sont calculés en intégrant la balance de force suivante :

$$\bar{\tau}(z) = \rho v_T \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right|$$

où la coordonnée vertical z est définie vers le haut à partir du fond, ρ est la densité de l'eau, v_T est le coefficient de viscosité turbulente, U est la vitesse moyenne du courant et τ est la tension de cisaillement sur la colonne d'eau.

Le taux de transport de sédiments non cohésifs q est calculé en ajoutant les taux de transport de sédiments en suspension q_s et de fond q_b (*bedload*),

$$\langle q_t \rangle = \langle q_s \rangle + \langle q_b \rangle$$

chaque taux étant calculé séparément. Les parenthèses $\langle \rangle$ indiquent que ces taux sont pris en moyenne sur la période de la vague.

Le taux de transport q_b est calculé en fonction du nombre sans dimension θ' mettant en rapport la tension de cisaillement au fond sur la friction superficielle (*skin friction*) :

$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)gd}$$

où s est la densité relative du sédiment, g est l'accélération de la gravité, d est le diamètre de la taille du grain et U'_f est la vitesse instantanée de cisaillement associée à la friction superficielle (ou vitesse de friction). Il est supposé ici que le transport au fond répond immédiatement à la tension de cisaillement dans des conditions d'écoulements transitoires, i.e. en présence de vagues.

Le taux de transport de sédiment en suspension instantané q_s est calculé par :

$$\bar{q}_s = \int_0^D \bar{u}(z,t) c(z,t) dz$$

où t est le temps, D est la profondeur de l'eau, c est la concentration de volume du sédiment en suspension et u est la vitesse de l'écoulement combiné des courants et vagues. La concentration instantanée du sédiment en suspension est obtenue de la solution de l'équation de diffusion suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_s \frac{\partial c}{\partial z}$$

où ε_s est le coefficient de diffusion du sédiment en suspension et w_s est la vitesse de chute du sédiment en suspension.

La condition limite au fond de l'équation ci haut est donnée en fonction de la concentration du sédiment c_b définie à $z=2d$. Deux formulations pour c_b sont implémentées dans MIKE21-ST : (1) la formulation déterministe de Engelund and Fredsoe (1976) où c_b est déterminé en fonction de θ' selon des considérations dynamiques définissant la manière dont la tension de cisaillement est transmise au fond, et (2) la formulation empirique de Zyserman and Fredsoe (1994). Ces deux formulations sont uniquement valides qu'en conditions d'écoulement en plan qui surviennent lorsque $\theta' > 0.8 - 1.0$. Pour des valeurs plus petites de $\theta' < 0.8$, le fond sera couvert de vaguelettes de fond (*ripples*).

L'influence des vaguelettes de fond sur le transport de sédiments en suspension est pris en compte dans MIKE21-ST en modifiant la concentration près du fond c_b , la valeur du coefficient de diffusion turbulente près du fond et la rugosité du fond. Les valeurs modifiées de c_b et de ε_s sont basées sur des résultats expérimentaux de Nielsen (1979), alors que le coefficient de rugosité en conditions de vaguelettes est calculé selon Raudkivi (1988). La méthode STP convergera graduellement vers une description de fond plat à mesure que la tension de cisaillement ou le courant augmentera.

Dans la zone de déferlement, une source additionnelle de turbulence résultant de l'intense dissipation d'énergie lors du bris des vagues existera. Ceci est pris en considération par un modèle unidimensionnel tel que décrit par Deigaards et al. (1986). Pour des vagues irrégulières, la coexistence de vagues se brisant et déjà brisée sur cette source de turbulence est prise en compte en supposant l'existence d'une vague déferlante équivalente. Cette vague équivalente a une

hauteur H_m égale à la hauteur maximale permise pour une vague de période T avant qu'elle ne déferle à la profondeur locale D , selon la formulation de Battjes and Janssen (1978). La période de cette vague équivalente, appelée aussi période de dissipation T_{diss} définie par :

$$T_{diss} = \frac{T}{Q_b}$$

où Q_b est la fraction des vagues qui se brisent à cet endroit.

Finalement, l'effet de la gradation du sédiment sur le transport total de sédiments q_t est pris en compte selon un critère d'entraînement des sédiments du fond vers la suspension et traitant chaque taille de sédiment différemment selon une méthode décrite par Zyserman and Fredsoe (1996).

Références pour modèle MIKE21-ST, méthode STP

- Davies, A.G., Ribberink, J.S., Temperville, A. and Zyserman, J.A. 1997. Comparison between sediment transport models and observations made in wave and current flows above plane beds. *Coastal Engineering* 31, pp. 163-198.
- Deigaard, R. 1993. A note on the three-dimensional shear stress distribution in a surfzone. *Coastal Engineering* 20, pp. 157-171.
- Deigaard, R., Fredsoe, J., and Hedegaard, I.B. 1986. Suspended sediment in the surf zone. *Jour. of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp.115-128.
- Deigaard, R., Fredsoe, J., and Hedegaard, I.B. 1986. Mathematical model for littoral drift, *Jour. of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 112, No.3, pp. 351-369.
- Deigaard, R., Justesen, P. and Fredsoe, J. 1991. Modelling of undertow by a one-equation turbulence model. *Coastal Engineering* 15, pp.431-458.
- Elfrink, B., Broker, I., Deigaard, R., Asp Hansen, E. and Justesen, P. 1996. Modelling of 3D sediment transport in the surf zone. *Procs. 25th Int. Com. on Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 4, pp. 3805-3817. Orlando, FL, USA.
- Engelund, F. and Fredsoe, J. 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology*, 7, pp. 296-306.
- Fredsoe, J. 1984. The turbulent boundary layer in combined wave-current motion. *Journal of Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 100, No. HY8, pp. 1103- 1120.
- Fredsoe, J., Andersen, O.H., and Silberg, S. 1985. Distribution of suspended sediment in large waves, *Jour. of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. III, No. 6, pp.1041-1059.
- Justesen, P., Hansen, E.A., Broker, I. and Deigaard, R. 1994. Longshore and cross-shore velocity profiles in spilling breakers with an oblique angle of incidence. *Progress Report 75*, Dept. of Hydrodynamics & Water Resources (ISVA), Technical University of Denmark, pp. 41-54.
- Zysennan, J .A. and Fredsoe, J. 1992. Inclusion of the effect of graded sediment in a deterministic sediment transport model. *MAST G6M- Coastal Morphodynam1t1ics Final Workshop, Abstracts-in-depth*. Pisa, Italy.

- Zysennan, J.A. and Fredsoe, J. 1994. Data analysis of bed concentration of suspended sediment. *Jour. of Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No.9.
- Zysennan, J.A. and Fredsoe, J. 1996. Validation of a deterministic sediment transport model for sheet-flow conditions. Progress Report 76, Dept. of Hydrodynamics & Water Resources (ISV A), Technical University of Denmark, pp. 3-9.

