### Projet MTQ – UQAR/ISMER

Implantation de stations d'observation des conditions maritimes aux Îles-de-la-Madeleine pour l'analyse de solutions de protection de la route 199, secteurs de la baie de Plaisance et de la Pointe-aux-Loups

X014.1

# Vagues, courants, niveau d'eau et glace de mer aux Îles-de-la-Madeleine de juillet 2012 à juin 2013

**Rapport final** 

Urs Neumeier et Sylvain Joly

février 2014



Université du Québec à Rimouski Institut des sciences de la mer de Rimouski

**Référence complète** : Neumeier, U., Joly, S., 2014. *Vagues, courants, niveau d'eau et glace de mer aux Îles-de-la-Madeleine de juillet 2012 à juin 2013*. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, février 2014, 70 p.

## Résumé

L'érosion des berges aux Îles-de-la-Madeleine est une menace concrète pour le réseau routier, les infrastructures électriques et d'aqueduc, ainsi que les habitations. Deux secteurs de la route 199 sont particulièrement vulnérables : l'ouest de la Baie de Plaisance au sud de La Martinique et la Dune-du-Nord au nord-est de la Pointe-aux-Loups. Les vagues et les courants ont été mesurés au large de ces deux sites pour une durée d'un an, afin obtenir des nouvelles données pour calibrer les ouvrages de protection et pour alimenter des modèles hydrodynamiques. Cela permettra de tenir compte des modifications des conditions hivernales avec les changements climatiques.

Deux profileurs de courant / houlographes (ADCP, modèle AWAC-AST) ont été installés à 30 m de profondeur de juillet 2012 à juin/juillet 2013. Deux autres ADCPs ont été installés plus près de la côte à 12/17 m de profondeur de juillet à novembre 2012. Un houlographe à capteur de pression a été utilisé sur la même période devant la plage de La Martinique à 4 m de profondeur. Enfin un marégraphe a enregistré les niveaux d'eau dans le port de Grosse-Île Nord (marées et surcote) du côté nord-ouest des Îles-de-la-Madeleine.

Conformément à la configuration bathymétrique et géographique, les vagues sont les plus fortes au large de Pointe-aux-Loups du côté nord-ouest des Îles-de-la-Madeleine, qu'au large de la Baie de Plaisance. Sur le côté nord-ouest, la plus forte tempête a eu lieu le 25 décembre 2012 avec des vagues ( $H_{m0}$ ) de 6.0 m, avec huit autres tempêtes avec des vagues de plus de 5 m. Sur le côté sud-est au large de la Baie de Plaisance, la plus forte tempête a eu lieu le 17 février 2013 avec des vagues de 5.3 m. Il y a eu aussi huit autres tempêtes avec des vagues de sugues de plus de 3.4 m. La plupart des fortes tempêtes ont eu lieu en hiver (entre le 22 décembre et le 22 mars), ce qui illustre l'augmentation de l'impact des tempêtes hivernales due à la diminution du couvert de glace et de l'atténuation de vagues.

Les courants sont dominés par une cyclicité tidale avec des courants plus forts en surface. Les directions dominantes sont parallèles à la côte au large de Pointe-aux-Loups et au large de la Baie de Plaisance. Par contre, au site dans la Baie de Plaisance il y a souvent de la cisaille de courant : au fond de la colonne d'eau les courants sont plutôt entrants dans la Baie alors qu'en surface les courants sont plutôt sortants.

Les composantes harmoniques de la marée ont été déterminées à Grosse-Île Nord. Les plus fortes surcotes mesurées atteignaient 1.21 m au-dessus du niveau marin moyen le 22 mars 2013 et 1.10 m le 30 décembre 2012. Le niveau d'eau était 1% du temps plus haut que 0.57 m au-dessus du niveau marin moyen.

La saison de glace a duré environ 3 mois, du 24 janvier au 16 mars 2013 aux deux sites au large. La glace de mer était présente de manière plus ou moins prolongée durant plusieurs jours, mais jamais de façon permanente. En général les épaisseurs maximales mesurées ne dépassaient pas 2 m et les épaisseurs moyennes étaient inférieures au mètre. Au large de la Baie de Plaisance, les épaisseurs mesuraient généralement entre 20 et 50 cm, alors qu'elles étaient légèrement supérieures au large de Pointe-aux-Loup. Aux deux sites on relève la

présence de blocs de glace imposants de plusieurs mètres d'épaisseur (jusqu'à 5 m) de manière simultanée autour du 15 mars 2013.

Les vagues modélisées avec SWAN ont un bon agrément avec les observations au large de Pointe-aux-Loups. Par contre dans la Baie de Plaisance, qui est moins profonde et a une morphologie complexe, les performances de la modélisation sont moins bonnes. Les résultats pourraient probablement y être améliorés avec une bathymétrie plus précises et en ajustant mieux les coefficients de dissipation par friction.

## Remerciements

Les mouillages ont été préparés par Gilles Desmeules. Les opérations de terrain ont été réalisées par Urs Neumeier, Gilles Desmeules et Benoit Ruest en juillet 2012, par Urs Neumeier et Gilles Desmeules en novembre 2012, et par Gilles Desmeules et Bruno Cayouette en juin 2013.

Le pêcheur et plongeur Mario Déraspe a été très utile pour toutes les missions en mer ainsi que pour la récupération des mouillages A et C en plongée en juin/juillet 2013.

Le traitement des données et le contrôle de qualité ont été effectué par Urs Neumeier et Sylvain Joly.

Simon Senneville a fourni la bathymétrie utilisée pour construire les grilles utilisées avec le modèle numérique SWAN.

Ce projet est financé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) en vertu d'un contrat de recherche entre le MTQ et l'Université du Québec (UQAR)/Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER). Michel Michaud a assuré la coordination administrative du projet au MTQ.

## Table des matières

Résumé	3
Remerciements	5
Table des matières	6
Liste des figures	7
Liste des tableaux	
1 Introduction	11
2 Activités de terrain	11
2. Activites de terrain	14 1 <i>1</i>
2.2 Descriptions des mouillages	14
2.2. Descriptions des mouillages	17
2.5 Trogrammation des mountages	17 20
2.5. Marégranhe	20
3. Données de vagues	
3.1. Traitement des données de vagues	
3.2. Explication du contrôle de qualité	
3.3. Liste des paramètres de vagues	
3.4. Illustrations des données de vagues	29
4. Données de courant	
4.1. Traitement des données de courant	
4.2. Illustration des données de courant	
5 Données de niveau d'eau	42
5 1 Traitement des données du marégraphe	42
5.1 Illustration des données de niveau d'eau	
	10
6. Donnees de glace	
6.1 Traitement des données de glaces	
6.2 Interpretation des données de glace	
7. Modélisation des vagues	
7.1 Configuration des modélisations	57
7.2 Résultat de la modélisation	59
8. Liste des fichiers de données	66
Références	69

## Liste des figures

Figure 1.	Carte générale avec la position des mouillages (points rouges) et du marégraphe de Grosse-Île-Nord (étoile rouge).	15
Figure 2.	Positions des mouillages A, B et E.	16
Figure 3.	Positions des mouillages C, D et F	16
Figure 4.	Mouillage C avec le support MTRBM, l'AWAC 600 kHz, ainsi que la double bouée parachute et le largueur ORE CART utilisés seulement pour l'installation du mouillage.	17
Figure 5.	Mouillage D avec l'AWAC 1 MHz sur le tripode en fibre de verre	18
Figure 6.	Mouillage F avec l'houlographe-marégraphe TWR-2050 monté sur le support.	18
Figure 7.	Position du marégraphe dans le port de Grosse-Ile-Nord.	21
Figure 8.	Fixation du marégraphe contre le quai de Grosse-Ile-Nord de juillet à novembre 2012. A : schéma du montage avec le marégraphe placé à la base du tube ABS. B : photographie du tube ABS fixé contre le quai	23
Figure 9.	Fixation du marégraphe contre le quai de Grosse-Ile-Nord de novembre 2012 à juin 2013. A : schéma du montage avec le marégraphe placé à la base du tube ABS. B : photographie du tube ABS fixé contre le quai	24
Figure 10. S	Séries temporelles des hauteurs et directions de vagues mesurées aux sites A à E. Pour les directions, les vagues de faibles amplitudes sont en couleurs plus pâles	32
Figure 11. F	Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues Hm0 aux sites A à E pour le premier déploiement (juillet à novembre 2012) et aux sites A et C pour l'ensemble du projet (juillet 2012 à juin/juillet 2013)	33
Figure 12. F	Rose de vagues de juillet 2012 à juin/juillet 2013 pour les sites A (récif Perle) et C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction	34
Figure 13. F	Rose de vagues de juillet à novembre 2012 pour les sites A (récif Perle), B (Baie de Plaisance), C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur) et D (devant Dune-du-Nord, 17 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction	35

Figure 14. Roses de vagues mensuelles pour le site A (récif Perle). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction	36
Figure 15. Roses de vagues mensuelles pour le site C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction	37
Figure 16. Profils de vitesse enregistrés au site D (devant Dune-du-Nord). Les données marquées comme mauvaises sont en noir.	40
Figure 17. Roses des courants (destination des courants) enregistrées au site A et C (juillet 2012 à juin/juillet 2013) et aux sites B et D (juillet à novembre 2012)	41
Figure 18. Niveau d'eau mesuré dans le port de Grosse-Île-Nord pour la période juillet 2012 à juin 2013, prédictions de marées selon analyse harmonique, et surcote/décote observée.	43
Figure 19. Fréquence d'inondation selon les données mesurées dans le port de Grosse- Île-Nord de juillet 2012 à juin 2013 (l'ensemble de données et détail sur les 1.2 % les plus hauts). Soustraire 0.434 m pour obtenir l'altitude selon le zéro des cartes terrestres.	44
Figure 20. Couverture et épaisseur de glace aux sites A et C durant l'hiver 2012/2013. Les lettres "a" et "b" indiquent les jours représentés sur les cartes à la Figure 25.	50
Figure 21. Couverture et épaisseur de glace aux sites A et C, détail de la période du 24 janvier au 12 février 2013. La lettre "a" indique le jour représenté sur la carte à la Figure 25a.	51
Figure 22. Couverture et épaisseur de glace au site A, comparaison des hivers 2011/2012 et 2012/2013	52
Figure 23. Exemples de bursts ayant mesuré de la glace au site A. Les vagues, qui sont présentes aux exemples (a) et (b), font osciller verticalement les floes de glaces (l'épaisseur de glace est moins variable). L'axe horizontal est le temps (1024 s pour chaque burst), qui a été converti en distance à partir de la vitesse des courants de surface.	53
Figure 24. Exemples de bursts ayant mesuré de la glace au site C. L'axe horizontal est le temps (1024 s pour chaque burst), qui a été converti en distance à partir de la vitesse des courants de surface.	54

Figure 25.	Cartes du Service canadien des glaces montrant le stade de formation de glace dans le golfe 9 février et le 15 mars 2013. Le type, l'épaisseur et la concentration de glace est indiquée dans le code de l'œuf (cf. Frequest, 2005)	55
Figure 26.	Extension des deux domaines modélisés de Pointe-aux-Loups et de la Baie de Plaisance, ainsi que positions des sites A à F	56
Figure 27.	Vue 3D de la bathymétrie du domaine de Pointe-aux-Loups. Une altitude arbitraire de 9 m a été attribuée au domaine terrestre	57
Figure 28.	Vue 3D de la bathymétrie du domaine de la Baie de Plaisance. Une altitude arbitraire de 9 m a été attribuée au domaine terrestre et à la lagune de Havre-aux-Maisons	58
Figure 29.	Vagues modélisées par SWAN sur le domaine de la Baie de Plaisance (a) à 2012-12-28 18:00 et (b) à 2013-05-18 16:00. Les hauteurs $H_{m0}$ sont représentées avec un code de couleur et les directions de propagation sont indiquées avec les flèches.	51
Figure 30.	Vagues modélisées par SWAN sur le domaine de Pointe-aux-Loups (a) à 2012-12-15 15:00 et (b) à 2012-12-25 02:00. Les hauteurs $H_{m0}$ sont représentées avec un code de couleur et les directions de propagation sont indiquées avec les flèches.	52
Figure 31.	Série temporelle des hauteurs de vagues mesurées aux sites A, B et E (en bleu) et de hauteurs modélisées avec SWAN aux sites B et E (en vert)	53
Figure 32.	Série temporelle des hauteurs de vagues mesurées aux sites C et D (en bleu) et de hauteurs modélisées avec SWAN aux sites B et F (en vert)	54
Figure 33.	Comparaison entre les données mesurées aux sites B, D et E et celles modélisée avec SWAN pour les mêmes sites. Trois classes de hauteurs de vagues sont représentées avec un code de couleur (bleu < vert < rouge) 6	55

## Liste des tableaux

Tableau 1.	Positions des mouillages.	14
Tableau 2.	Programmation des profileurs de courants AWAC (sites A à D)	19
Tableau 3.	Programmation des houlographes TWR-2050.	20
Tableau 4.	Altitude du capteur de pression des marégraphes installés à Grosse-Île	22
Tableau 5.	Premier et dernier bursts de vagues pour chaque déploiement d'AWAC	25
Tableau 6.	Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues.	27
Tableau 7.	Signification des flags d'erreur du contrôle de qualité des données de vagues.	27
Tableau 8.	Les 20 plus fortes tempêtes mesurées entre juillet 2012 et juin/juillet 2013 aux sites A et C	31
Tableau 9.	Caractéristiques des profils de courant pour chaque déploiement d'AWAC (début, fin, profondeur moyenne et hauteur de la tête de l'instrument au- dessus du fond marin).	38
Tableau 10.	Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des données du niveau d'eau enregistré par le marégraphe de Grosse-Île Nord de juillet 2012 à juin 2013, les composantes les plus importantes sont marquées en gras. Erreur estimée de l'amplitude et de la phase avec un intervalle de confiance de 95%.	45
Tableau 11.	Indicateur de performance de la modélisation par SWAN au site B, D et E comparé aux données mesurées aux mêmes sites pour la hauteur, la période et la direction des vagues.	60

## **1. Introduction**

Les Îles-de-la-Madeleine sont constituées d'une série d'îles "hautes", collines culminant entre 10 et 150 m principalement en grès permo-carbonifère, dont la plupart sont reliées entre eux par des cordons dunaires. Ces derniers se présentent souvent sous forme de doubles tombolos et délimitent plusieurs lagunes. La route 199, qui désert les principales localités et qui relie toutes les îles hautes sauf l'Île d'Entrée et l'île Brion, a été construite sur ces cordons dunaires.

Les cordons dunaires sont formés uniquement de sable meuble; de par leur nature ils sont mobiles : d'une part ils peuvent reculer ou s'avancer pour s'ajuster ainsi aux conditions hydrosédimentaires, d'autre part ils peuvent être rompus par des brèches lors de tempêtes, brèches qui se referment généralement les années subséquentes, mais qui peuvent aussi se développer comme nouvelles passes (Paskoff, 1998).

L'ensemble des îles est soumis à l'érosion côtière, aussi bien les côtes rocheuses (falaises de grès) avec un recul relativement lent, que les plages et cordons dunaires avec par endroit des reculs nettement plus rapides (Grenier et Dubois, 1992). Il s'agit d'un processus naturel, qui est toutefois une menace concrète pour le réseau routier, les infrastructures électriques et d'aqueduc, ainsi que les habitations (Roche, 2011). L'érosion semble augmenter ces dernières années suite à l'augmentation des tempêtes, la diminution des glaces hivernales et la hausse du niveau marin relatif (Savard et al., 2008). À terme les activités socio-économiques de la région sont grandement menacées.

Durant l'hiver la banquise côtière joue un rôle de protection et d'amortissement de l'énergie des vagues lors des tempêtes. La banquise réduit également la surface de transfert d'énergie et inhibe ainsi la formation des vagues. Au cours de la dernière décennie on a observé une réduction de la saison de glace dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine (Bajzak et al. 2011, Galbraith et al. 2013), associée à une augmentation de la fréquence des années de "glace mince" (Johnston et al. 2005). La modification des patrons de glace, tant sur la durée que sur l'épaisseur, entraîne donc une plus grande vulnérabilité du littoral lors de tempêtes hivernales à fort potentiel destructeur (par exemple, 24 mars 2010, 21 décembre 2010, 27 janvier 2011).

La route nationale 199, d'une longueur totale de 85 km, longe la mer sur quelque 30 km, où elle est partiellement menacée. D'ailleurs, les interventions en vue de protéger la route 199 se sont intensifiées depuis une vingtaine d'années. Des ouvrages de protection ont été construits sur certains sites exposés aux actions de la mer afin de garantir la pérennité des tombolos et de la route 199. Un inventaire préliminaire de terrain réalisé en 2008 par la direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du Ministère des Transport, a permis de déterminer vingt sites vulnérables à l'érosion côtière le long de la route 199 aux Îles-de-la-Madeleine, totalisant une longueur de 10,9 km (MTQ, 2009).

Deux secteurs sont présentement particulièrement menacés par l'érosion côtière aux Îles-dela-Madeleine : le cordon littoral (Dune du Havre-aux-Basques) à l'ouest de la Baie de Plaisance au sud de La Martinique, et la Dune-du-Nord au nord-est de la Pointe-aux-Loups (MTQ, 2009, Jolicoeur et O'Carroll, 2007). L'action de la mer y met en danger la pérennité de la route 199, rendant nécessaire des travaux de réparation récurrents après les événements de tempêtes et justifiant la recherche de solutions de protection durable à long terme.

L'érosion des berges et le transport sédimentaire en zone littorale dépendent fortement des vagues et des niveaux d'eau. D'une part, lors de tempêtes majeures, les vagues peuvent déplacer d'importantes quantités de sédiments vers le large ou par-dessus le cordon littoral vers la lagune. Les niveaux d'eau dus aux marées et aux surcotes modulent fortement l'action des vagues sur le littoral. Lors de faibles niveaux d'eau, une partie de l'énergie des vagues est dissipée sur les barres d'avant-côte. Par contre, les très hauts niveaux d'eau atteints par les surcotes durant certaines tempêtes permettent aux vagues d'agir sur le haut de plage, qui n'est pas en équilibre avec ce niveau d'énergie, provoquant des érosions menaçant directement les infrastructures près du trait de côte (USACE, 2002).

D'autre part, les vagues contribuent à la dérive littorale (transport sédimentaire le long de la côte). Les secteurs en reculs sont généralement les secteurs en déficit sédimentaire à cause de la dérive littorale, où localement l'exportation de sédiments domine par rapport à l'importation (Drapeau et Mercier, 1990).

Malgré la contribution importante des vagues aux processus d'érosion affectant les Îles-dela-Madeleine et menaçant en particulier la route 199 à La Martinique et à la Dune-du-Nord, très peu de données existent sur les conditions de vagues aux deux sites. Pourtant la protection des secteurs sensibles et la calibration des ouvrages de protection nécessitent une connaissance adéquate du climat de vagues, avec en particulier la quantification de l'intensité des évènements extrêmes ainsi que leur période de récurrence. Un climat de vague est normalement basé sur des enregistrements multi-annuels. Malheureusement, il n'existait pas d'observation sur de longues périodes et couvrant notamment la saison hivernale.

La modélisation numérique peut partiellement compenser le manquent de données physiques; elle peut aussi donner des informations sur la propagation des vagues dans la zone côtière et sur le transport sédimentaire en résultant. Toutefois les modèles numériques côtiers (par exemple : Mike21, Delft3D) doivent être alimentés avec les conditions de vagues aux frontière du domaine modélisé, alors que le climat de vague du golfe du Saint-Laurent est mal connu. D'autres modèles (par exemple : GENER, WAM/PROMISE, SWAN) qui prédisent le climat de vagues au large, mais ils n'ont été que partiellement validés pour le golfe du Saint-Laurent et des doutes existent sur l'exactitude de leurs résultats. De plus, les modèles numériques côtiers peuvent produire de bons résultats, mais ils font appel à plusieurs formules ayant des coefficients qui nécessitent d'être calibrés avec des données de terrain.

C'est pourquoi le ministère des Transports du Québec, en association avec l'Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, a mis en place un programme d'acquisition de données océanographiques devant les secteurs menacés de la route 199 pour une durée d'un an. Au total 4 profileurs de courant (ADCP, modèle AWAC-AST) ont été immergés pour une durée de 4 mois à 1 an, au large du secteur de Pointe-aux-

Loups, du Récif Perle et de la Baie-de-Plaisance, afin de mesurer les vagues, les courants et les glaces hivernales. Un houlographe à pression a été placé devant le secteur de la Martinique durant 4 mois pour mesurer les vagues près de la côte. Enfin, un marégraphe a été installé dans le port de Grosse-Île pour mesurer les marées et les surcotes sur la façade nord-ouest des Îles-de-la-Madeleine.

Un résumé des résultats du projet a été présenté sous forme d'affiche au Forum Science Environnement du MDDEFP qui s'est tenu le 16 octobre 2013 à Québec, ainsi qu'à la réunion annuelle de Québec Océan les 14 et 15 novembre 2013 à Rivière-du-Loup.

Ce rapport final décrit les instruments et les méthodes utilisées et résume les résultats obtenus. Il est accompagné par une série de fichiers de données qui sont énumérés à la section 6. Trois rapports d'étapes ont été produits au cours du projet en juillet 2012, en janvier 2013 et en août 2013. Ils contiennent plus d'information sur le déroulement détaillé des trois missions de terrain.

## 2. Activités de terrain

#### 2.1 Positions des mouillages

Les mouillages A, B et E sont situés au sud-est des Îles-de-la-Madeleine et mesurent les vagues touchant la Baie de Plaisance et la Martinique, alors que les mouillages C, D et F sont situés au nord-est des Îles-de-la-Madeleine au large de Pointe-aux-Loups et de la Dune-du-Nord (Figure 1, Tableau 1). Tous les mouillages ont été installés de juillet à novembre 2012. Seulement les mouillages profonds A et C ont été installé durant l'hiver, à savoir de novembre 2012 à juin 2013.

Le **mouillage** A est à 30 m de profondeur au large du récif La Perle, le premier haut-fond au sud-est des Îles-de-la-Madeleine. Il mesure les vagues du large avant qu'elles n'interagissent fortement avec la bathymétrie. Le **mouillage** B est au centre de la Baie de Plaisance par 11.5 m de profondeur (Figure 2). Il mesure les vagues qui atteindront la plage de la Martinique au fond de la Baie de Plaisance et la face est de l'île de Cap-aux-Meules. Le **mouillage** E est situé 950 m devant la plage de la Martinique à 4 m de profondeur.

Le **mouillage** C est à 28 m de profondeur à 9.5 km au large de la Dune-du-Nord, plus précisément au large du secteur en risque d'érosion juste au nord-est de Pointe-aux-Loups (Figure 3). Ce mouillage mesure les vagues au large sur le plateau madelinien. Le **mouillage** D est à 17 m de profondeur à 2.3 km devant la Dune-du-Nord. Il a été installé 320 m plus au large que prévu initialement pour éviter une zone de roches repérée sur l'échosondeur du bateau. Le **mouillage** F a été placé sur la crête d'une barre d'avant-côte à 600 m du rivage. Toutefois il n'a pas pu être récupéré.

ID	latitude	longitude	Profon- deur*	MTM 4 X	MTM 4 Y
mouillages installés en juillet et récupérés en novembre 2012					
А	47° 20.786' N	61° 31.688' W	29.5	302674.4	5245237.3
В	47° 19.759' N	61° 51.208' W	11.5	278085.1	5243394.7
С	47° 35.972' N	61° 46.868' W	28.1	283660.6	5273412.0
D	47° 33.460' N	61° 42.407' W	17	289238.8	5268740.1
E	47° 19.495' N	61° 55.403' W	4	272798.1	5242931.9
F #	47° 32.789' N	61° 41.471' W	4.8	290409.7	5267493.8
mouillages installés en novembre 2012 et récupéré en juin-juillet 2013					
А	47° 20.792' N	61° 31.704' W	29.5	302654.2	5245248.4
С	47° 35.983' N	61° 46.871' W	28.1	283656.9	5273432.4

Tableau 1. Positions des mouillages.

\* Profondeur en mètre sous le zéro des cartes marines.

<sup>#</sup> Le mouillage F n'a jamais pu être récupérer.



Figure 1. Carte générale avec la position des mouillages (points rouges) et du marégraphe de Grosse-Île-Nord (étoile rouge).



Figure 2. Positions des mouillages A, B et E.



Figure 3. Positions des mouillages C, D et F.

#### 2.2. Descriptions des mouillages

Les **mouillages A et C** sont constitués des éléments suivants (masse totale environ 180 kg, Figure 4) :

- un support de mouillage antichalutage en fibre de verre (modèle MTRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×123×47 cm), incluant une bouée pour la récupération (diamètre 28 cm, couleur jaune pour le mouillage A, ou couleur brun-rouille pour le mouillage C, avec autocollants réflecteurs) attachée à une corde en Spectra de ~80 m, et des lests de plomb,
- un déclencheur acoustique, modèle 867-A de la firme Benthos,
- un profileur de courant avec options vagues et glace, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb, le sommet de la tête est situé 52 cm au-dessus de la base du support,
- deux caissons de batteries avec au total quatre batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC.



Figure 4. Mouillage C avec le support MTRBM, l'AWAC 600 kHz, ainsi que la double bouée parachute et le largueur ORE CART utilisés seulement pour l'installation du mouillage.

Les mouillages B et D sont constitués des éléments suivants (Figure 5) :

- un support de mouillage tripode lesté de plomb (modèle en aluminium de MSI pour le mouillage B, modèle Seaspider en fibre de verre de Oceanscience pour le mouillage D),
- un profileur de courant avec options vagues et glace, modèle AWAC-AST 1 MHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb, le sommet de la tête est situé 45 cm au-dessus de la base du support)
- un caisson de batteries avec deux batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC
- une ligne de fond avec une ancre pour la récupération du mouillage.



Figure 5. Mouillage D avec l'AWAC 1 MHz sur le tripode en fibre de verre.

Les mouillages E et F sont constitués des éléments suivants (Figure 6) :

- un (pour le mouillage E deux) houlographe-marégraphe (modèle TWR-2050 de RBR),
- un support fait d'une plaque de base triangulaire, une fixation pour l'instrument et trois bras horizontaux plombés.
- une ligne de fond avec une ancre pour la récupération du mouillage.

![](_page_17_Picture_6.jpeg)

Figure 6. Mouillage F avec l'houlographe-marégraphe TWR-2050 monté sur le support.

#### 2.3 Programmation des mouillages

Les profileurs de courants ont été programmés pour enregistrer un burst de vague toutes les heures. Ces bursts duraient 17 minutes pour les mouillages profonds (sites A et C), et 10 minutes pour les mouillages à 12-17 m de profondeurs (sites B et D). Les instruments ont aussi mesuré un profil de vitesse sur l'ensemble de la colonne d'eau toutes les 20 minutes, avec des cellules de 2 m aux sites A et C, et des cellules de 1 m aux sites B et D.

	Juillet -novembre 2012			Novembre 2012-juin 2013		
	Site A	Site B	Site C	Site D	Site A	Site C
	Récif Perle	Baie de	Dune-du-Nord	Dune-du-Nord	Récif Perle	Dune-du-Nord
	30 m	Plaisance 12 m	28 m	17 m	30 m	28 m
Nom de fichier	IMA12A	IMB12A	IMC12A	IMD12A	IMA12B	IMC12B
Instrument	AWAC 600	AWAC 1	AWAC 600	AWAC 1	AWAC 600	AWAC 600
	kHz	MHz	kHz	MHz	kHz	kHz
Head ID	WAV 6465	WAV 5999	WAV 6136	WAV 5720	WAV 5971	WAV 6465
Profils de vitesse						
Intervalle entre profils	20 min.	idem	idem	idem	20 min.	idem
Hauteur cellules	2 m	1 m	2 m	1 m	2 m	idem
Nombre de cellules	20	idem	idem	idem	20	idem
Blanking distance	0.5 m	0.4 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m	idem
Période moyennée	100 s	idem	idem	idem	100 s	idem
Measurement load	50 %	idem	idem	idem	50 %	idem
Power level	high	idem	idem	idem	high	idem
Coordinate system	ENU	idem	idem	idem	ENU	idem
Salinité	30	idem	idem	idem	30	idem
Vagues						
Intervalle entre mesures	60 minutes	idem	idem	idem	60 minutes	idem
Fréquence	1 Hz / 2 Hz *	2 Hz / 4 Hz <sup>#</sup>	1 Hz / 2 Hz *	$2$ Hz / $4$ Hz $^{\#}$	1 Hz / 2 Hz *	idem
Durée	17 min.	10 min.	17 min.	10 min.	17 min.	idem.
Démarrage UTC	2012-07-05	2012-07-05	2012-07-06	2012-07-06	2012-11-05	2012-11-07
	02:00	02:00	03:00	03:00	13:00	10:00
Fuseau horaire	UTC	idem	idem	idem	UTC	idem
Batteries pour 180 jours #	2.84	1.80	2.84	2.04	4.00	idem
Mémoire pour 180 jours #	107.9 MB	123.9 MB	107.9 MB	124.1 MB	151.6 MB	idem
Mise à l'eau UTC	2012-07-05 15:42	2012-07-05 12:15	2012-07-06 13:50	2012-07-06 13:22	2012-11-05 16:44	2012-11-07 15:32
Récupération UTC	2012-11-05 16:05	2012-11-05 14:10	2012-11-07 15:05	2012-11-07 16:10	2013-07-15 15:45	2013-08-20 17:50

Tableau 2. Programmation des profileurs de courants AWAC (sites A à D).

\* Mesure des vitesses orbitales à 1 Hz et mesure de la hauteur d'eau par AST à 2 Hz.

<sup>#</sup> Mesure des vitesses orbitales à 2 Hz et mesure de la hauteur d'eau par AST à 4 Hz.

Les houlographes TWR-2050 (site E et F) ont été programmés pour enregistrer un burst de vagues de 8.5 minutes à 2 Hz toutes les deux heures et pour mesurer le niveau d'eau toutes les 10 minutes (moyenne des mesures à 2 Hz durant une minute). Avec cette programmation, l'occupation de la mémoire est de 99.9 % et la consommation de batterie est de 977 mAH pour 7 mois. Au site E, deux houlographes installés sur le support de mouillage ont démarré avec une heure de décalage entre eux, de manière à obtenir enregistrer un burst de vague toutes les heures.

Numéro de	Démarrage	Mise à l'eau	Récupération
série	UTC	UTC	UTC
21547	2012-07-04 00:00	2012-07-05 12:42	2012-11-05 13:45
21548	2012-07-04 01:00	2012-07-05 12:42	2012-11-05 13:45
12544	2012-07-04 00:00	2012-07-06 13:07	jamais retrouvé
	Numéro de série 21547 21548 12544	Numéro de série         Démarrage UTC           21547         2012-07-04 00:00           21548         2012-07-04 01:00           12544         2012-07-04 00:00	Numéro de série         Démarrage UTC         Mise à l'eau UTC           21547         2012-07-04 00:00         2012-07-05 12:42           21548         2012-07-04 01:00         2012-07-05 12:42           12544         2012-07-04 00:00         2012-07-06 13:07

Tableau 3. Programmation des houlographes TWR-2050.

#### 2.1. Installation et récupération des mouillages

Trois missions de terrain se sont déroulées en juillet 2012, en novembre 2012 et en juin 2013. La récupération du dernier mouillage a finalement eu lieu en juillet 2013.

Tous les mouillages et le marégraphe ont été installés lors d'une mission du 3 au 9 juillet 2012 à laquelle participait Urs Neumeier, Gilles Demeules et Benoit Ruest. Les mouillages ont été installés avec le bateau *Louise-Odile* du pêcheur Mario Déraspe. Les mouillages A, B et E ont été installés le 5 juillet 2012, les mouillages C, D et F le 6 juillet 2012, le marégraphe les 6 et 7 juillet 2012.

Les instruments ont été récupérés et certains réinstallés lors d'une mission du 4 au 9 novembre 2012 à laquelle participait Urs Neumeier et Gilles Demeules. Le travail en mer a été effectué avec le bateau *Louise-Odile* du pêcheur Mario Déraspe. Les mouillages A, B et E ont été récupérés le 5 novembre 2012 et le mouillage A réinstallé le même jour pour l'hiver. L'instrument du marégraphe a été changé le 6 novembre. Les mouillages C et D ont été récupérés le 7 novembre et le mouillage C réinstallé le même jour pour l'hiver.

Le mouillage F, qui avait été placé en juillet 2012 à 5 m de profondeur sur une barre subtidale parallèle à la côte très exposée de la Dune-du-Nord, n'a pas été retrouvé en novembre 2012. Il consistait en un capteur de pression RBR TWR-2050 fixé sur une structure très basse (hauteur totale ~15 cm) avec une ligne de fond. Ce mouillage peut avoir été déplacé ou plus probablement simplement enfoui par le sédiment sableux.

Une mission de terrain à laquelle participait Gilles Demeules et Bruno Cayouette a été réalisée du 17 au 21 juin 2013 pour récupérer les mouillages A et C ainsi que le marégraphe. Le travail en mer a été effectué avec le bateau *Jason Jeff* du pêcheur Donald Poirier, avec aussi l'aide du pêcheur-plongeur Mario Déraspe. Le 19 juin la récupération du mouillage A (récif La Perle) est tentée sans succès. Le lendemain, jeudi 20 juin, tout

l'équipement du marégraphe de Grosse-Île-Nord est démonté en avant-midi, l'après-midi le mouillage C (devant Dune-du-Nord) est récupéré, mais seulement grâce à l'intervention de Mario Déraspe (pris à bord par précaution). En effet, comme pour le mouillage A le déclencheur acoustique du mouillage C répond présent et confirme avoir relâchée la bouée nécessaire pour la récupération, mais cette bouée n'apparaît pas en surface. C'est seulement quand le plongeur déplace du sédiment et des coquilles accumulées au-dessus de la bouée que celle-ci remonte.

Le mouillage A a finalement été récupéré le 15 juillet par le plongeur Mario Déraspe avec le bateau *Jason Jeff* du pêcheur Donald Poirier lorsque les conditions de mer étaient favorables. Le plongeur a pu facilement dégager la bouée qui était légèrement coincée.

#### 2.5. Marégraphe

Le marégraphe a été installé dans la partie nord-est du port de Grosse-Île-Nord (aussi appelé Leslie, 47° 37.675' N, 61° 30.865' W, Figure 1 et Figure 7). Du 6 juillet au 6 novembre 2012 il s'agissait d'un marégraphe modèle TWR-2050 de RBR (numéro de série 21549), puis du 6 novembre 2012 au 20 juin 2013 d'un marégraphe RBRvirtuoso (numéro de série 52709). Chacun des instruments a été placé dans un tube vertical en ABS de 3.7 m (diamètre intérieur de 5 cm pour le TWR-2050, et de 7.5 cm pour le RBRvirtuoso) fermé aux extrémités et percé de plusieurs trous). Le tube ABS a été fixé contre le quai entre les deux premières poutres verticales du dernier segment de quai au nord-est du port (Figure 8 et Figure 9). Le marégraphe a été placé dans le bas du tube ABS, avec le capteur de pression à 10 cm de la base du tube, à environ 1.84 m sous le zéro des cartes marine pour le TWR-2050, et environ 1.81 m sous le zéro pour le RBRvirtuoso (d'après le relevé topographique, cf. ci-dessous). Les deux marégraphes ont été programmés pour prendre une mesure du niveau d'eau (moyenné sur une minute) toutes les cinq minutes.

![](_page_20_Picture_4.jpeg)

Figure 7. Position du marégraphe dans le port de Grosse-Ile-Nord.

Un baromètre enregistreur (modèle Barologger Edge de Solinst, numéro de série 2010427, CA 34216) a enregistré la pression et la température de l'air toutes les 10 minutes pendant toute la durée de déploiement des marégraphes. Il a été placé dans un bâtiment du port de Grosse-Île jusqu'au 24 juillet 2012, puis déplacé dans un autre bâtiment du port pour la durée restante.

Des relevés topographiques ont été réalisés le 7 juillet et le 6 novembre 2012 avec un DGPS Promark 3 (Thales / Magellan) pour obtenir l'altitude du marégraphe. En utilisant les bornes géodésique M01L9057 (sur le socle d'un cabanon à l'ouest du port) et 83L9519 (sur la dalle du quai à proximité du marégraphe), l'altitude du bord du quai à l'aplomb du marégraphe et le sommet des deux tubes ABS ont été déterminés (cf. rapports d'étape 1 et 2).

Pour calibrer exactement la position des marégraphes dans les tubes ABS, et ainsi déterminer précisément leur altitude, des mesures de niveau d'eau ont été faites dans le tube ABS avec un Little Dipper Water Level Meter de Heron. Ces mesures ont été réalisées le 7 juillet 2012 (après l'installation du TWR-2050, cf. rapport d'étape 1) et le 6 novembre 2012 (avant de démonter le TWR-2050, et après l'installation du RBRvirtuoso, cf. rapport d'étape 2). De telles mesures n'ont pas pu être réalisées en juin 2013, car des travaux avaient détruit le point de référence utilisé (vis sur la grosse poutre formant un rebord au bord du quai). Les relevés topographiques et les mesures directes de niveau d'eau ont permis de déterminer précisément l'altitude des marégraphes (Tableau 4).

	Altitude par rapport au niveau marin moyen (NMM29)	Altitude par rapport au zéro des cartes marines
TWR-2050 (juillet à novembre 2012)	-2.273 m	-1.839 m
RBRvirtuoso (novembre 2012 à juin 2013)	-2.248 m	-1.814 m

Tableau 4. Altitude du capteur de pression des marégraphes installés à Grosse-Île.

![](_page_22_Figure_0.jpeg)

Figure 8. Fixation du marégraphe contre le quai de Grosse-Ile-Nord de juillet à novembre 2012. A : schéma du montage avec le marégraphe placé à la base du tube ABS. **B** : photographie du tube ABS fixé contre le quai.

![](_page_23_Figure_0.jpeg)

Figure 9. Fixation du marégraphe contre le quai de Grosse-Ile-Nord de novembre 2012 à juin 2013. A : schéma du montage avec le marégraphe placé à la base du tube ABS. B : photographie du tube ABS fixé contre le quai.

## 3. Données de vagues

#### 3.1. Traitement des données de vagues

Tableau 5. Premier et dernier bursts de vagues pour chaque déploiement d'AWAC.

Site	Premier burst (UTC)	Dernier burst (UTC)		
mouillages installés en juillet et récupérés en novembre 2012				
A : Récif Perle	2012-07-05 16:10	2012-11-05 15:10		
B : Baie de Plaisance	2012-07-05 13:06	2012-11-05 14:06		
C : Dune-du-Nord 28 m	2012-07-06 14:10	2012-11-07 14:10		
D : Dune-du-Nord 17 m	2012-07-06 14:06	2012-11-07 16:06		
E : Martinique	2012-07-05 13:04	2012-11-05 13:04		
mouillages installés en novembre 2012 et récupérés en juin/juillet 2012				
A : Récif Perle	2012-11-05 17:01	2013-07-15 15:01		
C : Dune-du-Nord 28 m	2012-11-07 16:01	2013-06-20 17:01		

Les capteurs auxiliaires (pression, température, batterie, inclinaison, boussole) et les données brutes ont été examinés pour éliminer les périodes hors de l'eau (au début et à la fin des déploiements), pour vérifier le fonctionnement correct des instruments et la stabilité des plateformes de mouillage. Il existe occasionnellement de très légers mouvements du cardan sur lequel sont montés les instruments.

Lors du premier déploiement, les mouillages C et D ont bougé de manière plus significative lors des tempêtes des 3 et 11-12 octobre (rotation du support, et abaissement du mouillage C de 0.2-0.3 m les 10-11 octobre par l'affouillement du sédiment sableux). Ces mouvements ne semblent pas avoir affecté les bursts de vague et les profils de vitesse.

Lors du second déploiement, le mouillage A a bougé de manière plus significative lors de la tempête du 28 décembre 2012, ainsi que dans une moindre mesure lors des tempêtes du 22 décembre 2012 et du 9 février 2013 (rotation du support). Le mouillage A semble s'être enfoncé de 0.2-0.3 m durant les deux premiers mois. Le mouillage C a bougé de manière plus significative lors des tempêtes du 10 novembre, du 30 novembre et du 25 décembre 2012 (rotation du support). Le mouillage C semble aussi s'être enfoncé de 0.2-0.3 m durant le premier mois. Un examen détaillé des bursts de vague et des profils de vitesse pendant ces événements n'a montré aucune influence sur la qualité des données de vagues et de courant.

La pression enregistrée par les instruments a été corrigée avec la pression atmosphérique mesurée à la station météorologique de l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine (nord de l'île de Havre-aux-Maisons). Les directions mesurées avec la boussole interne des instruments ont été corrigées pour la déclinaison magnétique (19° ouest).

Données AWAC

Pour les AWAC (sites A et C) les paramètres de vagues ont été obtenus avec le logiciel *QuickWave* (version 2.10), en calculant les moments du spectre d'énergie sur l'intervalle 0.02-0.49 Hz. Les hauteurs et périodes de vagues sont calculées par les mesures acoustiques de la distance instrument-surface (Acoustic Surface Tracking, AST), et avec les données de pression si les données AST présentent trop d'erreurs. Les directions de vagues sont calculées avec les vitesses orbitales mesurées près de la surface.

La suite du traitement est effectuée dans Matlab avec une série de routines programmées par Urs Neumeier. En premier, la pression atmosphérique est corrigée avec variation temporelle. Puis les résultats subissent un contrôle de qualité avec des tests automatiques (*qctest\_wave.m*, version 0.30 pour le premier déploiement, version 0.31 pour le second déploiement) dont le résultat est revu et validé manuellement dans une interface graphique (*qcwave\_gui.m*). Au besoin pour certains bursts les paramètres de vagues non-directionnels sont recalculés avec la routine *wavesp.m* sur une partie des données AST du burst (si les données AST sont partiellement mauvaises) ou sur les données de pression (si les données AST sur la totalité du burst sont affectées).

#### Données RBR TWR-2050

Au site E étaient installés côte à côte deux capteurs de pression TWR-2050 enregistrant chacun un burst toutes les deux heures. L'ensemble du traitement a été effectué dans Matlab avec une série de routines programmées par Urs Neumeier. La pression atmosphérique a été corrigée. Il existait une très légère dérive irrégulière entre les deux capteurs de pression (~0.3 kPa) qui a été soustraite des données du deuxième instrument. Puis les deux jeux de données ont été combinés en un seul.

Les vagues ont été calculées avec *wavesp.m* avec les paramètres suivants : un filtre passebas avec une fréquence de coupure de 1/90 Hz a été appliqué pour éliminer les pulsations de longue période du plan d'eau; le facteur maximal utilisé pour corriger l'atténuation des variations de pression avec la profondeur était 5; les moments du spectre d'énergie ont été calculés sur l'intervalle 0.02-0.50 Hz. Puis le contrôle de qualité a été effectué avec *qctest wave.m* (version 0.30) et *qcwave gui.m*.

#### 3.2. Explication du contrôle de qualité

Les principaux paramètres de vagues ont subi un contrôle de qualité, dont le résultat est indiqué dans un flag hexadécimal à 3 chiffres. Le chiffre de gauche (poids fort) indique la validité des données selon le tableau suivant.

Flag	Description validité
0	Non vérifié
1	Bon
2	Douteux (probablement bon)
3	Erroné
4	Manquant (données n'ont jamais été enregistrées)

Tableau 6. Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues.

Les deux chiffres hexadécimaux de droite indiquent la raison du marquage erroné ou douteux, c'est-à-dire quel test a échoué. Huit erreurs possibles sont codées sur 8 bits selon tableau suivant. Le résultat est représenté en hexadécimal comme deux chiffres. (Plusieurs codes hexadécimaux peuvent s'additionner, par exemple 04 + 08 + 20 = 2C.)

bit	valeur	paramètres testés	tests manqués
	hexa-		
	décimale		
1	01	tous	valeur trop basse
		Dir <sub>m</sub> , Dir <sub>p</sub>	direction venant de la côte
2	02	tous	valeur trop grande
3	04	tous	test de continuité temporelle
4	08	H <sub>max</sub> , H <sub>1/10</sub> , H <sub>1/3</sub>	comparaison de $H_{m0}$ avec $H_{max}$ , $H_{1/10}$ ou $H_{1/3}$ (flag
			de ces derniers)
		$T_{01}, T_{02}, T_z, T_{1/10},$	comparaison de $T_{01}$ , $T_{02}$ , $T_z$ , $T_{1/10}$ , $T_{1/3}$ (flag si
		T <sub>1/3</sub>	différence à la médiane des T trop grandes)
		T <sub>p</sub>	comparaison de $T_p$ avec $T_{02}$
		Dir <sub>m</sub> , Dir <sub>p</sub>	comparaison de Dir <sub>m</sub> et Dir <sub>p</sub>
		$h_{PT}, h_{AST}$	comparaison de $h_{PT}$ et $h_{AST}$ (flag de $h_{AST}$ )
5*	10	h	valeur trop basse par rapport aux prédictions de
			marée
		Dir <sub>m</sub> , Dir <sub>p</sub> ,	période trop courte pour déterminer la direction
		Dir <sub>Spread</sub> , UDI	(dans QuickWave)
6	20	$T_{02}, T_{0/10}$	pente des vagues, $T_{02}$ avec $H_{m0}$ , et $T_{1/10}$ avec $H_{1/10}$
		h	valeur trop grande par rapport aux prédictions de
			marée
7	40	tous	marqué erroné dans QuickWave
8	80	tous	burst déficient, problématique ou présence de
			glace de mer

Tableau 7. Signification des flags d'erreur du contrôle de qualité des données de vagues.

\* Dans les fichiers exportés, le bit 5 indique aussi que la valeur calculée par Quickwave a été modifiée soit manuellement, soit en recalculant avec *wavesp.m* sur une partie ou la totalité du burst.

#### Exemples du flag de qualité

- 0 pas testé
- 100 donnée bonne
- 202 donnée douteuse, car valeur trop grande
- 310 donnée mauvaise, car période trop courte pour déterminer la direction
- 328 donnée mauvaise, car échoue la comparaison des hauteurs de vague et car la pente des vagues est trop raide
- 380 donnée mauvaise, car burst déficient
- 110 donnée bonne, obtenue en modifiant le résultat de Quickwave

#### 3.3. Liste des paramètres de vagues

Les vagues naturelles sont complexes, avec une grande variabilité temporelle des hauteurs, des périodes et des directions. Pour néanmoins les caractériser avec quelques valeurs, des paramètres statistiques des vagues sont calculés à partir de chaque enregistrement de vagues (série temporelle de 8 à 17 minutes). Deux méthodes différentes existent pour ces calculs : l'analyse spectrale et l'analyse temporelle (basée sur les passages à zéro, appelée *zero-crossing*).

Il existe de nombreux paramètres statistiques de vagues. Leur disponibilité dépend du type de houlographe et du logiciel utilisé pour le traitement. Voici un résumé des plus importants :

- La hauteur des vagues est généralement décrite par la hauteur significative  $H_{m0}$  (par méthode spectrale, paramètre préféré actuellement) ou la hauteur significative  $H_{1/3}$  (par méthode zero-crossing). Autres hauteurs souvent utilisées sont la hauteur de la plus grande vague  $H_{max}$  et la hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes  $H_{1/10}$ .
- La période des vagues est souvent décrite par les périodes moyennes par méthode spectrale  $T_{02}$  et  $T_{01}$  (cette-dernière est moins sensible aux erreurs instrumentales), période du pic d'énergie du spectre des vagues  $T_p$  (qui peut osciller dans le temps en présence simultanée de houle et de vagues de vent) ou la période moyenne calculée par méthode zéro-crossing  $T_z$ .

#### Symbol unité description

h	m	hauteur de l'eau au-dessus du fond à la position de l'instrument
$h_{PT}$	m	hauteur de l'eau mesurée avec le capteur de pression
h <sub>AST</sub>	m	hauteur de l'eau mesurée avec le faisceau acoustique de l'AWAC (Acoustic Surface Tracking)
H <sub>m0</sub>	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale
H <sub>1/3</sub>	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers des vagues les plus grandes)
H <sub>1/10</sub>	m	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero- crossing)
H <sub>max</sub>	m	hauteur de la plus grande vague (méthode zero-crossing)

H <sub>m</sub>	m	hauteur moyenne (méthode zero-crossing)				
$T_{p}$ $T_{02}$ $T_{01}$ $T_{z}$ $T_{1/3}$ $T_{1/10}$	S S S S	période du pic d'énergie du spectre des vagues période moyenne par méthode spectrale définie comme $(m_0/m_2)^{0.5}$ période moyenne par méthode spectrale définie comme $m_0/m_1$ période moyenne des vagues (calcul par zero-crossing) période moyenne du tiers des vagues les plus grandes (méthode zero- crossing) période moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-				
T <sub>max</sub>	S	période de la vague la plus grande ( $H_{max}$ ) du burst (méthode zero-crossing)				
Dir <sub>m</sub>	0	direction moyenne (direction de provenance, angle avec le nord				
Dir <sub>p</sub>	0	direction du pic d'énergie (direction moyenne de la bande de fréquence de				
Dir <sub>Spread</sub>	0	Dispersion directionnelle des vagues (±variance) calculée pour le pic de fréquence				
UI		Index d'unidirecticité (Unidirectivity index)				
U	m/s	vitesse moyenne dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP (près de la surface pour AWAC-AST)				
Udir	0	direction du courant moyen dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP				
QWuseds	pectrum	Les données de l'AWAC utilisées pour calculer les vagues non- directionnelles : 0 = pression, 1 = vitesses orbitales, 3 = AST (faisceau acoustique de l'AWAC, Acoustic Surface Tracking). Si c'est un chiffre à virgule, le chiffre après la virgule indique pour l'AST la fraction du burst utilisé (par exemple, 3,78 pour un calcul à partir des données AST sur 78 % du burst), et pour la pression le facteur maximal utiliser pour corriger l'atténuation des variations de pression avec la profondeur (par exemple, 0,15 pour un calcul à partir des données de pression avec un facteur maximal de correction de 15).				
icecover	%	Pourcentage du burst avec présence de glace				

Les fichiers d'AWAC traités par Quickwave contiennent plusieurs autres paramètres (IceDistance, QW\_nodetects, QW\_baddetects, nbZC, QW\_error) qui correspondent à des résultats intermédiaires ou des informations pour le contrôle de qualité.

#### 3.4. Illustrations des données de vagues

La Figure 10 présente les séries temporelles des vagues mesurées aux cinq mouillages. Conformément à la configuration bathymétrique et géographique, les vagues sont les plus fortes au site C, qui est exposé aux vagues venant du golfe (Figure 11). Au site A, les vagues jusqu'à 2 m sont fréquentes, mais les vagues de tempêtes sont un peu moins grandes à cause du fetch plus limité. À noter que des vagues jusqu'à 2.4 m venant des Îles-de-laMadeleine y ont été mesurées. Cela est aussi bien visible sur les roses de vagues, qui illustrent la distribution des hauteurs de vagues selon leur direction (Figures 12 et 13). Il existe des variations saisonnières surtout dans la hauteur des vagues, mais aussi dans la direction au site A, qui sont illustrées par les roses de vagues mensuelles (figures 14 et 15).

Sur le côté nord-ouest au site C, la plus forte tempête a eu lieu le 25 décembre 2012 avec des vagues ( $H_{m0}$ ) de 6.0 m (Tableau 8). Sur l'autre côté des Îles au site A, la plus forte tempête a eu lieu le 17 février 2013 avec des vagues de 5.3 m. Durant la période hivernale, entre le 22 décembre 2012 et le 22 mars 2013, il y a eu sept tempêtes avec des vagues de plus de 5.0 m au site C, et sept tempêtes avec des vagues de plus de 3.6 m au site A. Le faible couvert de glace durant cet hiver relativement doux n'a que partiellement atténué les vagues, et ces résultats illustrent l'augmentation de l'impact des tempêtes en hiver.

Site A (Récif Perle)						Site C (devant Dune-du-Nord, prof. 28 m)					
Rang	Date/Heure (UTC)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>02</sub> (s)	Dir (°)		Rang	Date/Heure (UTC)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>02</sub> (s)	Dir (°)	
1	2013-02-17 20:00	5.26	7.5	94	-	1	2012-12-25 02:00	6.03	7.3	291	
2	2012-12-28 08:00	5.00	6.7	96		2	2012-10-12 00:00 <sup>d</sup>	5.90	7.5	292	
3	2013-03-22 15:00	4.83	7.8	74		3	2013-02-05 04:00	5.84	6.7	289	
4	2012-12-22 18:00	3.99	6.3	104		4	2013-03-18 17:00	5.76	5.7	317	
5	2012-12-30 21:00	3.97	7.0	85		5	2012-12-31 23:00	5.70	7.0	320	
6	2013-02-10 12:00	3.83	8.7	71		6	2013-03-22 20:00	5.28	6.4	331	
7	2013-02-22 11:00	3.64	6.5	52		7	2013-01-03 08:00	5.24	6.7	321	
8	2012-11-09 05:00	3.59	6.4	77		8	2012-11-30 16:00	5.19	6.9	313	
9	2012-09-06 12:00 <sup>a</sup>	3.48	6.2	109		9	2013-01-18 02:00	5.17	7.2	319	
10	2013-01-31 22:00	3.16	5.3	170		10	2012-11-11 01:00	4.97	7.0	321	
11	2012-12-03 12:00	3.11	5.5	180		11	2013-01-21 13:00	4.97	6.3	282	
12	2013-01-20 22:00	3.10	5.5	137		12	2013-04-06 21:00	4.81	6.7	317	
13	2012-10-11 13:00 <sup>b</sup>	3.08	5.6	142		13	2013-02-19 11:00	4.78	6.5	320	
14	2012-12-19 15:00	2.97	5.6	93		14	2012-11-25 23:00	4.61	5.7	276	
15	2012-08-17 14:00 <sup>c</sup>	2.87	5.7	102		15	2013-02-01 16:00	4.53	6.1	276	
16	2012-12-25 00:00	2.84	5.2	239		16	2013-02-10 15:00	4.53	7.9	18	
17	2013-04-17 08:00	2.81	5.3	188		17	2012-12-10 02:00	4.44	6.9	313	
18	2013-05-18 16:00	2.78	5.9	49		18	2013-01-07 20:00	4.39	6.5	322	
19	2013-03-20 19:00	2.73	5.6	83		19	2013-01-25 14:00	4.12	6.1	320	
20	2012-11-25 23:00	2.72	5.3	221	_	20	2013-01-06 00:00	4.11	6.0	320	

Tableau 8. Les 20 plus fortes tempêtes mesurées entre juillet 2012 et juin/juillet 2013 aux sites A et C.

<sup>a</sup> Vagues à ce moment au site B,  $H_{m0} = 2.43 \text{ m}$ ,  $T_{02} = 5.7 \text{ s}$ , Dir =  $87^{\circ}$ <sup>b</sup> Vagues à ce moment au site B,  $H_{m0} = 1.49 \text{ m}$ ,  $T_{02} = 4.4 \text{ s}$ , Dir =  $116^{\circ}$ <sup>c</sup> Vagues à ce moment au site B,  $H_{m0} = 2.24 \text{ m}$ ,  $T_{02} = 5.3 \text{ s}$ , Dir =  $79^{\circ}$ <sup>d</sup> Vagues à ce moment au site D,  $H_{m0} = 4.51 \text{ m}$ ,  $T_{02} = 6.6 \text{ s}$ , Dir =  $286^{\circ}$ 

![](_page_31_Figure_0.jpeg)

Figure 10. Séries temporelles des hauteurs et directions de vagues mesurées aux sites A à E. Pour les directions, les vagues de faibles amplitudes sont en couleurs plus pâles.

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

Figure 11. Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  aux sites A à E pour le premier déploiement (juillet à novembre 2012) et aux sites A et C pour l'ensemble du projet (juillet 2012 à juin/juillet 2013).

![](_page_33_Figure_0.jpeg)

Figure 12. Rose de vagues de juillet 2012 à juin/juillet 2013 pour les sites A (récif Perle) et C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction.

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

Figure 13. Rose de vagues de juillet à novembre 2012 pour les sites A (récif Perle), B (Baie de Plaisance), C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur) et D (devant Dune-du-Nord, 17 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction.

![](_page_35_Figure_0.jpeg)

Figure 14. Roses de vagues mensuelles pour le site A (récif Perle). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction.

![](_page_35_Figure_2.jpeg)

![](_page_36_Figure_0.jpeg)

Figure 15. Roses de vagues mensuelles pour le site C (devant Dune-du-Nord, 28 m de profondeur). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues venant de cette direction.

![](_page_36_Figure_2.jpeg)

## 4. Données de courant

#### 4.1. Traitement des données de courant

Tableau 9. Caractéristiques des profils de courant pour chaque déploiement d'AWAC (début, fin, profondeur moyenne et hauteur de la tête de l'instrument au-dessus du fond marin).

Site	Premier burst	Dernier burst	Profondeur	Hauteur tête					
	(UTC)	(UTC)	moyenne	AWAC					
mouillages installés en ju	mouillages installés en juillet et récupérés en novembre 2012								
A : Récif Perle	2012-07-05 16:00	2012-11-05 16:00	30.8 m	0.45 m					
B : Baie de Plaisance	2012-07-05 12:20	2012-11-05 14:40	13.3 m	0.59 m					
C : Dune-du-Nord 28 m	2012-07-06 14:00	2012-11-07 15:00	30.2 m	0.45 m					
D : Dune-du-Nord 17 m	2012-07-06 13:40	2012-11-07 16:00	18.8 m	0.63 m					
mouillages installés en novembre 2012 et récupérés en juin/juillet 2012									
A : Récif Perle	2012-11-05 17:00	2013-07-15 15:40	30.5 m	0.45 m					
C : Dune-du-Nord 28 m	2012-11-07 15:40	2013-06-20 17:40	30.1 m	0.45 m					

L'examen des capteurs auxiliaires pour éliminer les périodes hors de l'eau et pour vérifier le fonctionnement correct des instruments était similaire à celui des vagues (cf. ci-dessus). De même, la pression enregistrée a été corrigée avec la pression atmosphérique mesurée à la station météorologique de l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine.

Les instruments enregistraient les courants dans le référentiel est/nord/vertical. Les directions mesurées avec la boussole interne des instruments ont été corrigées pour la déclinaison magnétique (19° ouest). Tout le traitement a été effectué dans Matlab avec une série de routines programmées par Urs Neumeier.

Lors du contrôle de qualité les cellules hors de l'eau ou affectées par la surface de l'eau ont été rejetées (toutes cellules commençant à plus de 90% de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument). Les cellules avec un rapport signal/bruit inférieur à 3 dB ont aussi été marquées comme mauvaises.

Les cellules influencées par les glaces flottantes ont été rejetées de la manière suivante. L'épaisseur de la glace a été déterminée sur les bursts de vagues comme la différence entre la distance AWAC-base de la glace (mesure par l'Acoustic Surface Tracking) et la distance AWAC-niveau hydrostatique (mesure par le capteur de pression), cf. section 6. L'épaisseur de la glace (épaisseur instantanée maximale observée à  $\pm 2$  heures du profil) a été soustraite à la hauteur de la colonne d'eau avant d'appliquer le test de 90% de la colonne d'eau.

La présence d'erreurs dues à des poissons ou d'autres objets flottants a été vérifiée en examinant visuellement les amplitudes de chaque faisceau acoustique et les vitesses. Durant l'hiver, il existe des épisodes de vagues avec des très fortes amplitudes du signal acoustique dans toute la colonne d'eau pendant plusieurs heures, amplitudes qui pourraient être liées à des fragments de glace ou de frazil. Comme la variabilité des vitesses augmente également, ces données sont douteuses et ont été marquées comme mauvaises.

Pour le site A il s'agit des deux périodes suivantes : le 2013-02-08 de 01:20 à 03:20 et le 2013-02-13 de 17:20 à 19:00. Pour le site C il s'agit des quatre périodes suivantes : de 2013-01-27 9:40 à 2013-01-28 7:00, de 2013-02-04 17:40 à 2013-02-06 04:00, de 2013-02-07 14:00 à 2013-02-08 11:00, et de 2013-02-09 14:40 à 2013-02-11 06:40.

#### 4.2. Illustration des données de courant

Un exemple des séries temporelles de courants enregistrées est présenté avec les données au site D, pour la période de juillet à novembre 2012, avec les trois composantes de vitesse : vers l'est, vers le nord, et vertical vers le haut (Figure 16). La résolution graphique ne permet pas de distinguer individuellement chaque enregistrement sur cette figure. Des figures similaires sont présentées pour chaque déploiement d'ADCP dans les rapports d'étape 2 et 3.

Les courants horizontaux sont dominés par une cyclicité tidale avec des courants plus forts vers la surface. Les roses de courants (Figure 17) font ressortir les directions dominantes parallèles à la côte aux sites C et D, alors qu'au site A des directions dominantes parallèles à la côte sont seulement bien développées dans la partie supérieure de la colonne d'eau. Au site B au milieu de la Baie de Plaisance, il y a souvent des différences de direction de courant entre la base et le sommet de la colonne d'eau (cisaille), et des courants plutôt vers le sud-ouest ou l'ouest au fond (entrant dans la baie) et des courants vers le nord-est en surface (sortant de la baie).

![](_page_39_Figure_0.jpeg)

Figure 16. Profils de vitesse enregistrés au site D (devant Dune-du-Nord). Les données marquées comme mauvaises sont en noir.

![](_page_40_Figure_0.jpeg)

Figure 17. Roses des courants (destination des courants) enregistrées au site A et C (juillet 2012 à juin/juillet 2013) et aux sites B et D (juillet à novembre 2012).

## 5. Données de niveau d'eau

#### 5.1 Traitement des données du marégraphe

La pression atmosphérique a été corrigée avec les enregistrements d'un Barologger Solinst installé dans une cabane située dans le port (altitude 6.5 m, correction pour tenir compte de cette altitude  $\times 1.00082$ ). Le poids de la colonne d'eau a été calculé selon Fofonoff (1985) avec une gravité de 9.8084 m s<sup>-2</sup>, la température estimée à 3°C et une salinité estimée à 29. L'altitude du capteur de pression (-1.780 m) a été déterminée par un relevé topographique (cf. section 2.4) et par la mesure directe de la position de la surface d'eau.

Les données sont relativement bruyantes (variations rapides de 2-10 cm, voire plus lors de tempêtes), probablement dû à l'exposition du port vers le golfe. L'instrument a été testé en novembre 2012 après le déploiement, sa variabilité est inférieure à 5 mm en eau calme. Un filtre passe-bas (fréquence de coupure 1/3600 Hz) a été appliqué pour réduire cette forte variabilité, qui toutefois est réelle.

Les heures sont en UTC. Les altitudes sont indiquées par rapport au zéro des cartes marines; le niveau marin moyen (zéro des cartes terrestres) est 0.434 m plus haut.

Les composantes harmoniques de la marée ont été calculées avec la boîte à outils Matlab  $T_TIDE$  (Pawlowicz et al., 2002) et sont présentées au Tableau 10. Uniquement les composantes avec un rapport signal sur bruit supérieur à 1 ont été conservées. Ces composantes harmoniques ont ensuite servi à calculer les prédictions de marée.

#### 5.1 Illustration des données de niveau d'eau

La figure 18 présente les niveaux d'eau mesurés dans le port de Grosse-Île Nord. La marée est diurne, avec une légère composante semi-diurne durant la période de mortes-eaux. Le plus haut niveau mesuré était de +1.64 m par rapport au zéro des cartes marines, le plus bas à -0.10 m<sup>1</sup>. Le niveau d'eau était 5% du temps au-dessus de +0.86 m, et 2% du temps au-dessus de +0.94 m, et 1% du temps au-dessus de +1.01 m (Figure 19).

L'amplitude maximale prédite selon notre analyse harmonique est de 0.7 m (Figure 18). Le signal résiduel, c'est-à-dire observations moins prédictions, correspond aux surcotes et aux décotes. Ces variations étaient généralement inférieurs à  $\pm 0.20$  m, mais une vingtaine de surcotes plus importantes ont été observées durant l'année. La surcote la plus forte était de  $\pm 0.91$  m le 22 mars 2013 (niveau d'eau atteint  $\pm 1.64$  m), la deuxième plus importante de  $\pm 0.66$  m le 30 décembre 2012 (niveau d'eau atteint  $\pm 1.53$  m).

Lors de la tempête avec les plus hautes vagues ( $H_{m0}$  6.0 m au site C), la surcote était seulement de +23 cm (niveau d'atteint +0.85 m). Le 17 février 2013, avec les plus fortes vagues du côté sud-est ( $H_{m0}$  5.3 m au site A), la surcote à Grosse-Île Nord était de +0.66 m (niveau d'eau atteint +1.24 m)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ce qui correspond à +1.21 m et -0.53 m par rapport au zéro des cartes terrestres (niveau marin moyen)

![](_page_42_Figure_0.jpeg)

Figure 18. Niveau d'eau mesuré dans le port de Grosse-Île-Nord pour la période juillet 2012 à juin 2013, prédictions de marées selon analyse harmonique, et surcote/décote observée.

![](_page_43_Figure_0.jpeg)

Figure 19. Fréquence d'inondation selon les données mesurées dans le port de Grosse-Île-Nord de juillet 2012 à juin 2013 (l'ensemble de données et détail sur les 1.2 % les plus hauts). Soustraire 0.434 m pour obtenir l'altitude selon le zéro des cartes terrestres.

Tableau 10. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des données du niveau d'eau enregistré par le marégraphe de Grosse-Île Nord de juillet 2012 à juin 2013, les composantes les plus importantes sont marquées en gras. Erreur estimée de l'amplitude et de la phase avec un intervalle de confiance de 95%.

Composante	Période	Amplitude	Erreur	Phase	Erreur
harmonique	(h)	(m)	Amplitude	(°)	Phase
SSA	4382.906	0.0337	0.0320	247.6782	58.5524
MM	661.309	0.0403	0.0339	217.1867	47.5888
Q1	26.868	0.0169	0.0118	275.1649	43.5863
01	25.819	0.1297	0.0133	278.0288	5.7894
NO1	24.833	0.0145	0.0136	345.1872	54.3487
P1	24.066	0.0478	0.0110	311.0142	12.0515
K1	23.934	0.1263	0.0109	306.3974	5.5557
MU2	12.872	0.0062	0.0015	275.9455	13.9663
N2	12.658	0.0111	0.0015	310.4618	8.4823
M2	12.421	0.0545	0.0015	348.5419	1.6778
MKS2	12.386	0.0023	0.0017	342.7356	43.1034
L2	12.192	0.0016	0.0013	197.7824	45.7525
<b>S2</b>	12.000	0.0332	0.0015	40.8301	2.7113
K2	11.967	0.0089	0.0018	40.3345	10.6637
MO3	8.386	0.0042	0.0007	132.9333	11.1354
M3	8.280	0.0011	0.0008	342.7690	42.2895
SO3	8.192	0.0010	0.0008	159.9405	54.5785
MK3	8.177	0.0024	0.0008	170.4797	19.1245
MN4	6.269	0.0029	0.0008	17.8913	18.6827
M4	6.210	0.0033	0.0008	43.7602	14.3737
MS4	6.103	0.0017	0.0008	14.1274	30.0532
2MK5	4.931	0.0011	0.0007	68.2904	37.9998
2MN6	4.166	0.0007	0.0005	118.6617	45.6216
M6	4.140	0.0015	0.0005	133.1243	18.4937
2MS6	4.092	0.0014	0.0005	236.6484	23.1638
2MK6	4.089	0.0006	0.0006	277.0009	62.8558
M8	3.105	0.0009	0.0006	64.9193	42.1331

## 6. Données de glace

#### 6.1 Traitement des données de glaces

Pendant les déploiements hivernaux aux sites A et C, les AWAC étaient configurés pour que le faisceau acoustique vertical (Acoustic Surface Tracking, AST) ne détecte pas seulement l'interface eau-air (la surface de l'eau), mais aussi l'interface eau-glace (la base de la banquise). L'instrument enregistre pour chaque ping la distance entre la tête de l'instrument et à la première de ces deux interfaces.

D'autre part, le capteur de pression de l'AWAC mesure le poids de la colonne d'eau audessus de l'instrument. Cela permet de calculer la distance entre la tête de l'instrument et la surface de l'eau de manière indépendante. En cas de présence de la banquise, celle-ci n'affecte pas le résultat.

Les épaisseurs de glace ont été calculées à partir de ces deux mesures de distance : (1) la distance entre AWAC et surface de l'eau déterminée par le capteur de pression, (2) la distance entre AWAC et base de la glace mesurée par le signal AST. En présence de glace, la différence entre les deux mesures, ajustée avec la densité de la glace par rapport l'eau, c'est-à-dire multipliée par un facteur de  $\times 1.11$  (Eicken et al., 2009), permet d'estimer l'épaisseur de la glace qui dérive au-dessus de l'instrument.

La présence et l'épaisseur de glace sont déterminées avec les bursts de vagues mesurés chaque heure pendant 17 minutes (signal de pression enregistré à 1 Hz, signal AST à 2 Hz). En premier le signal AST est filtré avec le logiciel Quickwave pour enlever les données aberrantes, qui sont remplacées par des valeurs interpolées. Ensuite le signal AST est parfois corrigé manuellement avec l'interface graphique qcwave\_gui.m pour rétablir la position de l'interface eau-glace si le filtre automatique de Quickwave a appliqué une mauvaise correction.

Souvent le signal AST montre des oscillations de haute fréquence 0.5-1 Hz entre deux niveaux, qui sont interprétés comme la base de la glace et un niveau de faible densité (bulles d'air ou neige) dans la glace. Un algorithme spécifique (inclus dans qcwave\_gui.m) lisse ces oscillations en conservant le niveau inférieur. Ensuite, le signal AST corrigé à 2 Hz est moyenné à 1 Hz, et soustrait au signal de pression. Finalement, l'épaisseur de glace obtenue est multipliée par un facteur de 1.11.

Cette méthode de mesure de glace nécessite de connaître précisément la vitesse du son dans l'eau (pour la mesure par AST) et la masse volumique de l'eau (pour la mesure par le capteur de pression). Ces deux paramètres dépendent de la salinité et de la température, qui varient verticalement et dans le temps. (Ils dépendent aussi de la pression, mais de manière négligeable dans les profondeurs des mouillages). La vitesse du son dans l'eau dépend surtout de la température, alors que la masse volumique de l'eau dépend surtout de la salinité. La salinité est seulement estimée selon les données pluriannuelles de Pêches et Océans Canada. La température du fond de l'eau, mesurée au niveau de la tête de l'instrument, est utilisée pour le calcul de la distance AST. Pour compenser les variations verticales de température et la salinité réelle, un coefficient de calibration est calculé sur des périodes libres de glace sélectionnées manuellement dans l'interface graphique qcwave\_gui.m, de manière à ce que les deux distances calculées (AST et pression) soient identiques en absence de glace. Ce coefficient de calibration est ensuite interpolé temporellement pour tous les bursts, et appliqué avant de faire la différence entre le signal AST et le signal de pression.

Le résultat détaillé de l'analyse des glaces sont des bursts de 1024 s avec une présence partielle ou continue de glace (Figures 23 et 24). La banquise ou les floes de glace ne sont généralement pas immobiles au large, mais dérivent lentement poussé par les courants ou par le vent. L'ADCP mesure la vitesse des courants près de la surface. En assumant que la glace dérive à la même vitesse que les courants, l'échelle de temps de chaque burst peut être convertie en échelle de distance (Figures 23 et 24).

Pour synthétiser les données de glace, le pourcentage de couverture de glace a été estimé visuellement pour chaque burst dans l'interface graphique qcwave\_gui.m, et l'épaisseur maximale, moyenne et minimale (de la fraction du burst avec de la glace) calculée pour chaque burst (Figures 20 à 22).

#### 6.2 Interprétation des données de glace

#### Variabilité spatiale des conditions de glaces aux Îles-de-la-Madeleine

Le site A est situé au large du Récif Perle, sur le côté sud-est des Îles-de-la-Madeleine, alors que le site C situé au large de Pointe-aux-Loups est du côté opposé, soit sur la façade nord-ouest des Îles.

Au cours de l'hiver 2012/2013, les données expérimentales observées aux deux sites permettent de détecter la présence de glace de manière plus ou moins prolongée durant plusieurs jours, mais jamais de façon permanente (Figure 20).

Au site A, la présence de glace devient importante et s'établit de manière prolongée à deux moments spécifiques au cours de la saison hivernale. La première période de glace intervient du 24 au 31 janvier 2013 et la seconde période, axée autour du 8 février 2013, se limite à quatre jours environ (Figure 21). En général les épaisseurs maximales mesurées ne dépassaient pas deux mètres de haut et les épaisseurs moyennes étaient inférieures au mètre. Les glaces observées mesuraient généralement entre 20 et 50 cm (épaisseur moyenne des bursts). Au cours de la première période de glace, la couverture temporelle des glaces n'était que très rarement complète et oscillait entre 40 et 100% du temps d'enregistrement, alors que lors de la seconde période en février, la couverture temporelle était souvent de 100%. C'est d'ailleurs au cours de cette période qu'on observe des épaisseurs maximales de deux mètres et plus. Ces épaisseurs observées sont le témoin direct des accumulations dynamiques de la glace lors des mouvements et déformations de celle-ci, générant ainsi des crêtes de pression.

Au site C, les caractéristiques des glaces diffèrent de ce qui est a pu être observé au site A. La présence des glaces est plus tardive et intervient une semaine plus tard, soit à partir du 30 janvier 2013 (Figure 20). Elle est également moins fréquente, mais les épaisseurs maximales sont plus grandes et atteignent rapidement quelques mètres de haut. On ne retrouve pas de période prolongée de glace sur plusieurs jours comme observé au site A. Sur la plupart des bursts avec de la glace, la couverture est généralement complète. Ces données suggèrent une grande étendue du champ de glace autour de la région du mouillage malgré le mouvement quasi permanent des glaces au gré du courant et des vents dominants. Les journées avec des couvertures complètes de glace s'alternent avec des journées totalement libres de glace. Ces plus grandes épaisseurs maximales observées au site C, sont révélatrices de la prédominance de la croissance dynamique et des compressions latérales, localement ou non, de la glace de ce côté-ci des Îles.

Malgré les différences observées, on relève sur les deux sites la présence de blocs de glace imposants de plusieurs mètres d'épaisseur, au-delà de cinq mètres, de manière simultanée autour du 15 mars 2013. À cette date-là, le Service canadien des glaces rapporte dans le secteur du site A, la présence de 30% de *glace moyenne de première année* (épaisseur 70-120 cm), de 50% de *glace blanchâtre* (épaisseur 15-30 cm) et de 10 % de *glace grise* (épaisseur 10-15 cm, Figure 25b). Sachant que la catégorie *glace moyenne de première année* est la deuxième en importance en terme d'épaisseur sur l'échelle de codification des stades de formation de la glace de mer, les informations obtenues à l'aide des mouillages de type ADCP améliorent la précision des conditions de glace par rapport aux relevés quotidien du Service canadien des glaces, bien que nos informations soient obtenues a posteriori.

#### Variabilité interannuelle des conditions de glaces

Un AWAC avait été placé au site A durant l'hiver 2011/2012 dans le cadre d'un autre projet. Les enregistrements successifs au site A au cours des hivers 2011/2012 et 2012/2013 permettent de constater la variabilité interannuelle qu'il peut exister dans les conditions de glace à un même site.

Les données obtenues au cours de l'hiver 2011/2012 montrent un hiver plus tardif et beaucoup plus dense dans la présence des glaces qu'en 2012/2013 (Figure 22). La présence des glaces commence à être détectée à partir du 7 février et s'achève au 18 mars 2012 avec très peu de périodes prolongées libres de glaces. Il est possible de dégager deux périodes principales d'englacement au site A : une première s'étalant du 13 au 19 février 2012 où les épaisseurs moyennes ne dépassent pas le mètre, mais les épaisseurs maximales atteignent facilement deux à trois mètres, voire quatre. La couverture temporelle n'y jamais totalement complète. À l'inverse lors de la seconde période du 28 février au 11 mars 2012, la couverture est quasiment complète. Au cours de cette période, les épaisseurs moyennes mesurées sont relativement faibles en comparaison des épaisseurs maximales qui atteignent très souvent quatre à cinq mètres de haut. Cette période d'englacement est révélatrice d'un épisode où les accumulations et les déformations dynamiques de glace sont très présentes de ce côté-ci des Îles-de-la-Madeleine. La période de glace de l'hiver 2011/2012 et celle de l'hiver 2012/2013 ne sont pas synchrones dans la saison, l'une se termine au début du mois de février alors que l'autre ne fait que commencer à cette époque-ci de l'année. Ces deux

enregistrements illustrent la grande variabilité qu'il peut exister d'un hiver à l'autre au niveau des conditions de glace, tant pour le timing que pour leurs caractéristiques physiques.

#### Variabilité des enregistrements de glace.

La glace détectée par les ADCPs au cours d'un enregistrement de 1024 secondes, présente différentes types de variations latérales d'épaisseur, qui correspondent principalement à la morphologie de la surface inférieure de la banquise (Figures 23 et 24). La relative cohésion de la glace lors de mouvements convergents du courant et/ou du vent favorise la détection de la glace sous forme de plaque de banquise, relativement solidaire sur plusieurs mètres, dizaines de mètres voire centaines de mètres. On retrouve ainsi des plaques de banquise unies et solidaires, épaisses d'environ un mètre et s'étirant sur plusieurs centaines de mètres de long comme illustré sur la Figure 24b. Ces plaques de glaces peuvent être d'épaisseur relativement constante (Figure 24a) ou présenter une rugosité très hétérogène (Figure 24b). Les enregistrements illustrent également le passage de blocs de glace de quelques dizaines de mètres de longueur (Figure 24c). Le passage de la banquise s'entrecoupe par moments de zones d'eau libre ou de zones de glace frazil perturbant le signal de l'ADCP. La présence de la glace atténue l'énergie des vagues quand celles-ci sont présentes et l'on peut voir apparaître de très faibles oscillations à la surface de l'eau entre deux morceaux de banquise dérivant (Figures 24c et 23c). D'autres enregistrements laissent apparaître le signal sinusoïdal des vagues sur des blocs de glaces épais de quelques dizaines de centimètres et qui dérivent en surface (Figures 23a et 23b). Ces blocs de glace dérivant sont entrecoupés par de l'eau libre où les vagues sont présentes. Dans cette situation les blocs de glaces sont portés par les vagues qui impriment leur oscillation. En général on retrouve ce schéma avec de la glace découpée en plusieurs morceaux.

![](_page_49_Figure_0.jpeg)

Figure 20. Couverture et épaisseur de glace aux sites A et C durant l'hiver 2012/2013. Les lettres "a" et "b" indiquent les jours représentés sur les cartes à la Figure 25.

![](_page_50_Figure_0.jpeg)

Figure 21. Couverture et épaisseur de glace aux sites A et C, détail de la période du 24 janvier au 12 février 2013. La lettre "a" indique le jour représenté sur la carte à la Figure 25a.

![](_page_51_Figure_0.jpeg)

Figure 22. Couverture et épaisseur de glace au site A, comparaison des hivers 2011/2012 et 2012/2013.

![](_page_52_Figure_0.jpeg)

Figure 23. Exemples de bursts ayant mesuré de la glace au site A. Les vagues, qui sont présentes aux exemples (a) et (b), font osciller verticalement les floes de glaces (l'épaisseur de glace est moins variable). L'axe horizontal est le temps (1024 s pour chaque burst), qui a été converti en distance à partir de la vitesse des courants de surface.

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

Figure 24. Exemples de bursts ayant mesuré de la glace au site C. L'axe horizontal est le temps (1024 s pour chaque burst), qui a été converti en distance à partir de la vitesse des courants de surface.

![](_page_54_Figure_0.jpeg)

Figure 25. Cartes du Service canadien des glaces montrant le stade de formation de glace dans le golfe 9 février et le 15 mars 2013. Le type, l'épaisseur et la concentration de glace est indiquée dans le code de l'œuf (cf. Frequest, 2005).

## 7. Modélisation des vagues

Les vagues en zone côtière ont été modélisées avec le logiciel SWAN (Simulating WAves Nearshore, version 40.85, Booij et al., 1999) en propageant les vagues mesurées au large (sites A et C) vers la côte. Les objectifs sont :

- 1) de vérifier si les résultats produit avec SWAN concorde avec les observations de vagues aux sites plus près de la côte (B, D et E),
- 2) d'obtenir des séries modélisées de vagues près de la côte durant toute l'année de l'étude.

Pour cela deux domaines ont été construits, l'un pour le secteur de Pointe-aux-Loups, l'autre pour la Baie de Plaisance (Figure 26).

![](_page_55_Figure_5.jpeg)

Figure 26. Extension des deux domaines modélisés de Pointe-aux-Loups et de la Baie de Plaisance, ainsi que positions des sites A à F.

#### 7.1 Configuration des modélisations

La modélisation de Pointe-aux-Loups utilise une grille inclinée de  $46.5^{\circ}$  par rapport au Nord, avec 107 points espacés de 300 m dans l'axe parallèle à la côte (sud-ouest/nord-est), et avec 52 points espacés de 200 m dans l'axe perpendiculaire à la côte (nord-ouest/sud-est). Le domaine modélisé mesure  $31.8 \times 10.2$  km. Le site C est localisé au milieu de la limite externe du domaine (Figure 26).

Le modélisation de la Baie de Plaisance utilise une grille inclinée de  $23^{\circ}$  par rapport au Nord, avec 151 points dans l'axe parallèle à l'orientation des Îles (sud-ouest/nord-est), et avec 140 points dans l'axe perpendiculaire à l'orientation des Îles (nord-ouest/sud-est). La résolution est de  $200 \times 200$  m. Le domaine mesure  $30 \times 27.8$  km et le site A est à sa limite externe (Figure 26). La lagune de Havre-aux-Maison et le côté nord des Îles, qui couvrent partiellement le domaine, ne sont pas représentées car les vagues de ces secteurs n'influencent pas la Baie de Plaisance.

![](_page_56_Figure_3.jpeg)

Figure 27. Vue 3D de la bathymétrie du domaine de Pointe-aux-Loups. Une altitude arbitraire de 9 m a été attribuée au domaine terrestre.

La bathymétrie est basée sur les données détaillées du Service hydrographique du Canada (SHC), qui ont dans un premier temps été rééchantillonnées sur une grille régulière de 25 m par Simon Senneville. Puis la bathymétrie de chaque point de notre grille a été obtenue en moyennant sur la tuile correspondante tous les points de la grille à 25 m (Figures 27 et 28). Le trait de côte a été déterminé sur les orthophotographies de 2001 de la photocartothèque québécoise.

Les modélisations représentent l'énergie des vagues dans 36 directions (résolution angulaire 10°) et dans 36 intervalles de fréquence de 0.04 à 1 Hz. Ils reproduisent la génération de vague par le vent (selon la formulation de Janssen (1991)), la propagation des vagues, l'interaction vague-vague des quadruplets, l'interaction vague-vague des triades, la réfraction, la diffraction, la dissipation d'énergie par moutonnement, la dissipation d'énergie par friction sur le fond (selon la formulation de Hasselmann et al. (1973)) et le déferlement. La modélisation a été effectuée en mode stationnaire toutes les heures.

![](_page_57_Picture_2.jpeg)

Figure 28. Vue 3D de la bathymétrie du domaine de la Baie de Plaisance. Une altitude arbitraire de 9 m a été attribuée au domaine terrestre et à la lagune de Havre-aux-Maisons.

Les deux modélisations sont alimentées par le vent mesuré à la station météorologique de l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine, qui est situé sur l'île de Havre-aux-Maisons, entre les deux secteurs étudiés. Les niveaux d'eau sont représenté par ceux mesurés par l'AWAC au site C pour la modélisation de Pointe-aux-Loups et par les ceux mesurés par le marégraphe du SHC à Cap-aux-Meules pour la modélisation de la Baie de Plaisance.

Les modélisations sont alimentés en vagues sur toute la limite externe et sur une partie des limites perpendiculaire à la côte par les données mesurées aux sites A et C, à savoir la hauteur  $H_{m0}$ , la période  $T_{02}$ , la direction du pic d'énergie Dir<sub>p</sub> et la dispersion directionnelle des vagues Dir<sub>Spread</sub>. Aucune modélisation n'a été effectuée lorsque la direction n'a pas pu être déterminée aux sites A et C (période des vagues trop courte).

Sachant que SWAN ne tient pas compte de la glace de mer et de la glace de rive; les périodes avec de la glace aux sites A et C ont été exclues de la modélisation. Mais il doit y avoir des périodes modélisées qui sont libres de glace au large mais avec de la glace de rive. C'est pourquoi la période hivernale n'est pas modélisée correctement sur tout le domaine, en particulier pour les zones plus près de la côte.

#### 7.2 Résultat de la modélisation

La modélisation a été effectuée sur toutes les périodes de déploiements des AWACs aux sites A et C. SWAN reproduit relativement bien les vagues dans les zones centrales des domaines, mais près des limites il peut y avoir des artefacts dues à la manière sont introduites les vagues mesurées aux sites A et C (cf. limite nord à la Figure 29a). Sur les exemples de tempêtes avec différentes directions de vagues incidentes, l'influence de la bathymétrie se distingue par les effets des hauts-fonds et par la réfraction en zones peu profondes (Figures 29 et 30).

La comparaison des séries temporelles montrent que la modélisation de Pointe-aux-Loups reproduit très bien les événements de tempêtes au site D (Figure 32). La performance est moins bonne pour la modélisation de la Baie de Plaisance, avec des pics de tempêtes relativement bien reproduit au site B, mais nettement moins bien au site E (Figure 31).

La comparaison plus détaillée des données modélisées et celles simulées est effectuée avec les graphiques de dispersion (Figure 33) et avec les paramètres statistiques suivants (Tableau 11) : le biais (moyenne des différences), le biais relatif (le biais divisé par la moyenne quadratique des données observées), la RMSE (racine des moyennes des carrés des différences), le  $\chi^2$  (comparaison des distributions, Balakrishnan et al. 2013) et pour les directions R (la longueur du vecteur résultants des différences de direction). La modélisation est plus proche des observations si le biais et le biais relatifs sont proches de zéro et que la RMSE, R et le  $\chi^2$  sont petits.

Pour la modélisation de Pointe-aux-Loups, il y a un bon agrément au site D pour les hauteurs des vagues : le biais est faible (-0.003) et la dispersion de l'erreur est petite. Les périodes et les directions des vagues supérieurs à 2 m sont très bien reproduites, alors que la

performance est nettement moins bonne pour les périodes et directions des vagues inférieures à 1 m.

Pour la modélisation de Baie de Plaisance, les performances sont moins bonnes au site B et surtout au site E. Au site B, SWAN sous-estime un peu les hauteurs (biais de -0.038 m, sous-évaluation d'un facteur d'environ 0.8) et la dispersion de l'erreur est plus grande. Les périodes sont sous-évaluées et il a aussi de la difficulté d'évaluer la direction, sauf pour les vagues supérieures à 1 m. Au site E près de la côte, les faibles vagues sont très mal reproduites et les vagues supérieures à 0.5 m sont sous-évaluées d'un facteur d'environ 0.55. Les périodes sont fortement sous-évaluées.

Ces comparaisons montrent que SWAN, avec la configuration utilisée, simule de manière satisfaisante les vagues sur la côte rectiligne de Pointe-aux-Loups. Par contre dans la Baie de Plaisance moins profonde avec une bathymétrie et une morphologie côtière plus complexe, les résultats de SWAN sont moins bons, surtout près de la côte au site E.

Les résultats pourraient être améliorés en utilisant une bathymétrie plus précise, comme celle réalisée par le CIDCO dans la Baie de Plaisance, surtout dans les zones peu profondes. Pour la partie sud de la Baie de Plaisance, la position et la morphologie de la flèche sableuse de Sandy Hook devrait être mieux actualisée. Les coefficients utilisés pour la dissipation d'énergie par frottement sur le fond devraient aussi être ajusté au type de fond marin.

	Site B			Site D			Site E	
	$H_{m0}$	T <sub>02</sub>	Dir	H <sub>m0</sub>	T <sub>02</sub>	Dir	H <sub>m0</sub>	T <sub>02</sub>
Biais	-0.003	-1.17	-13.86	-0.038	-0.44	15.33	0.070	-3.21
Biais relatif	-0.6%	-30.5%		-4.5%	-11.2%		23.4%	-57.1%
RMSE / R <sup>a</sup>	0.197	1.46	71.48	0.159	0.68	40.37	0.277	3.57
$\chi^2$	0.042	19.50	0.00	0.023	31.69	0.02	0.163	1.04

Tableau 11. Indicateur de performance de la modélisation par SWAN au site B, D et E comparé aux données mesurées aux mêmes sites pour la hauteur, la période et la direction des vagues.

<sup>a</sup> RMSE pour les hauteurs et les périodes, R (longueur du vecteur résultants des différences de direction) pour les directions.

![](_page_60_Figure_0.jpeg)

Figure 29. Vagues modélisées par SWAN sur le domaine de la Baie de Plaisance (a) à 2012-12-28 18:00 et (b) à 2013-05-18 16:00. Les hauteurs  $H_{m0}$  sont représentées avec un code de couleur et les directions de propagation sont indiquées avec les flèches.

![](_page_61_Figure_0.jpeg)

Figure 30. Vagues modélisées par SWAN sur le domaine de Pointe-aux-Loups (a) à 2012-12-15 15:00 et (b) à 2012-12-25 02:00. Les hauteurs  $H_{m0}$  sont représentées avec un code de couleur et les directions de propagation sont indiquées avec les flèches.

![](_page_62_Figure_0.jpeg)

Figure 31. Série temporelle des hauteurs de vagues mesurées aux sites A, B et E (en bleu) et de hauteurs modélisées avec SWAN aux sites B et E (en vert).

![](_page_63_Figure_0.jpeg)

Figure 32. Série temporelle des hauteurs de vagues mesurées aux sites C et D (en bleu) et de hauteurs modélisées avec SWAN aux sites B et F (en vert).

![](_page_64_Figure_0.jpeg)

Figure 33. Comparaison entre les données mesurées aux sites B, D et E et celles modélisée avec SWAN pour les mêmes sites. Trois classes de hauteurs de vagues sont représentées avec un code de couleur (bleu < vert < rouge).

## 8. Liste des fichiers de données

#### Fuseau horaire : UTC

Pour les bursts de vagues, le temps indiqué est le milieu de la période échantillonnée. Par contre pour les profils de vitesse, le temps indiqué est le début de la période de mesure de 100 s.

#### Données de vagues

IMA_12A-12B.xls	Paramètres de vagues du mouillage A pour l'ensemble du projet (juillet 2012 à juillet 2013)
IMB12A.xls	Paramètres de vagues du mouillage B pour l'été 2012
IMC 12A-12B.xls	Paramètres de vagues du mouillage C pour l'ensemble du projet
_	(juillet 2012 à juin 2013)
IMD12A.xls	Paramètres de vagues du mouillage D pour l'été 2012
IME12A.xls	Paramètres de vagues du mouillage E pour l'été 2012
	<ul> <li>Ces fichiers Excel contiennent chacun trois feuilles de calcul avec</li> <li>1) tous les résultats des calculs incluant les valeurs mauvaises ainsi qu'un code de qualité pour chaque donnée (cf. section 3.2);</li> <li>2) seulement les résultats bons ou douteux, les résultats mauvais ayant été remplacés par -999;</li> <li>3) seulement les résultats bons, les résultats douteux ou mauvais ayant été remplacés par -999.</li> </ul>
IMA12A.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage A pour l'été 2012
IMA12B.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage A pour l'hiver 2012/2013
IMB12A.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage B pour l'été 2012
IMC12A.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage C pour l'été 2012
IMC12B.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage C pour l'hiver 2012/2013
IMD12A.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage D pour l'été 2012
IME12A.spectre	Spectre non-directionnel des vagues au mouillage E pour l'été 2012
	Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres non-directionnels en $m^2 Hz^{-1}$ avec les fréquences en première ligne et les date/heures en première colonne.
IMA12A spectredir	Spectre directionnel des vagues au mouillage A pour l'été 2012
IMA12B.spectredir	Spectre directionnel des vagues au mouillage A pour l'hiver 2012/2013
IMB12A.spectredir	Spectre directionnel des vagues au mouillage B pour l'été 2012

IMC12B.spectredir	Spectre directio	nnel des	vagues	au	mouillage	С	pour	l'hiver
	2012/2013							
IMC12A.spectredir	Spectre direction	nel des va	gues au n	noui	llage C pour	l'ét	té 2012	2
IMD12A.spectredir	Spectre direction	nel des va	gues au n	noui	llage D pour	l'ét	té 2012	2

Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres directionnels en  $m^2 Hz^{-1}$  degrés<sup>-1</sup> avec les directions en degrés en première ligne, les dates/heures en première colonne et les fréquences en deuxième colonne. Chaque burst occupe 48 lignes. Pour les fréquences auxquelles le spectre directionnel n'a pas pu être déterminé, les valeurs sont remplacées par -999.

#### Données de courant

IMC_12A-12Bprofil.xls	Profils de vitesse enregistrés au site A pour l'ensemble du projet (juillet 2012 à juillet 2013)
IMB12Aprofil.xls	Profils de vitesse enregistrés au site B pour l'été 2012
IMC_12A-12Bprofil.xls	Profils de vitesse enregistrés au site C pour l'ensemble du projet (juillet 2012 à juin 2013)
IMD12Aprofil.xls	Profils de vitesse enregistrés au site D pour l'été 2012
	Ces fichiers Excel contiennent chacun neuf feuilles de calcul avec les vitesses Est, Nord, verticale et magnitude de vitesse horizontale (U) en m/s, la direction en degrés depuis le Nord, l'amplitude du signal pour chaque faisceau acoustique en <i>count</i> , et les données des capteurs auxiliaire (hauteur d'eau au-dessus du fond en m, température en °C, voltage de la batterie en V, orientation en degré depuis le nord magnétique, inclinaison de l'instrument en degré). La hauteur du centre des cellules au- dessus de la tête de l'instrument est dans les feuilles de calcul, la hauteur de celle-ci au-dessus du fond est de 0.45 m (cf. section 4.1).

Données du marégraphe

Marégraphe\_Grosse-Ile\_juillet2012-juin2013.xlsx

Fichier Excel avec les niveaux d'eaux mesurés par le marégraphe pour les deux périodes de mesures (données traitées uniquement). Données de glaces

IMA12Bglace.xls	Fichier Excel avec les statistiques de glace au site A pour chaque
	burst durant l'hiver 2012/2013
IMC12Bglace.xls	Fichier Excel avec les statistiques de glace au site C pour chaque
	burst durant l'hiver 2012/2013

### Références

- Balakrishnan, N., Voinov, V., Nikulin, M.S., 2013. Chi-Squared Goodness of Fit Tests with Applications. Academic Press, 256 p.
- Bajzak, C.E., Hammill, M.O., Stenson, G.B., Prinsenberg, S., 2011. Drifting away: implications of changes in ice conditions for a pack-ice-breeding phocid, the harp seal (*Pagophilus* groenandicus). Can. J. Zool., 89, 1050-1062. doi: 10.1139/z11-081.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104/C4, 7649-7666.
- Drapeau, G., Mercier, O., 1990. Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 44, 217-226.
- Eicken, H., Gradinger, R., Salganek, M., Shirasawa K., Perovich, D., Leppäranta, M., 2009. *Field techniques for sea ice research*. University of Alaska Press, Fairbanks, 566 p.
- Fofonoff, N.P., 1985. Physical properties of seawater: a new salinity scale and equation of state for seawater. *Journal of Geophysical Research*, 90, 3332-3342.
- Frequest, D., 2005. *MANICE, Manuel des normes d'observation des glaces*. 9e édition. Service canadien des glaces, Environnement Canada, Ottawa, 155 p.
- Galbraith, P.S., Chassé, J., Larouche, P., Gilbert, D., Brickman, D., Pettigrew, B., Devine, L., Lafleur, C., 2013. Physical oceanographic conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2012. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/026, v + 89 p.
- Grenier, A., Dubois, J.-M.M., 1992. L'évolution des côtes aux Îles-de-la-Madeleine. In : Dubois, J.-M., Gagnon, J. (Eds) Les Îles-de-la-Madeleine : un pays à découvrir. Info Géo Graphes, 1, 59-64.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Ergänzungsheft A12.
- Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., 1985. Effect of atmospheric stability on the growth of surface gravity waves. *Boundary-Layer Meteorol.*, 32, 85-96.
- Johnston, D.W., Friedlaender, A.S., Torres, L.G., Lavigne, D.M., 2005. Variation in sea ice cover on the east coast of Canada from 1969 to 2002: climate variability and implications for harp and hooded seals. *Climate Research* 29 (3), 209-222. doi : 10.3354/cr029209.
- Jolicoeur, S., O'Carroll, S., 2007. Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Iles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Quebec, Canada). *Landscape and Urban Planning*, 81, 287-298.
- MTQ, 2009. Érosion des berges, Les Îles-de-la-Madeleine, Plan d'action 2009-2012. Ministère des Transports du Québec, Rimouski, 27 p.
- Paskoff, T., 1998. Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. 3e édition, Armand Colin, Paris, 260 p.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. Computers & Geosciences, 28, 929-937. doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4

- Roche, 2011. Analyse des solutions en érosion côtières dans la Baie de Plaisence, Îles-de-la-Madeleine, étude en hydraulique maritime. Rapport final pour la Municipalité des Îlesde-la-Madeleine, 217 p.
- Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., Saucier, F., Gachon, P., Senneville, S., Fraser, C., Jolivet, Y., 2008. Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des chagements climatiques, Synthèse des résultats. Rapport pour Ouranos, 48 p.
- USACE, 2002. *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Manual EM 1110-2-1100, Washington, D.C., 6 volumes.