

**Stations d'observation des conditions maritimes
2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent
pour les problèmes d'érosion côtière**

Projet CC07.1

Rapport final

Présenté au ministère des Transports du Québec

Urs Neumeier et Sylvain Joly

Janvier 2019

Référence complète : Neumeier, U., Joly, S., 2019. Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xiv + 112 p.

Résumé

L'érosion côtière est une menace concrète pour le réseau routier, les infrastructures et les habitations dans de nombreux secteurs du Québec, dont le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie (incluant les Îles-de-la-Madeleine), ainsi que la Côte-Nord. Au cours de la dernière décennie, l'actualité a montré une préoccupation croissante de ce phénomène naturel au sein de la population, notamment par la médiatisation de certains événements météorologiques extrêmes et des dégâts associés. Ce projet est dans la continuité du précédent, intitulé "*Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014*", financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP). Cette prolongation permet ainsi d'améliorer l'information des conditions maritimes dans les zones sensibles en quantifiant la récurrence des événements majeurs et leur direction.

Dans le cadre du présent projet "*Stations d'observation des conditions maritimes dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent pour l'érosion des berges*" financé par le ministère des Transports du Québec, quatre houlographes (ADCP, modèle AWAC-AST) ont été installés, de mai 2014 à mai 2018, par 35 mètres de fond au large de secteurs affectés par l'érosion côtière : Saint-Ulric (site A), Cap d'Espoir (site B), Rivière-Pentecôte (site E) et Paspébiac (site F, 3 ans seulement de monitoring). Ces instruments mesurent les vagues, les courants, l'épaisseur des glaces et les niveaux d'eau. Également, un marégraphe a été installé au quai de Paspébiac dans la baie des Chaleurs à partir de juillet 2015 pour enregistrer le de niveau d'eau à haute fréquence. Chacun des mouillages au large a été remplacé tous les 6 mois en utilisant les navires de pêches disponibles localement. Les enregistrements ont produit une série quasi-continue de données de vagues, de courants et de niveau d'eau pendant quatre ans pour les sites de l'estuaire et du golfe, et de 3 ans pour Paspébiac dans la baie des Chaleurs.

Une des informations primordiales est le dépassement des records de hauteurs de vagues (H_{m0} et H_{max}) précédemment établis lors des événements de décembre 2010, par de nouveaux records que ce soit au site de St-Ulric (site A) ou de Cap d'Espoir (site B). Dans l'estuaire du St-Laurent, à St-Ulric, la tempête du 5 janvier 2018 a généré des vagues de 4,22 m de hauteur significative et les vagues les plus hautes ont été mesurées à 6,85 m (H_{max}). Deux autres tempêtes majeures ont produit des conditions des vagues supérieures à ce qui avait été mesuré en décembre 2010. Dans le golfe du St-Laurent, il s'agit de la tempête du 30 décembre 2016 qui a produit des vagues 6,61 m (H_{m0}) au site de Cap d'Espoir. Durant cet événement des vagues de 10,73 m (H_{max}) ont été mesurées. Sur la côte nord de l'estuaire, le littoral où se situe Rivière-Pentecôte a été également très exposé lors de la tempête hivernale du 30 décembre 2016, avec des vagues de 6,08 m (H_{m0}). Pour la baie des Chaleurs, les très hautes vagues (H_{m0} : 2,81 m) n'ont jamais dépassé les 3 m à cause du fetch limité.

Par ailleurs, la poursuite du suivi des 2 stations précédemment surveillées lors de la phase 2010-2014, a permis de dégager une tendance entre le début de la décennie (2010-2014) et la fin (2014-2018). Dans l'estuaire du St-Laurent, les vagues de 3 m sont ainsi trois fois plus fréquentes par rapport au début de la décennie. De plus, les tempêtes qui

génèrent des vagues en provenance de l'ouest sont plus fréquentes à la fin de la décennie qu'au début. De manière globale, sur l'ensemble des quatre sites surveillés, l'activité des tempêtes était plus importante au cours de la période mai 2016 à mai 2018. On observe ainsi une tendance à l'accroissement des événements extrêmes tant par leur intensité que par leur fréquence.

Pour ce qui est des conditions de glace, les données montrent de grosses variabilités entre les sites, les années et au cours d'une même saison, avec de multiples périodes libres de glace plus ou moins courtes. Les épaisseurs observées sont plus élevées que ce qui est documenté par le Service Canadien des Glaces. L'estuaire du St-Laurent, avec le site de St-Ulric est l'endroit où les glaces sont les plus présentes, malgré des conditions supérieures dans la baie des Chaleurs lors du dernier hiver 2017-2018. La pêche au crabe ayant été retardée de plusieurs semaines pour ce secteur. Cet hiver était d'ailleurs pour les quatre sites celui qui a connu des conditions de glace plus importantes que les précédents. Néanmoins, ces conditions n'ont pu empêcher le développement d'une tempête majeure dans l'estuaire du St-Laurent et dans la baie des Chaleurs, soit celle du 5 janvier 2018.

Les surcotes de tempêtes ont été déterminées à partir des données de niveaux d'eau mesurés par les mouillages, mais également par le marégraphe dans la marina de Paspébiac. Ces surcotes sont relativement fréquentes et interviennent essentiellement en hiver, mais n'ont produit des niveaux d'eau extrêmes seulement si elles étaient synchronisées avec des marées hautes de vive-eau. Au cours de la présente étude, les surcotes ont dépassé le seuil de 1 mètre aux quatre sites, notamment lors des tempêtes du 30 décembre 2016 et 5 janvier 2018.

Sur l'ensemble des données récoltées par le marégraphe, le signal de marée mesuré à Paspébiac est en phase avec celui de Belledune. Les niveaux d'eau mesurés par l'AWAC au site F sont quasi similaires à ± 15 cm aux niveaux d'eau obtenus par le marégraphe dans le port de Paspébiac.

Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	xii
Remerciements.....	xiv
1. Introduction	1
2. Acquisition des données	3
2.1. Sites d'étude	3
2.2. Description des instruments des mouillages	12
2.3. Configuration des mouillages.....	12
2.4. Programmation des mouillages	14
2.5. Nomenclature	16
2.6. Déroulement des missions et des déploiements	17
2.7. Description du marégraphe de Paspébiac.....	21
3. Traitement des données	26
3.1. Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants.....	26
3.2. Traitement et contrôle de qualité des données de vagues	28
3.3. Traitement et contrôle de qualité des données de courants	32
3.4. Traitement des données de glace.....	33
3.5. Traitement des données du marégraphe	35
3.6. Archivage des données.....	40
4. Résultats des instruments.....	43
4.1. Données de vagues	43
4.2. Données de courants.....	61
4.3. Glaces hivernales.....	67
4.4. Niveaux d'eau des mouillages.....	74
4.5. Niveau d'eau du marégraphe de Paspébiac	86
5. Modélisation	94
6. Discussion et conclusions.....	99
7. Description des fichiers	103
Références.....	107
Annexe 1 : Liste des paramètres de vagues	109
Annexe 2 : Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues	111

Liste des figures

Figure 1 – Position des sites d'études dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.....	3
Figure 2 – (Haut) Position du mouillage A (Saint-Ulric). (Bas) Fetch pour le mouillage A par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	5
Figure 3 – (Haut) Position du mouillage B (Cap d'Espoir); l'agrandissement montre la position exacte (point vert) sur le flanc externe du haut-fond Leander avec la bathymétrie multifaisceau du Service hydrographique du Canada; Profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage B par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	6
Figure 4 – (Haut) Position du mouillage E (Rivière-Pentecôte); profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage E par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).	7
Figure 5 – (Haut) Positions du mouillage F (Paspébiac) et du marégraphe dans le port de Paspébiac; profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage F par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).	8
Figure 6 – Baie des Chaleurs avec les positions du mouillage F (Paspébiac), de mouillages côtiers avec Aquadopp Profiler à Bonaventure et St-Godefroi, du marégraphe dans le port de Paspébiac et du marégraphe du Service hydrographique du Canada (SHC) dans le port de Belledune; profondeur en brasses.....	9
Figure 7 – Positions des mouillages installés en été 2017 devant Bonaventure et St-Godefroi. Le relief sous-marin est illustré avec des données multifaisceaux et Lidar du SH; profondeur en brasses.	9
Figure 8 – Vue détaillée de la position de chacun des déploiements aux quatre sites, ainsi que du point visé (cible). En plus des déploiements du présent projet (gros cercles), les déploiements du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP sont aussi représentés pour les sites A et B (petit cercles).	10
Figure 9 – Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée sur le fond. (B) Mouillage MTRBM ouvert avec la bouée pour la récupération (la corde de récupération est dans le cylindre noir, le déclencheur acoustique Benthos (gris), les deux caissons batteries (bleu) et des lests de plomb pour assurer la stabilité de la plateforme.	13
Figure 10 – Plateforme GP-TRBM avec AWAC après la récupération à bord du bateau de pêche Miss Amy Lynn. La bouée utilisée pour la récupération	

a été relâchée par le largueur acoustique et la corde en Spectra est déroulée.	14
Figure 11 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes).	15
Figure 12 – Périodes de déploiement des mouillages aux quatre sites avec le nom de chaque déploiement. L’asymétrie des périodes estivales et hivernales est due aux disponibilités très limitées des bateaux de pêches pour opérer.	20
Figure 13 – Position du marégraphe (flèche verte) et du baromètre enregistreur (cercle bleu) dans le port de Paspébiac.	23
Figure 14 – Schéma et photo du montage du marégraphe. Le deuxième instrument (gris foncé sur le schéma) a seulement été installé à partir du 6 novembre 2017; avant cette date il y avait un seul instrument.	24
Figure 15 – Vue générale du marégraphe installé dans l'angle du quai et du tube temporaire utilisé pour les mesures manuelles.	24
Figure 16 – Interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d’un burst (bas).	31
Figure 17 – Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.	33
Figure 18 – Seconde fenêtre de l’interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l’interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L’épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances pression-AST est en turquoise entre les deux graphiques inférieurs.	35
Figure 19 – Pressions mesurées avec le baromètre enregistreur RBR DR-1050 à Paspébiac et à la station météorologique EC de New Carlisle, ainsi que la différence entre les deux séries temporelles : le premier présente des variations cycliques corrélées avec les cycles quotidiens de température.	37
Figure 20 – Mesures manuelles de niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Paspébiac le 17 novembre 2015 avant et après le remplacement du marégraphe.	38
Figure 21 – Exemple des petites oscillations avec des périodes de 15-48 minutes, ainsi que du lissage avec un filtre passe-bas.	39
Figure 22 – Page d’accès aux archives de données environnementales sur le site de l’Observatoire Global du Saint-Laurent. La recherche peut se faire par type de variables ou bien par identifiant de mission.	41
Figure 23 – Exemples de jeu de données disponibles sur le site internet de l'OGSL pour les sites de Rivière-Pentecôte (haut) et de Paspébiac (bas).	42

Figure 24 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} à St-Ulric et Cap d’Espoir en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 et 2010-2018.	46
Figure 25 – Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} aux quatre sites. Les courbes des sites A et B sont construites en intégrant les 4 années du projet précédent.	47
Figure 26 – Roses de vagues pour les quatre sites et pour toute la durée du projet. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d’occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L’échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), 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 provenant de cette direction.	48
Figure 27 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 16 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	49
Figure 28 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site B (Cap d’Espoir). Les 16 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	50
Figure 29 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 16 plus fortes tempêtes durant les quatre années du projet sont indiquées avec des cercles rouges (la portion du 1 ^{er} mai au 24 septembre 2018 n’est pas montrée par convenance).	51
Figure 30 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site F (Paspébiac). Les 12 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	52
Figure 31 – Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des 40 plus fortes tempêtes observées aux sites A et B et des 25 plus fortes tempêtes observées aux sites E et F durant le projet. Les triangles en bleu correspondent à la période 2010-2014 et les triangles en rouge, 2014-2018.	55
Figure 32 – Relation entre les hauteurs de vagues H_{m0} et les périodes T_{02} mesurées aux quatre sites durant le projet. Ces graphiques montrent bien les périodes des plus fortes vagues de tempête et la présence de houle avec une longue période mais une plus faible amplitude. La densité des mesures est indiquée avec un code de couleur (bleu : faible densité, rouge : forte densité).	56
Figure 33 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites A et B. Les tempêtes utilisées pour l’ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les	

événements au-dessus du 93 ^e percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.	57
Figure 34 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites E et F. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les événements au-dessus du 93 ^e percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.	58
Figure 35 – Comparaison des vagues mesurées au site F (Paspébiac) avec celles mesurées devant Bonaventure (gauche) et devant St-Godefroi (droite).	59
Figure 36 – Séries temporelles des vagues mesurées au site F (Paspébiac), devant Bonaventure à 4,5 m de profondeur et devant St-Godefroi à 4 m de profondeur. En grisé sont indiquées les périodes quand les vagues venaient de l'est au site F (Paspébiac).	60
Figure 37 – Profils de vitesse enregistrés au site E (Rivière-Pentecôte), exemple pour décembre 2016. Les données marquées comme mauvaises sont en noir.	63
Figure 38 – Profils de vitesse enregistrés au site F (Paspébiac), exemple pour juin 2015. Les données marquées comme mauvaises sont en noir.	64
Figure 39 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées au site A et B de mai 2014 à avril 2018.	65
Figure 40 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées au site E (mai 2014 à septembre 2018) et au site F (mai 2015 à avril 2018).	66
Figure 41 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les quatre hivers du projet.	70
Figure 42 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les quatre hivers du projet.	71
Figure 43 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant les quatre hivers du projet.	72
Figure 44 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers avec mouillage.	73
Figure 45 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	77
Figure 46 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	78

Figure 47 – Niveau d’eau (par rapport au niveau d’eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	79
Figure 48 – Niveau d’eau (par rapport au niveau d’eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) durant les trois ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	80
Figure 49 – Niveaux d’eau mesurés, prédictions de marées avec T_TIDE et surcotes pendant la tempête du 30 décembre 2016.	81
Figure 50 – Niveaux d’eau mesurés, prédictions de marées avec T_TIDE et surcotes pendant la tempête du 5 janvier 2018.	82
Figure 51 – Fréquence d’inondation selon les données mesurées durant les quatre ans (l’ensemble des données et le détail sur les 1% les plus hauts). L’altitude est par rapport au niveau marin moyen mesuré par les instruments.	85
Figure 52 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2015-07-04 au 2016-08-02 : niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu entre juillet 2015 et mai 2018, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.	88
Figure 53 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2017-06-27 au 2018-05-01 : niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu entre juillet 2015 et mai 2018, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.	89
Figure 54 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés à Paspébiac, à Belledune (marégraphe SHC) et par l'AWAC F au large de Paspébiac, exemple de 7 jours. Pour Belledune et l'AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximativement par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.	90
Figure 55 – Différences entre les niveaux d'eau mesurés à Paspébiac, à Belledune (marégraphe SHC) et par l'AWAC F au large de Paspébiac, différences détaillées et différences lissées avec un filtre passe-bas de 48 heures.	90
Figure 56 – Comparaison entre le niveau d'eau mesuré à Paspébiac, les prédictions de marées avec T_TIDE (harmoniques calculées à partir du niveau mesuré) et les prédictions de marées du SHC, exemple de 8 jours.	91
Figure 57 – Comparaison entre les surcotes (observation - prédictions de T-TIDE) au marégraphe de Paspébiac, au marégraphe de Belledune (SHC), et à l'AWAC au large de Paspébiac, exemple de deux périodes de 17 jours. Les observations des deux premiers sites ont été lissées avec un filtre passe-bas de 60 minutes pour le calcul de la surcote.	93

Figure 58 – Grilles curvilinéaires utilisées pour la modélisation : G1 en bleu, G2 en vert, G3A (Bonaventure) en violet et G3B (Saint-Godefroi) en rouge.....97

Figure 59 – Exemple de la modélisation hydrodynamique pour la grille de Bonaventure le 2014-11-28 à 13:40. (A) Salinité de la couche de surface, (B) Salinité sur un profil perpendiculaire à la côte.....98

Liste des tableaux

Tableau 1 – Positions des quatre mouillages (sites visés, pour les positions exactes de chaque déploiement, voir Tableau 2).	3
Tableau 2 – Position exacte ainsi que début et fin de chaque déploiement aux quatre sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide).	11
Tableau 3 – Synthèse des paramètres de programmation des instruments.	16
Tableau 4 – Début et fin approximative de chaque période de déploiement. Pour les dates exactes de chaque mouillage, voir Tableau 2.	17
Tableau 5 – Listes des sorties en mer effectuées pour les mouillages du projet. La nomenclature des missions reprend celle utilisée pour l’archivage des données dans le SGDO	21
Tableau 6 – Liste des visites de terrain pour le marégraphe de Paspébiac.	22
Tableau 7 – Coordonnées et altitudes mesurées près du marégraphe de Paspébiac lors du relevé topographique du 4 juillet 2015.	25
Tableau 8 – Signification des différents bits de l’octet du flag de qualité des données de courants.	32
Tableau 9 – Altitude par rapport au zéro des cartes marines du marégraphe de Paspébiac (altitudes déterminées en début et en fin de déploiement, altitude utilisée pour le traitement des données) ainsi que constante p_{offset} déterminée pour chaque déploiement.	38
Tableau 10 – Les 40 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2018 aux sites A et B. Les tempêtes de la période 2010-2014 sont surlignées en grisé.	53
Tableau 11 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2018 aux sites E et F.	54
Tableau 12 – Statistiques sur les couvertures de glace annuelles à chaque site.	69
Tableau 13 – Liste des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes observées aux sites A, B, E et F, avec l’heure, la surcote/décote par rapport aux prédictions de marée et le niveau d’eau (par rapport au niveau d’eau moyen observé) à ce moment-là.	83
Tableau 14 – Liste des 10 plus hauts niveaux marins observés aux quatre sites, avec l’heure, le niveau marin (par rapport au niveau d’eau moyen observé) et la surcote/décote par rapport aux prédictions de marée à ce moment-là.	84
Tableau 15 – Liste des 10 plus fortes surcotes, des 10 plus fortes décotes et des 10 plus hauts niveaux observés au marégraphe du port de Paspébiac (niveau marin par rapport à CGVD28). La surcote/décote mesurée par l’AWAC au site F et la différence avec celle du marégraphe de Paspébiac est indiquée à titre de comparaison	92

Tableau 16 – Débit des rivières reproduites dans le modèle avec la période des données utilisées pour calculer les débits moyens.	96
Tableau 17 – Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues, avec les flags utilisés dans ce projet et les valeurs équivalentes des flags utilisés dans le Système de gestion de données environnementale de l'ISMER (SGDE).	111
Tableau 18 – Codes explicatifs du contrôle de qualité.	112

Remerciements

Les mouillages ont été préparés et entretenus par Gilles Desmeules. La plupart des opérations de terrain ont été réalisées par Urs Neumeier, Gilles Desmeules et Sylvain Joly, certaines aussi par Bruno Cayouette, Lou Tisé et Christian Boutot.

Les mouillages ont été récupérés et réinstallés avec des bateaux de pêche des différents ports : *Le Dauphin III* (pêcheur Bertrand Desbois), *Maxime C1* et *Rémy Martin* (pêcheur Georges Huard) et *Belle Mer* (pêcheur Roger Ouellet) à Matane; *Mary David* et *Miss Amy Lynn* (pêcheur Gilles Duguay), *Le Fish* (pêcheur Lauréat Lelievre) à Sainte-Thérèse-de-Gaspé/Grande-Rivière; *Jérôme Isabelle* (Sylvain Gauthier) à Rivière-Pentecôte. La mise en place initiale de trois des mouillages du projet a été effectuée lors de la dernière mission du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP avec le navire de recherche Coriolis II (capitaine Emmanuel Sevor). Le *Macoma*, bateau de 6,7 mètres de l'ISMER, a été utilisé deux fois pour localiser par télémétrie le mouillage A (Saint-Ulric) qui n'avait pas pu être récupéré normalement. Le *Néreis*, bateau de 4,7 m de l'ISMER a été utilisé pour le marégraphe de Paspébiac ainsi qu'en 2017 pour les mouillages côtiers devant Bonaventure et Hope Town.

Les plongeurs Fred Hartog et Mario Déraspe ont permis à plusieurs occasions de récupérer un mouillage dont la bouée était bloquée. Marc-André Desroches et Nelson Holmes ont aidé pour l'installation du marégraphe au quai de Paspébiac.

Le traitement des données et le contrôle de qualité ont été effectués par Urs Neumeier et Sylvain Joly. Des discussions avec James Caveen et Pascal Guillot ont aidé à définir les procédures du contrôle de qualité. Edwige Boudiere, Marion Bandet et Sylvain Joly ont travaillé sur la modélisation. Simon Senneville, Dany Dumont et Magalie Hardy ont fourni des données pour la modélisation.

Ce projet a été 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). Christian Poirier et Michel Michaud ont assuré la coordination du projet au MTQ.

1. Introduction

L'érosion côtière est un processus dynamique souvent naturel, mais qui entre en conflit à l'occupation statique du territoire côtier par l'Homme. En effet, les maisons, les infrastructures et le réseau routier s'adaptent difficilement à l'évolution dynamique de la morphologie littorale. Pour de nombreux secteurs de la Gaspésie, de la Côte-Nord et du Bas-Saint-Laurent, la majorité de la population est concentrée dans la zone côtière. De plus, les principaux axes de communication (routes 132 et 138) sont souvent très proches du rivage pour des raisons historiques ou des contraintes géomorphologiques. Ces routes sont vulnérables et en même temps essentielles pour la sécurité de la population (Drejza et al., 2014).

La côte québécoise de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est souvent constituée de sédiments meubles déposés depuis la fin de la glaciation. Ces sédiments subissent à certains endroits une érosion significative (Bernatchez et Dubois, 2004). Avec les changements climatiques attendus ces prochaines décennies, les impacts de l'érosion côtière augmenteront probablement (Savard et al., 2009), et les coûts pour s'adapter à cette réalité augmenteront fortement (Bernatchez et al., 2015).

L'érosion côtière est un phénomène naturel, qui est principalement causée par les vagues avec aussi des contributions par les courants et les glaces hivernales. Lors de tempêtes majeures, les vagues peuvent déplacer d'importantes quantités de sédiments vers le large ou vers l'intérieur des terres. Lors de tel événements, le niveau d'eau détermine l'étage de la plage qui est principalement remanié par les vagues. En cas de hauts niveaux dues aux marées de vive-eau combinées avec des surcotes de tempêtes, les vagues affecteront directement le haut de plage et pourront aussi attaquer la zone supratidale, ce qui peut mettre en danger les bâtiments et les routes près du rivage (USACE, 2002).

Les vagues sont aussi le principal agent de la dérive littorale, qui est le transport de sédiment sableux ou graveleux le long de la côte. Lorsque la dérive littorale est interrompue (souvent par l'action anthropique) ou si la dérive littorale accélère localement (importation plus faible que l'exportation dans un secteur), le résultat est un recul du trait de côte.

Une bonne connaissance du climat de vague est donc nécessaire pour étudier la morphodynamique littorale et surtout pour planifier les interventions de génie côtier. Les données sur les vagues sont toutefois relativement rares pour les côtes québécoises. De plus les houlographes ont souvent été retirés à l'automne, si bien que les séries temporelles ne couvrent pas la fin de l'automne et le début de l'hiver, qui sont pourtant la période avec les plus fortes tempêtes. Cette limitation de certaines études passées est due à la présence de glace de mer en hiver, qui peut endommager les instruments. Pourtant cette période est particulièrement intéressante, car la capacité d'atténuation des vagues par la glace de mer n'est pas encore bien comprise. C'est aussi une raison pourquoi la modélisation numérique ne peut que difficilement remplacer les mesures réelles. En effet, les interactions vagues-glace commencent à être incluses dans certains modèles numériques, mais les formulations nécessitent encore d'être calibrées et validées.

Un précédent projet intitulé "*Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014*", qui avait été financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec, Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie, et réalisé par l'UQAR/ISMER, a mesuré les vagues au large de Saint-Ulric, du Cap d'Espoir et de Sept-Îles (deux mouillages) pendant quatre ans.

Le présent projet, qui est financé par le ministère des Transports du Québec dans le cadre du Fonds vert et du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020) du gouvernement du Québec, a utilisé les mêmes équipements que le projet précédent, complété par l'achat d'un nouveau mouillage complet. Les vagues ont continué à être mesurées à deux sites du précédent projet (Saint-Ulric et Cap d'Espoir) et deux nouveaux sites ont été ajoutés (Rivière-Pentecôte et Paspébiac). Les nouveaux sites ont été choisis lors d'une réunion avec des représentants du MTQ, du MSP et de l'ISMER. La position exacte de chaque mouillage a été déterminée par Urs Neumeier selon des considérations techniques.

Le présent projet a trois objectifs généraux. (A) Améliorer les connaissances du climat de vagues à quatre sites du golfe et de l'estuaire du Saint Laurent ainsi que dans la baie des Chaleurs (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière Pentecôte et Paspébiac). (B) Mesurer aux mêmes sites les courants, les glaces hivernales et les niveaux d'eau (avec aussi un marégraphe dans le port de Paspébiac). (C) Évaluer l'impact des changements climatiques, notamment la diminution de la glace de mer et la hausse du niveau marin, sur les courants, les vagues et le transport sédimentaire près de la côte en recourant à la modélisation numérique.

Ce rapport décrit les instruments et les méthodes utilisés, puis présente les données récoltées durant les quatre années qu'a duré le projet. Il décrit aussi la modélisation numérique qui a été commencée pour la baie des Chaleurs, mais n'a pas pu être achevée principalement à cause de l'abandon de l'étudiante chargée de ce volet du projet.

2. Acquisition des données

2.1. Sites d'étude

Ce projet a mesuré les conditions océanographiques au large de quatre secteurs menacés par l'érosion côtière (Figure 1). La position exacte de chaque mouillage a été déterminée selon des considérations techniques (profondeur, rugosité et pente du fond marin) pour assurer un bon fonctionnement des instruments, une bonne stabilité des mouillages et une profondeur suffisante pour éviter les dommages par les glaces hivernales. Les coordonnées des sites sont indiquées au Tableau 1.

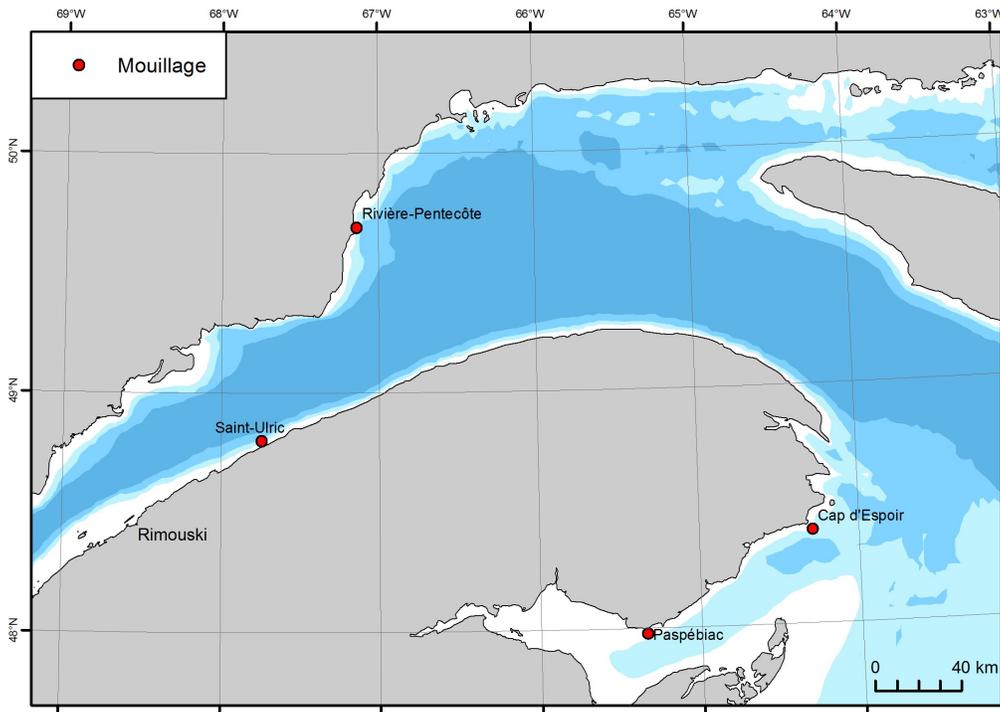


Figure 1 – Position des sites d'études dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Tableau 1 – Positions des quatre mouillages (sites visés, pour les positions exactes de chaque déploiement, voir Tableau 2).

Identifiant et nom	Longitude / Latitude	MTM X / Y (fuseau)	Prof. #
A : Saint-Ulric	48° 48,000' N / 67° 44,600' W	286925 / 5406874 (6)	32 m
B : Cap d'Espoir	48° 23,350' N / 64° 17,350' W	320413 / 5361186 (5)	37 m
E : Rivière-Pentecôte	49° 41,770' N / 67° 08,700' W	330401 / 5506563 (6)	34 m
F : Paspébiac	47° 58,900' N / 65° 20,200' W	242348 / 5316196 (5)	34 m

Profondeur sous le zéro des cartes marines.

Les figures 2 à 5 présentent des cartes détaillées pour chaque mouillage ainsi que les fetchs (distance sur laquelle le vent peut souffler dans une direction pour générer les vagues). Les fetchs sont indiqués pour tous les 3° en direction, mais aussi comme fetchs pondérés selon la méthode d'Yvon Ouellet (Neumeier et al. 2016), qui calcule une moyenne pondérée de -42° à +42°.

Le site de Saint-Ulric (A) est à ~32 m de profondeur et à environ 2,3 km au large de Saint-Ulric (Figure 2). La côte sud de l'estuaire est ici presque rectiligne et la bathymétrie présente une pente relativement régulière entre 10 et 60 m de profondeur. Le site A est représentatif pour les vagues au large dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent entre Matane et Sainte-Flavie.

Le site de Cap d'Espoir (B) est à ~37 m de profondeur environ 4 km au large du cap d'Espoir sur la pente externe du haut-fond Leander (Figure 3). Le mouillage est placé dans une zone au relief peu accidenté (replat sans trop de grands blocs). Ce site permet de mesurer les vagues du golfe du Saint-Laurent frappant Percé et Anse-à-Beaufils en provenance du nord-est, de l'est et du sud-est, ainsi que les vagues sortant de la baie des Chaleurs. Il est aussi pertinent pour mesurer les vagues du golfe du Saint-Laurent entrant dans la baie des Chaleurs.

Le site de Rivière-Pentecôte (E) est à 34 m de profondeur entre les villages de Rivière-Pentecôte et de Baie-Trinité, à 3 km au nord de la Pointe-aux-Anglais (Figure 4). La côte est ici rectiligne nord-sud devant une petite plaine côtière formée de cordons littoraux. La bathymétrie forme localement une pente régulière entre 20 et 50 m de profondeur, mais est plus irrégulière en plus grande profondeur (Figure 4). Ce site du nord-ouest du golfe du Saint-Laurent est bien exposé aux vagues venant du sud, sud-est, de l'est et du nord-est.

Le site de Paspébiac (F) est à 34 m de profondeur en face de la pointe de New-Carlisle (Figure 5). Il est représentatif pour la partie centrale nord de la baie des Chaleurs. Les plus grands fetchs sont de l'est et d'est-nord-est, mais il y a aussi des fetchs de plus de 50 km vers l'ouest, c'est-à-dire vers l'intérieur de la baie des Chaleurs.

En été 2017, deux mouillages côtiers ont aussi été installés. L'un était devant Bonaventure à 800 m du rivage à une profondeur de 4,5 m sous le zéro des cartes marine (48° 2,384' N 65° 30,142' W, Figures 6 et 7). L'autre était devant St-Godefroi à 400 m du rivage à 4,0 m sous le zéro des cartes marine (48° 4,016' N 65° 7,329' W, Figures 6 et 7).

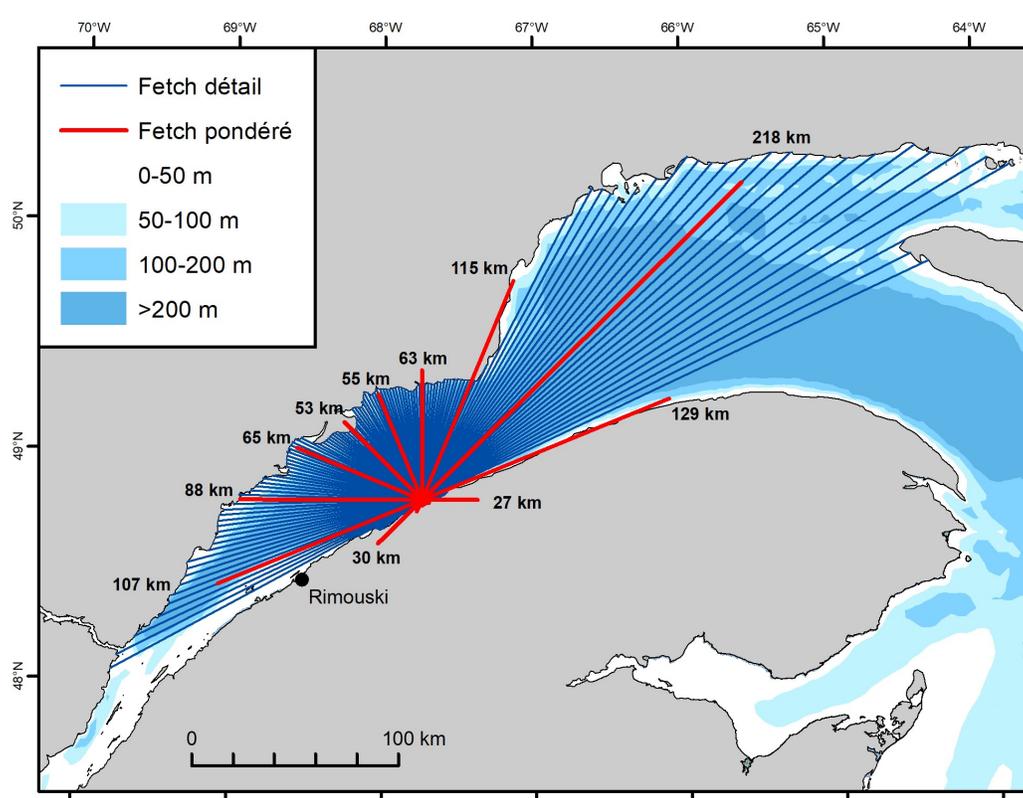
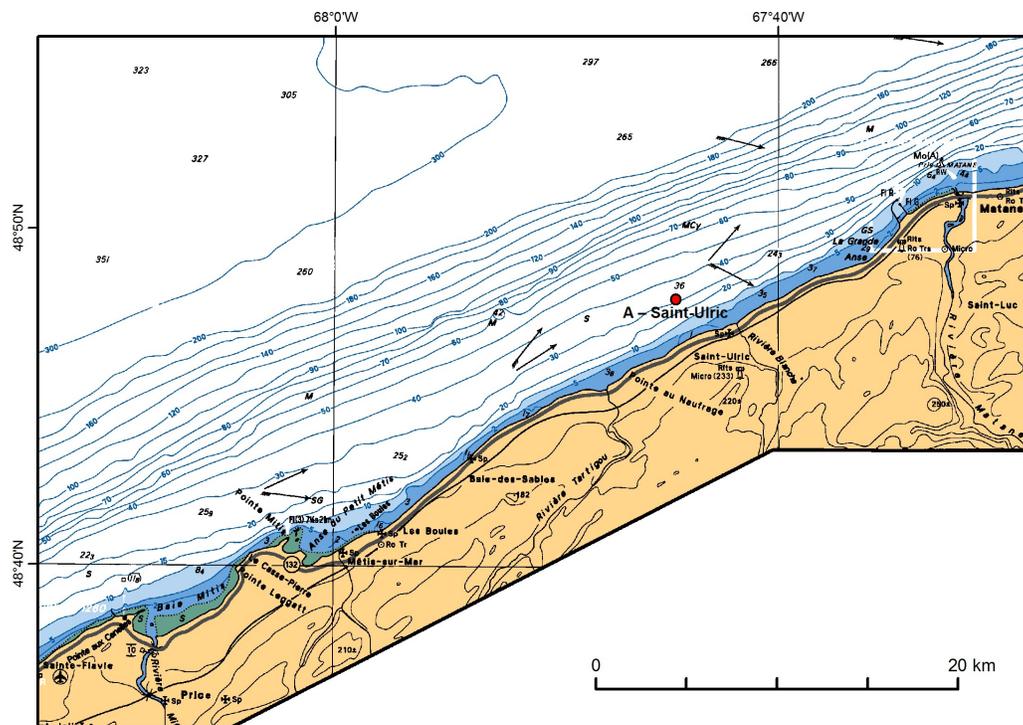


Figure 2 – (Haut) Position du mouillage A (Saint-Ulric). (Bas) Fetch pour le mouillage A par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

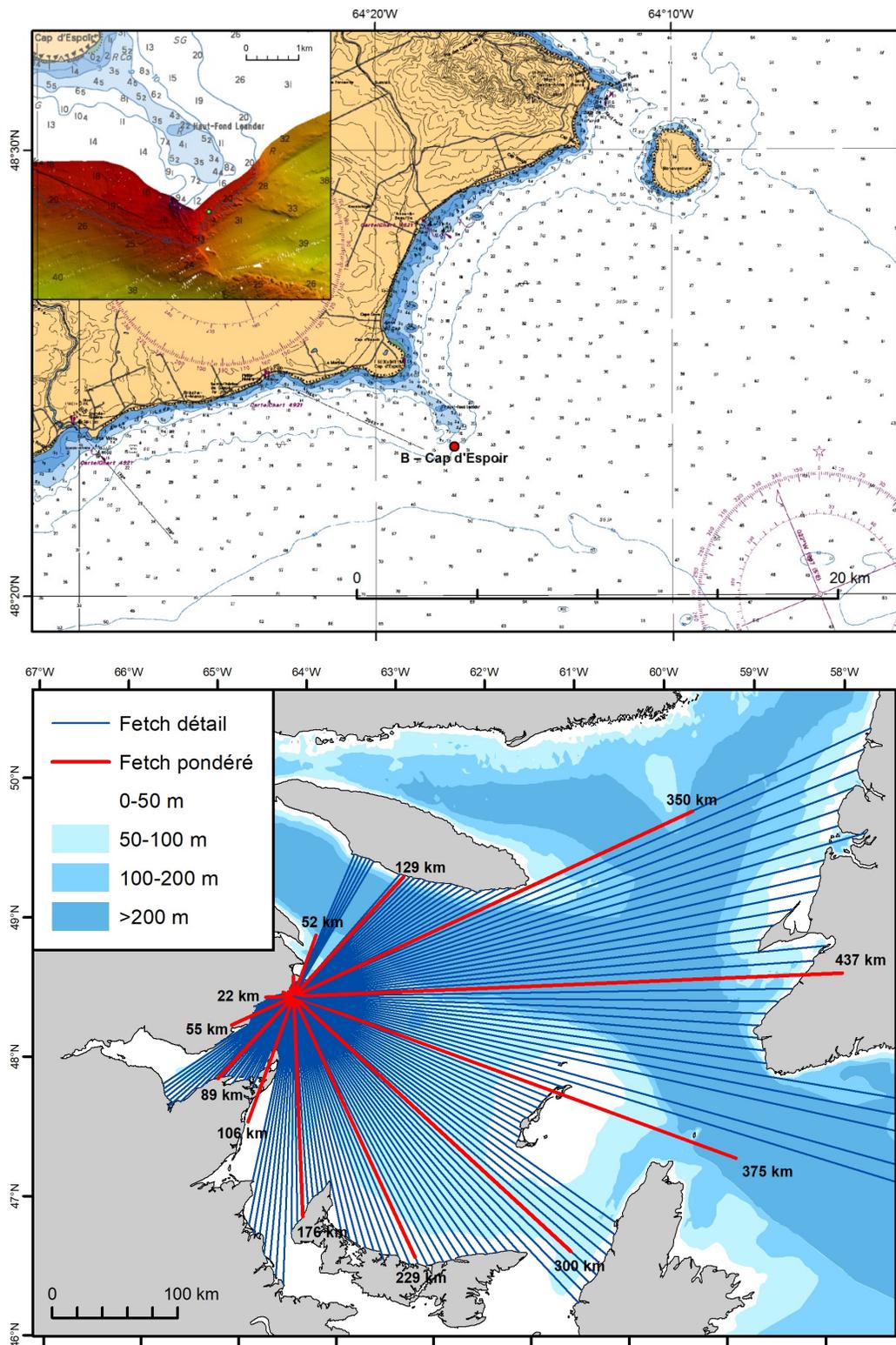


Figure 3 – (Haut) Position du mouillage B (Cap d'Espoir); l'agrandissement montre la position exacte (point vert) sur le flanc externe du haut-fond Leander avec la bathymétrie multifaisceau du Service hydrographique du Canada; Profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage B par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

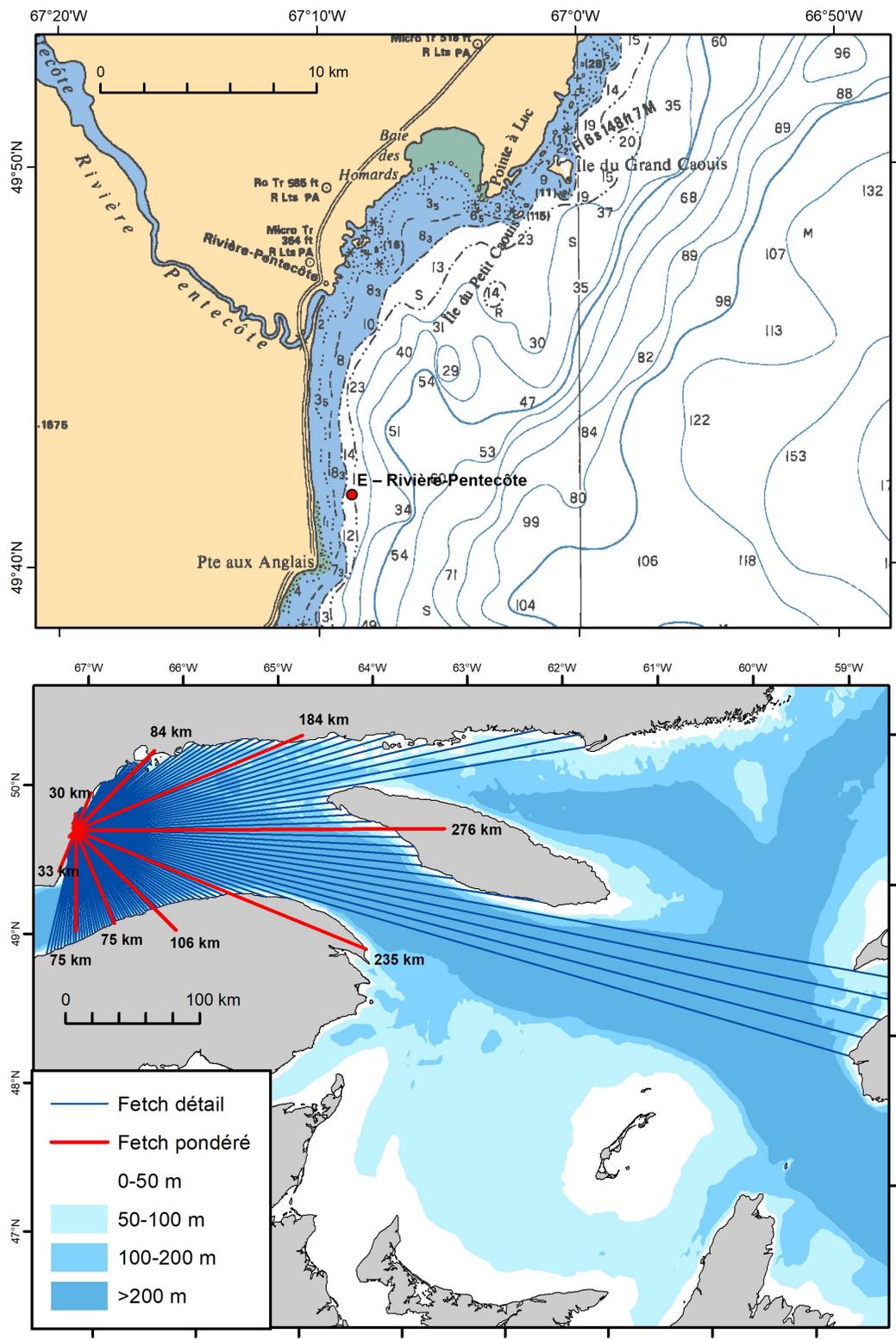


Figure 4 – (Haut) Position du mouillage E (Rivière-Pentecôte); profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage E par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

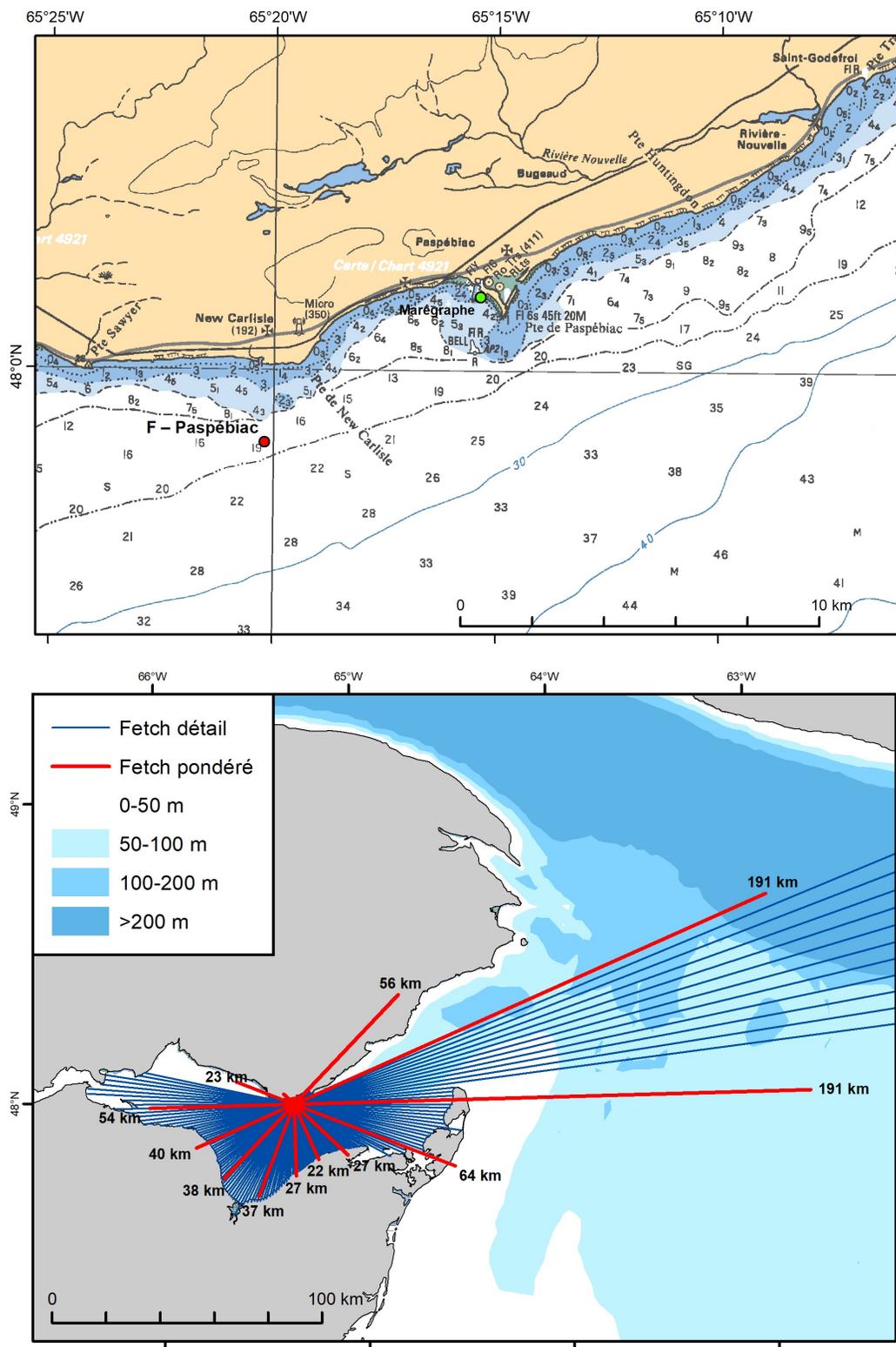


Figure 5 – (Haut) Positions du mouillage F (Paspébiac) et du marégraphe dans le port de Paspébiac; profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage F par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

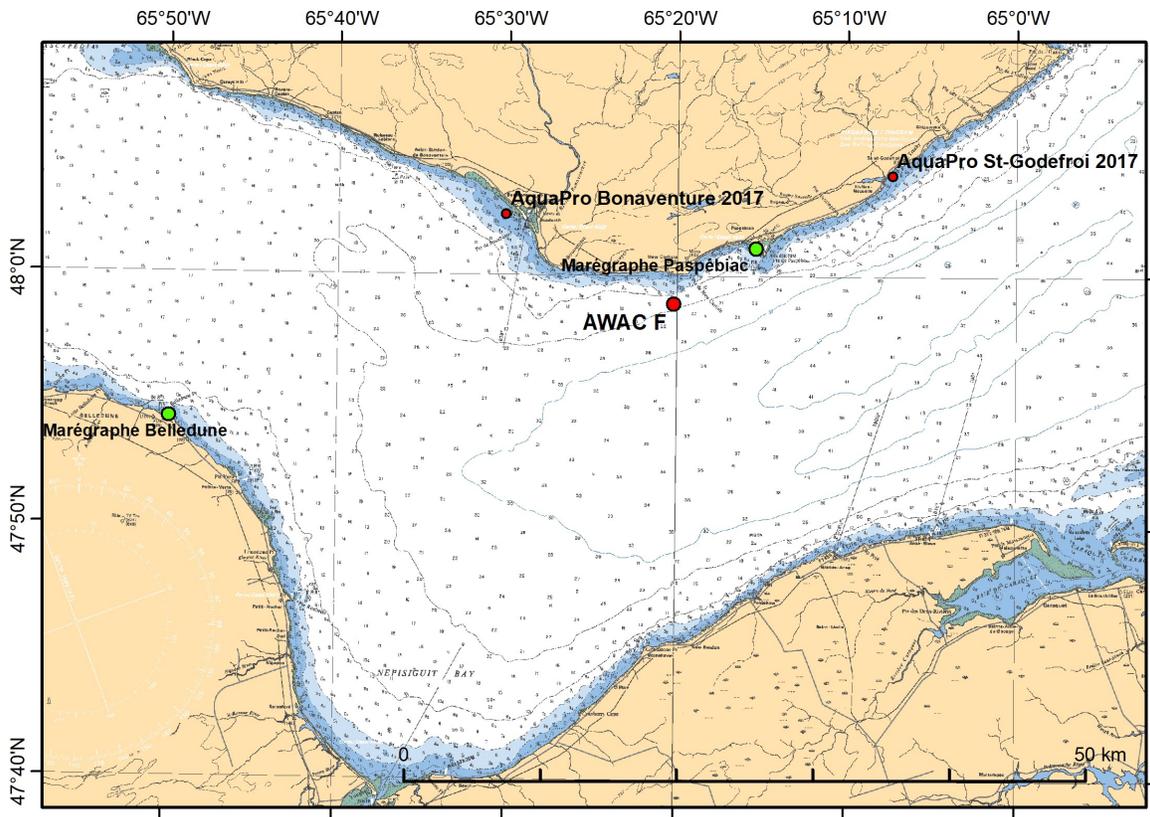


Figure 6 – Baie des Chaleurs avec les positions du mouillage F (Paspébiac), de mouillages côtiers avec Aquadopp Profiler à Bonaventure et St-Godefroi, du marégraphe dans le port de Paspébiac et du marégraphe du Service hydrographique du Canada (SHC) dans le port de Belledune; profondeur en brasses.

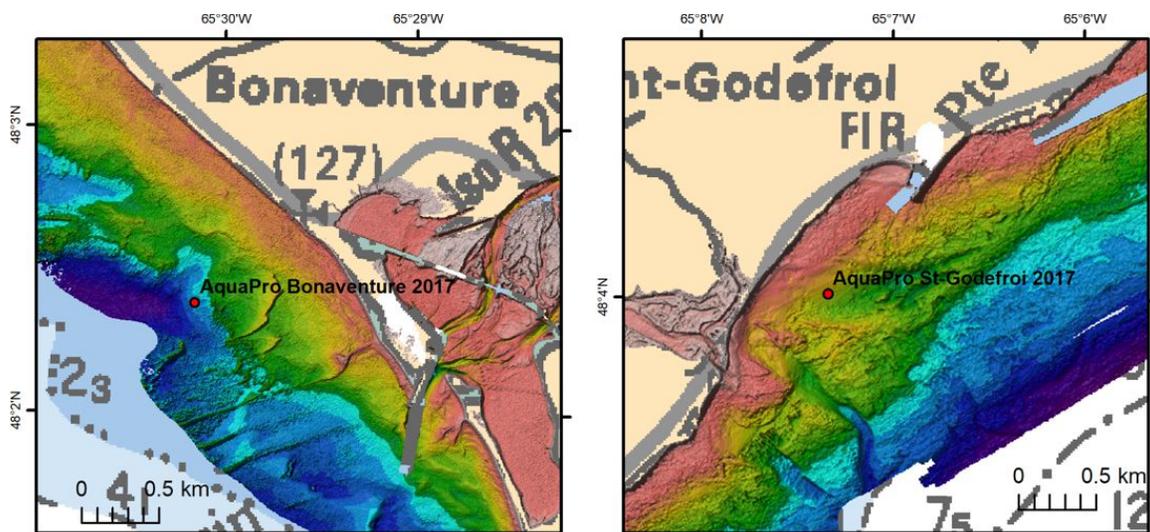


Figure 7 – Positions des mouillages installés en été 2017 devant Bonaventure et St-Godefroi. Le relief sous-marin est illustré avec des données multifaisceaux et Lidar du SH; profondeur en brasses.

Le Tableau 1 indique la position visée pour les quatre sites. La position réelle des mouillages lors de chaque déploiement était un peu différente à cause de la difficulté de maintenir les bateaux immobiles par rapport au fond, alors qu'ils sont soumis à des courants significatifs. De plus, les mouillages étaient volontairement placés 50-100 m plus loin si le mouillage précédent n'avait pas pu être récupéré normalement pour éviter les interférences entre les instruments et pour faciliter le travail des plongeurs. Enfin au site E, les mouillages ont parfois été placés un peu plus loin à cause de la présence de lignes de paniers de pêcheurs de crabes. Le Tableau 2 et la Figure 8 indiquent la position exacte de chaque mouillage.

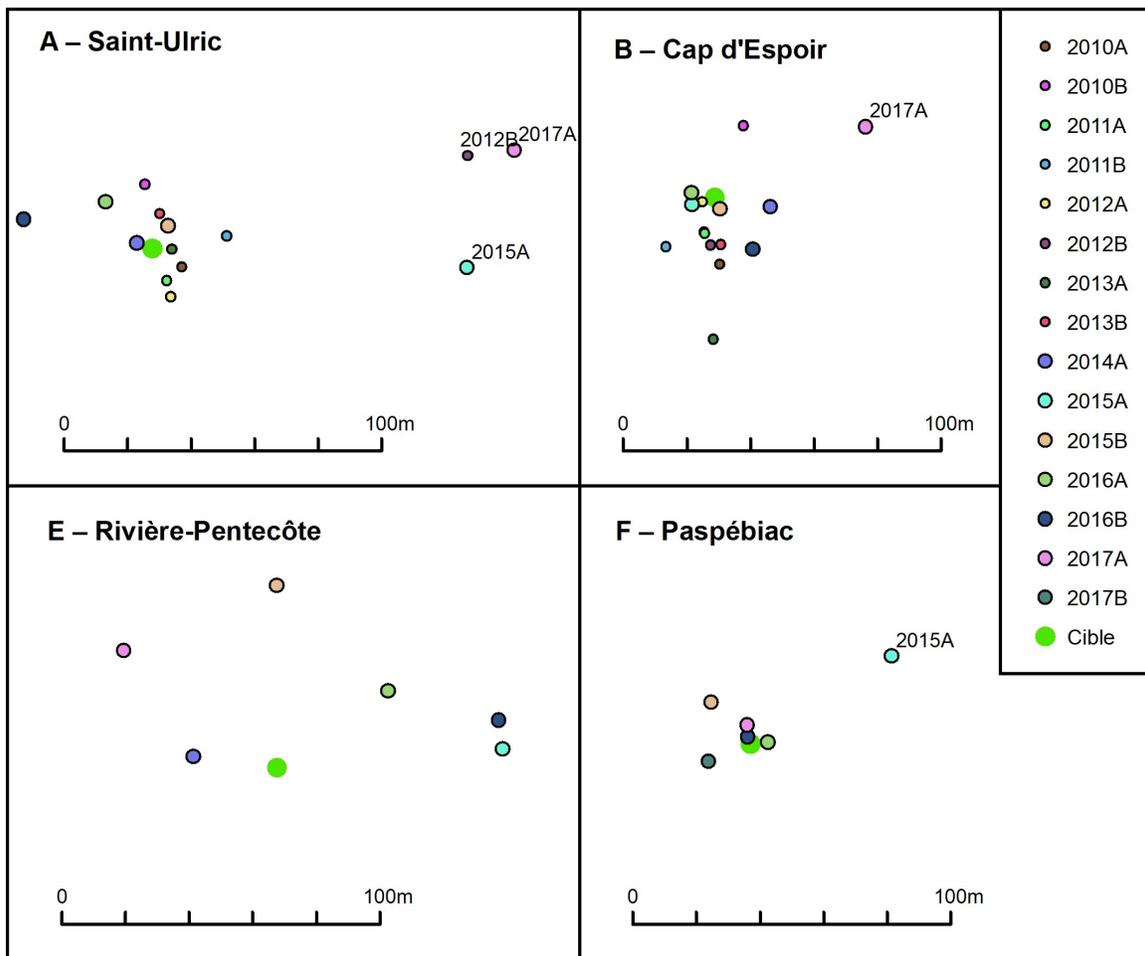


Figure 8 – Vue détaillée de la position de chacun des déploiements aux quatre sites, ainsi que du point visé (cible). En plus des déploiements du présent projet (gros cercles), les déploiements du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP sont aussi représentés pour les sites A et B (petit cercles).

Tableau 2 – Position exacte ainsi que début et fin de chaque déploiement aux quatre sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide).

Période	Fichier	Début (HNE)	Fin (HNE)	Latitude	Longitude	Prof. m [#]
<i>A – Saint-Ulric</i>						
cible A				48° 48,000' N	67° 44,600' W	32
2014A	SPA14A	2014-05-07 08:00	2015-03-11 01:00	48° 48,001' N	67° 44,604' W	34
2015A	SPA15A	2015-06-17 13:00	2015-09-15 09:00	48° 47,997' N	67° 44,519' W	33,5
2015B	SPA15B	2015-09-15 11:00	2016-04-22 06:00	48° 48,004' N	67° 44,596' W	34
2016A*	SPA16A	2016-04-22 07:00	2017-02-22 17:00	48° 48,008' N	67° 44,612' W	34
2016B	SPA16B	2016-10-20 12:00	2017-05-31 15:00	48° 48,005' N	67° 44,633' W	34,3
2017A	SPA17A	2017-05-31 11:00	2018-04-04 05:00	48° 48,017' N	67° 44,507' W	33,8
<i>B – Cap d'Espoir</i>						
cible B				48° 23,350' N	64° 17,350' W	37,1
2014A	SPB14A	2014-05-05 15:00	2015-02-01 00:00	48° 23,348' N	64° 17,336' W	38,1
2015A	SPB15A	2015-05-22 06:00	2015-10-21 13:00	48° 23,349' N	64° 17,356' W	37,8
2015B	SPB15B	2015-10-21 15:00	2016-06-11 08:00	48° 23,348' N	64° 17,349' W	37,8
2016A	SPB16A	2016-06-11 09:00	2016-09-27 08:00	48° 23,351' N	64° 17,356' W	37,9
2016B	SPB16B	2016-09-27 09:00	2017-06-22 13:00	48° 23,348' N	64° 17,341' W	38,3
2017A	SPB17A	2017-06-22 14:00	2018-04-23 11:00	48° 23,361' N	64° 17,311' W	38,6
<i>E – Rivière-Pentecôte</i>						
cible E				49° 41,770' N	67° 08,700' W	34
2014A	SPE14A	2014-05-06 17:00	2015-03-10 10:00	49° 41,772' N	67° 08,722' W	33,7
2015A	SPE15A	2015-06-22 17:00	2015-10-06 05:00	49° 41,773' N	67° 08,641' W	36,4
2015B	SPE15B	2015-10-06 07:00	2016-04-21 17:00	49° 41,801' N	67° 08,700' W	34,8
2016A	SPE16A	2016-04-21 19:00	2016-10-27 13:00	49° 41,783' N	67° 08,681' W	34,8
2016B	SPE16B	2016-10-27 14:00	2017-06-06 06:00	49° 41,778' N	67° 08,642' W	37,2
2017A	SPE17A	2017-06-06 07:00	2018-09-24 03:00	49° 41,790' N	67° 08,740' W	32,3
<i>F – Paspébiac</i>						
cible F				47° 58,900' N	65° 20,200' W	34
2015A	SPF15A	2015-05-22 17:00	2015-10-22 06:00	47° 58,914' N	65° 20,164' W	34,6
2015B	SPF15B	2015-10-22 08:00	2016-06-10 13:00	47° 58,907' N	65° 20,210' W	34,5
2016A	SPF16A	2016-06-10 15:00	2016-09-26 12:00	47° 58,900' N	65° 20,196' W	34,9
2016B	SPF16B	2016-09-26 13:00	2017-05-24 06:00	47° 58,901' N	65° 20,201' W	34,6
2017A	SPF17A	2017-05-24 08:00	2017-11-05 07:00	47° 58,903' N	65° 20,201' W	34,5
2017B	SPF17B	2017-11-05 08:00	2018-04-10 13:00	47° 58,897' N	65° 20,215' W	35

[#] Profondeur sous le zéro des cartes marines.

* Le mouillage SPA16A n'a pu être récupéré à l'automne 2016 et a continué à enregistrer jusqu'en février 2017 (cf. section 0).

2.2. Description des instruments des mouillages

Les vagues et les courants ont été mesurés avec un seul modèle de profileurs de courants à effet Doppler acoustique (ADCP), soit des AWAC-AST 600 kHz (AWAC) de la firme Nortek. Les ADCPs, dont les faisceaux sont orientés vers le haut, sont montés sur un support de mouillage qui repose sur le fond marin.

La mesure des profils de courants est effectuée par les ADCPs de manière classique avec les trois faisceaux acoustiques inclinés de 25° par rapport à la verticale : la vitesse des particules en suspension est déterminée dans l'axe de chaque faisceau par effet Doppler acoustique (déphasage de l'écho renvoyé par les particules); les vitesses sont converties en vitesses *est*, *nord*, et *haut* grâce aux mesures de la boussole électronique et des inclinomètres intégrés. La colonne d'eau est découpée en couches appelées *cellules* (d'une épaisseur de 2 m), sur lesquelles les profils de vitesse sont mesurés. L'instrument n'enregistre pas des vitesses instantanées, mais moyenne les mesures sur une durée entre 90 et 150 s, selon la programmation choisie (Tableau 3).

Les vagues sont mesurées pendant des périodes de 1024 s (17 minutes) qui sont appelées *bursts*. Le spectre non directionnel des vagues et les paramètres, tels que les hauteurs et les périodes des vagues, sont calculées à partir des enregistrements du niveau d'eau. Les AWACs enregistrent le niveau d'eau avec un faisceau acoustique vertical (AST, Acoustic Surface Tracking) fonctionnant comme un échosondeur. (La première méthode est plus précise, surtout pour les profondeurs supérieures à 10 m.) Les directions des vagues sont déterminées à partir des vitesses orbitales des vagues qui sont mesurées près de la surface de l'eau pour les AWACs. L'instrument enregistre ces paramètres à une fréquence de 1 ou 2 Hz (Tableau 3).

L'épaisseur de la glace est calculée à partir de la différence entre (1) la distance jusqu'à la surface de l'eau mesurée par le capteur de pression et (2) la distance jusqu'à la base de la glace mesurée avec le faisceau acoustique AST.

2.3. Configuration des mouillages

Chacun des mouillages, installé entre 32 et 38 m de profondeur, est constitué des éléments suivants (masse totale ~ 180 kg) :

- un support de mouillage antichalutage en fibre de verre (modèle MTRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×123×47 cm, Figure 9) ou en uréthane (modèle GP-TRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×127×56 cm, Figure 10), incluant une bouée pour la récupération (diamètre de 28 à 30 cm, couleur brun-rouille ou jaune avec autocollants réflecteurs) attachée à une corde en Spectra de 90 m, et des lests de plomb;
- un déclencheur acoustique, modèle 867-A de la firme Benthos;

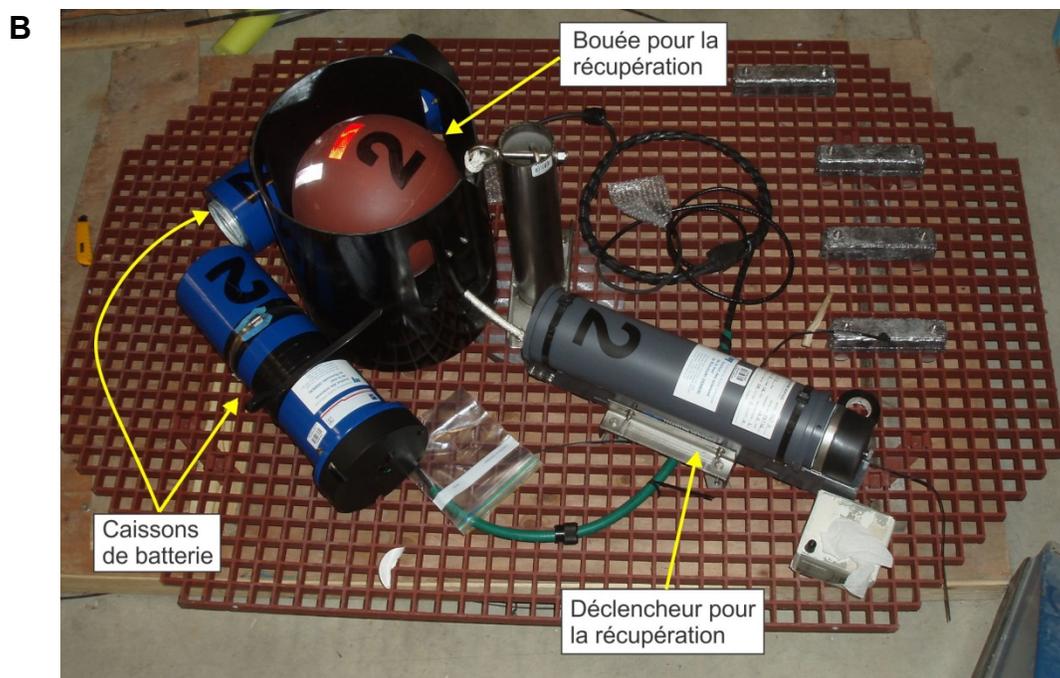
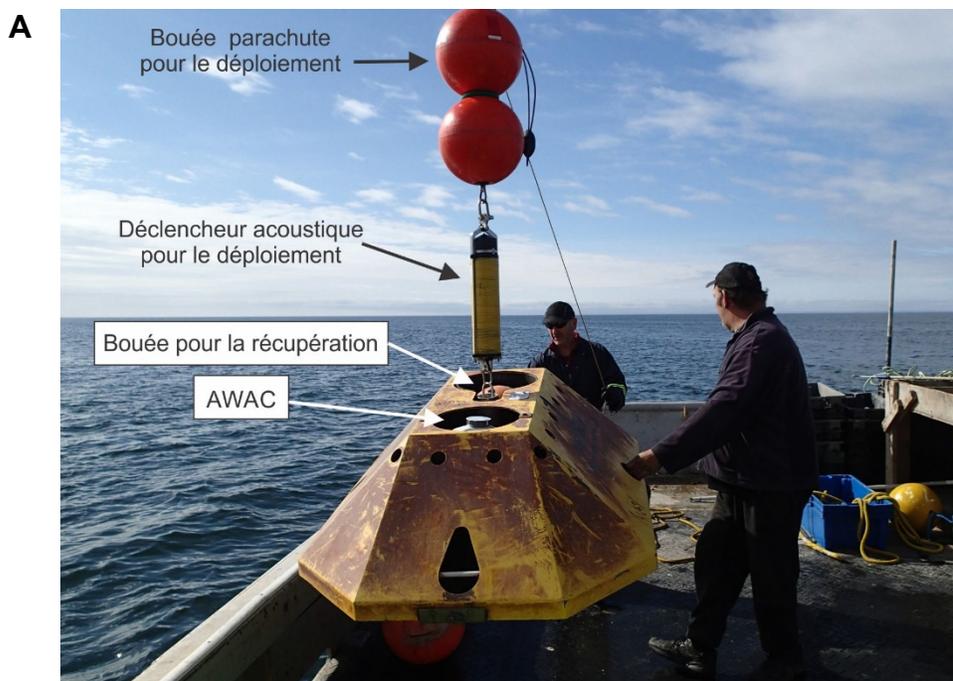


Figure 9 – Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée sur le fond. (B) Mouillage MTRBM ouvert avec la bouée pour la récupération (la corde de récupération est dans le cylindre noir, le déclencheur acoustique Benthos (gris), les deux caissons batteries (bleu) et des lests de plomb pour assurer la stabilité de la plateforme.

- un profileur de courants 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 contenant au total quatre batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC.

Les deux modèles de supports de mouillages utilisés sont très similaires, GP-TRBM ayant remplacé MTRBM. Tous les mouillages sont avec le modèle MTRBM, sauf un acheté plus tard qui est avec le modèle GP-TRBM.

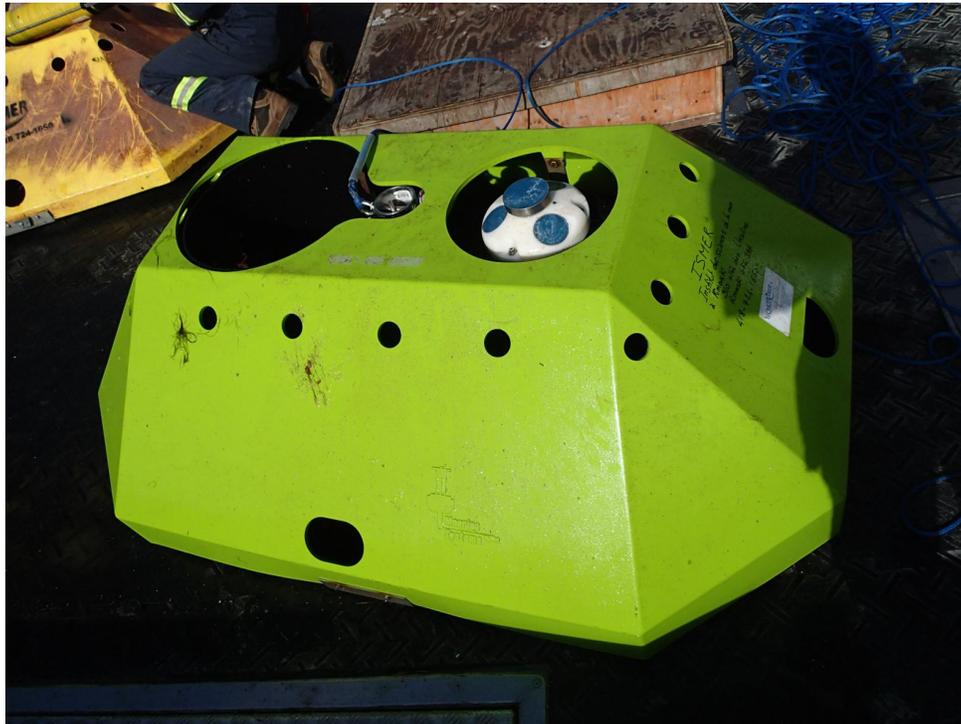


Figure 10 – Plateforme GP-TRBM avec AWAC après la récupération à bord du bateau de pêche Miss Amy Lynn. La bouée utilisée pour la récupération a été relâchée par le largueur acoustique et la corde en Spectra est déroulée.

2.4. Programmation des mouillages

Toutes les données ont été enregistrées dans le fuseau horaire Heure Normale de l'Est (HNE, soit UTC-5). Ci-dessous et dans le Tableau 3 sont résumés les paramètres de programmation des AWAC-AST 600 kHz. Les fichiers journaux, qui présentent le détail de la programmation de chaque instrument pour chaque déploiement, sont reproduits dans les rapports de mission (ou les rapports de déploiements) semestriels.

Tous les instruments ont été programmés pour mesurer un profil de vitesse toutes les 20 minutes et un burst de vague de 17 minutes toutes les heures selon le schéma suivant (Figure 11) :

- 1) au début de chaque heure entière, un profil de vitesse est mesuré durant 90 à 150 secondes (selon la capacité des batteries disponibles pour les profils de vitesses, la priorité étant accordée aux mesures de vagues);
- 2) immédiatement après, un burst de vague de 17 minutes est enregistré;
- 3) ensuite un profil de vitesse est mesuré à 20 minutes après l'heure;
- 4) et un autre profil est mesuré à 40 minutes après l'heure.

Les AWAC-AST 600 kHz sont alimentés par deux caissons de batteries, avec au total quatre batteries de 540 Wh à 13,5 V, soit 2160 Wh. Ils ont mesuré des profils de vitesses avec des cellules de 2 m, le centre de la première cellule étant situé à 2,5 m au-dessus de l'instrument.

Durant l'été 2017, les deux Aquadopp Profiler 2 MHz placé devant Bonaventure et devant St-Godefroi ont également été programmés pour mesurer un profil de vitesse toutes les 20 minutes et un burst de vague de 17 minutes toutes les heures. Ils mesuraient des profils de vitesses de 40 cellules de 0,25 m.

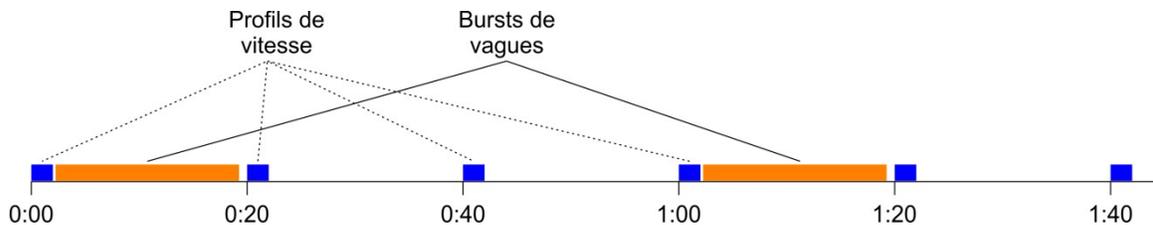


Figure 11 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes).

Tableau 3 – Synthèse des paramètres de programmation des instruments.

	Site A Saint-Ulric	Site B Cap d'Espoir	Site E Rivière-Pentecôte	Site F Paspébiac
Profils de vitesse				
Intervalle entre profils	20 min.	20 min	20 min	20 min
Hauteur cellules	2 m	2 m	2 m	2 m
Nombre de cellules	20	22	20	20 ^a
Blanking distance	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Période moyennée ^b	120 – 150 s	90 – 150 s	90 – 150 s	120 – 150 s
Measurement load ^b	25 - 50 %	25 - 50 %	50 %	25 - 50 %
Power level	high	idem	idem	idem
Coordinate system	ENU	idem	idem	idem
Compass update rate	20 min.	idem	idem	idem
Salinité	30 ou 29 ^c	32 ou 30 ^c	32 ou 31 ^c	32
Vitesse du son	calculé ^c	idem	idem	idem
Précision vitesse horiz.	1,4 – 2,0 cm/s	1,4 – 2,6 cm/s	1,4 – 1,8 cm/s	1,4 – 2,0 cm/s
Précision vitesse vert.	0,5 – 0,7 cm/s	0,5 – 0,9 cm/s	0,5 – 0,6 cm/s	0,5 – 0,7 cm/s
Vagues				
Intervalle entre mesures	1 heure	idem	idem	idem
Fréquence	1 Hz / 2 Hz ^d	idem	idem	idem
Durée	1024 s	idem	idem	idem
Wave sampling cell size	dynamique	idem	idem	idem

^a Pour déploiement 2015A : 22 cellules au site F.

^b La période moyennée et le *Measurement load* (pourcentage de temps utilisé pour effectuer des mesures durant la période moyennée) des profils de vitesse ont été ajustés selon la capacité de batterie disponible.

^c La vitesse du son est calculée en fonction de la salinité entrée lors de la programmation (cf. ci-dessus) et de la température mesurée près du fond par l'instrument.

^d Fréquence 1 Hz pour la pression et les vitesses orbitales, 2 Hz pour distance par faisceau AST.

^e La première salinité est celle utilisée pour la période 2014A, la deuxième pour les périodes subséquentes.

2.5. Nomenclature

Les identifiants suivants sont utilisés pour les quatre sites d'étude : A (Saint-Ulric), B (Cap d'Espoir), E (Rivière-Pentecôte) et F (Paspébiac), cf. aussi Tableau 1. Les mouillages aux sites A et B sont la suite du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP. Ce dernier projet avait aussi deux mouillages à proximité de Sept-Îles, ayant comme identifiants C et D.

Chaque déploiement semestriel est identifié par l'année de la mise à l'eau suivi par « A » pour la mise à l'eau au printemps et par « B » pour la mise à l'eau à l'automne (Tableau 4). Selon le contexte, l'année est exprimée avec quatre chiffres (principalement pour décrire les périodes) ou avec deux chiffres (dans les noms de fichiers).

Les noms des fichiers pour chaque déploiement sont construits sous la forme *SPxyyy* avec *x* représentant l'identifiant de station (cf. Tableau 1) et *yyy* l'identifiant court de la période de déploiement (cf. Tableau 4).

Tableau 4 – Début et fin approximative de chaque période de déploiement. Pour les dates exactes de chaque mouillage, voir Tableau 2.

Identifiant long	Identifiant court	Début	Fin
2014A	14A	mai 2014	mars 2015
2015A	15A	mai / juin 2015	sept / octobre 2015
2015B	15B	sept / octobre 2015	avril / juin 2016
2016A	16A	avril / juin 2016	sept / octobre 2016
2016B	16B	sept / octobre 2016	mai / juin 2017
2017A	17A	mai / juin 2017	novembre 2017
2017B	17B	novembre 2017	avril 2018

2.6. Déroulement des missions et des déploiements

À l'exception de la mise à l'eau des mouillages A, B et E au printemps 2014 qui s'est faite en une seule mission de 3 jours avec Le Coriolis II, les déploiements suivants ont été réalisés avec l'aide de bateaux de pêcheurs locaux à partir de Matane pour le site A, de Saint-Thérèse-de-Gaspé pour le site B, de Rivière-Pentecôte, de Baie-Trinité ou de Matane pour le site E, et de Paspébiac pour le site F. Chaque printemps, à parti du mois d'avril (libération des glaces), et chaque automne, à partir de septembre, et jusqu'en novembre, les pêcheurs étaient contactés pour mobiliser leur bateau en fonction de leur disponibilité, et des conditions météorologiques pour se rendre sur le site à visiter pour récupérer le mouillage précédemment installé et mettre à l'eau le nouveau. Pour les mouillages de Paspébiac et Cap d'Espoir, il s'agissait la plupart du temps, d'une même mission de terrain étalée sur 2 jours où l'équipe de scientifique revenait à terre entre les 2 déploiements pour laisser au pêcheur le temps du transit entre Saint-Thérèse-de-Gaspé et Paspébiac. Les détails des sorties en mer sont listés dans le Tableau 5.

Les mouillages sont posés sur le fond marin. Ils sont constitués d'un support antichalutage, d'un AWAC et d'un déclencheur acoustique qui peut relâcher vers la surface une bouée reliée au mouillage par une corde. Sur chaque site de mouillage l'ordre des opérations est le suivant : (1) Déclenchement du largueur acoustique du mouillage pour relâcher la bouée du mouillage. (2) Récupération de la bouée et hissage du

mouillage à bord. (3) Mise à l'eau du nouveau mouillage, dont la chute dans l'eau sera freinée par une bouée parachute. (4) Déclenchement de la bouée parachute, qui était reliée au mouillage avec le largueur acoustique ORE CART. (5) Récupération de la bouée parachute.

Au cours des quatre années du projet, les sorties en mer se sont généralement bien déroulées chaque printemps et automne dans l'ensemble, et les périodes de déploiements sont résumées pour les quatre sites sur la Figure 12. Malheureusement, plusieurs problèmes de récupération de mouillage sont tout de même survenus et ont nécessité des efforts logistiques supplémentaires, des ressources additionnelles (plongeurs), ainsi que du temps et conséquemment des dépenses supplémentaires (sans toutefois que le budget total prévu soit dépassé) :

- St-Ulric en avril 2016 : Lors de la réinstallation du mouillage SPA16A, impossible de récupérer la bouée parachute qui le sera finalement une semaine plus tard. Cela aura occasionné une nouvelle sortie en mer avec le bateau Maxime C1 de Georges Huard.
- St-Ulric en octobre 2016 : Impossible de récupérer le mouillage de l'été SPA16A. Multiples tentatives de la part des plongeurs (Fred Hartog) pour retrouver le mouillage à l'automne, sans succès. Plusieurs tentatives ont été effectuées avec des plongeurs pour retrouver ce mouillage (28 octobre 2016, 22 mai 2017, 21 juin 2017). Il sera finalement récupéré le 19 août 2017 par un autre plongeur, Mario Déraspe. Ce fût la 3^e tentative de récupération. Probablement ensablement du mécanisme devant libérer la bouée.
- Cap d'Espoir en mai 2017 : Échec de la récupération du mouillage SPB16B sans nouvelle mise à l'eau. Il sera récupéré deux mois plus tard en juin 2017 par le plongeur, Mario Déraspe. La corde était emmêlée.
- St-Ulric en mai 2017 (épisode 1) : le plongeur, Fred Hartog tente de retrouver le mouillage non récupéré en automne précédent (SPA16A), mais se trompe et sort la corde du mouillage fonctionnel, SPA16B, installé à l'automne précédent.
- St-Ulric en mai 2017 (épisode 2, quelques jours plus tard) : La bouée installée par le plongeur sur le mouillage SPA16B dépasse à peine de la surface, et n'est pas visible lors d'une première sortie à cause de la marée et le courant. Le déclenchement usuel par le largueur acoustique a fonctionné, mais la corde du mouillage s'emmêle avec celle de la bouée du plongeur, et la récupération normale n'est pas possible. Le mouillage SPA16B est finalement récupéré lors d'une deuxième sortie dans la même journée.
- Cap d'Espoir en avril 2018 : Échec de la récupération du mouillage SPB17A laissé sous l'eau un an. Le mouillage sera finalement récupéré en août 2018 avec l'aide du plongeur Mario Déraspe. Cela aura aussi nécessité une sortie en mer supplémentaire avec le bateau de Gilles Duguay.

- Rivière-Pentecôte (printemps-été 2018) : les conditions météorologiques, la faible disponibilité du pêcheur et de l'équipe technique n'ont pas permis de sortie en mer avant le mois de septembre 2018 pour récupérer un mouillage mis à l'eau au printemps 2017. Échec de la récupération lors de la sortie. Le mouillage sera finalement récupéré par l'équipe du plongeur Mario Déraspe le 1^{er} octobre 2018, qui le ramène par le traversier Godbout-Matane jusqu'au quai de Matane.

L'ensemble de ces incidents suggère que laisser sous l'eau un mouillage un an ou plus augmente le risque d'ensablement, d'intrusion de matériels biologiques pouvant bloquer le mécanisme de relargage de la bouée, ou encore d'avoir des soucis avec la corde reliée à la bouée de récupération, et par conséquent, provoquant ainsi l'échec de la récupération du mouillage. Il est aussi recommandé de bien identifier chaque mouillage pour faciliter le travail des plongeurs afin que ceux-ci puissent récupérer le bon mouillage si deux mouillages (ancien et nouveau) sont installés sur le même site. L'équipe de l'ISMER a utilisé les capacités de télémétrie des largueurs acoustiques pour mieux localiser certains mouillages que les plongeurs n'arrivaient pas à trouver. Des améliorations de la méthode de télémétrie sont actuellement développées pour les futures récupérations.

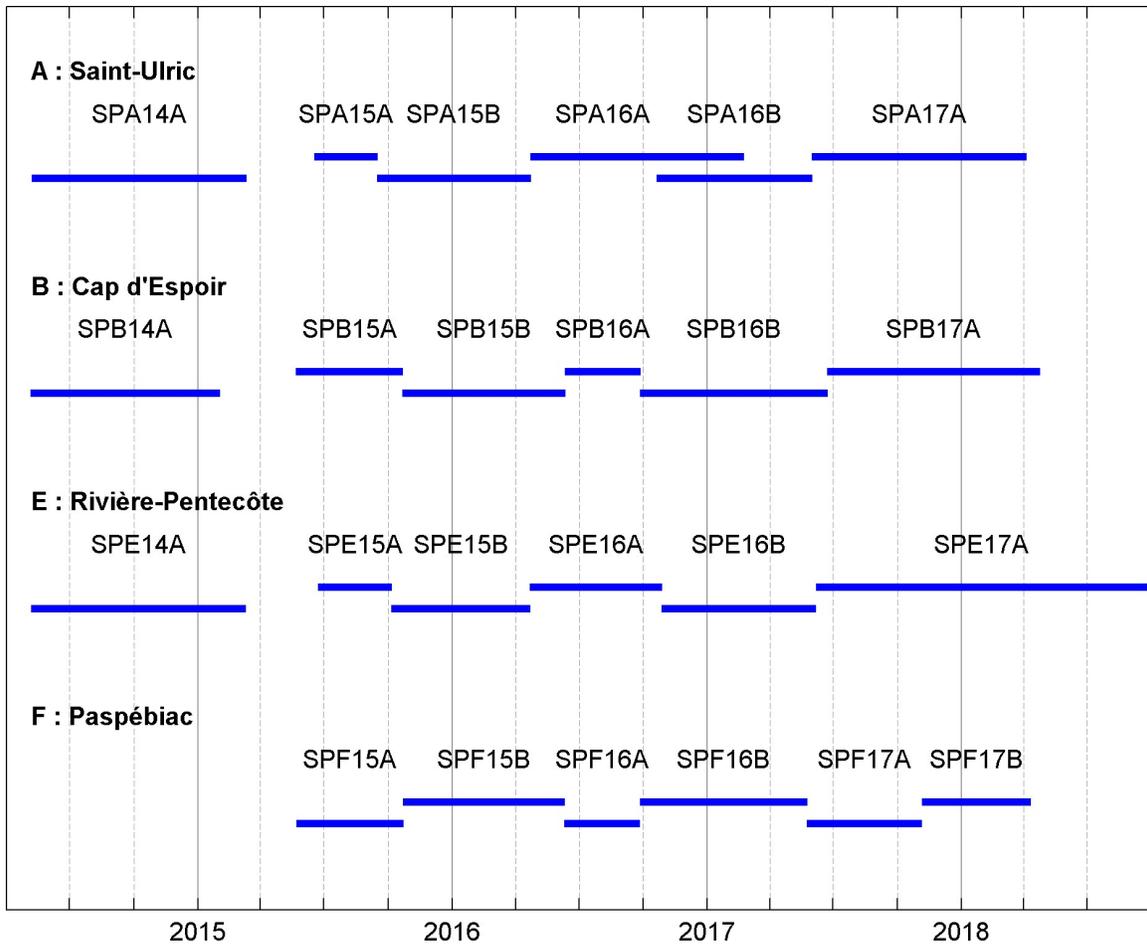


Figure 12 – Périodes de déploiement des mouillages aux quatre sites avec le nom de chaque déploiement. L'asymétrie des périodes estivales et hivernales est due aux disponibilités très limitées des bateaux de pêches pour opérer.

Tableau 5 – Listes des sorties en mer effectuées pour les mouillages du projet. La nomenclature des missions reprend celle utilisée pour l'archivage des données dans le SGDO

Date	Fichier	Site	Mission	Saison	Navire
2014-05-05 *	SPB14A	Cap d'Espoir	1403_MTQ	été-hiver	Coriolis II
2014-05-05 *	SPE14A	Rivière-Pentecôte	1403_MTQ	été-hiver	Coriolis II
2014-05-05 *	SPA14A	St-Ulric	1403_MTQ	été-hiver	Coriolis II
2015-05-22	SPB15A	Cap d'Espoir	1509_MTQ	été	Le Fish
2015-05-22	SPF15A	Paspébiac	1509_MTQ	été	Le Fish
2015-06-17	SPA15A	St-Ulric	1510_MTQ	été	Le Dauphin III
2015-06-22	SPE15A	Rivière-Pentecôte	1511_MTQ	été	Jérôme Isabelle
2015-09-15	SPA15B	St-Ulric	1512_MTQ	hiver	Maxime C1
2015-10-06	SPE15B	Rivière-Pentecôte	1513_MTQ	hiver	Maxime C1
2015-10-21	SPB15B	Cap d'Espoir	1514_MTQ	hiver	Mary David
2015-10-22	SPF15B	Paspébiac	1514_MTQ	hiver	Mary David
2016-04-21	SPE16A	Rivière-Pentecôte	1609_MTQ	été	Maxime C1
2016-04-22	SPA16A	St-Ulric	1609_MTQ	été-hiver	Maxime C1
2016-06-10	SPF16A	Paspébiac	1610_MTQ	été	Mary David
2016-06-11	SPB16A	Cap d'Espoir	1610_MTQ	été	Mary David
2016-09-26	SPF16B	Paspébiac	1611_MTQ	hiver	Mary David
2016-09-27	SPB16B	Cap d'Espoir	1611_MTQ	hiver	Mary David
2016-10-20	SPA16B	St-Ulric	1612_MTQ	hiver	Rémy Martin
2016-10-27	SPE16B	Rivière-Pentecôte	1613_MTQ	hiver	Rémy Martin
2017-05-24	SPF17A	Paspébiac	1709_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2017-05-31	SPA17A	St-Ulric	1710_MTQ	été-hiver	Rémy Martin
2017-06-06	SPE17A	Rivière-Pentecôte	1711_MTQ	été-hiver	Jérôme Isabelle
2017-06-22	SPB17A	Cap d'Espoir	1712_MTQ	été-hiver	Anaïs
2017-11-05	SPF17B	Paspébiac	1713_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn

* La mission en mer en mai 2014 avec le Coriolis II a été payée par le projet précédent 2010-2014 financé par le MSP

2.7. Description du marégraphe de Paspébiac

Un marégraphe a été installé à partir du 4 juillet 2015 dans le port de Paspébiac (Figure 5, 48° 01,132' N 65° 15,339' W) pour mesurer précisément les niveaux d'eau dans la partie centrale de la baie des Chaleurs. Il s'agit d'un marégraphe RBR TGR-2050 fourni par le MTQ qui est placé dans un tube en plastique ABS noir de 3,666 m de long et de 5 cm de diamètre intérieur. Le capteur de pression est à environ 93 mm de la base du tube. Le tube est placé dans un renforcement de la paroi d'acier du quai, juste au premier angle du quai principal sur le côté intérieur du quai (cf. Figure 13). Le tube ABS est fixé à la paroi en acier avec quatre vis en acier inoxydable marin placées à environ 0,34, 0,39, 1,25 et 1,59 m au-dessus du zéro des cartes marines (Figure 14 et Figure 15). Le plastique ABS (acrylonitrile butadiène styrène) a un coefficient de dilatation thermique d'environ $7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, ce qui correspond à une dilatation de 4,2 mm pour une longueur de 2 m et une

différence de température de 30°C, soit moins que la marge d'exactitude des instruments (cf. ci-dessous).

Les RBR TGR-2050 utilisés ont une pleine échelle de pression de 50 m et leurs spécifications indiquent une marge d'exactitude de 0,05 % de la pleine échelle, soit $\pm 2,5$ cm. Le marégraphe est programmé en heure UTC pour enregistrer toutes les 5 minutes une mesure moyennée sur 30 secondes.

Le Tableau 6 indique les visites de terrain pour le marégraphe. L'installation initiale et les remplacements ont été effectués aux marées basses de vive-eau en utilisant une petite embarcation, généralement amenée depuis Rimouski, mais louée sur place pour l'installation initiale. Deux tubes ABS ont été préparés pour le projet et ils ont été utilisés alternativement. Lors des remplacements, le nouveau tube était préparé avec le nouveau marégraphe avant de démonter l'ancien tube, si bien qu'il y a généralement seulement 10-20 minutes sans données entre le démontage et la réinstallation.

Lors du troisième déploiement (2016-08-02 au 2017-06-27), le marégraphe TGR-2050 n° de série 16489 a dysfonctionné, n'enregistrant pas correctement les niveaux d'eau, et les données de niveaux d'eau pour cette période sont perdus. Pour suppléer à une telle défaillance, un second instrument a été installé dans le même tube ABS juste au-dessus du marégraphe TGR-2050 à partir du 6 novembre 2017. Ce second instrument est un RBR TWR-2050 (n° série 21549 et 21543) appartenant à l'UQAR/ISMER, qui est physiquement identique au TGR-2050, mais avec une électronique permettant l'enregistrement de bursts de vagues à 4 Hz et avec une pleine échelle de pression de 10 m. Les capteurs de pressions de deux marégraphes sont distants verticalement de 0,265 m.

Tableau 6 – Liste des visites de terrain pour le marégraphe de Paspébiac.

Date	Début période	Activités	n° série des marégraphe(s) installé(s)
2015-07-04	2015A	Installation initiale	16489
2015-11-17	2015B	Remplacement du marégraphe et baromètre	16495
2016-06-16		Inspection visuelle	
2016-08-02	2016A	Remplacement du marégraphe et baromètre	16489
2017-05-24		Inspection visuelle	
2017-06-27	2017A	Remplacement du marégraphe et baromètre	16495
2017-11-06	2017B	Remplacement du marégraphe	16683 + 21549
2018-05-01	2018A	Remplacement des marégraphes	16486 + 21543 ^a

^a Ces instruments ont été réinstallés le 2018-05-01 pour le projet CC17.1, qui assure la suite des mesures de niveau d'eau à Paspébiac à partir de 2018.

Au début et à la fin de chaque déploiement plusieurs mesures manuelles ont été effectuées sur une période de 15 à 30 minutes avec une sonde de niveau d'eau *Heron Little Dipper* dans un tuyau servant de puit de tranquillisation (Figure 15). Ces mesures manuelles, qui ont été faites par rapport une surface en acier de la bordure du quai dont l'altitude exacte est connue (cf. ci-dessous), ont permis de déterminer précisément l'altitude du marégraphe pour chaque déploiement (cf. section 3.5). La précision des mesures manuelles est estimée de 5 à 10 mm, selon les conditions environnementales.



Figure 13 – Position du marégraphe (flèche verte) et du baromètre enregistreur (cercle bleu) dans le port de Paspébiac.

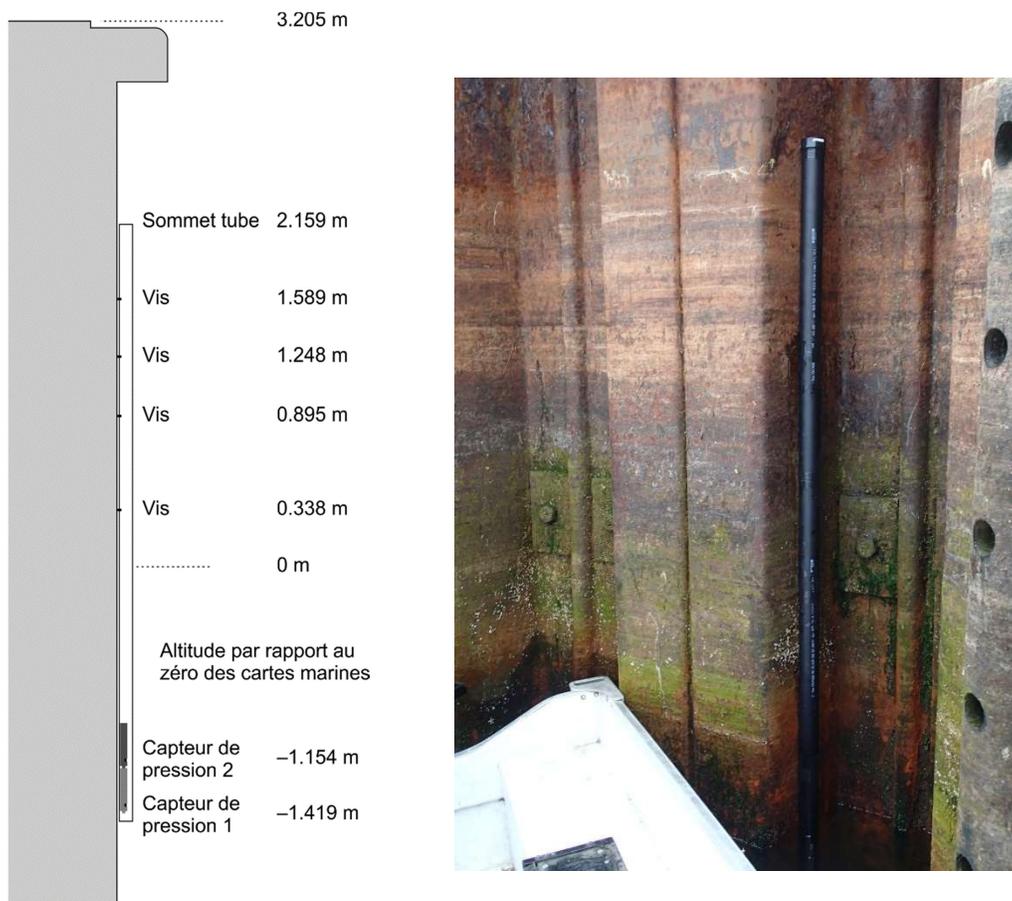


Figure 14 – Schéma et photo du montage du marégraphe. Le deuxième instrument (gris foncé sur le schéma) a seulement été installé à partir du 6 novembre 2017; avant cette date il y avait un seul instrument.



Figure 15 – Vue générale du marégraphe installé dans l'angle du quai et du tube temporaire utilisé pour les mesures manuelles.

Pour corriger la pression atmosphérique, un baromètre enregistreur RBR DR-1050 fourni par le MTQ a été placé dans l'appentis à poubelle qui est adossé au local électrique situé juste à l'est du début du quai (cf. Figure 13). L'instrument a été attaché au-dessus de la plus haute poutre horizontale à une altitude CGVD28 (Canadian Geodetic Vertical Datum 1928) d'environ 5,4 m. Le baromètre enregistreur a été programmé en heure UTC pour prendre une mesure toutes les 5 minutes.

Un levé topographique a été effectué le 4 juillet 2015 pour établir l'altitude exacte de la bordure du quai et ainsi rattacher les mesures de niveau d'eau aux référentiels verticaux usuels. Les points ont été mesurés à partir de la borne géodésique 91L9025 située sur le muret central du quai. Le Tableau 7 indique l'altitude des différents points levés. Les altitudes sont indiquées par rapport au zéro des cartes marines, par rapport au niveau marin moyen 1928 (CGVD28 Canadian Geodetic Vertical Datum 1928) et par rapport au nouveau niveau marin moyen 2013 (CGVD2013, Canadian Geodetic Vertical Datum 2013). À Paspébiac, les altitudes CGVD2013 sont 0,471 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 0,901 m plus hautes que celles CGVD28 et 1,372 m plus hautes que celles CGVD2013.

Tableau 7 – Coordonnées et altitudes mesurées près du marégraphe de Paspébiac lors du relevé topographique du 4 juillet 2015.

Points	X MTM (5)	Y MTM (5)	Alt _{CGVD28}	Alt _{CGVD2013}	Z _{zéro_marin}
Borne 91L9025	248 442,798	5320 253,608	3,800	3,329	4,701
Surface en acier au-dessus du marégraphe	248 436,461	5320 269,355	2,304	1,833	3,205
Surface en acier au-dessus des mesures manuelles	248 435,509	5320 269,041	2,295	1,824	3,196
Sommet du capuchon du tube contenant le marégraphe ^a	248 436,263	5320 269,53	1,26	0,79	2,16
Capteur de pression marégraphe ^b			-2,32	-2,79	-1,42

^a Position approximative, car le tube est sous un surplomb.

^b Altitude approximative, l'altitude précise sera déterminée en comparant les mesures manuelles de niveau d'eau avec les enregistrements du marégraphe (cf. section 3.5).

3. Traitement des données

Certaines parties du traitement des données ont été réalisées avec les logiciels de la firme Nortek (fabricant des instruments AWAC) : *QuickWave* (version 2.10) pour le calcul automatique des vagues, *Storm* version 1.14 pour une visualisation rapide des données de courants et de vagues et des paramètres généraux, *AWAC AST* (au cours du projet successivement versions 1.38.04, 1.41, 1.42, 1.44, 1.45, 1.46.06) pour l'exportation en fichiers texte des données des AWACs.

La suite du traitement des données, le contrôle de qualité, la visualisation et l'analyse plus approfondie des données ont été effectués dans *Matlab* (versions 7.1 ou 7.14), soit directement à la ligne de commande, soit avec une série de fonctions écrites par Urs Neumeier.

3.1. Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants

Les contrôles généraux comprennent la vérification générale du fonctionnement des instruments ainsi que l'orientation et les mouvements de la tête de l'instrument. Ils ont été effectués soit dans *Storm*, soit dans *Matlab*.

En premier, nous avons vérifié les codes d'état et les codes d'erreur des instruments, l'évolution du voltage des batteries, et la plausibilité des mesures de température (qui est utilisée par les instruments pour calculer la vitesse du son de l'eau). La température mesurée par les instruments près du fond variait parfois selon le cycle semi-diurne de la marée, ces oscillations étaient généralement de 2 °C à 5 °C, mais pouvaient atteindre exceptionnellement jusqu'à 10 °C.

Ensuite nous avons vérifié la position des instruments (verticalité de la tête), leur stabilité (mouvements enregistrés par la boussole électronique et les inclinomètres) et l'enregistrement de la pression (pour repérer des changements de profondeur). La plupart du temps, les instruments étaient généralement orientés correctement, la tête regardant vers le haut à $\pm 5^\circ$ de la verticale, à quelques exceptions près. Des rotations latérales significatives des supports de mouillages sur le fond ont pu être observées lors d'évènements de tempête majeurs sans que cela ne vienne affecter la qualité des données.

Cependant, nous avons rencontré quelques soucis avec le cardan d'un instrument, particulièrement pour deux déploiements (SPF16B et SPE17A). Lors d'évènements de tempête, le cardan a subi des incursions du roulis pouvant aller jusqu'à 11° par rapport à la verticale, donc une inclinaison de la tête de l'instrument, et ensuite le cardan semblait bloqué sans être capable de revenir en position verticale. Le premier incident concerne le déploiement SPF16B à Paspébiac (du 26/09/2016 au 24/05/2017), durant lequel la tête de l'AWAC était inclinée de 7° sur le côté dès la mise à l'eau et jusqu'au 15 octobre 2016, où la tête s'est par la suite légèrement redressée ($< 5^\circ$). Le deuxième souci avec ce même cardan a eu lieu lors du dernier déploiement à Rivière-Pentecôte (SPE17A, du 06/06/2017 au 25/09/2018). Lors de la mise à l'eau, l'orientation de la tête de l'instrument était

correcte, mais plusieurs grosses tempêtes au cours de l'automne suivant ont provoqué des variations de l'inclinaison dépassant les 5°. Lors de la tempête du 30 octobre 2017, la tête s'est inclinée jusqu'à 6°, puis une autre tempête le 19 novembre 2017 est venue modifier encore l'inclinaison mais selon l'autre axe du cardan, puis lors de la tempête du 13 décembre 2017, la tête s'est inclinée jusqu'à 11° et elle est demeurée dans cette position pendant environ 3 semaines. La tempête majeure du 5 janvier 2018, a permis à la tête de se redresser légèrement jusqu'à 8.6°. Ces excursions au-delà de 5° ont pu venir affecter la qualité des bursts de vagues mesurés. Toutefois, le contrôle de qualité des données effectué manuellement a limité les erreurs possibles dues à ces inclinaisons trop prononcées de la tête de l'AWAC, en recalculant au besoin des paramètres de vagues avec l'interface *qcwave_gui* (cf. section 3.2).

Lors de l'installation du mouillage de Saint-Ulric le 31 mai 2017, la tête de l'AWAC est restée coincée penchée jusqu'au 2017-06-22 à 04:00. Par conséquent, du 2017-05-31 au 2017-06-22 (22 premiers jours de SPA17A), il n'y a pas de donnée de courant, pas de direction des vagues, et des hauteurs et directions de vagues calculées à partir du capteur de pression, donc moins précises, surtout pour les vagues de courte période.

Finalement, les premières et dernières données valides (pour les profils de vitesse et pour les vagues) de chaque déploiement ont été déterminées selon les données enregistrées, mais aussi en vérifiant la concordance des heures de mise à l'eau et de récupération notées lors des missions. L'heure et la date du premier et dernier enregistrement de vagues valides sont indiquées au Tableau 2. Un mouillage a été déployé aux sites A, B et E au printemps 2014 à la dernière mission du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP. Les instruments ont enregistré jusqu'au milieu de l'hiver 2015 avant de s'arrêter (Tableau 2). Les données reprennent environ 3 mois plus tard lors de la première mission du présent projet et la couverture temporelle aux sites A, B, E et F est presque continue pendant trois ans de printemps 2015 au printemps 2018, avec seulement parfois une heure manquante entre les déploiements (Tableau 2, Figure 12).

Les données de vagues présentées dans ce rapport et fournies en fichiers numériques ne comprennent pas les premiers et derniers enregistrements hors de l'eau. Pour les courants, uniquement les données valides sont présentées dans ce rapport, mais les fichiers numériques contiennent aussi les premiers et derniers enregistrements hors de l'eau.

Le capteur de pression des instruments mesure la pression totale (poids de la colonne d'eau plus la pression atmosphérique). Ces données ont été corrigées avec la pression atmosphérique enregistrée à une station météorologique proche pour obtenir une hauteur de colonne d'eau correcte. Les données de Saint-Ulric ont été corrigées avec la station météorologique de l'aéroport de Mont-Joli, les données de Cap d'Espoir avec la station météorologique Cap-d'Espoir, les données de Rivière-Pentecôte avec la station météorologique de Pointe-des-Monts, et les données de Paspébiac avec la station météorologique de New Carlisle.

Les directions de courants et de vagues calculées en référence avec le Nord magnétique ont été corrigées pour la déclinaison magnétique : pour Saint-Ulric 18° ouest, pour Cap

d'Espoir 19° ouest au jusqu'à la période 2016B et ensuite 18° ouest, pour Rivière-Pentecôte et Paspébiac 19° ouest au jusqu'à la période 2016A et ensuite 18° ouest.

3.2. Traitement et contrôle de qualité des données de vagues

Tous les paramètres de vagues (cf. Annexe 1) ont été obtenus initialement avec le logiciel *QuickWave*. Le spectre d'énergie et moments du spectre ont été calculés sur l'intervalle 0,02-0,48 Hz. Il est possible d'utiliser deux méthodes alternatives pour calculer les hauteurs et périodes de vagues ainsi que le spectre non directionnel : la première (optimale) est réalisée par les mesures acoustiques de la distance instrument-surface (Acoustic Surface Tracking, AST), alors que la seconde est réalisée avec les données de pression si les données AST présentent trop d'erreurs. Les directions de vagues et le spectre directionnel sont calculés avec les vitesses orbitales mesurées près de la surface en utilisant la méthode *Maximum Likelihood Method with Surface Tracking* (MLMST). *QuickWave* a aussi corrigé la déclinaison magnétique (cf. ci-dessus) et un décalage (offset) constant de pression pour chaque déploiement.

Les fichiers texte produits par *QuickWave* ont été importés dans Matlab pour la suite du traitement, notamment la correction de la hauteur d'eau pour les variations de la pression atmosphérique, et pour le contrôle de qualité.

Lors du contrôle de qualité, un sémaphore ou flag de qualité a été ajouté aux données pour décrire la validité des valeurs. Une donnée peut être qualifiée de bonne (aucune indication de problème), de douteuse (il y a des indices de problème, mais la donnée est probablement bonne) ou d'erronée (très probablement la donnée est mauvaise). De plus, une donnée peut être non testée (pour les paramètres ne subissant pas de test de qualité ou avant que le contrôle de qualité n'ait été effectué) ou manquante (quand aucun instrument n'a enregistré à ce moment-là, par exemple les quelques heures entre deux déploiements). L'annexe 2 et en particulier son Tableau 17 décrit ces flags de qualité.

La plupart des paramètres de vagues (hauteurs, périodes, directions, niveaux d'eau) ont subi en premier un contrôle de qualité automatique. Trois catégories de test automatique sont utilisées :

- 1) Tests de limite : pour chaque paramètre, des valeurs limites minimales et maximales ont été définies (*limit checks*);
- 2) Tests de continuité temporelle : les variations temporelles d'un paramètre ne doivent pas être trop rapides (*time-continuity checks*);
- 3) La cohérence des paramètres entre eux est aussi vérifiée : comparaison de H_{m0} avec H_{max} , $H_{1/10}$ ou $H_{1/3}$, comparaison entre T_{01} , T_{02} , T_z , $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ et la médiane des périodes, comparaison entre T_p et T_{02} , comparaison de Dir_m et Dir_p , comparaison de comparaison de h_{PT} et h_{AST} , comparaison de h_{PT} et h_{AST} avec les prédictions de marées, la pente des vagues selon T_{02} et H_{m0} , et selon $T_{1/10}$ et $H_{1/10}$ (*consistency checks*).

Pour tous ces tests, deux niveaux de limite sont utilisés pour produire des alertes faibles ou fortes (*soft flag / hard flag*). Enfin, *Quickwave* produit dans certains cas un code d'erreur s'il ne peut pas calculer certains paramètres, notamment les directions des vagues si la période est trop courte (inférieure à environ 3 s).

Pour les niveaux d'eau, les données mesurées ont été comparées aux prédictions de marée calculées avec le logiciel *XTide 2.10* (Flater, 2008), qui est couramment utilisé en océanographie physique. Les harmoniques de marées de Matane sont utilisées pour le site de Saint-Ulric, celles de Grande-Rivière pour Cap d'Espoir et celles de Port-Cartier pour Rivière-Pentecôte et celles de Paspébiac pour Paspébiac.

Dans un deuxième temps, le résultat des tests automatiques a été revu et validé manuellement avec l'interface graphique *qcwave_gui*. Celle-ci présente de manière synthétique les éléments suivants (Figure 16) :

- des graphiques des séries temporelles (niveaux d'eau, hauteurs, périodes et directions) en mettant en évidence les données marquées par une alerte ou marquées comme douteux/mauvais;
- les valeurs numériques de chaque paramètre du burst courant ainsi que du précédent et du suivant;
- les alertes des tests automatiques et les flags du contrôle de qualité;
- le spectre non directionnel et le spectre directionnel du burst courant;
- les 1024 s d'enregistrement du niveau d'eau (AST et pression) du burst courant dans une deuxième fenêtre, qui sert aussi pour le traitement de la glace (l'interface est prévue pour être utilisée avec deux écrans simultanément).

L'interface *qcwave_gui* permet de définir le flag de qualité de chaque paramètre et d'indiquer une raison pour un flag douteux ou mauvais. Elle permet aussi de modifier les données et de recalculer les paramètres non directionnels des vagues soit sur la totalité du burst, soit sur une ou plusieurs portions d'un burst à partir des données de pression ou des données d'AST. Toute modification des données est consignée dans le fichier et peut être annulée.

Les données le plus souvent marquées comme erronées sont les directions des vagues. Il s'agit de vagues avec une courte période (inférieure à environ 3 s). En effet, leur direction ne peut être déterminée par les vitesses orbitales mesurées près de la surface par les trois faisceaux obliques seulement si les trois mesures sont faites dans la même vague. Les vagues de courte période ont une courte longueur d'onde, parfois plus petite que la distance entre les trois faisceaux à la surface.

L'ensemble des paramètres de vagues est marqué comme erroné en présence de glace, sauf si la couverture de glace n'était pas continue et que les paramètres de vagues ont pu être recalculés sur une partie du burst.

Sinon, les autres paramètres sont rarement marqués comme erronés, mais parfois comme douteux. Pour un certain nombre de bursts, *QuickWave* n'a pas calculé correctement les vagues (trop d'erreurs dans la série temporelle AST, dernier burst du déploiement, présence d'un bateau au-dessus de l'instrument, etc.), mais il a généralement été possible de recalculer les vagues sur la partie non problématique du burst.

La raison pour laquelle une donnée est douteuse/erronée est indiquée avec huit bits (un octet), spécifiant quel(s) test(s) a (ont) échoué (cf. Tableau 18 de l'annexe 2). Le flag de qualité est exprimé en chiffre hexadécimal de trois caractères, le premier (poids fort) représentant la qualité, les deux caractères suivants l'octet des tests (cf. annexe 2).

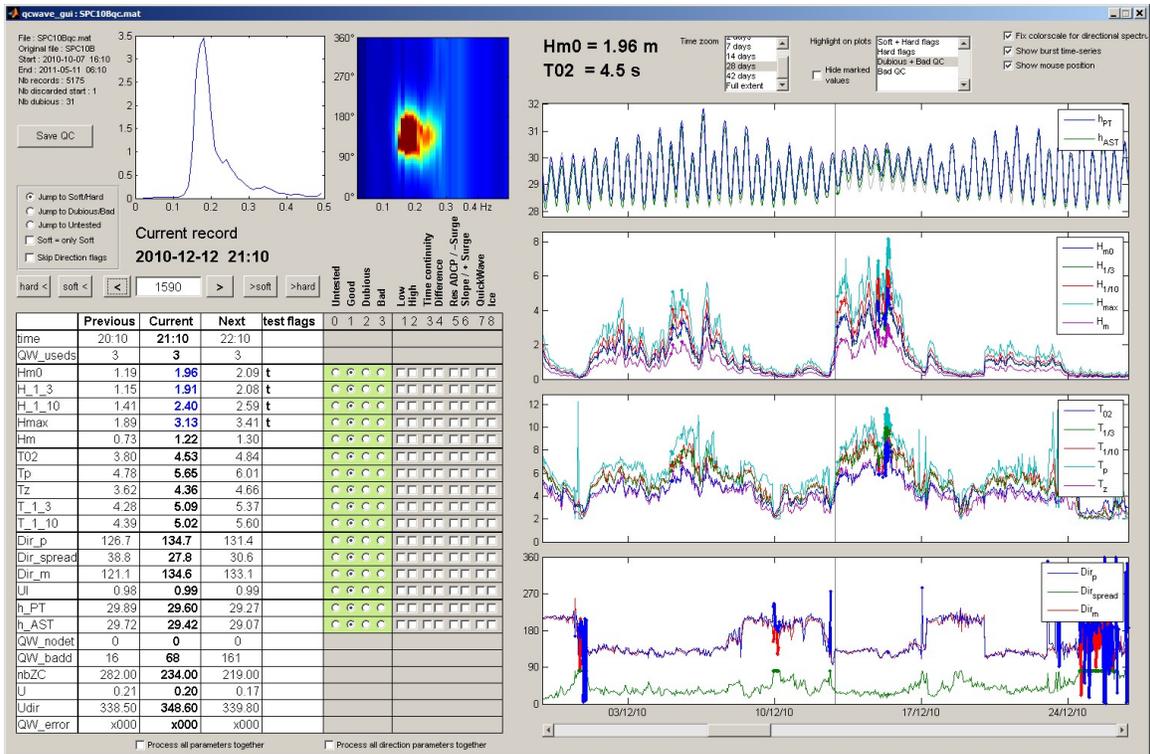


Figure 16 – Interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas).

3.3. Traitement et contrôle de qualité des données de courants

Toutes les données des profils de vitesses (vitesses, amplitudes de l'écho et senseurs auxiliaires) ont été exportées en fichiers texte avec le logiciel *AWAC AST*. Les données ont ensuite été importées dans Matlab le traitement et le contrôle de qualité.

La déclinaison magnétique a été corrigée et la hauteur d'eau est corrigée pour les variations de la pression atmosphérique. Ensuite toutes les cellules commençant à plus de 90 % de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument ont été marquées comme mauvais, car hors de l'eau et potentiellement affectées par la surface de l'eau. Pour les déploiements hivernaux, les cellules influencées par les glaces flottantes ont aussi été rejetés en se basant sur l'épaisseur de glace mesurée durant les bursts de vagues (cf. section 3.4) : l'épaisseur de la glace (épaisseur instantanée maximale observée à ± 2 heures du profil) est soustraite à la hauteur de la colonne d'eau avant d'appliquer le test de 90 % de la colonne d'eau. Enfin un contrôle de qualité automatique a été effectué sur le rapport signal sur bruit (SNR) qui doit être supérieur à 3 dB.

Le contrôle de qualité est terminé manuellement avec l'interface graphique *awac_gc*, qui permet d'une part de visualiser et de zoomer dans les données et d'autre part d'attribuer les flags de qualité (Figure 17). L'interface montre simultanément les séries temporelles des profils de vitesse ou d'amplitude en teintes de couleurs, les graphiques de profils des vitesses et les flags de qualité. La sélection des paramètres examinés peut être modifiée à tout moment et il est aussi possible d'afficher la série temporelle d'une cellule. Les flags du contrôle de qualité peuvent être attribués ou corrigés avec la souris.

La validité des données de courants est définie avec un flag de qualité pour chaque cellule (ou point de profil) de chaque profil. Ce flag est une valeur entre 0 et 255, 0 indiquant une donnée valide, et une valeur supérieure à 0 une donnée erronée. La raison de l'erreur est codée en binaire sur un octet selon le Tableau 8.

Tableau 8 – Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants.

Bit	Valeur décimale	Raison de l'erreur
1	1	Hors de l'eau ou influence de la surface (test automatique)
2	2	Rapport signal sur bruit (SNR) trop faible (test automatique)
3	4	Rapport signal sur bruit trop élevé (objet flottant dans l'eau)
4	8	Hors de l'eau (défini manuellement)
5	16	Influence de la glace
6	32	Non utilisé
7	64	Autre problème de qualité (parfois sans explication)
8	128	Dysfonctionnement de l'instrument

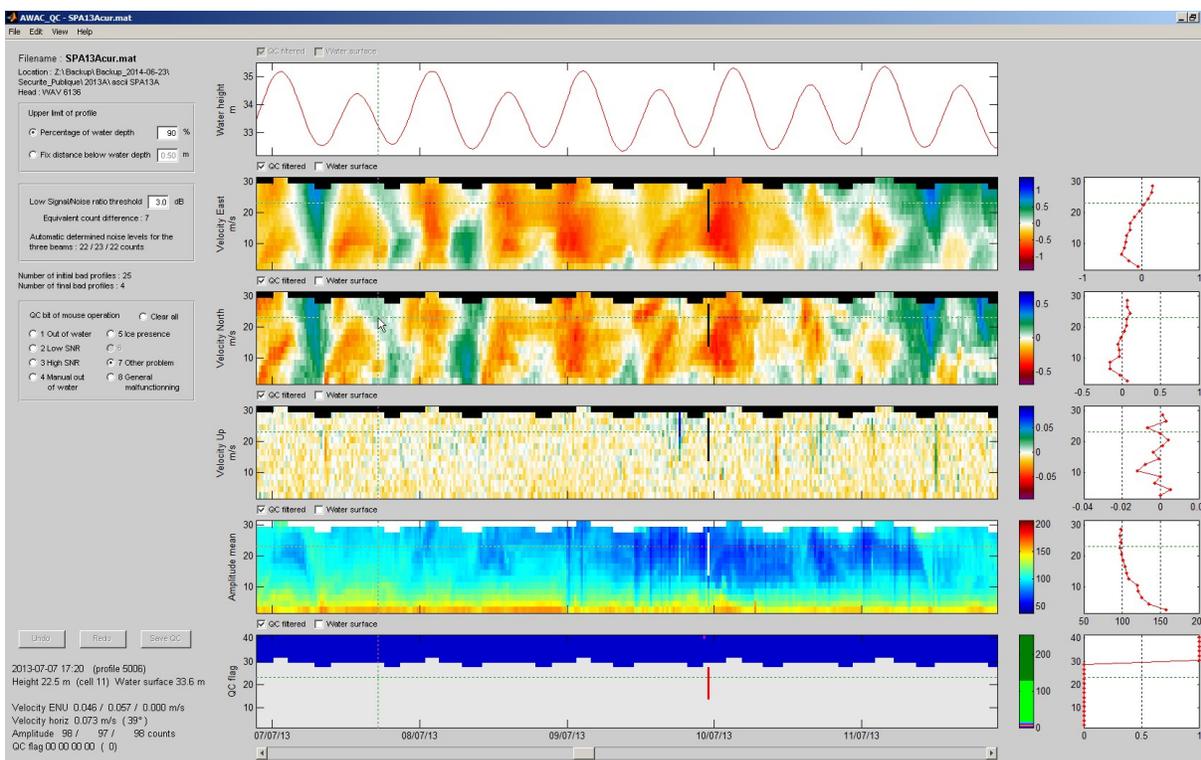


Figure 17 – Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.

3.4. Traitement des données de glace

Pendant les déploiements hivernaux les AWACs 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 la première de ces deux interfaces (d_{AST}).

D'autre part, le capteur de pression de l'AWAC mesure le poids de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument. Cela permet de calculer la distance entre la tête de l'instrument et la surface de l'eau ($d_{pression}$). En cas de présence de banquise, celle-ci n'affecte pas le résultat.

L'épaisseur de glace (H_{glace}) est ensuite calculée comme la différence entre les deux distances, 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), selon la formule suivante :

$$H_{glace} = 1,11 \times (d_{pression} - d_{AST})$$

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). Les données brutes de pression et de distance AST sont exportées en format texte avec le logiciel *AWAC AST*. Comme la mesure de distance AST est parfois perturbée par des bulles ou d'autres objets dans l'eau, les données de distance AST filtrées par le logiciel *Quickwave* pour éliminer les données aberrantes sont aussi utilisées. Ces trois jeux de données sont importés dans Matlab. Les données de pressions sont corrigées pour les variations de la pression atmosphérique. Le signal AST est lissé pour conserver le niveau inférieur en cas d'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.

La suite du traitement est effectuée avec l'interface graphique *qcwave_gui*, qui est aussi utilisée pour le contrôle de qualité des vagues (cf. section 3.2). Pour l'analyse de la glace, la deuxième fenêtre de l'interface présente toute l'information pertinente et permet de faire les opérations et corrections nécessaires (Figure 18).

Après une observation visuelle, chaque burst est classé manuellement dans une des trois catégories suivantes :

- 1) libre de glace,
- 2) mixte (couverture de glace partielle),
- 3) couverture de glace continue.

En cas de couverture de glace partielle, la fraction de temps couverte de glace est estimée et les vagues recalculées dans l'intervalle de temps libre de glace si cela est possible.

Ensuite, le signal AST est parfois corrigé manuellement pour rétablir la position de l'interface eau-glace si le filtre automatique de *Quickwave* a appliqué une mauvaise correction (en magenta sur la Figure 18).

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. Toutefois, des stratifications verticales de température et de salinité existent aux sites d'étude.

Pour compenser les variations verticales de température et la salinité réelle, un coefficient de correction est calculé sur des périodes libres de glace, de manière à ce que les deux distances calculées (AST et pression) soient identiques en absence de glace. Les périodes hivernales libres de glaces (soit des bursts sans aucune glace, soit des intervalles sans glace dans des bursts mixtes) sont sélectionnées manuellement dans *qcwave_gui*. Le

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.

Pour chaque burst avec une présence continue ou partielle de glace, l'épaisseur moyenne de la glace est calculée sur la période avec de la glace. L'épaisseur de glace maximale durant le burst est aussi déterminée.

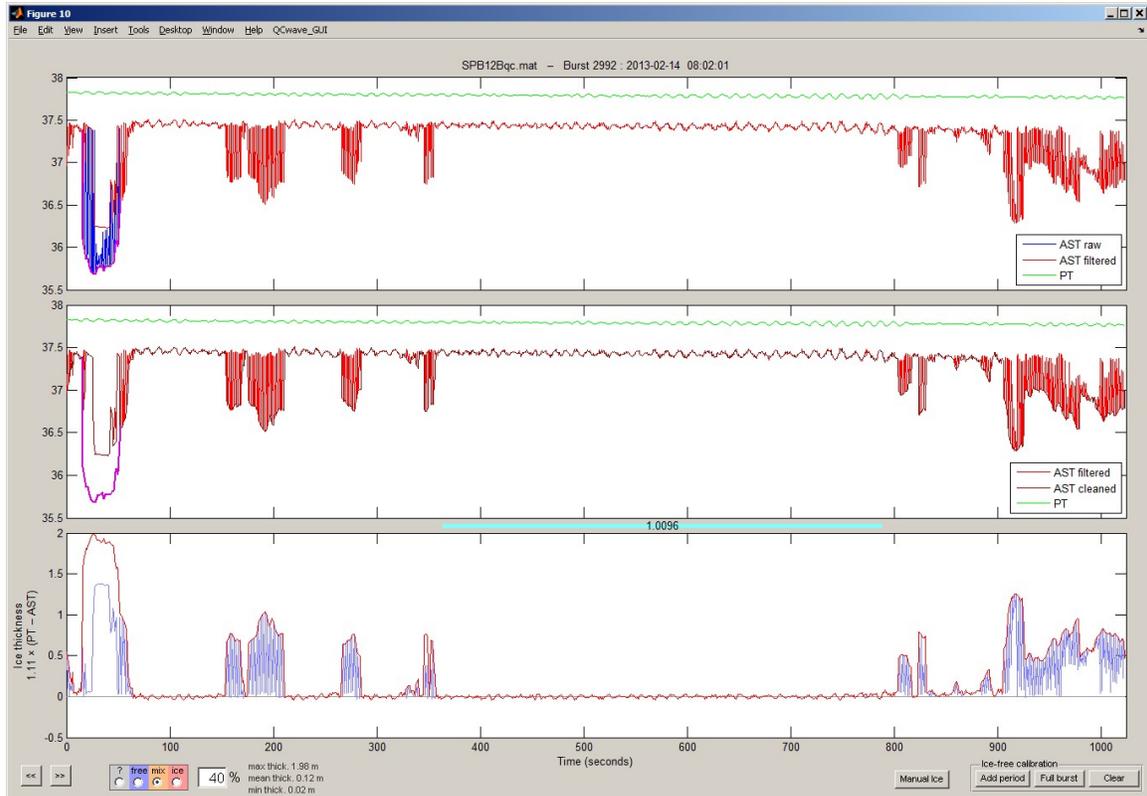


Figure 18 – Seconde fenêtre de l'interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l'interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L'épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances pression-AST est en turquoise entre les deux graphiques inférieurs.

3.5. Traitement des données du marégraphe

Le traitement des données du marégraphe a été effectué dans Matlab. L'ensemble des calculs pour obtenir le niveau d'eau est résumé dans la formule suivante

$$z_{eau} = \frac{p_{rbr} - p_{atm0} + p_{offset}}{g \rho} - z_{rbr}$$

avec z_{eau} l'altitude du niveau d'eau par rapport à CGVD28 (m), p_{rbr} la pression enregistrée par le marégraphe (Pa), p_{atm0} la pression atmosphérique au niveau de la mer (Pa), p_{offset} une constante propre à chaque instrument pour corriger les différences de calibration entre le marégraphe et le baromètre (Pa), g l'accélération gravitationnelle ($m\ s^{-2}$), ρ la masse volumique de l'eau ($kg\ m^{-3}$) et z_{rbr} l'altitude du marégraphe par rapport à CGVD28 (m). Le traitement des données a été effectué avec comme référence altitudinale le zéro des cartes marines (les figures de la présente section sont d'après cette référence), puis les altitudes ont été converties à la fin à CGVD28 en soustrayant 0,901 m.

La pression enregistrée par le baromètre enregistreur RBR DR-1050 installé dans un petit bâtiment au début du quai de Paspébiac montre en été des importantes variations de pression pouvant aller jusqu'à 4 dbar suivant un cycle jour-nuit (Figure 19). Ces variations cycliques n'existent pas dans les données de pression de la station météo d'Environnement Canada (EC) à New Carlisle (48,0119° N, 65,3317° W, altitude 46,4 m, identifiant OMM 71619), qui est à 5,7 km du port de Paspébiac. Le local où est installé le baromètre enregistreur DR-1050 est bien ventilé, mais il surchauffe probablement les journées d'été ensoleillées. Le capteur de pression du DR-1050 est visiblement pas entièrement compensé pour les variations de température. Cela a aussi été observé lors d'un autre projet à Quaqaq (Nunavik) avec le même modèle de baromètre-enregistreur. Pour cette raison la correction de pression atmosphérique a été effectuée principalement avec les données de pression de la station météo EC de New Carlisle. Le baromètre enregistreur au port de Paspébiac a été maintenu en fonctionnement, mais seulement comme source secondaire en cas de panne de la station météo EC de New Carlisle, ce qui ne s'est par produit.

Pour la comparaison entre le marégraphe de Paspébiac et celui de Belledune, les données de ce dernier exprimées par rapport au zéro des cartes marines ont été corrigées de -1,282 m pour les convertir en CGVD28. Pour la comparaison entre le marégraphe de Paspébiac et les niveaux d'eau mesurés par l'AWAC au site F, aux données de ce dernier a été soustrait le niveau d'eau médian de chaque déploiement, puis a été ajouté 0,087 m. Les deux valeurs de correction (-1,282 m et 0,087 m) ont été calculées comme la moyenne des différences de mesures entre Paspébiac et Belledune, respectivement Paspébiac et le site F.

La pression de la station météo EC de New Carlisle a été convertie au la pression au niveau de la mer ($\times 1,00552$) pour obtenir p_{atm0} . Les données de pression des marégraphe avant et après déploiement ont été comparées avec p_{atm0} pour déterminer la constante p_{offset} de chaque instrument (Tableau 9). La pression de la colonne d'eau ($p_{rbr} - p_{atm0} + p_{offset}$) est convertie en hauteur d'eau en divisant par la gravité (g , $9,8087\ m\ s^{-2}$ à Paspébiac) et par la masse volumique de l'eau (ρ). Cette dernière est calculée avec la température mesurée par les RBR TGR-2050 et avec une salinité estimée de 33 en appliquant la formule de Fofonoff (1985). Une erreur dans l'estimation de salinité de 1 unité sous-estimerait la densité de 0,08%, et le niveau d'eau serait surestimé de 3 mm à marée haute.

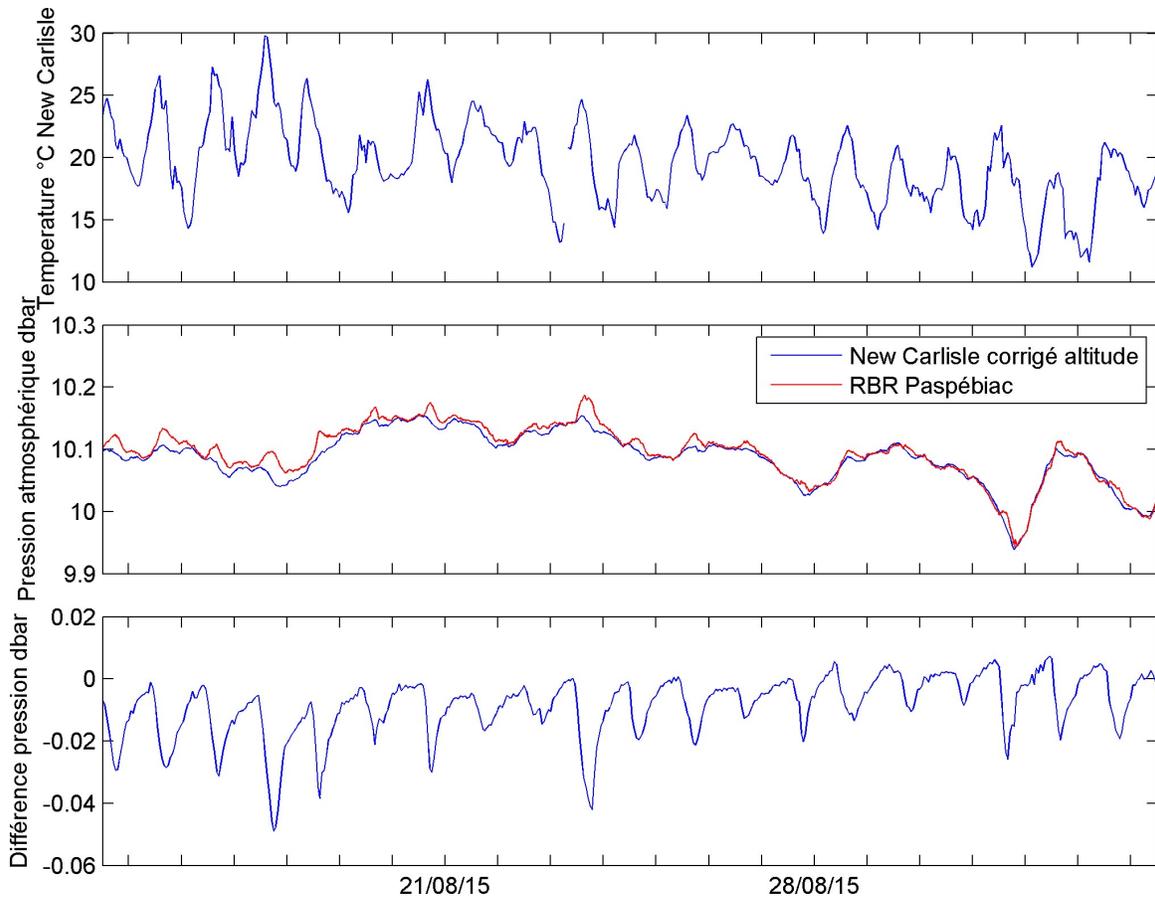


Figure 19 – Pressions mesurées avec le baromètre enregistreur RBR DR-1050 à Paspébiac et à la station météorologique EC de New Carlisle, ainsi que la différence entre les deux séries temporelles : le premier présente des variations cycliques corrélées avec les cycles quotidiens de température.

L'altitude du capteur de pression de chaque marégraphe (z_{rbr}) a ensuite été établie en comparant les mesures manuelles de niveaux d'eau effectuées au début et à la fin de chaque déploiement (Exemple Figure 20). Des petites variations de ces altitudes peuvent être la différence entre les tubes ABS utilisés, des variations de quelques millimètres de la fixation du marégraphe dans le tube, et surtout des différences de calibrations des instruments qui n'ont pas été corrigés avec p_{offset} . En effet, la détermination de z_{rbr} est plus simple et plus précise que la détermination de p_{offset} . Il y a une bonne concordance entre les mesures manuelles et les enregistrements des marégraphes. L'altitude de chaque marégraphe a été déterminée pour le début et pour la fin de son déploiement (Tableau 9).

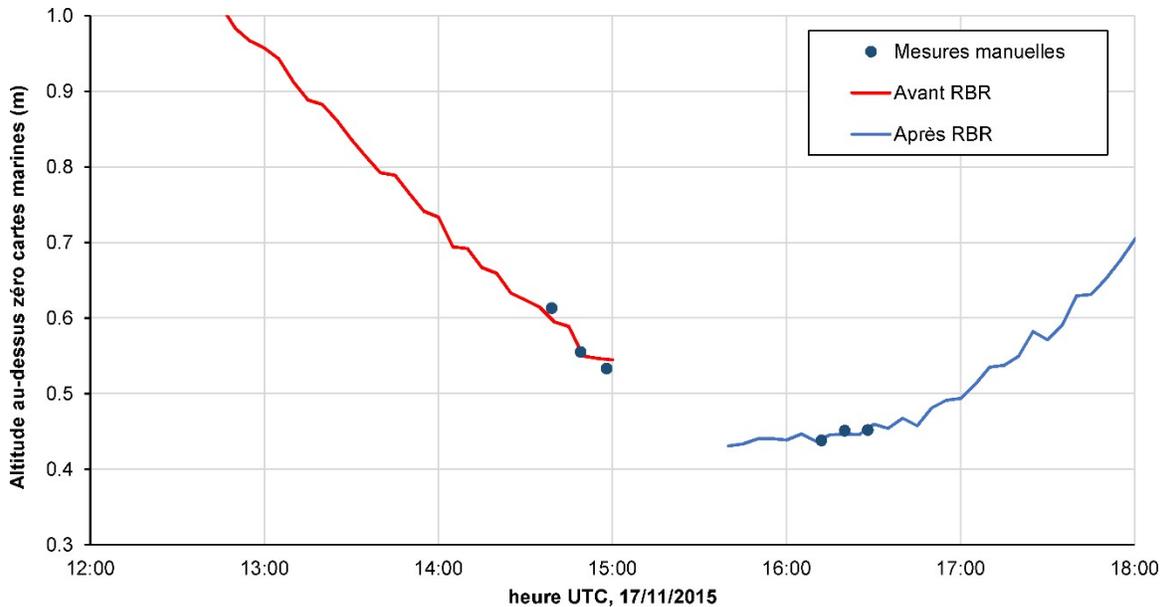


Figure 20 – Mesures manuelles de niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Paspébiac le 17 novembre 2015 avant et après le remplacement du marégraphe.

Tableau 9 – Altitude par rapport au zéro des cartes marines du marégraphe de Paspébiac (altitudes déterminées en début et en fin de déploiement, altitude utilisée pour le traitement des données) ainsi que constante p_{offset} déterminée pour chaque déploiement.

Période	Altitude début	Altitude fin	Altitude utilisée	p_{offset}^b
2015A	-1,467 m	-1,485 m	-1,475 m	0,02 dbar
2015B	-1,452 m	-1,456 m	-1,454 m	-0,16 dbar
2016A ^a	–	–	–	
2017A	-1,371 m ^b	-1,445 m	-1,408 m	-0,46 dbar
2017B	-1,450 m	-1,380 m	-1,415 m	0,00 / -0,19 dbar
2018A	–	-1,446 m	-1,446 m	0,03 / 0,23 dbar

^a Le marégraphe n'a pas enregistré de données exploitables durant la période 2016A.

^b Lorsque deux valeurs sont indiquées, elles s'appliquent au marégraphe inférieur (principal) et au marégraphe supérieur (additionnel).

Pour la période 2017B quand deux marégraphes étaient installés, les deux ont mesurés des valeurs très similaires. La différence entre les deux instruments montre des variations de jusqu'à 5 mm qui suivent le cycle de marée, ces variations sont causées par des différences dans la calibration des instruments (différence de 0,25 %). Enfin pendant des tempêtes, la différence montre parfois des oscillations de 10-20 minutes, dont les extrêmes sont de -66 mm à +51 mm. Comme il n'est pas possible de savoir lequel des

instruments donnaient des meilleurs résultats pour cette période, il est recommandé d'utiliser la moyenne des deux instruments.

Les enregistrements des marégraphes montrent des petites oscillations avec une période de 15-48 minutes (moyenne 35 minutes) et généralement une amplitude de 2-4 cm, allant à 4-15 cm pendant des tempêtes (Figure 21). Pour lisser ces oscillations, un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 1/3600 Hz a été appliqué. Selon l'utilisation prévue, les données lissées ou non lissées peuvent être utilisées.

Les surcote et les décotes, la série temporelle a été analysée avec la boîte à outils T_TIDE dans Matlab (Pawlowicz et al., 2002) pour déterminer les harmoniques de marées, puis de calculer les prédictions de marées. Les surcotes et les décotes sont finalement calculées comme la différence entre les niveaux observés et les niveaux d'eau prédits par T_TIDE.

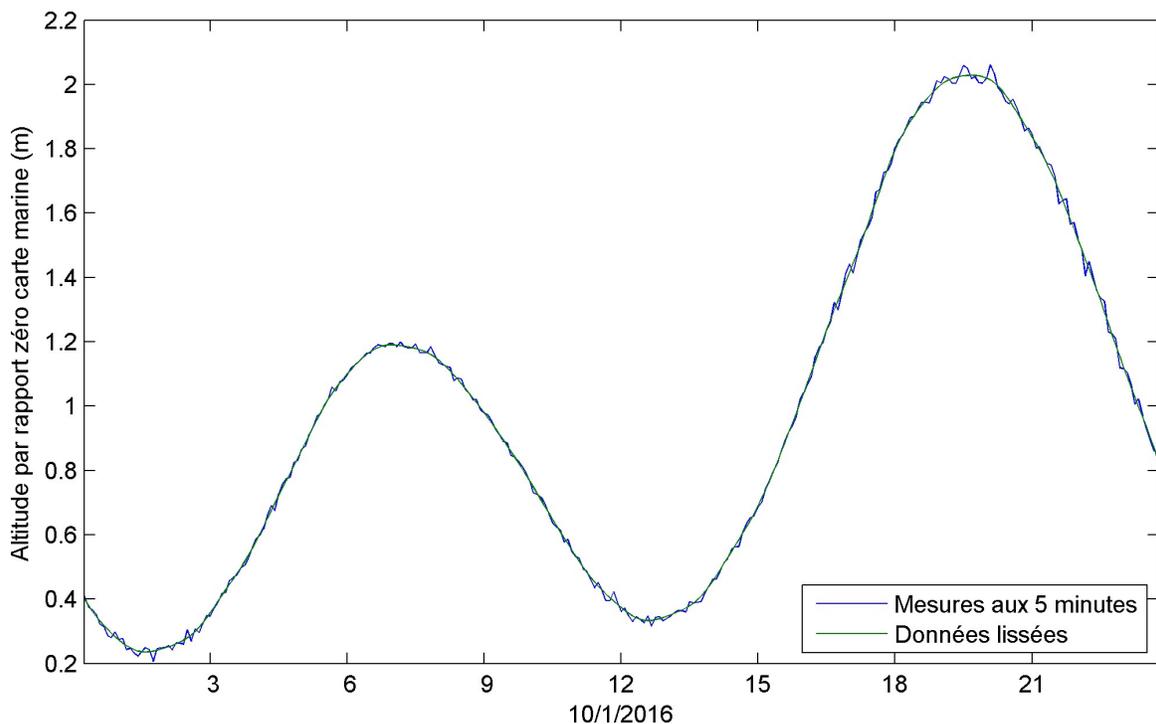


Figure 21 – Exemple des petites oscillations avec des périodes de 15-48 minutes, ainsi que du lissage avec un filtre passe-bas.

3.6. Archivage des données

Toutes les données produites par les AWAC (sites A, B, E et F) et par le marégraphe de Paspébiac ont été transmises avec ce rapport au MTQ, cf. chapitre 7.

Pour assurer la pérennité de cet ensemble exceptionnel de données océanographiques et pour permettre leur utilisation à des fins scientifiques dans le futur, les données de vagues et de courant ont également été sauvegardées dans le Système de gestion de données environnementales (SGDE) de l'ISMER. Le SGDO-ISMER est une banque de données d'archivage sécurisée qui peut être interrogée avec l'interface de l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL) à l'adresse <https://ogsl.ca/archive/>. Les données ont été enregistrées en format ODF, un format autodocumenté utilisé en océanographie.

L'interface de l'OGSL permet de filtrer les jeux de données existant aux archives de données environnementales sur le site de l'Observatoire Global du Saint-Laurent. La recherche peut se faire par type de variables, par période et par secteur géographique (Figure 22). L'interface web présente ensuite les jeux de données correspondants sur une carte, qui permet d'interroger aussi les métadonnées de chaque jeu de données (Figure 23).

L'accès aux données du présent projet, via l'OGSL, est limité aux personnes autorisées par le gestionnaire de la banque de données, bien que la présence des jeux de données et leurs métadonnées soient visibles pour tous. Actuellement, Urs Neumeier possède l'accès, d'autres personnes peuvent être autorisées par le MTQ. Dans le futur, le MTQ pourra décider d'élargir l'accès à ces données à tous les scientifiques.

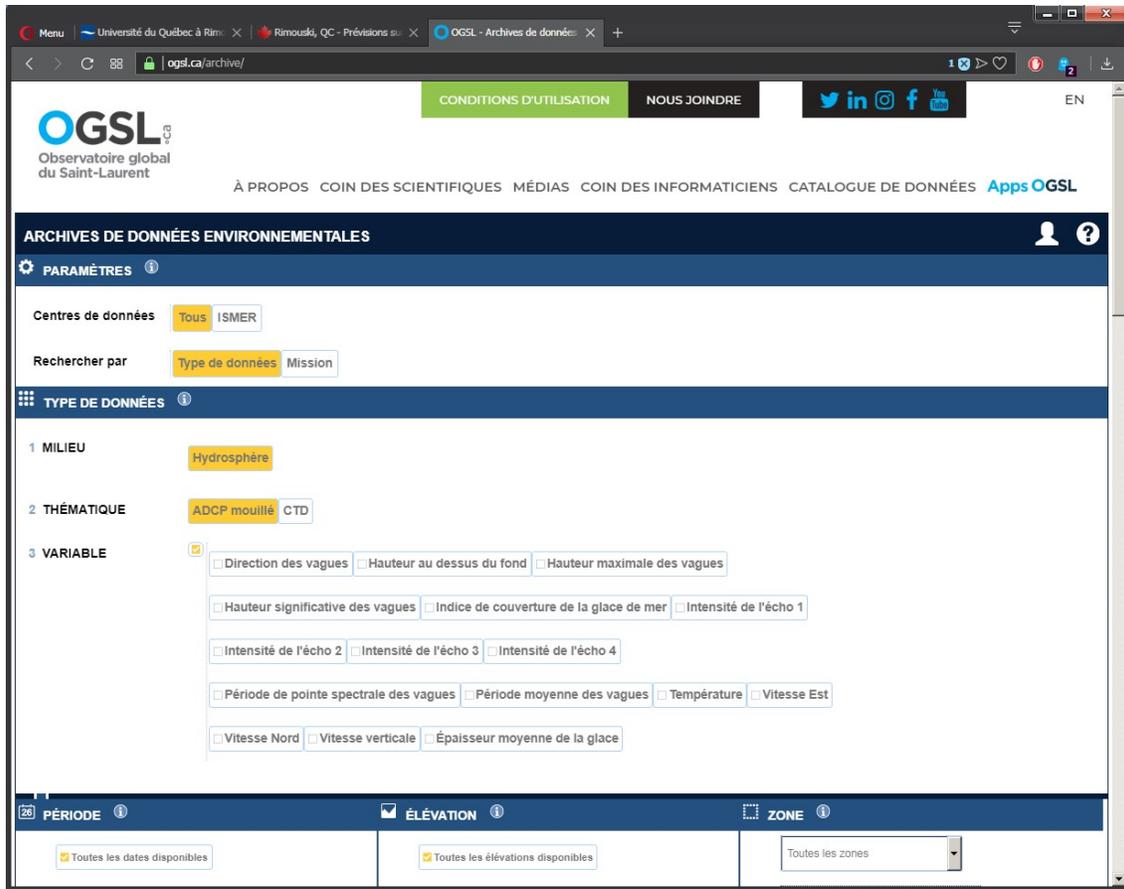


Figure 22 – Page d'accès aux archives de données environnementales sur le site de l'Observatoire Global du Saint-Laurent. La recherche peut se faire par type de variables ou bien par identifiant de mission.

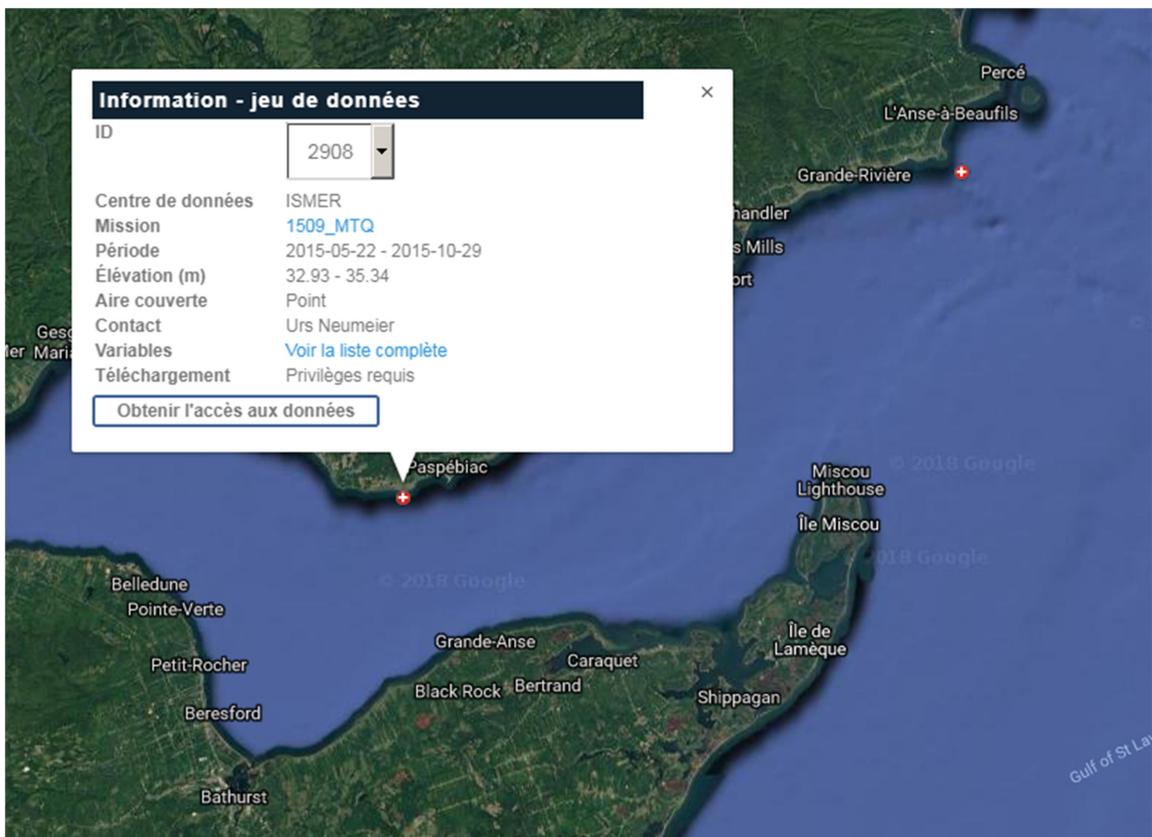
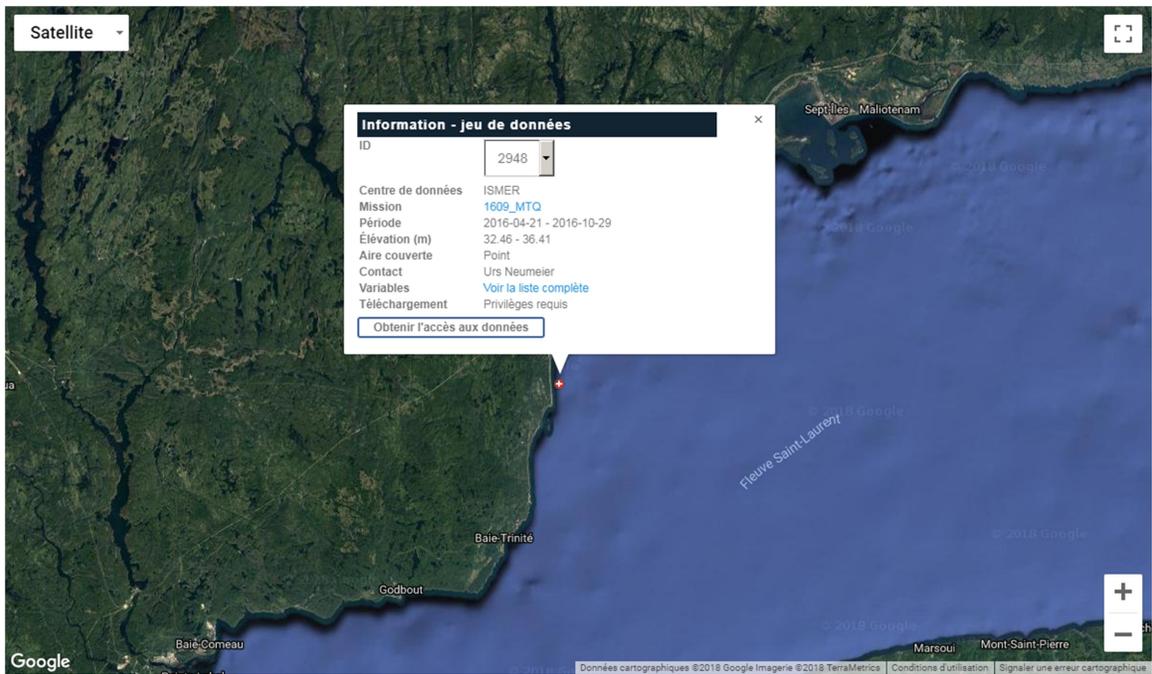


Figure 23 – Exemples de jeu de données disponibles sur le site internet de l'OGSL pour les sites de Rivière-Pentecôte (haut) et de Paspébiac (bas).

4. Résultats des instruments

4.1. Données de vagues

Toutes les données de vagues disponibles pour chaque site ont été compilées pour calculer les probabilités de dépassement des hauteurs de vagues. Les données de St-Ulric (site A) et Cap d'Espoir (site B) obtenues lors du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP, couvrant la période 2010-2014, ont donc été incorporées aux données nouvellement acquises pour la période 2014-2018. Ainsi, nous avons obtenu des séries temporelles de 69 424 heures au site de St-Ulric, 66 142 heures au site de Cap d'Espoir, 38 435 heures au site de Rivière-Pentecôte et 25 923 heures au site de Paspébiac. Présentées sous une échelle logarithmique, ces courbes de probabilité de dépassement correspondent à une représentation graphique de la fréquence d'occurrence des hauteurs de vagues atteintes, avec l'emphase mise sur les tempêtes. Il est important de rappeler que ces résultats sont basés sur la hauteur significative des vagues H_{m0} , non sur les hauteurs maximales mesurées

Avant de présenter les résultats obtenus aux 4 sites, il est pertinent de présenter la comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues à St-Ulric et Cap d'Espoir selon la période d'enregistrement (Figure 24), soit celle allant de mai 2010 à avril 2014, celle de mai 2014 à avril 2018, et enfin la période globale allant de mai 2010 à avril 2018. Il faut rappeler qu'au site de Cap d'Espoir le monitoring en 2010 a commencé seulement en octobre et non en mai à cause d'un souci technique.

Aux deux sites, il n'y a pas de différence pour les vagues inférieures à 2 m, soient les plus fréquentes. À St-Ulric, pour une même probabilité d'occurrence (0,01%) la hauteur significative des vagues H_{m0} a augmenté de 46 cm entre le début et la fin de la décennie. À Cap d'Espoir il s'agit d'une augmentation de 77 cm. D'une autre façon, à St-Ulric, pour une même hauteur de vagues, soit 3 m, la probabilité d'occurrence a été multipliée par 3. Les vagues de 3 m dans l'estuaire du St-Laurent sont ainsi 3 fois plus fréquentes par rapport au début de la décennie. Au site de Cap d'Espoir, la différence entre les deux périodes n'est remarquable que sur les très hautes vagues de plus de 5,73 m. Bien que la tendance à l'augmentation des phénomènes extrêmes soit visible aux deux sites, la différence entre ces deux sites dans l'intensité de l'augmentation pourrait résulter de plusieurs facteurs, que ce soit par une modification dans le régime des glaces, et/ou par un changement dans les phénomènes météorologiques à l'origine des tempêtes (trajectoire, fréquence, etc.).

La prolongation de l'enregistrement des conditions de vagues aux sites déjà surveillés lors de la période 2010-2014 a permis d'améliorer la connaissance à ces sites, et d'observer une tendance à l'accroissement des événements extrêmes tant par leur intensité que par leur fréquence. Cette tendance est nette au site représentatif de l'estuaire du St-Laurent (site A).

Les probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} des deux nouveaux sites, Rivière-Pentecôte (site E) et Paspébiac (site F) sont présentées avec celles de St-Ulric et Cap d'Espoir à la Figure 25.

Le site de Rivière-Pentecôte montre un régime de vagues relativement similaire à celui observé à Cap d'Espoir. Les deux sites sont exposés aux très fortes vagues produites dans le golfe du St-Laurent, toutefois celles mesurées au site de Rivière-Pentecôte sont un peu moins élevées que celles de Cap d'Espoir (à probabilité d'occurrence identique). Bien que des vagues supérieures à 5 m soient observées à Rivière-Pentecôte, 90% du temps, les vagues mesurées à ce site sont inférieures à 1 m. Cette analyse est encore plus visible avec le graphique présentant les séries temporelles des hauteurs vagues H_{m0} pour chaque site. Le site de Paspébiac présente un régime de vagues borné par la configuration géographique de la baie des Chaleurs et la limitation du fetch. La hauteur significative des vagues H_{m0} n'a jamais dépassé les 3 m pendant toute la durée du projet. Bien que le site de Paspébiac soit très différent de celui de Rivière-Pentecôte, 90% du temps, les vagues mesurées dans la baie des Chaleurs sont inférieures à 1 m. Les sites de St-Ulric et Paspébiac présentent des régimes de vagues proches, l'écart se creusant graduellement avec l'augmentation des hauteurs mesurées. À l'avenir, la courbe représentant le régime de vague de Paspébiac pourrait subir la même modification qu'il est possible de constater pour le site de St-Ulric entre la période 2010-2014 et 2014-2018, sans toutefois voir les limites supérieures être surpassées. Ces graphiques mettent en relief les disparités entre sites et leur vulnérabilité aux futurs dépassements (ou non) des limites mesurées par la présente étude.

De la même manière, les roses des vagues pour chaque site sont présentées afin de visualiser les secteurs de provenance des fortes vagues. Il est à noter que l'échelle colorimétrique est légèrement différente de celle utilisée lors du précédent rapport pour présenter le même genre de graphique. Les vagues sont discrétisées en six catégories au lieu de sept : les vagues dont la hauteur H_{m0} est inférieure à 0,5 m; celles comprises entre 0,5 et 1 m; entre 1 et 1,5 m; entre 1,5 et 2,5 m; entre 2,5 et 3,5 m; entre 3,5 et 4,5 m; et enfin celles au-dessus de 4,5 m. Sans surprise, les vagues plus fortes mesurées à St-Ulric proviennent du secteur nord-est. La tempête la plus forte enregistrée ($H_{m0} \rightarrow 4,2$ m) est arrivée du nord-est (44°). Les vagues en provenance de l'ouest demeurent encore importantes et plusieurs grosses tempêtes issues de cette direction ont été enregistrées à St-Ulric. Ce graphique permet également de constater que le littoral en face de St-Ulric reçoit des vagues d'au minimum 2,5 m de toutes les directions ouvertes sur le fleuve St-Laurent. À Cap d'Espoir, les directions de provenance des grosses vagues s'étalent du nord-est au sud-ouest. Les plus fortes proviennent du secteur est-sud-est ($H_{m0} \rightarrow 6,6$ m). À noter, que la huitième plus forte tempête en importance ($H_{m0} \rightarrow 5$ m), enregistrée au site de Cap d'Espoir sur les huit dernières années, en provenance du sud-ouest (214°), serait originaire de l'intérieur de la baie des Chaleurs ou bien de la vallée de Shediac en longeant la presqu'île de Miscou. Les tempêtes en provenance de ce secteur sont très rares et les vagues habituellement de moindre importance. Le site de Rivière-Pentecôte ne semble recevoir des vagues de tempêtes seulement du secteur est ($H_{m0} \rightarrow 6,1$ m; dir : 67°). Ce secteur de provenance des vagues les plus élevées est aussi celui où les vagues sont les plus fréquentes. Malgré un fetch important, aucune grosse tempête n'est issue du

sud ou du sud-ouest. La présence de l'île d'Anticosti ne permet pas de limiter la propagation des tempêtes originaires du golfe du St-Laurent jusqu'au littoral de Rivière-Pentecôte. Pour sa part, le site de Paspébiac est relativement bien protégé des tempêtes en provenance du golfe du St-Laurent. À l'échelle de la baie des Chaleurs, les plus fortes vagues mesurées proviennent de l'ouest et de l'est. Les vagues les plus élevées mesurées à Paspébiac ($H_{m0} \rightarrow 2,8$ m) provenaient de l'est (direction : 85°), là où est le fetch est le plus important. C'est également des secteurs ouest et est que les vagues sont le plus souvent originaires. À l'exception de cinq événements distinctifs lors desquels la hauteur H_{m0} des vagues a dépassé les 2,5 m, la plupart des grosses vagues dans la baie des Chaleurs sont inférieures à cette limite de 2,5 m.

Pour plus de détails, nous avons répertorié dans les Tableaux 10 et 11 la date, l'heure, la hauteur H_{m0} et la période des vagues, ainsi que la direction de provenance des 40 plus fortes tempêtes mesurées au site de St-Ulric (site A) et Cap d'Espoir (site B), et des 25 plus fortes tempêtes mesurées au site de Rivière-Pentecôte (site E) et Paspébiac (site F). La répartition spatiale de ces tempêtes est également représentée à la Figure 31. Dans le but de souligner la tendance évoquée avec les courbes de probabilité de dépassement, les tempêtes survenues lors de la période 2010-2014 sont ombragées en gris dans le Tableau 10 et identifiées en bleu dans la Figure 31, alors que les tempêtes de la période 2014-2018 sont identifiées en rouge sur cette même figure. Ces outils visuels permettent également de constater une tendance à l'augmentation de l'intensité des tempêtes entre les deux périodes au niveau de l'estuaire du St-Laurent et de la pointe de la péninsule gaspésienne. Pour le site de St-Ulric, les tempêtes qui génèrent des vagues en provenance de l'ouest sont plus fréquentes à la fin de la décennie qu'au début.

Les hauteurs de vagues H_{m0} et la distribution des tempêtes au cours du projet sont présentées sous forme de séries temporelles des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées à chaque site avec les 16 plus fortes tempêtes mises en évidence pour St-Ulric, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte; et les 12 plus fortes tempêtes à Paspébiac où seulement 3 années de mesure sont disponibles (Figures 27 à 30). Il est important de rappeler qu'il manque à la fin de l'hiver 2015, respectivement 98, 111 et 104 jours de données aux sites de A, B et E. Ainsi quelques tempêtes printanières ont pu être manquées. À St-Ulric, les tempêtes ne sont pas seulement cantonnées à l'automne, mais interviennent également au cours de l'hiver, notamment celles du 15 mars 2017 et du 5 janvier 2018. Les faibles conditions de glace hivernales ont probablement permis le développement et la propagation sur la côte des fortes vagues. Les tempêtes semblent avoir été moins fréquentes au cours de la période 2015-2016, et à l'inverse, la période 2016-2017 démontre une fréquence plus élevée des vagues surpassant le seuil des 2 m, tant à l'automne 2016 qu'au printemps 2017. Au Cap d'Espoir les tempêtes d'importance interviennent généralement en décembre et janvier. Les quelques tempêtes printanières sont rares. Par commodité nous avons décidé de ne pas illustrer pour le site de Rivière-Pentecôte, la fin de la série temporelle allant du 1^{er} mai au 24 septembre 2018, pour deux raisons, la première étant qu'aucune tempête d'importance n'est intervenue, et la seconde, le profileur de courant (AWAC-AST) utilisé, a montré des signes de mauvais fonctionnement de plus en plus fréquent sur la fin de la période en question. À Rivière-Pentecôte, on note à première vue une ségrégation évidente entre les événements

d'importance et le reste des vagues mesurées. On a ici une dichotomie entre les grosses vagues tempêtes issues de l'est, et des vagues très petites, inférieures à 1 m, qui sont les conditions les plus fréquentes à ce site. Cette tendance se remarque également par la forme de la courbe des probabilités de dépassement présentée pour ce site à la Figure 25, qui montre une inflexion au niveau des vagues inférieures à 1 m. Par ailleurs, une activité plus importante au niveau de la fréquence des tempêtes est observée pour les deux dernières périodes de mai 2015 à mai 2018 par rapport au début du suivi. Dans la baie des Chaleurs, le début du suivi des conditions de vagues a commencé en juin 2015. À Paspébiac, les tempêtes interviennent également en décembre et janvier, même si quelques-unes sont mesurées en novembre ou en mars. Le reste de l'année, les conditions de vagues sont calmes. Dans la baie des Chaleurs, tout comme aux trois autres sites monitorés, l'activité des tempêtes était plus importante au cours de la période mai 2016 à mai 2018.

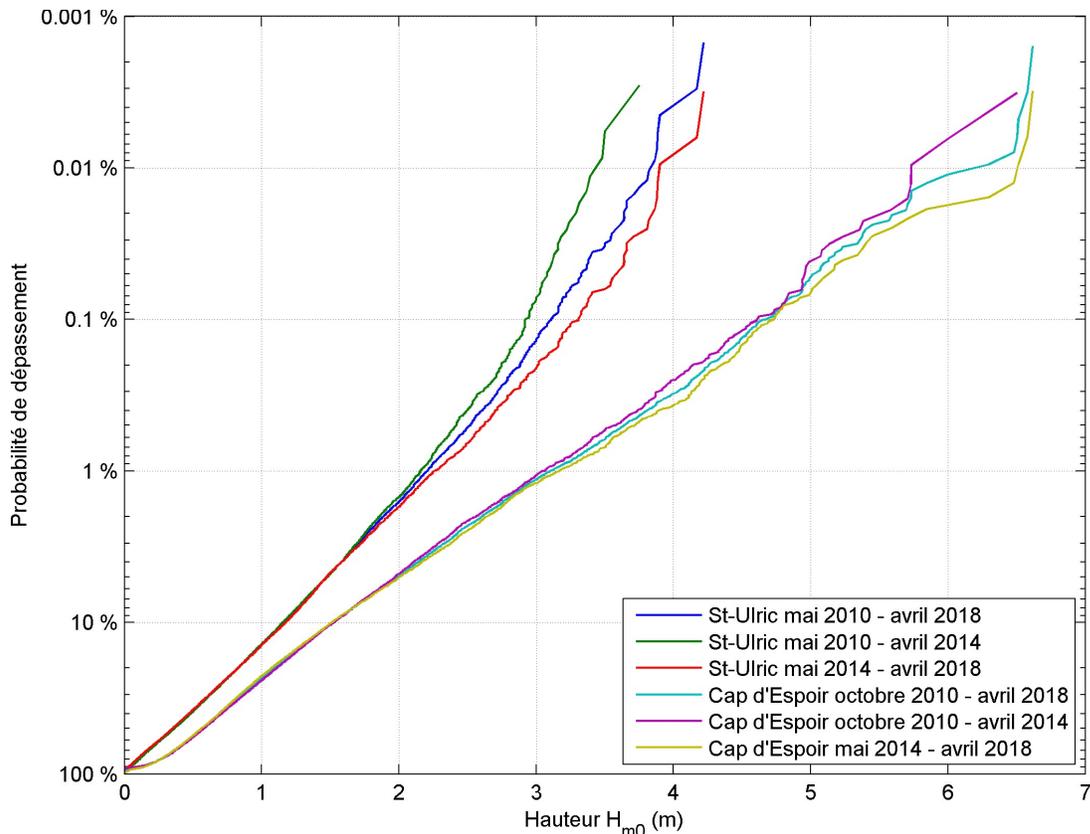


Figure 24 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} à St-Ulric et Cap d'Espoir en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 et 2010-2018.

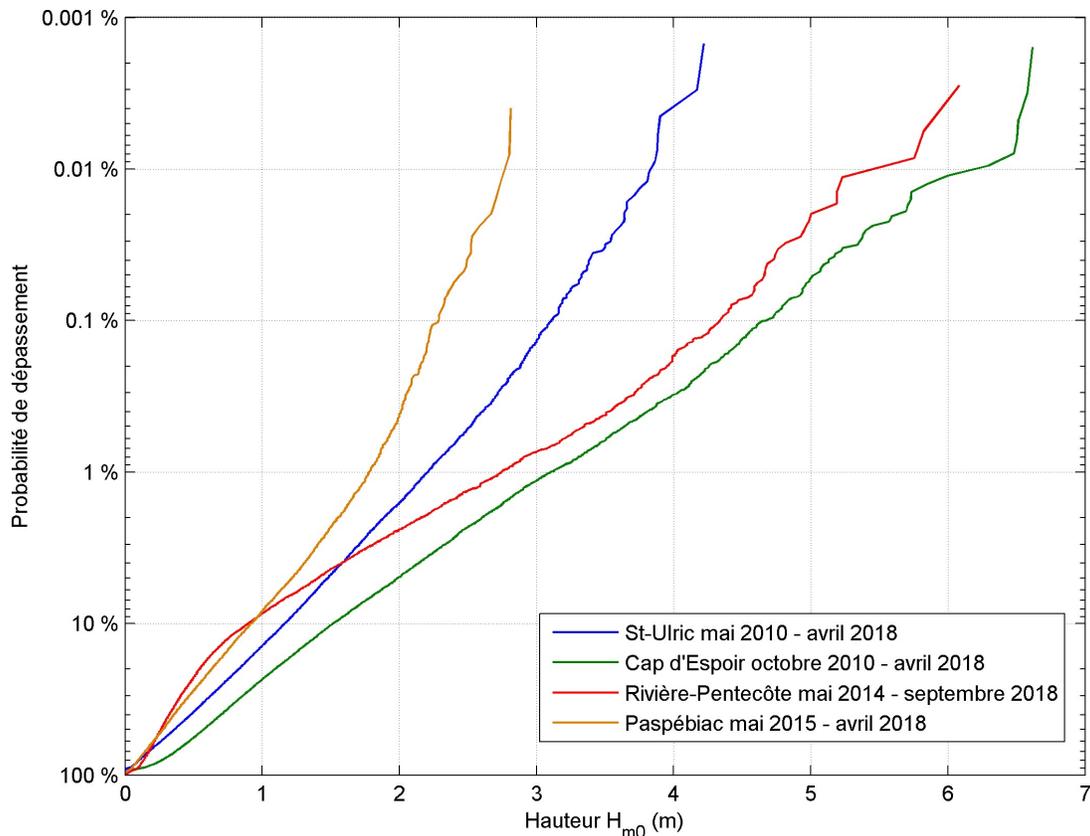


Figure 25 – Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} aux quatre sites. Les courbes des sites A et B sont construites en intégrant les 4 années du projet précédent.

La Figure 32 illustre la relation entre la période T_{02} et la hauteur H_{m0} des vagues. Pour chaque hauteur de vague, il y a une période minimale (correspondant à une longueur d'onde minimale). La figure montre aussi les périodes des plus fortes vagues de tempête à chaque site : entre 5 et 7 s à Saint-Ulric, entre 6 à 8 s au Cap d'Espoir et à Rivière-Pentecôte, et entre 4,5 et 5,5 s pour Paspébiac. Dans la baie des Chaleurs, les périodes des vagues de tempête sont beaucoup plus courtes que celles mesurées dans le golfe ou dans l'estuaire du St-Laurent à cause d'un fetch réduit. Par ailleurs on observe moins de variabilité pour les sites de St-Ulric et Paspébiac, alors qu'aux deux autres sites ouverts sur le golfe, il y a une plus grande variabilité des hauteurs de vague pour une même période élevée.

Les périodes de retour des fortes vagues ont été calculées pour chaque site et selon différentes méthodologies (Figures 33 et 34). La première distribution probabiliste utilisée est la loi généralisée de Pareto, où l'ajustement est réalisé au seuil des 93%. Les deux autres distributions sont celles de Weibull et de Gumbel. Les huit années de données aux sites de St-Ulric et de Cap d'Espoir ont servi à construire ces courbes, alors qu'un jeu de données beaucoup plus court a été utilisé pour les sites de Rivière-Pentecôte (4 ans) et Paspébiac (3 ans). Selon la distribution utilisée, les résultats peuvent montrer des

différences importantes pour un même site. Pour St-Ulric, les vagues dont la hauteur H_{m0} est supérieure à 4 m ont une récurrence aux 5 ans environ, à Rivière-Pentecôte et Cap d'espoir ce sont des vagues supérieures à 6 m qui ont cette récurrence, voire 6,4 m pour le site B. Pour la baie des Chaleurs, ce sont des vagues légèrement inférieures à 3 m qui ont une récurrence aux 5 ans.

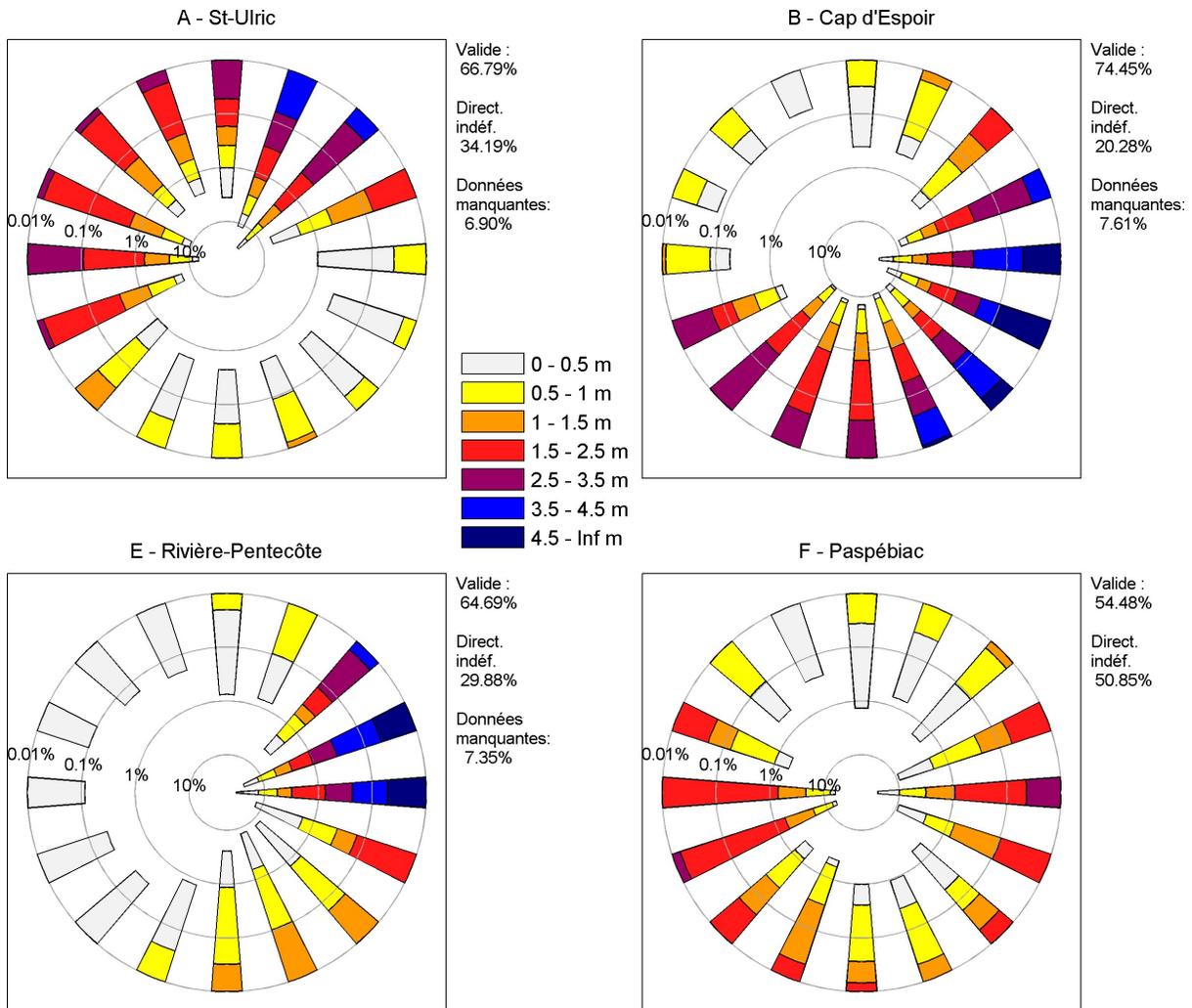


Figure 26 – Roses de vagues pour les quatre sites et pour toute la durée du projet. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements 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 provenant de cette direction.

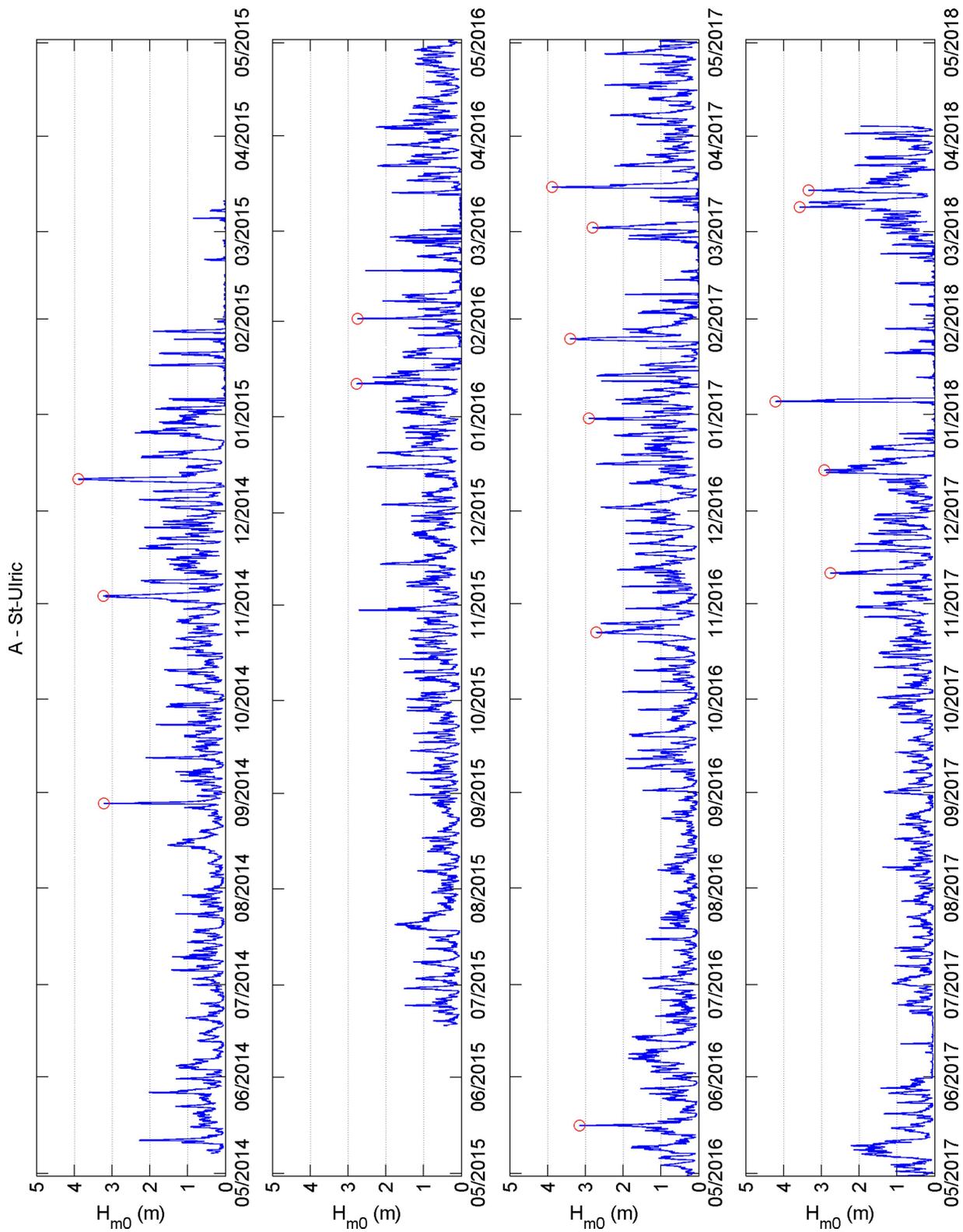


Figure 27 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 16 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

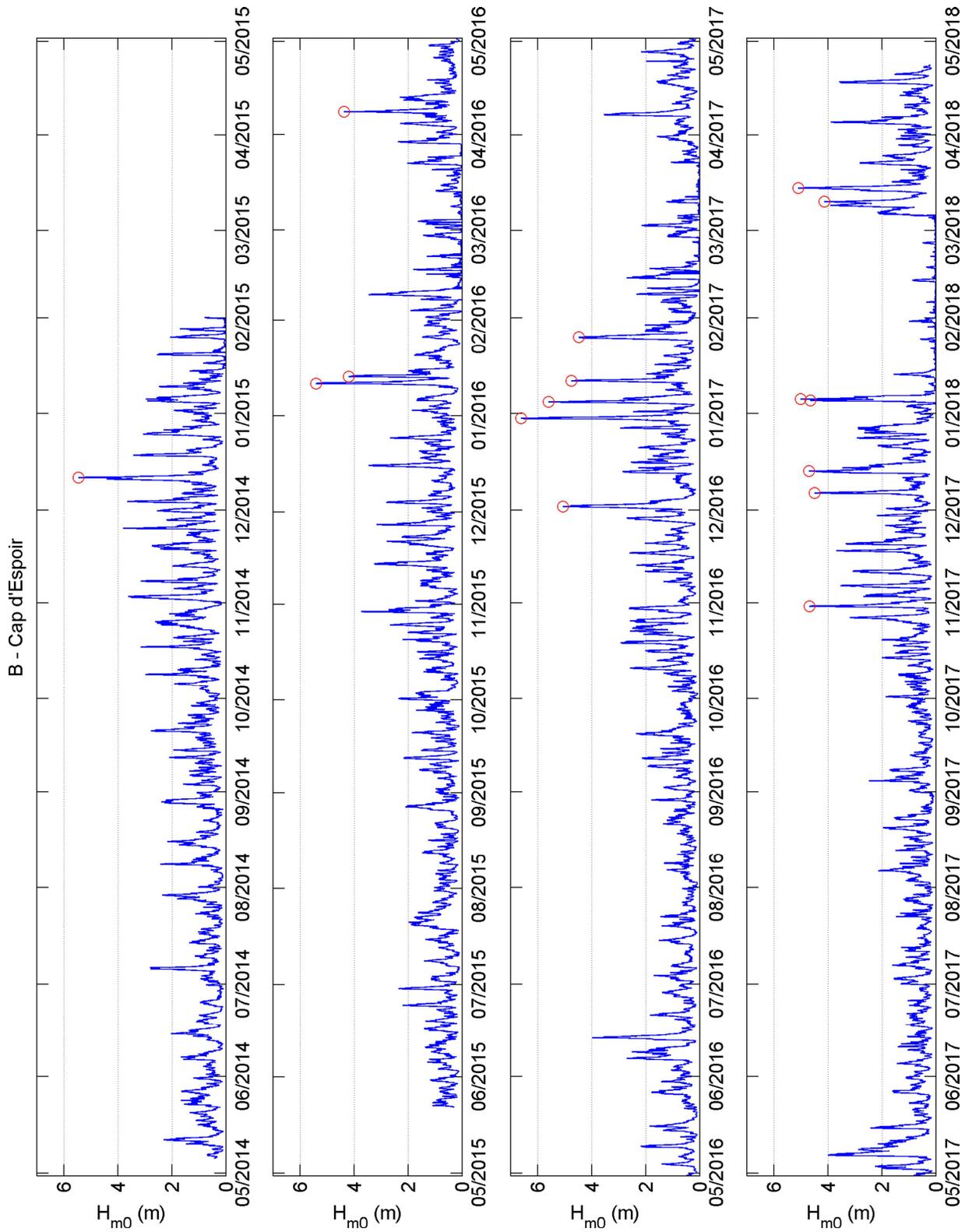


Figure 28 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site B (Cap d'Espoir). Les 16 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

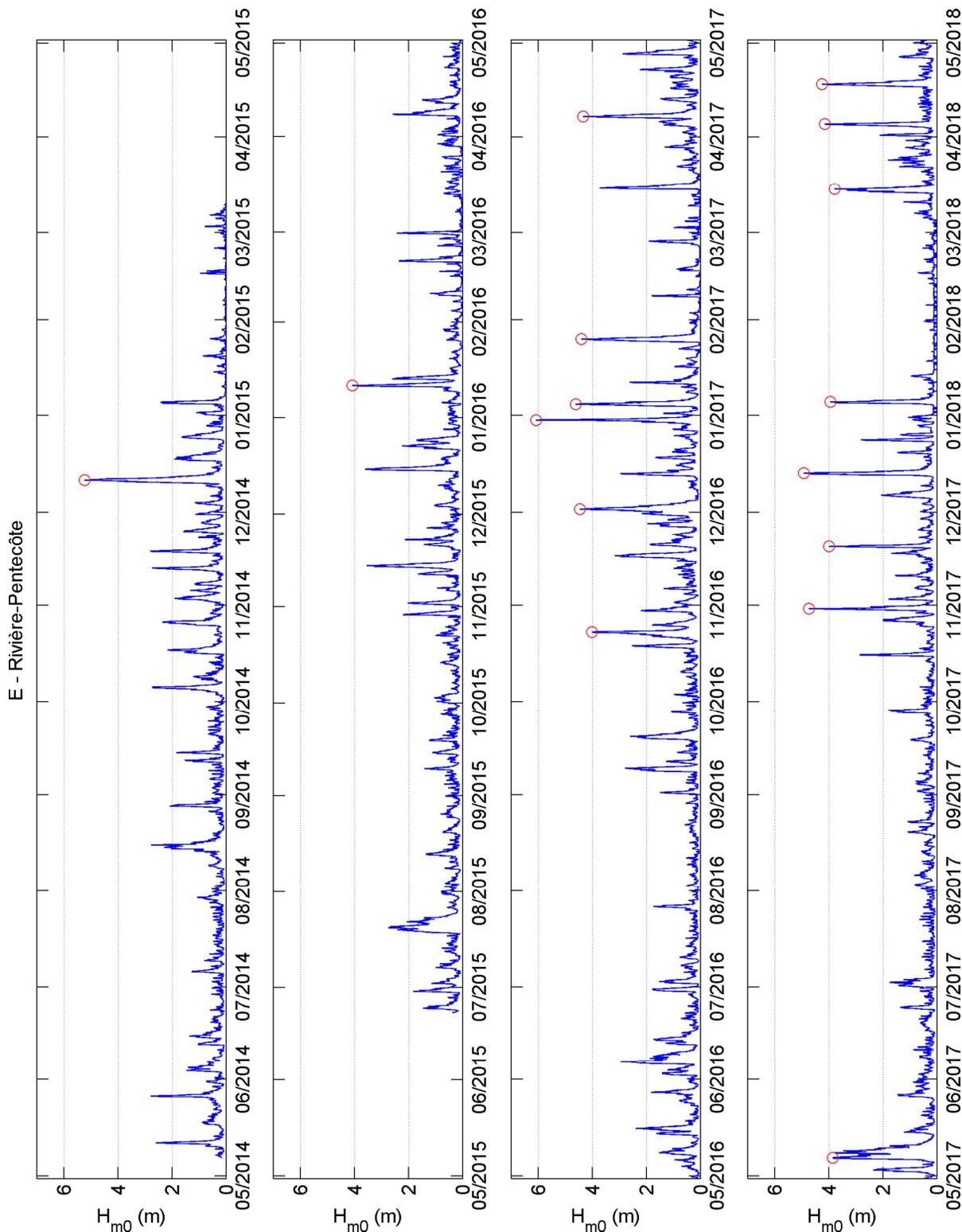


Figure 29 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 16 plus fortes tempêtes durant les quatre années du projet sont indiquées avec des cercles rouges (la portion du 1^{er} mai au 24 septembre 2018 n'est pas montrée par convenance).

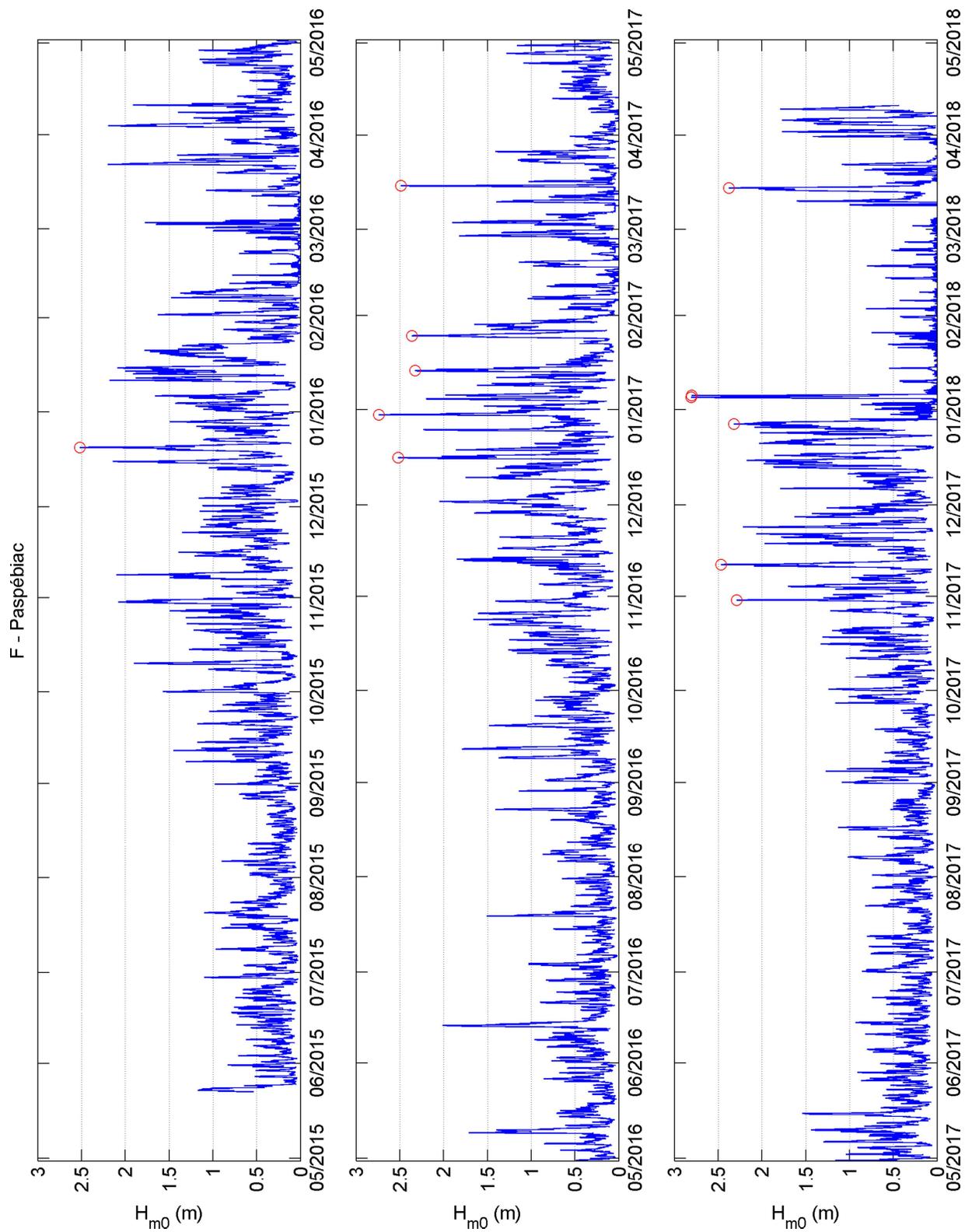


Figure 30 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site F (Paspébiac). Les 12 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges

Tableau 10 – Les 40 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2018 aux sites A et B. Les tempêtes de la période 2010-2014 sont surlignées en grisé.

Site A (St-Ulric)					Site B (Cap d'Espoir)				
Rang	Date/Heure (HNE)	H _{m0} (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)	Rang	Date/Heure (HNE)	H _{m0} (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)
1	05/01/2018 03:00	4.22	6.84	44	1	30/12/2016 09:00	6.61	7.66	117
2	11/12/2014 04:00	3.90	6.48	23	2	15/12/2010 05:00	6.50	7.79	122
3	15/03/2017 09:00	3.88	6.87	29	3	04/01/2017 14:00	5.59	7.90	114
4	15/12/2010 15:00	3.75	7.57	63	4	11/12/2014 09:00	5.45	7.80	94
5	08/03/2018 22:00	3.58	6.55	50	5	11/01/2016 06:00	5.40	7.15	116
6	23/04/2012 14:00	3.48	6.20	33	6	14/03/2018 15:00	5.09	7.74	79
7	25/01/2017 12:00	3.40	6.49	34	7	02/12/2016 00:00	5.07	7.19	104
8	14/03/2018 06:00	3.34	6.10	45	8	05/01/2018 14:00	5.01	7.33	214
9	14/02/2014 10:00	3.29	5.49	42	9	08/04/2012 11:00	4.81	7.56	80
10	03/11/2014 09:00	3.23	5.76	4	10	11/01/2017 11:00	4.74	6.99	146
11	28/12/2010 04:00	3.22	5.76	53	11	13/12/2017 09:00	4.69	7.12	97
12	28/08/2014 09:00	3.22	6.39	25	12	30/10/2017 17:00	4.68	6.76	119
13	20/01/2013 23:00	3.16	5.67	253	13	05/01/2018 02:00	4.64	9.53	96
14	21/02/2013 04:00	3.16	6.06	37	14	22/12/2012 10:00	4.55	6.26	130
15	16/05/2016 07:00	3.16	6.07	42	15	20/01/2013 15:00	4.50	5.84	128
16	27/03/2014 05:00	3.04	5.52	328	16	06/12/2017 09:00	4.49	7.00	148
17	06/12/2010 13:00	2.95	6.17	67	17	25/01/2017 16:00	4.48	6.86	96
18	18/02/2013 10:00	2.95	5.17	292	18	06/01/2014 20:00	4.44	7.04	136
19	14/12/2017 02:00	2.93	5.65	264	19	18/11/2013 16:00	4.38	6.30	141
20	26/01/2014 12:00	2.92	5.08	260	20	08/04/2016 06:00	4.37	5.83	128
21	30/12/2016 17:00	2.91	5.17	274	21	05/12/2010 03:00	4.35	6.67	116
22	21/12/2010 06:00	2.89	6.07	69	22	21/12/2010 14:00	4.26	6.52	100
23	05/05/2011 21:00	2.85	6.14	59	23	27/11/2013 18:00	4.26	6.62	129
24	02/03/2017 06:00	2.82	5.88	30	24	13/01/2016 12:00	4.19	6.23	76
25	25/11/2013 00:00	2.81	5.19	302	25	10/03/2018 05:00	4.13	6.87	86
26	28/12/2012 03:00	2.80	5.71	24	26	06/12/2010 11:00	4.12	6.44	123
27	11/01/2016 13:00	2.78	5.80	269	27	15/12/2013 19:00	4.04	5.76	69
28	13/03/2014 05:00	2.78	5.27	48	28	16/10/2010 01:00	4.02	6.67	122
29	10/11/2017 17:00	2.77	5.41	266	29	06/05/2017 18:00	3.99	6.80	120
30	26/06/2012 23:00	2.75	6.14	33	30	13/06/2016 10:00	3.97	6.57	94
31	01/02/2016 19:00	2.75	5.23	274	31	28/12/2011 14:00	3.92	6.55	139
32	22/12/2012 05:00	2.74	6.42	39	32	05/04/2018 00:00	3.89	7.06	90
33	09/09/2010 14:00	2.73	5.88	17	33	27/12/2010 22:00	3.87	6.90	94
34	22/10/2016 15:00	2.72	5.71	43	34	17/04/2011 16:00	3.84	6.91	147
35	15/12/2016 23:00	2.72	5.13	326	35	24/11/2014 18:00	3.81	6.19	144
36	13/01/2011 05:00	2.71	5.49	70	36	28/12/2012 08:00	3.80	6.53	101
37	30/10/2015 06:00	2.71	5.20	256	37	19/09/2012 10:00	3.77	6.30	151
38	13/01/2017 10:00	2.70	5.32	280	38	29/10/2015 12:00	3.73	6.77	143
39	08/04/2012 20:00	2.66	5.57	30	39	05/10/2011 13:00	3.70	6.57	75
40	25/10/2016 12:00	2.59	5.77	37	40	17/11/2017 13:00	3.68	6.36	85

Tableau 11 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2018 aux sites E et F.

Site E (Rivière-Pentecôte)					Site F (Paspébiac)				
Rang	Date/Heure (HNE)	H _{m0} (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)	Rang	Date/Heure (HNE)	H _{m0} (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)
1	30/12/2016 11:00	6.08	7.41	67	1	04/01/2018 21:00	2.81	6.60	85
2	11/12/2014 04:00	5.23	7.27	85	2	05/01/2018 12:00	2.80	5.04	261
3	13/12/2017 10:00	4.92	7.48	78	3	30/12/2016 07:00	2.74	5.29	89
4	30/10/2017 17:00	4.73	7.24	84	4	16/12/2016 05:00	2.52	5.04	250
5	04/01/2017 13:00	4.61	6.98	64	5	20/12/2015 06:00	2.52	5.45	256
6	01/12/2016 20:00	4.46	6.68	69	6	15/03/2017 03:00	2.49	4.84	79
7	25/01/2017 15:00	4.40	7.04	58	7	11/11/2017 04:00	2.47	5.12	259
8	07/04/2017 10:00	4.33	6.71	65	8	14/03/2018 10:00	2.38	4.93	86
9	17/04/2018 20:00	4.25	6.80	87	9	25/01/2017 06:00	2.36	4.70	78
10	05/04/2018 00:00	4.14	7.15	88	10	13/01/2017 14:00	2.33	5.24	257
11	11/01/2016 04:00	4.08	6.72	78	11	27/12/2017 05:00	2.32	4.85	263
12	23/10/2016 05:00	4.01	6.70	84	12	30/10/2017 15:00	2.29	5.12	92
13	19/11/2017 16:00	3.99	6.56	89	13	25/12/2016 09:00	2.23	5.22	255
14	05/01/2018 04:00	3.94	6.92	80	14	23/11/2017 11:00	2.21	4.95	266
15	06/05/2017 16:00	3.85	7.13	60	15	22/03/2016 08:00	2.20	4.97	256
16	15/03/2018 00:00	3.79	7.45	96	16	04/01/2017 11:00	2.20	4.75	82
17	08/05/2017 07:00	3.76	6.61	67	17	03/04/2016 22:00	2.20	5.09	250
18	15/03/2017 08:00	3.72	6.88	57	18	11/01/2016 04:00	2.18	4.94	98
19	15/12/2015 06:00	3.59	5.68	72	19	15/12/2017 10:00	2.17	4.74	263
20	14/11/2015 01:00	3.55	6.24	74	20	15/12/2015 15:00	2.14	4.85	82
21	16/11/2016 16:00	3.17	6.02	47	21	08/11/2015 09:00	2.10	5.12	252
22	13/12/2016 05:00	2.96	6.08	73	22	15/01/2016 05:00	2.09	4.69	259
23	06/06/2016 16:00	2.94	5.88	87	23	30/10/2015 10:00	2.08	4.91	254
24	27/04/2017 12:00	2.87	5.85	72	24	21/11/2017 03:00	2.06	5.11	266
25	15/10/2017 22:00	2.85	5.79	71	25	01/12/2016 23:00	2.05	5.03	85

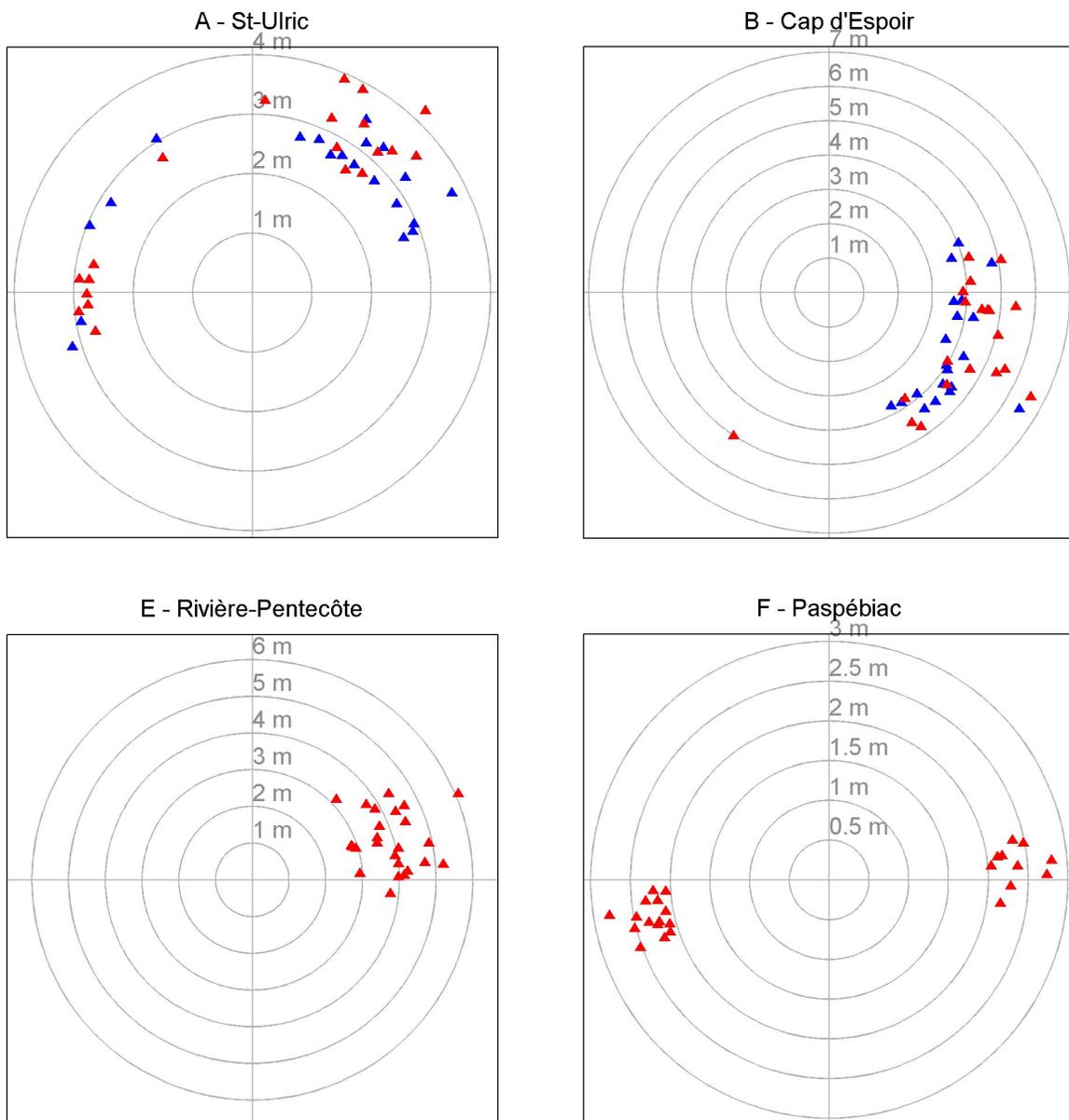


Figure 31 – Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des 40 plus fortes tempêtes observées aux sites A et B et des 25 plus fortes tempêtes observées aux sites E et F durant le projet. Les triangles en bleu correspondent à la période 2010-2014 et les triangles en rouge, 2014-2018.

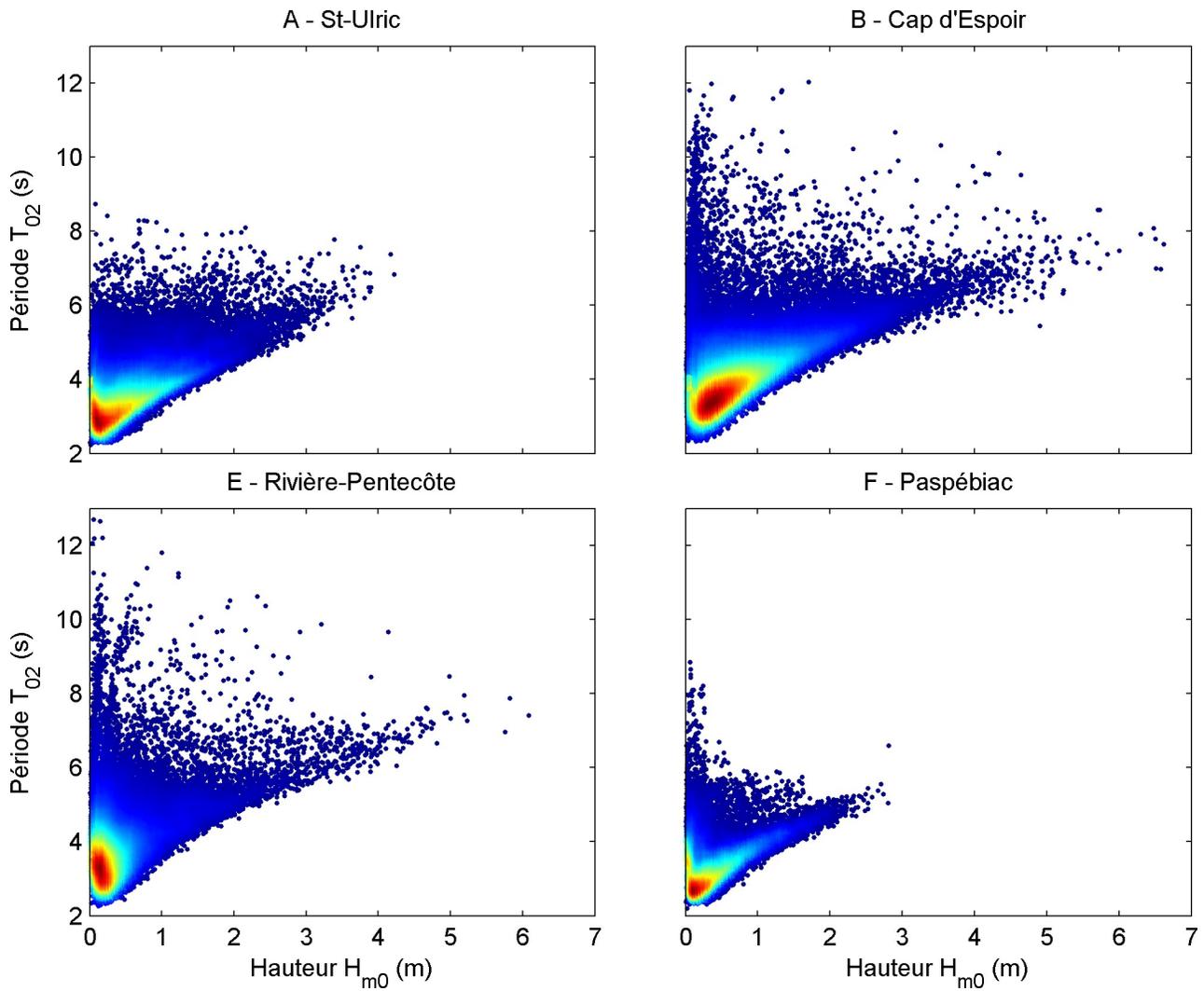


Figure 32 – Relation entre les hauteurs de vagues H_{m0} et les périodes T_{02} mesurées aux quatre sites durant le projet. Ces graphiques montrent bien les périodes des plus fortes vagues de tempête et la présence de houle avec une longue période mais une plus faible amplitude. La densité des mesures est indiquée avec un code de couleur (bleu : faible densité, rouge : forte densité).

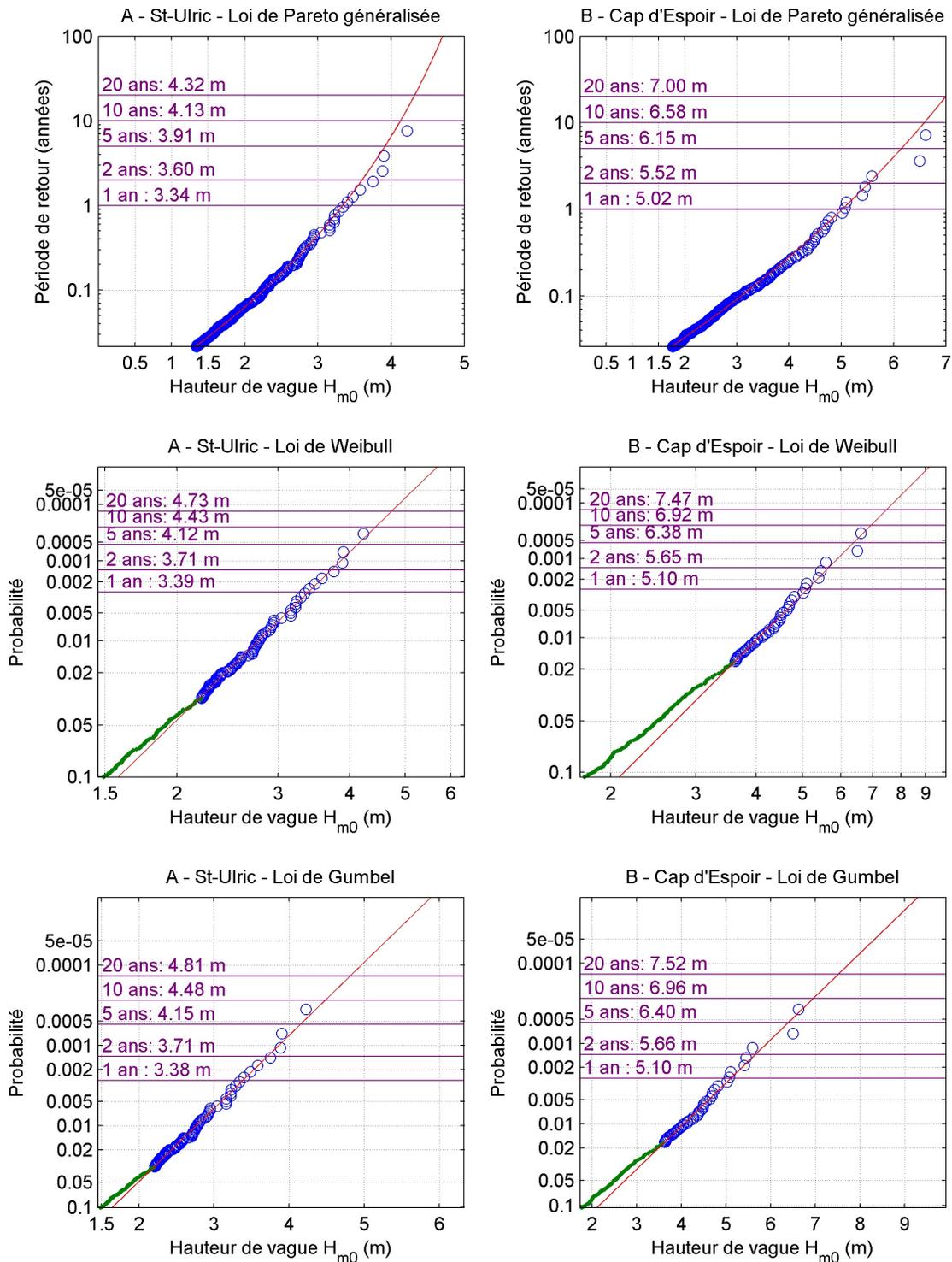


Figure 33 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites A et B. Les tempêtes utilisées pour l’ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les évènements au-dessus du 93^e percentile (cercles bleus) de l’ensemble des données.

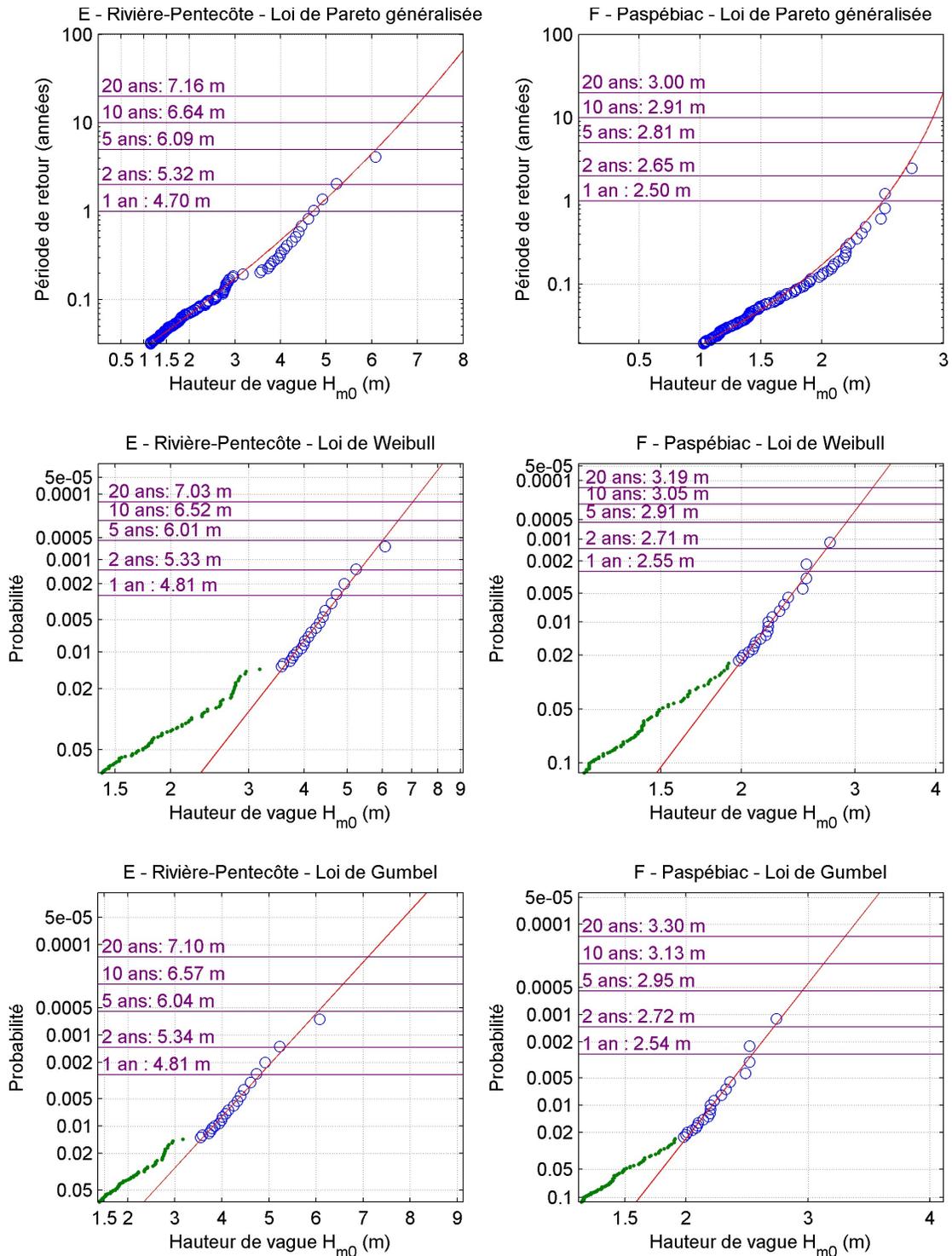


Figure 34 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites E et F. Les tempêtes utilisées pour l’ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les évènements au-dessus du 93^e percentile (cercles bleus) de l’ensemble des données.

En 2017, deux houlographes côtiers ont été installés la baie des Chaleurs de fin juin à début novembre, l'un devant Bonaventure, l'autre devant St-Godefroi (Figures 6 et 7). L'objectif était d'obtenir des données pour calibrer le modèle numérique. Mais ces enregistrements illustrent d'une part la différence avec les vagues au large de Paspébiac au site F, et d'autre part les différentes conditions de vagues à quelques centaines de mètre de la côte dans deux secteurs menacés par l'érosion, l'un exposé aux vagues de l'ouest, et l'autre, exposé aux vagues de l'est.

Le site F (Paspébiac) a une profondeur de 30 m et il est exposé aux vagues venant aussi bien de l'ouest du fond de la baie des Chaleurs (vents dominants) que de l'est du Golfe du Saint-Laurent (Figure 5). Le site de Bonaventure est bien protégé des vagues venant de l'est, soit celles provenant du Golfe du Saint-Laurent, alors que le site de Saint-Godefroi est relativement protégé des vagues de l'ouest. Pour chacun des deux sites côtiers, certaines vagues sont similaires au site de Paspébiac, alors qu'entre 30% à 50% sont nettement inférieures (Figure 35). La comparaison des séries temporelles illustre mieux la relation (Figure 36). Lors d'événements de vagues venant d'est (zones grisées sur le graphique), les enregistrements de Paspébiac et Saint-Godefroi se suivent étroitement, sans déphasage et sans trop de différences. Par contre, quand les vagues venaient de l'ouest, le site de Bonaventure reçoit des vagues légèrement inférieures à celles qui sont enregistrées à Paspébiac, et celles reçues à St-Godefroi sont plus faibles, le site étant protégé par la pointe de New-Carlisle.

Le site F est donc assez représentatif de la baie des Chaleurs. Il faut toutefois bien tenir compte de la direction des vagues si l'on veut transposer ses données vers la côte.

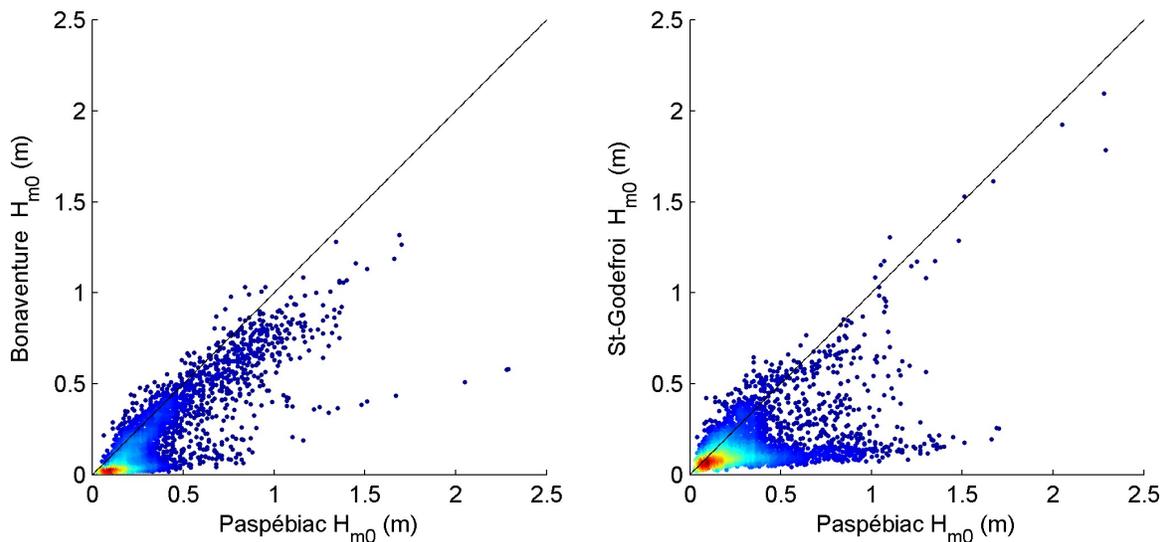


Figure 35 – Comparaison des vagues mesurées au site F (Paspébiac) avec celles mesurées devant Bonaventure (gauche) et devant St-Godefroi (droite).

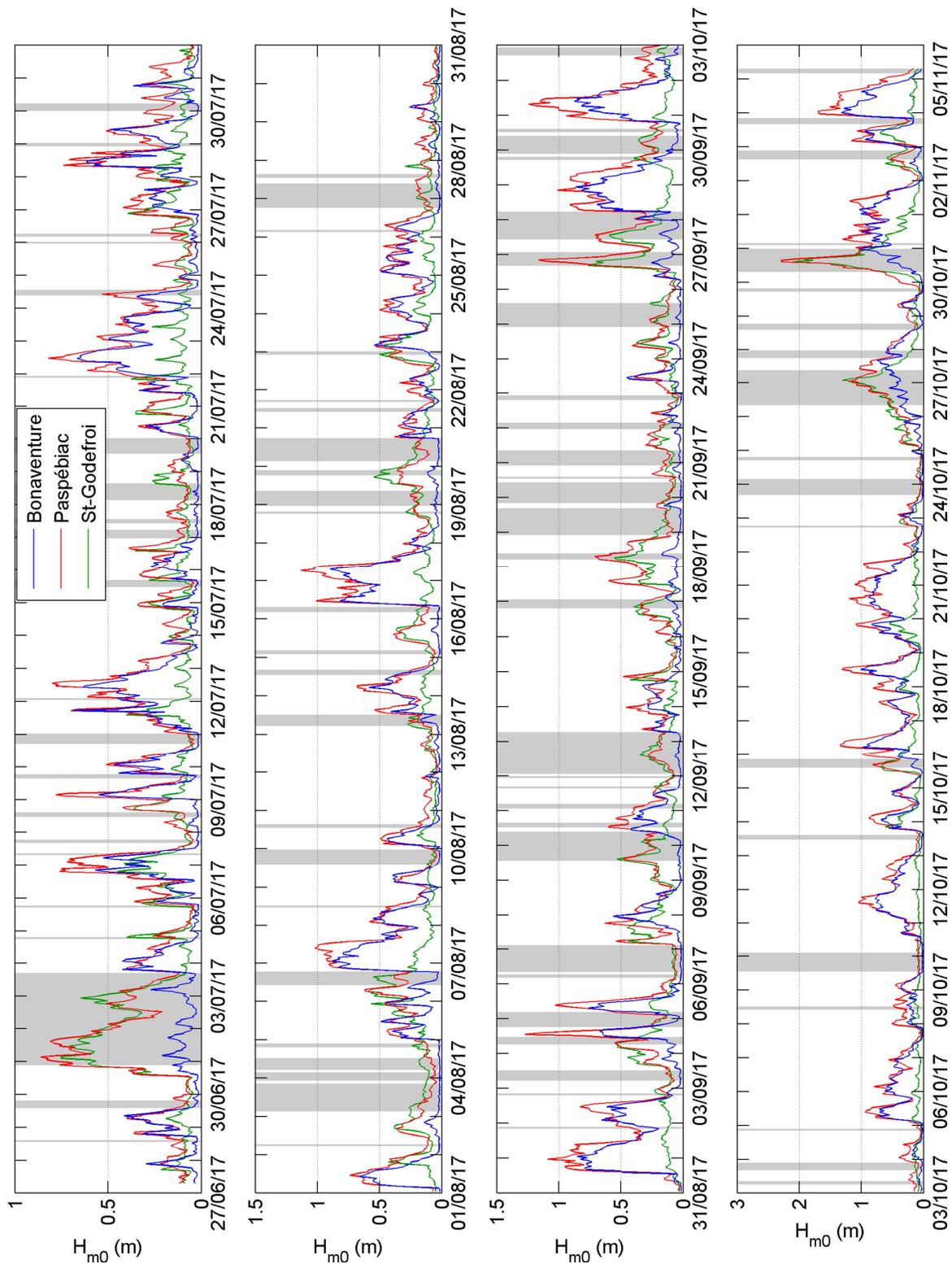


Figure 36 – Séries temporelles des vagues mesurées au site F (Paspébiac), devant Bonaventure à 4,5 m de profondeur et devant St-Godefroi à 4 m de profondeur. En grisé sont indiquées les périodes quand les vagues venaient de l'est au site F (Paspébiac).

4.2. Données de courants

Outre les vagues en surface, les instruments utilisés échantillonnent la totalité de la colonne d'eau et permettent ainsi d'obtenir des profils verticaux de courants à haute résolution temporelle, soit un profil toutes les 20 minutes.

Nous présentons ici un exemple de série temporelle des profils de courants seulement pour les deux nouveaux sites, Rivière-Pentecôte et Paspébiac. En effet, les courants dans la colonne d'eau sont largement influencés par le signal de marée, et présentent donc une certaine constance dans le temps au niveau des différents sites choisis. Ainsi, les profils de courants de St-Ulric et Cap d'Espoir ne sont pas illustrés dans le présent rapport.

Ces Figures 38 et 39 illustrant les courants sont composés de 4 panneaux, le premier illustrant les oscillations du niveau d'eau en surface selon la marée, les autres panneaux représentant les trois composantes de vitesse : vers l'est, vers le nord, et vertical (positif vers le haut). La période illustrée couvre un peu plus d'un mois lunaire (29,5 jours) avec deux périodes de vive-eau et deux périodes de morte-eau.

Les variations du niveau d'eau au site de Rivière-Pentecôte (Figure 37, panneau supérieur) montrent une amplitude relativement élevée (environ 4-5 m), similaire à ce qui peut être observé dans l'estuaire du St-Laurent au niveau de St-Ulric, alors qu'au site de Paspébiac (Figure 38, panneau supérieur) les variations du niveau d'eau demeurent plus faibles (2 m). Néanmoins, on peut voir que dans la baie des Chaleurs, lors des marées de vive-eau, il y a une forte inégalité diurne entre les deux marées hautes quotidiennes. Au site de Rivière-Pentecôte, les courants sont orientés essentiellement selon l'axe nord-sud, soit parallèle à la côte. La cyclicité tidale n'est que très peu visible, car les courants orientés vers le nord au changement de marée sont beaucoup plus faibles par rapport à ceux orientés vers le sud lors de la marée montante. Il semble y avoir une cyclicité dans l'orientation du courant (nord-sud) selon l'alternance morte-eau/vive-eau. De manière générale les courants ne sont pas très élevés à Rivière-Pentecôte. Au site de Paspébiac, les courants sont majoritairement orientés selon l'axe est-ouest, en fonction de la marée. Ces courants de marée sont relativement élevés à Paspébiac, avec une plus forte intensité à marée montante. Cette inégalité dans l'intensité des courants à marée montante et descendante est due à la propagation de l'onde de marée M2 à l'intérieur de la baie des Chaleurs. Contrairement au site de Rivière-Pentecôte, la cisaille entre la surface et le fond de la colonne d'eau à Paspébiac semble plus évidente, avec des courants opposés à certains moments de la marée.

Les courants de surface et dans le fond de la colonne d'eau sont illustrés par les roses de courants pour chacun des 4 sites aux Figures 39 et 40. Ces roses de courants représentent les directions de propagation des courants, contrairement aux roses de vagues qui présentent l'origine. Sans surprise, à Saint-Ulric (A), les courants sont parallèles à la côte aussi bien en surface qu'au fond avec une prédominance dans l'intensité et la fréquence des courants vers le nord-est. Les courants de fond observés à Saint-Ulric sont relativement plus élevés par rapport aux autres sites, ce qui s'explique par le marnage plus

important et la présence du courant de Gaspé qui longe la côte entre Rimouski et Rivière-au-Renard.

Au Cap d'Espoir, la distribution est bidirectionnelle et presque symétrique avec une partie des courants entrant dans la baie des Chaleurs au sud-ouest, et une autre en direction de l'est avec une légère rotation entre la surface et le fond. Au fond, le courant est parallèle à la bathymétrie. À marée montante, l'eau entre dans la baie des Chaleurs et à marée descendante, l'eau ressort en direction du golfe du Saint-Laurent.

Au site de Rivière-Pentecôte, sur la côte Nord, les courants sont également orientés selon le trait de côte aussi bien en surface qu'en profondeur, et le transport net est dirigé vers le sud. L'orientation des courants à ce site est déphasée d'environ 90° avec le sens de propagation des fortes vagues. À Paspébiac, le relèvement de la bathymétrie proche de côte produit de forts courants à marée montante. À cet endroit, les courants et les vagues sont orientés dans les mêmes directions.

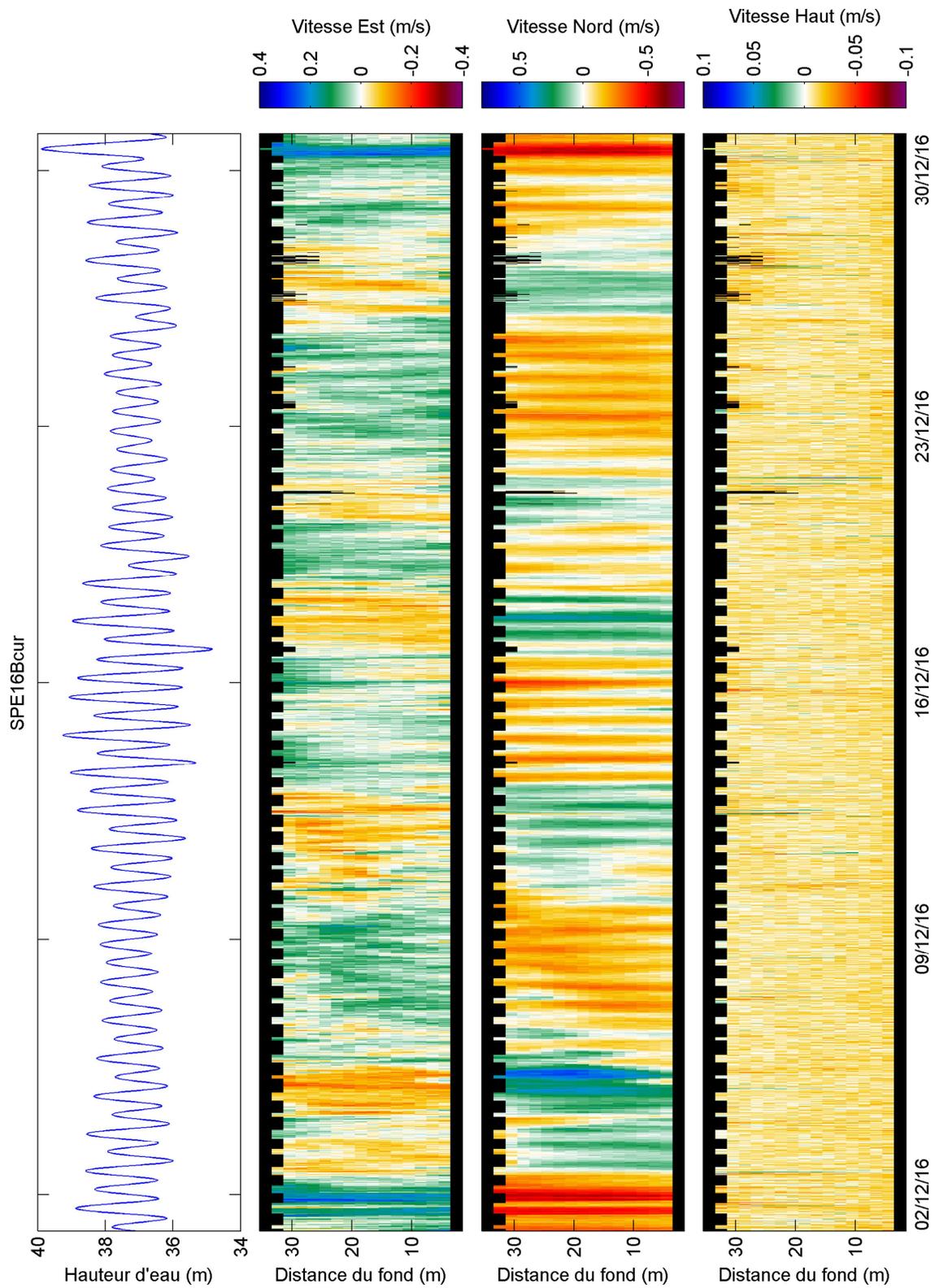


Figure 37 – Profils de vitesse enregistrés au site E (Rivière-Pentecôte), exemple pour décembre 2016. Les données marquées comme mauvaises sont en noir.

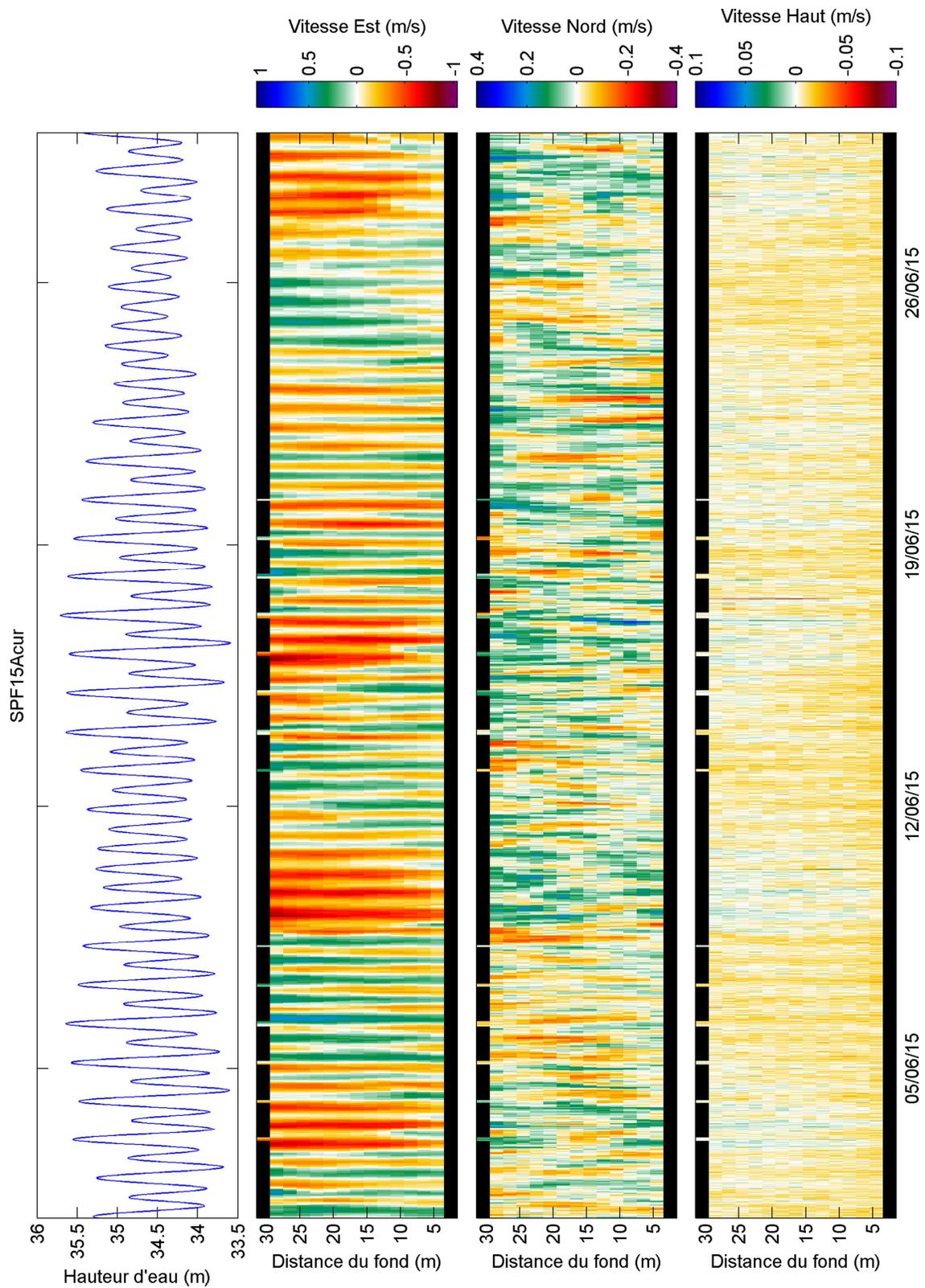
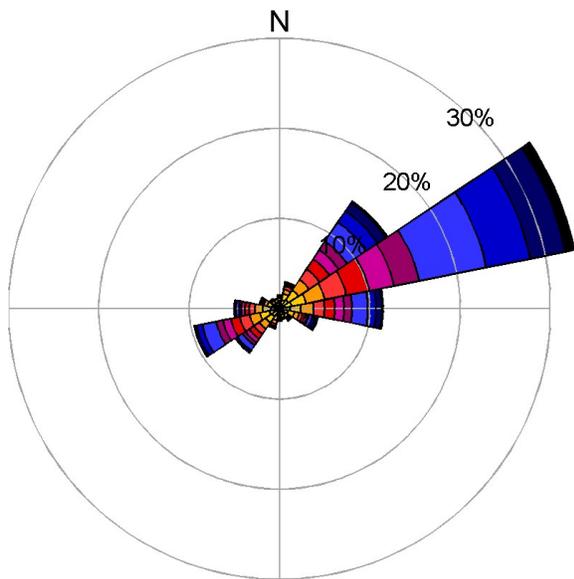
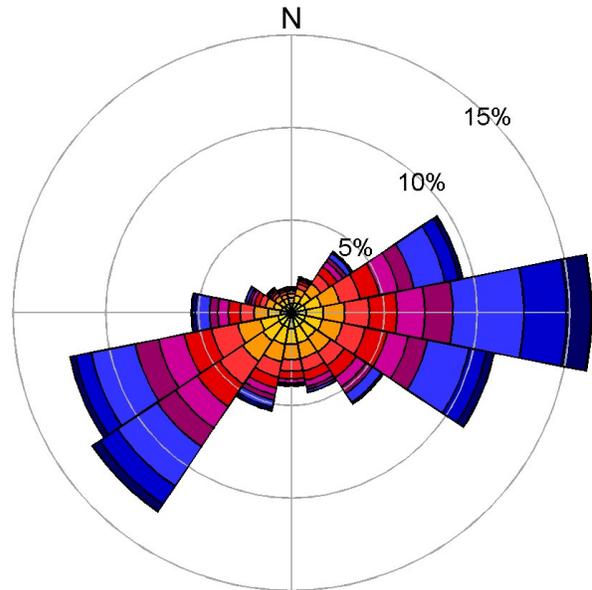


Figure 38 – Profils de vitesse enregistrés au site F (Paspébiac), exemple pour juin 2015. Les données marquées comme mauvaises sont en noir.

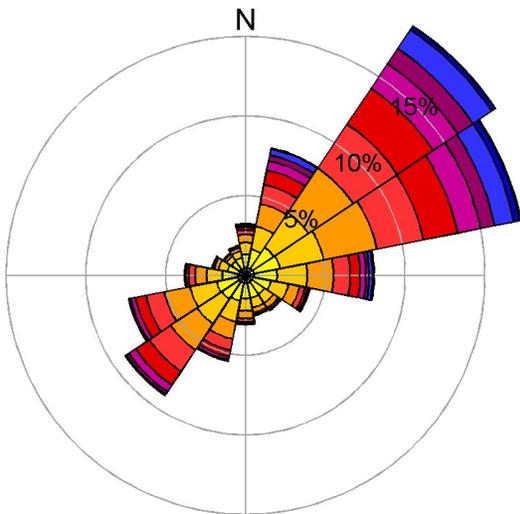
A – Saint-Ulric, surface (27 m)



B – Cap d'Espoir, surface (31 m)



A – Saint-Ulric, fond (3 m)



B – Cap d'Espoir, fond (3 m)

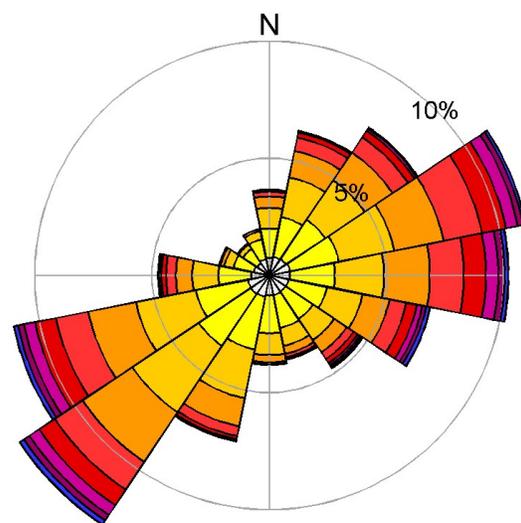
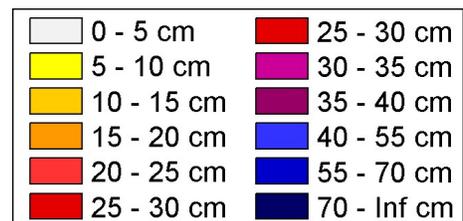
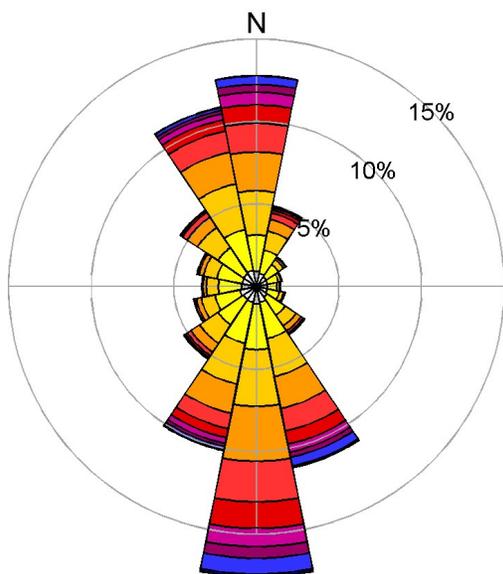


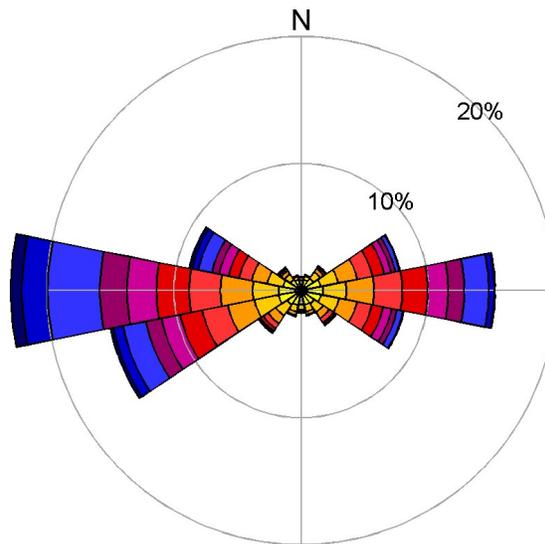
Figure 39 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées au site A et B de mai 2014 à avril 2018.



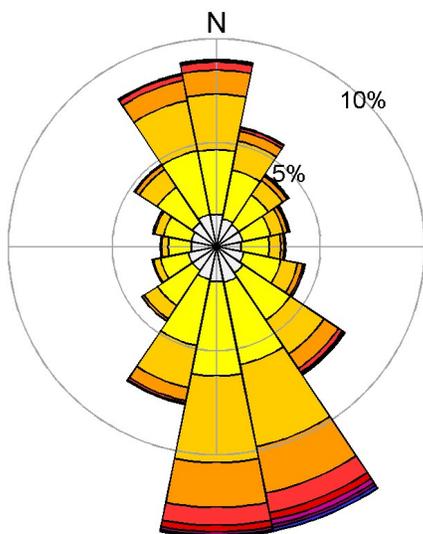
E – Rivière-Pentecôte, surface (27 m)



F – Paspébiac, surface (27 m)



E – Rivière-Pentecôte, fond (3 m)



F – Paspébiac, fond (3 m)

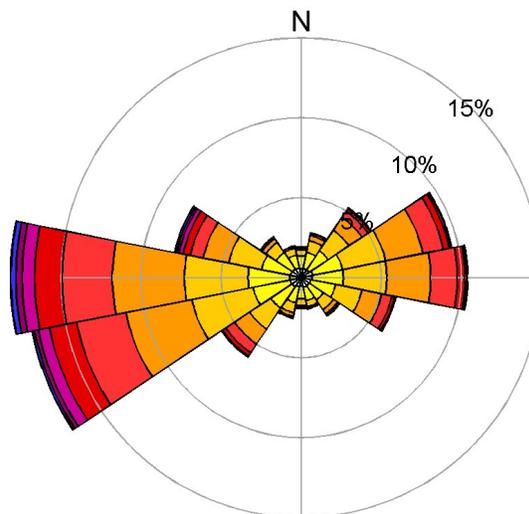


Figure 40 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées au site E (mai 2014 à septembre 2018) et au site F (mai 2015 à avril 2018).

0 - 5 cm	25 - 30 cm
5 - 10 cm	30 - 35 cm
10 - 15 cm	35 - 40 cm
15 - 20 cm	40 - 55 cm
20 - 25 cm	55 - 70 cm
25 - 30 cm	70 - Inf cm

4.3. Glaces hivernales

L'épaisseur des floes de glace est calculée à partir des deux mesures de distance : (1) la distance entre l'AWAC et la surface de l'eau déterminée par le capteur de pression, (2) la distance entre l'AWAC et la base de la glace mesurée par le signal AST. Deux types d'erreurs sont susceptibles d'affecter le résultat. D'une part, la difficulté d'estimer correctement la densité et la vitesse du son dans la colonne d'eau (cf. section 3.4) peut induire une erreur positive ou négative de 2-5 cm. Cette erreur est négligeable pour les grandes épaisseurs de glace, mais elle est significative lorsque l'épaisseur est seulement de 5-20 cm. D'autre part, le faisceau AST peut être induit en erreur par des objets flottant sous la glace et indiquer à cause de cela une trop grande épaisseur de glace. Le traitement de la glace a été effectué manuellement avec soin pour éviter ce genre de problèmes, mais l'instrument utilise une méthode indirecte de mesure de l'épaisseur de glace et les erreurs ne peuvent pas être totalement exclues. À la vue des résultats obtenus dans la baie des Chaleurs au site de Paspébiac, il semblerait que les épaisseurs de glace estimées par les instruments de l'AWAC soient fortement surévaluées. À ce jour, aucune mesure manuelle d'épaisseur de glace sur le fleuve n'est venue corréliser les mesures obtenues par l'AWAC. Ces données d'épaisseurs présentées dans ce rapport devraient plus être vues comme un indice de la présence de glace à cet endroit.

L'ensemble des données de glace récoltées au cours des quatre années du projet sont illustrées par des séries temporelles des épaisseurs maximales et moyennes (Figures 41 à 44). Les séries temporelles recouvrant la période du 1^{er} décembre au 15 avril de l'année suivante sont fractionnées par année afin d'illustrer la variabilité interannuelle de la saison de glace. Des floes de glace occasionnels sont observés certaines années après le 15 avril, mais ne sont pas illustrés.

Tous les sites présentent des saisons de glace discontinues entrecoupées par des périodes d'eau libre, ainsi qu'une variabilité interannuelle marquée. À St-Ulric les données de glace de la première saison hivernale sont manquantes après le 11 mars 2015, l'instrument ayant épuisé sa mémoire de stockage. Malgré cela, les hivers 2014-2015 et 2017-2018 ont connu une présence de glace plus importante que les deux autres hivers. Ces résultats corroborent ceux décrits pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe St-Laurent par Galbraith et al. (2016 et 2017). L'hiver 2017-2018 a débuté plus en avance que les autres années, avec une forte présence de glace dès le mois de décembre 2017, mais s'est achevé par contre plus tôt au printemps. Cependant, la présence importante de glace sur les rives de l'estuaire du St-Laurent au cours de cet hiver 2017-2018 n'a pas empêché la détection des plus fortes vagues jamais enregistrées à ce site au début du mois de janvier 2018 (cf. Figure 27 et Tableau 10, H_{m0} atteignant 4,2 m). La libération des glaces précoce, au printemps a permis également le développement de deux tempêtes majeures à la mi-mars 2018.

À Cap d'Espoir les données de glace du premier hiver sont également manquantes après le 1^{er} février 2015. À l'entrée de la baie-des-chaleurs, les conditions de glace sont généralement moins importantes que celles observées dans l'estuaire, les glaces ayant tendance à dériver plus ou moins rapidement dans la partie sud du golfe du St-Laurent.

Aucune tempête majeure n'a été détectée pendant la saison des glaces au site de cap d'Espoir.

À Rivière-Pentecôte les données de glace du premier hiver sont manquantes après le 10 mars 2015. La côte Nord semble moins propice à l'accumulation de floes de glace très épais. Seules quelques périodes, limitées à quelques jours, au cours de la saison hivernale, montrent une présence de glace accrue au niveau du site de Rivière-Pentecôte. Ici aussi le dernier hiver d'enregistrement des données est marqué par une présence renforcée de la glace de mer.

Enfin, les données de glaces mesurées au site de Paspébiac, confirme une saison de glace plus importante lors de l'hiver 2017-2018 que lors des précédents. On remarque également que la libération des glaces dans la baie des Chaleurs se fait de manière beaucoup plus tardive que dans l'estuaire du St-Laurent et il n'est pas rare d'observer encore de grosses plaques de glace au mois d'avril. La tempête du 4-5 janvier 2018, observée dans l'estuaire, a été également ressentie à Paspébiac (cf. Figure 30 et Tableau 11, H_{m0} atteignant 2,8 m) et constitue à cet endroit aussi un record malgré la présence de glace avant cet événement marquant.

Ce qui ressort de ces graphiques, est la présence accrue de glace lors du dernier hiver 2017-2018 détectable aux quatre sites monitorés, qui n'a cependant pas empêché le développement d'une tempête majeure dans l'estuaire du St-Laurent et dans la baie des Chaleurs.

Le Tableau 12 résume les conditions de glaces aux quatre sites durant les quatre années du projet. Comme les Figures 41 à 44, il indique que Saint-Ulric est le site avec la glace la plus fréquente et la plus épaisse. Cela s'explique par l'importante quantité de glace formée dans l'estuaire maritime (eau moins salée et moins agitée) qui est ensuite poussée et empilée sur la côte sud de l'estuaire par le vent du nord-ouest et par les courants.

Tableau 12 – Statistiques sur les couvertures de glace annuelles à chaque site.

	Durée de la saison de glace (jours) ^a	Équivalent de couverture continue (jours) ^b	Épaisseur moyenne (m) ^c
A – Saint-Ulric			
2014-2015 ^d	66,4	46,7	1,20
2015-2016	73,0	21,8	0,84
2016-2017	64,2	20,1	0,61
2017-2018	93,8	43,7	0,52
B – Cap d’Espoir			
2014-2015 ^d	16,2	5,7	0,22
2015-2016	54,4	13,3	0,30
2016-2017	45,1	15,0	0,69
2017-2018	64,6	22,3	0,31
E – Rivière-Pentecôte			
2014-2015 ^d	61,6	16,5	0,28
2015-2016	65,5	4,5	0,19
2016-2017	57,7	10,8	0,39
2017-2018	83,5	16,7	0,42
F – Paspébiac			
2015-2016	52,2	9,0	0,41
2016-2017	82,0	10,4	0,50
2017-2018	99,6	54,5	0,61

^a Nombre de jours entre la première et la dernière glace de l’hiver

^b Somme de la couverture de glace moyenne journalière

^c Épaisseur moyenne de la glace (en considérant seulement les périodes d’observation de la glace)

^d Saison de glace incomplète aux sites A, B et F à partir du 11 mars, 1^{er} février et 10 mars 2015 respectivement.

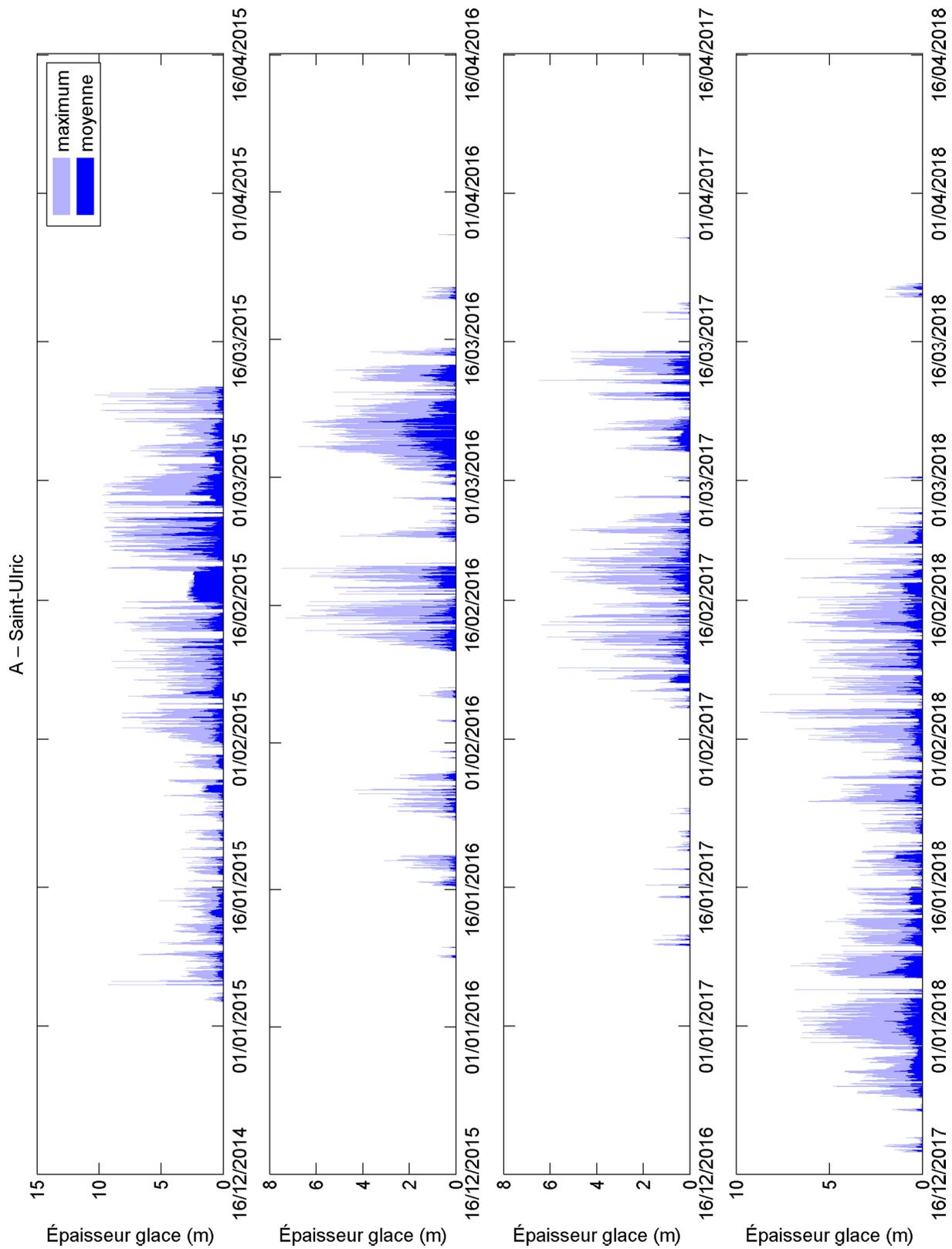


Figure 41 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les quatre hivers du projet.

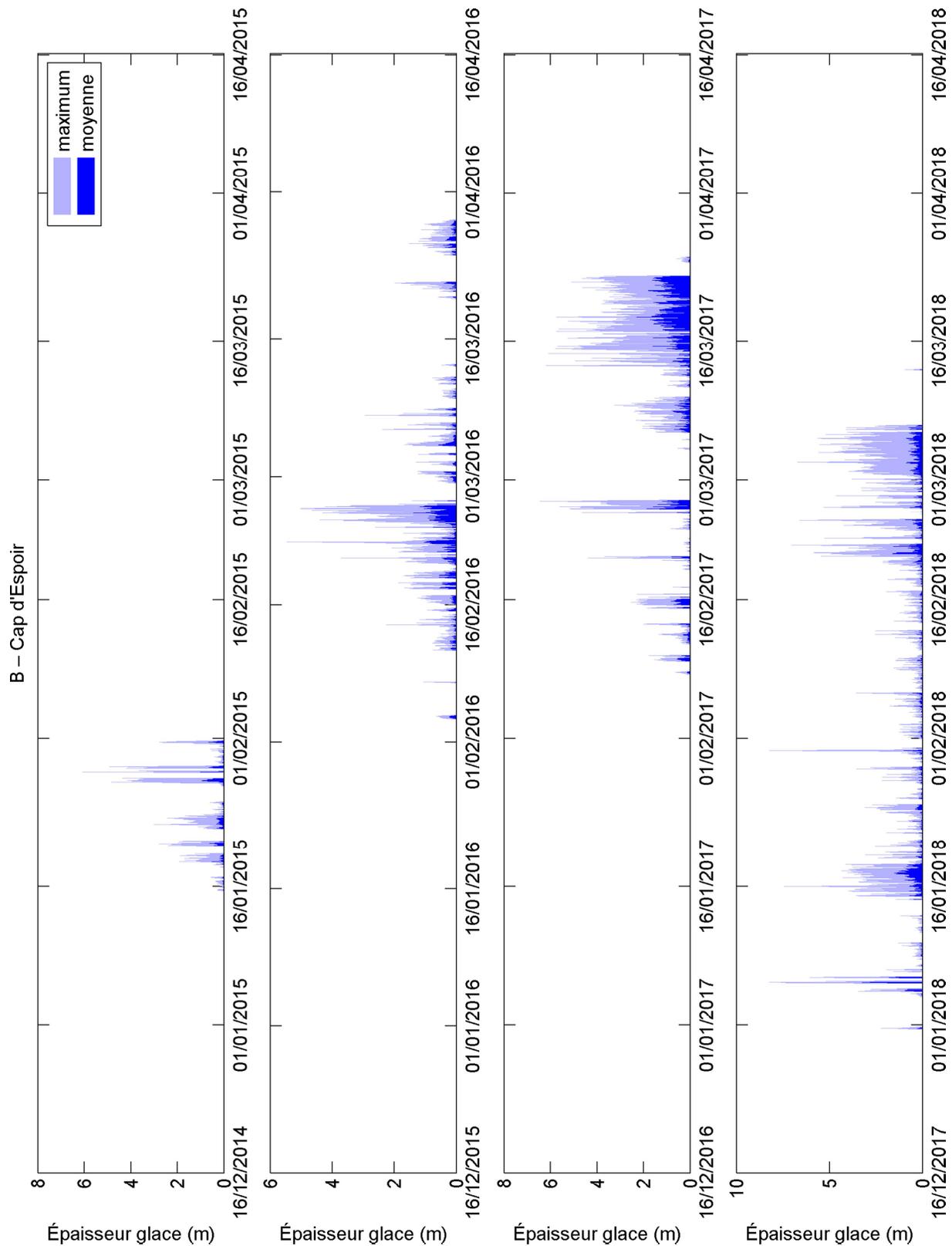


Figure 42 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les quatre hivers du projet.

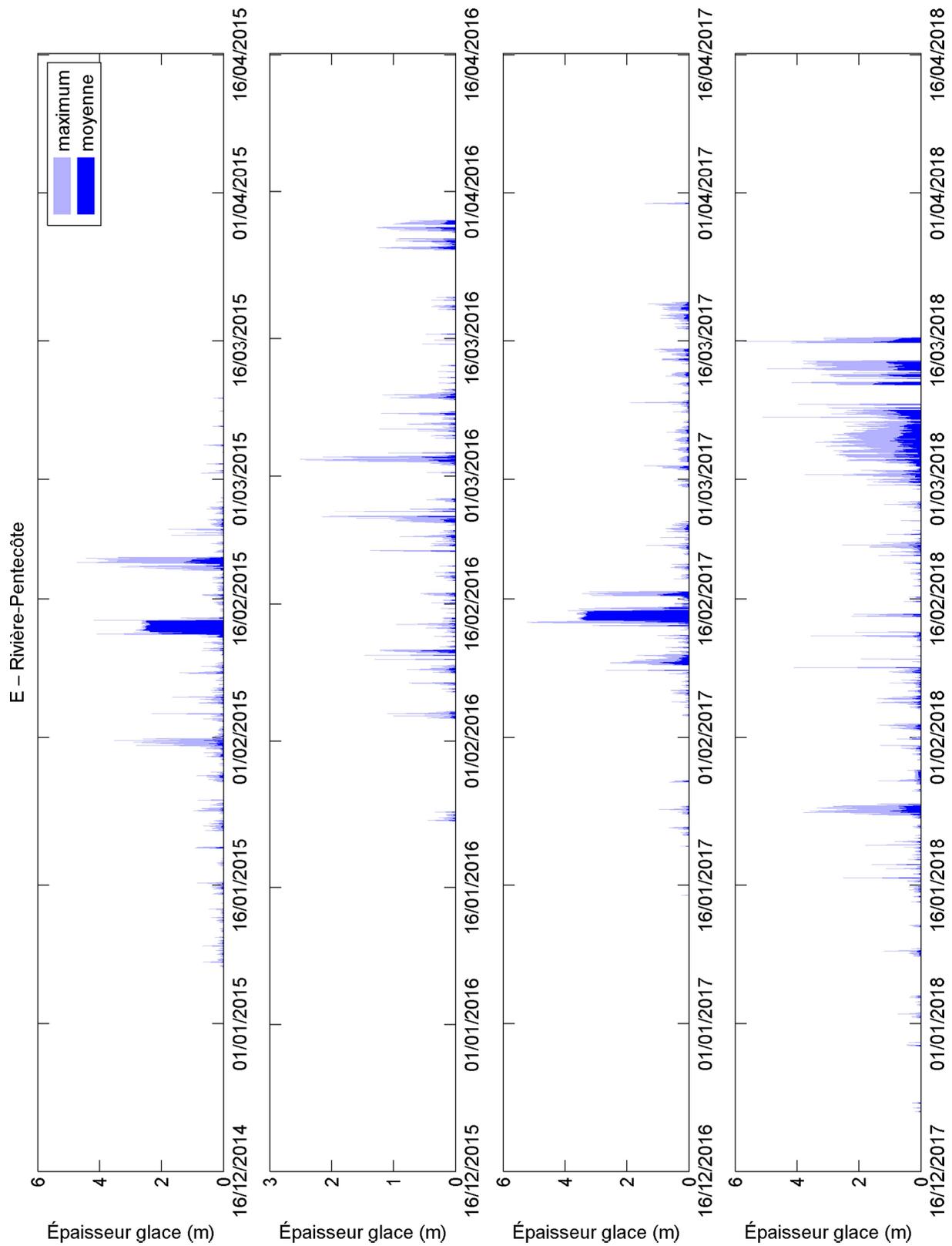


Figure 43 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant les quatre hivers du projet.

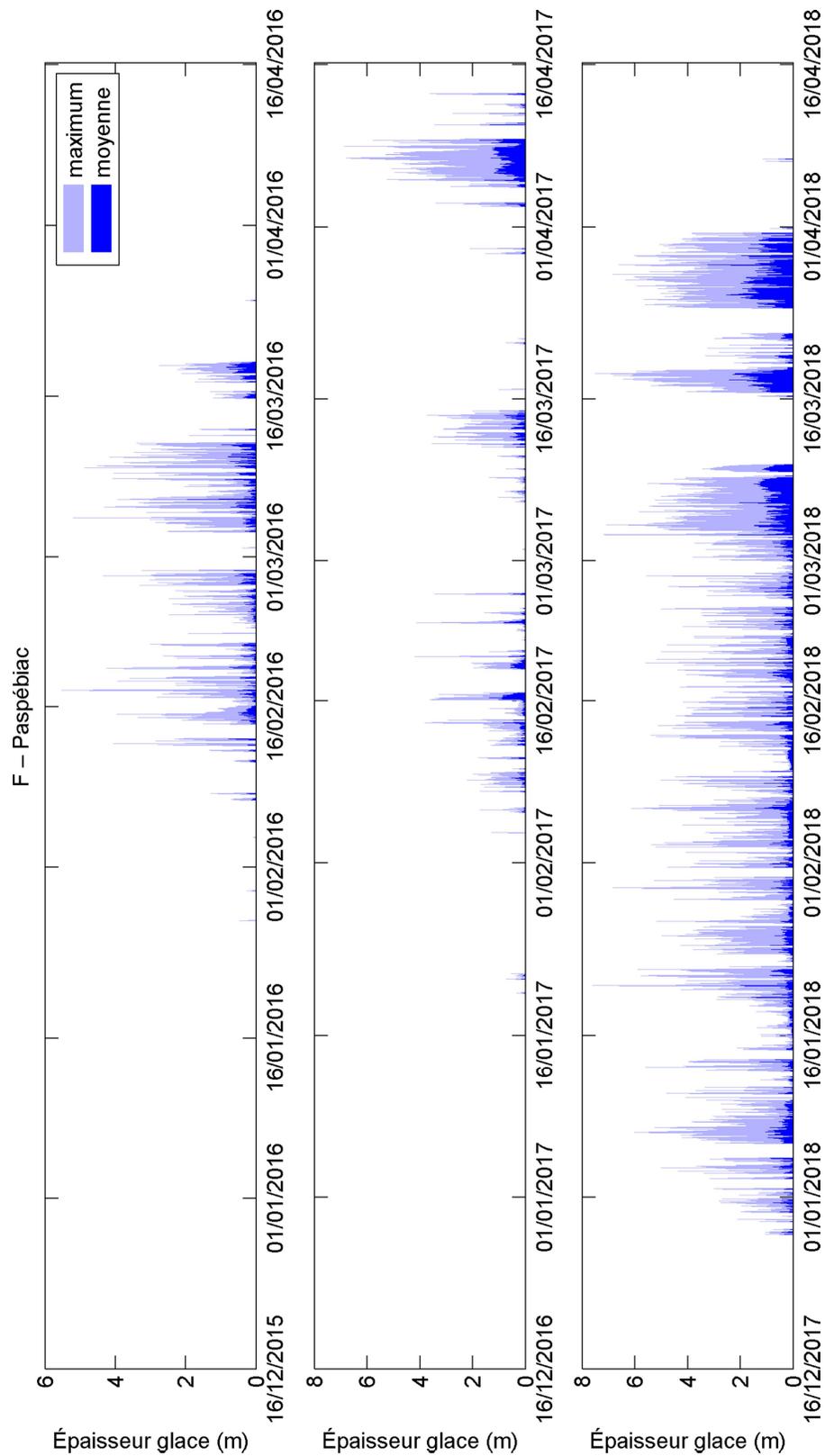


Figure 44 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers avec mouillage.

4.4. Niveaux d'eau des mouillages

Les AWACs mesurent la hauteur de la colonne d'eau de deux manières, avec le capteur de pression et avec le faisceau acoustique AST. La première mesure est utilisée ici pour les niveaux d'eau, car non perturbée par la glace hivernale, les objets flottants et les bulles d'air durant les tempêtes.

Les données ont été traitées de la manière que pour le marégraphe de Paspébiac (cf. section 3.5). Toutefois, le niveau de référence n'était pas CGVD28, car l'altitude exacte des instruments n'est pas connue et elle pouvait varier légèrement d'un déploiement à l'autre au même site, mais le niveau moyen. À cet effet le niveau d'eau moyen observé durant chaque déploiement a été soustrait aux données de ce déploiement.

La gravité aux sites A, B, E et F est respectivement $9,8092 \text{ m/s}^2$, $9,8108 \text{ m/s}^2$, $9,8101 \text{ m/s}^2$ et $9,8087 \text{ m/s}^2$ selon la base de données de la Commission géologique du Canada. La salinité a été mesurée ponctuellement avec des profils CTD lors de certaines missions, mais elle est variable dans le temps, et elle n'a pas été mesurée en continu. C'est pourquoi une salinité constante est supposée à chaque site, choisie comme la moyenne des salinités mesurée par les profils CTD, soit 29,2 à Saint-Ulric, 29,8 au Cap d'Espoir, 30,9 à Rivière-Pentecôte et 33 à Paspébiac. La masse volumique a été calculée avec la température mesurée par l'AWAC près du fond. Pour chaque site, une pression constante correspondant à la moitié de la profondeur moyenne a été utilisée (17 m, 19 m, 17 m et 17 m pour les sites respectivement A, B, E et F).

Les prédictions de marées ont été calculées comme pour le marégraphe avec la boîte à outils T_TIDE (cf. section 3.5). Les surcotes et les décotes sont finalement calculées comme la différence entre les niveaux observés et les niveaux d'eau prédits par T_TIDE (Figure 49).

Il faut être conscient que ces mesures de niveau d'eau avec les AWACs ne sont pas aussi précises que celles d'un marégraphe installé dans un port pour les raisons suivantes.

- 1) La position verticale absolue par rapport à un datum vertical n'est pas connue avec précision. Il est seulement possible d'estimer le niveau marin moyen à partir de la moyenne des observations. Toutefois, il existe des variations saisonnières et interannuelles du niveau marin moyen qui peuvent atteindre plusieurs centimètres.
- 2) Le niveau d'eau est calculé à partir des pressions mesurées. Pour la conversion la masse volumique de la colonne d'eau est nécessaire, or cette masse volumique varie selon la température qui a seulement été mesurée près du fond, et surtout selon la salinité qui n'a pas été mesurée en continu. À une température de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ et une salinité de 30, une variation de salinité d'une unité psu produit une variation de masse volumique de $\sim 0,08 \%$, et une variation de température de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ produit une variation de masse volumique de $\sim 0,01\%$. À une profondeur de 37 m, cela correspond à une variation de respectivement 0,028 et 0,004 m. C'est pourquoi il faut considérer un

intervalle de confiance d'environ ± 5 cm pour les niveaux d'eau mesurés et les surcotes calculées.

Les Figures 45 à 48 présentent les variations du niveau d'eau au site de St-Ulric, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte durant 4 ans, et 3 ans à Paspébiac, associé avec leur écart (surcote et décote) par rapport aux prédictions astronomiques. Les niveaux d'eau varient essentiellement selon le signal de la marée semi-diurne à chaque site, mais à cause de la résolution des figures, seule l'alternance des périodes de morte-eau et de vive-eau est visible. Les écarts observés (surcote et décote) surviennent la plupart du temps en décembre/janvier, voire les mois d'hiver. **Au cours de la présente étude, les surcotes ont dépassé le seuil de 1 mètre aux quatre sites, notamment lors des tempêtes du 30 décembre 2016 et 5 janvier 2018.** La plupart du temps, les surcotes sont dues aux événements météorologiques mais les écarts par rapport aux prédictions astronomiques peuvent également s'expliquer par une cyclicité saisonnière liée au débit du fleuve Saint-Laurent et au niveau marin du nord-ouest de l'Atlantique, ou encore par un déphasage temporaire de l'onde de marée. Les fortes surcotes ne produisent des niveaux marins exceptionnels seulement si elles sont combinées avec des marées hautes, de préférence des marées hautes de vive-eau. Par ailleurs, des variations dans l'amplitude de l'onde marée peuvent s'expliquer, lorsqu'elles interviennent durant l'hiver, par la friction avec la banquise (St-Laurent et al., 2008), créant ainsi des surcotes et décotes.

Le Tableau 13 répertorient la date et l'heure des 10 plus fortes surcotes et les 10 plus fortes décotes observées à chaque site, quel que soit le moment de la marée, alors que le Tableau 14 répertorie la date et l'heure des 10 plus hauts niveaux marins mesurés. Les Figure 49 et 50 présentent les niveaux d'eau mesurés aux quatre sites lors de deux tempêtes majeures survenues lors de cette étude, soit celle du 30 décembre 2016 et celle du 5 janvier 2018. Les niveaux d'eau sont associés avec la prédiction de marée spécifique à chaque site. La différence entre le niveau d'eau mesuré et la prédiction astronomique est illustrée sur le dernier panneau de chaque figure.

Lors de la tempête du 30 décembre 2016, les surcotes observées à chaque site sont automatiquement suivies par une décote quelques heures plus tard. Ces surcotes n'étaient pas synchronisées avec la marée haute, et sont intervenues durant la phase ascendante de la marée. Par ailleurs il est possible de noter au niveau des quatre sites, un léger retard de l'onde de marée au moment de la marée basse suivante.

Lors de la tempête du 5 janvier 2018, à l'exception du site de Paspébiac, toutes les surcotes observées sont intervenues au même moment, et là aussi, quelques heures avant la marée haute. Les phénomènes de décote qui suit la surcote et le déphasage de l'onde de marée ne sont cette fois-ci visible qu'au site de Paspébiac. Au cours de cet événement, le site de Paspébiac a connu deux surcotes successives, entrecoupées de quelques heures seulement, de façon similaire à ce qui a pu être observé lors de la tempête évoquée précédemment. Il se pourrait qu'au site de Paspébiac, un phénomène de résonance des ondes de tempête ait lieu, produisant ainsi deux surcotes successives à quelques heures d'intervalle, et donc potentiellement prévisible. Les détails de ces variations du niveau

marin aux quatre sites durant ces deux tempêtes spécifiques, ainsi que pour d'autres événements marquants sont répertoriés dans le Tableau 13.

Au site de St-Ulric, la surcote la plus élevée (+ 1,20 m), est survenue lors de la tempête du 30 décembre 2016 où la pression atmosphérique est descendue à 962 hPa. La vitesse des vents atteignait 50 km/h environ. Sans surprise ces vents provenaient du nord-est. Lors de la deuxième plus forte surcote (+ 1,02 m) intervenue le 5 janvier 2018, la pression atmosphérique était de 967 hPa avec des vents supérieurs à 70 km/h.

Au Cap d'Espoir, la surcote la plus élevée (+ 1,05 m) a été enregistrée au cours de la tempête du 5 janvier 2018. La pression atmosphérique est descendue à 956 hPa avec des vents de plus de 80 km/h. Lors de la tempête du 30 décembre 2016, la surcote n'était que 0,78 m à Cap d'Espoir, mais c'est lors de cet événement que le quai de Percé fut encore une fois complètement détruit. Des vagues de plus de 10 m (H_{\max}) ont été mesurées lors de cet événement majeur.

À Rivière-Pentecôte, ce sont ces deux mêmes tempêtes qui ont provoqué des surcotes de 1,24 m (2016-12-30) et 1,12 m (2018-01-05) avec des vents de 65 et 80 km/h respectivement. Lors de la tempête du 30 décembre 2016, le pêcheur avec qui nous faisons affaire à Rivière-Pentecôte pour la récupération du mouillage, nous a informé qu'une maison mobile, installée sur le littoral dans les environs de la baie des Anglais, a été emportée au large par les vagues. Dans la baie des Chaleurs, la tempête du 5 janvier 2018 a aussi provoqué une surcote importante de 1,12 m. Les vents atteignaient 45 km/h.

Finalement la Figure 51 présente les fréquences d'inondation aux quatre sites. Sur les quatre années du projet, les niveaux d'eau mesurés suivent une distribution normale de type gaussienne.

Les mesures de niveau d'eau des AWACs peuvent compléter les mesures des marégraphes installés dans des ports en étendant la couverture géographique. Toutefois, à cause l'intervalle de confiance nettement plus grand (cf. ci-dessus), les AWACs ne peuvent remplacer de tels marégraphes pour des mesures de grande précision.

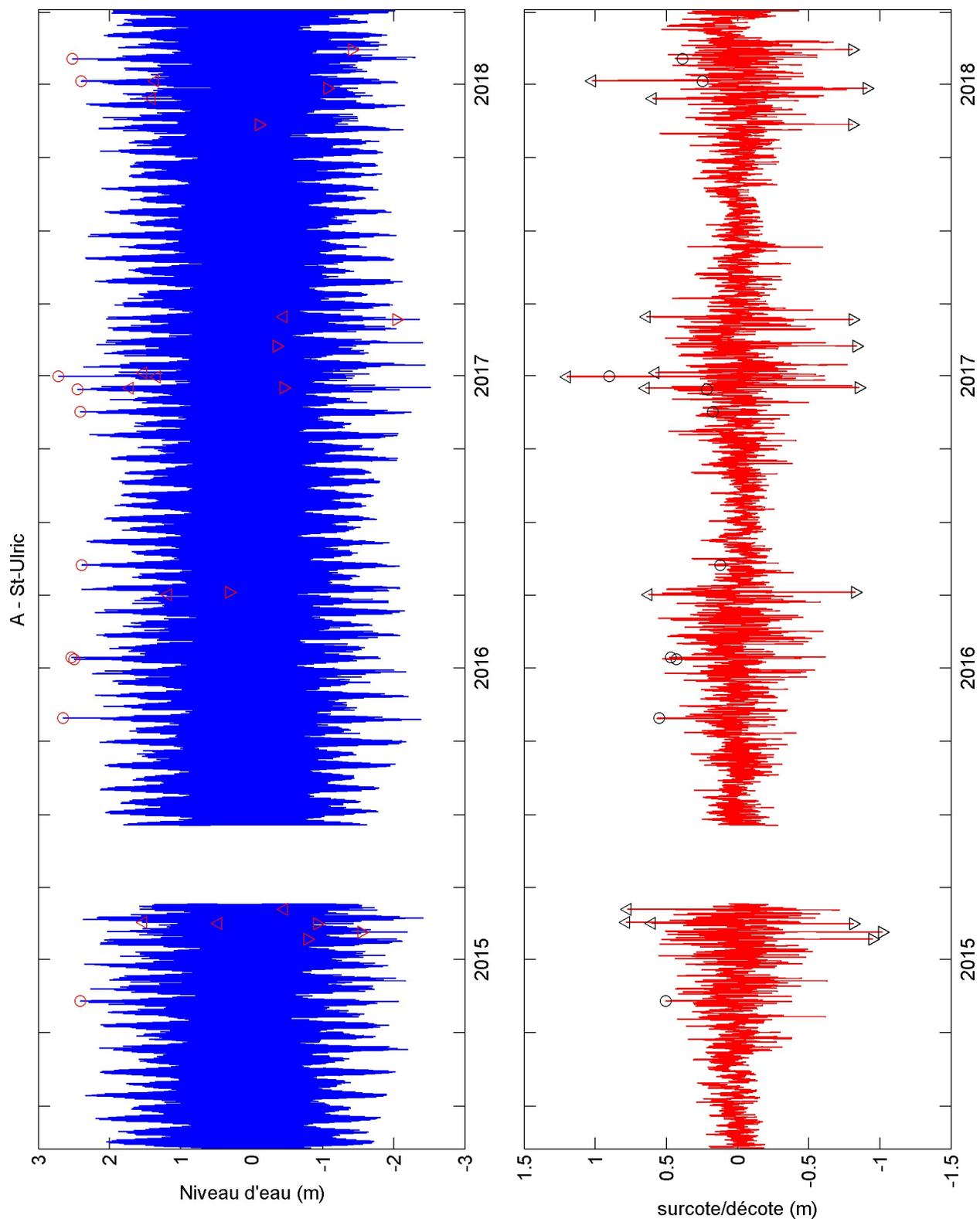


Figure 45 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (▽).

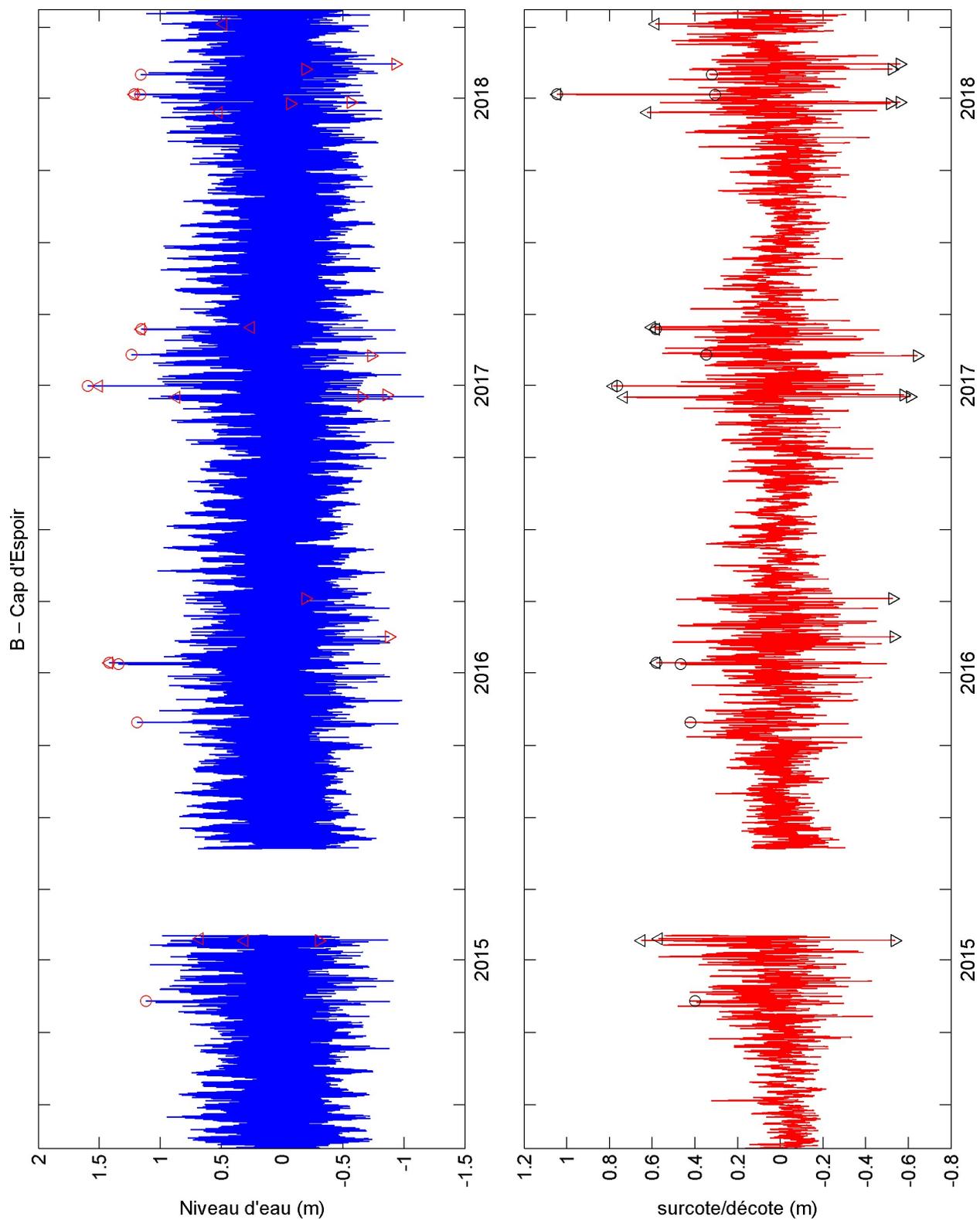


Figure 46 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (\circ), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

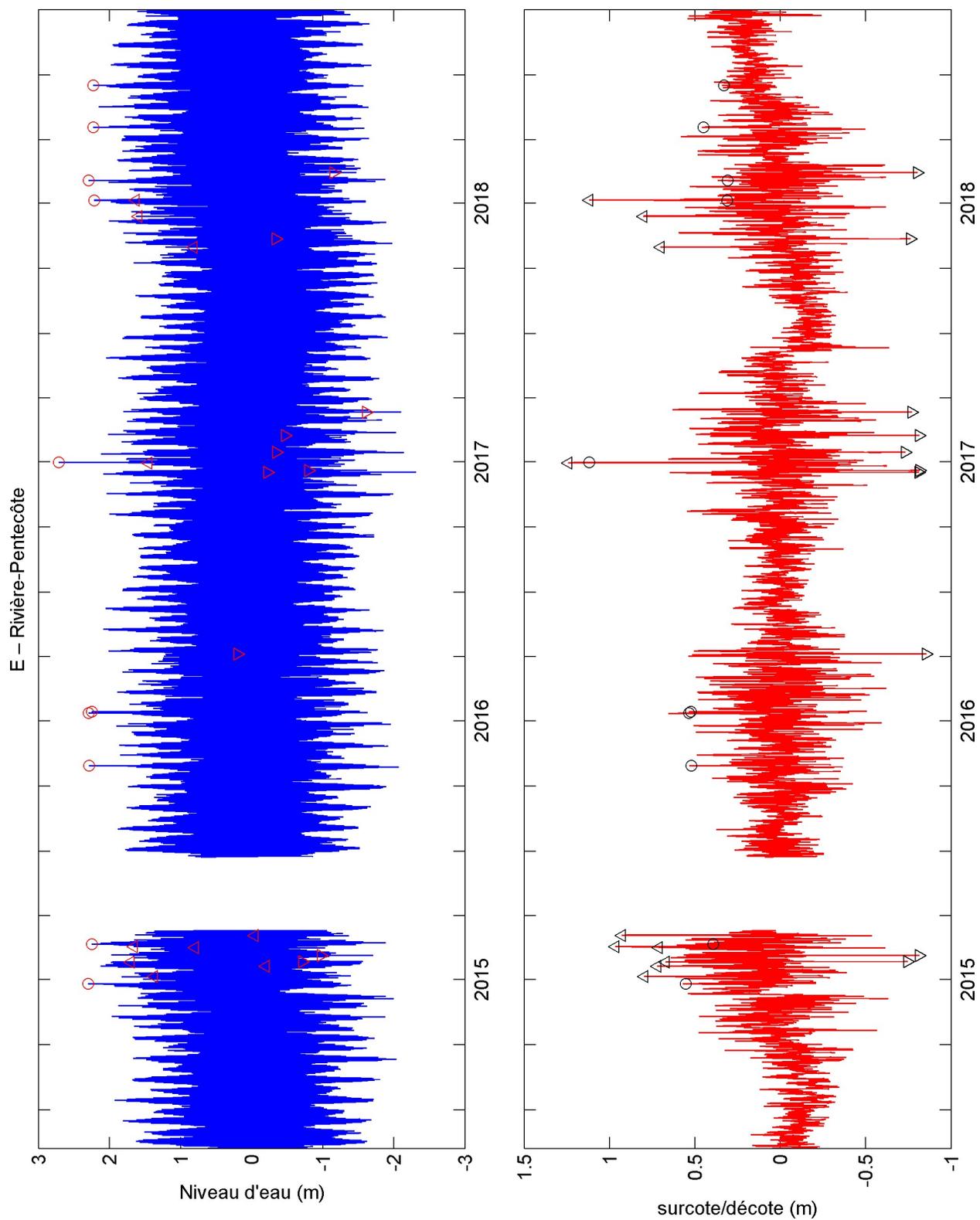


Figure 47 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les quatre ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

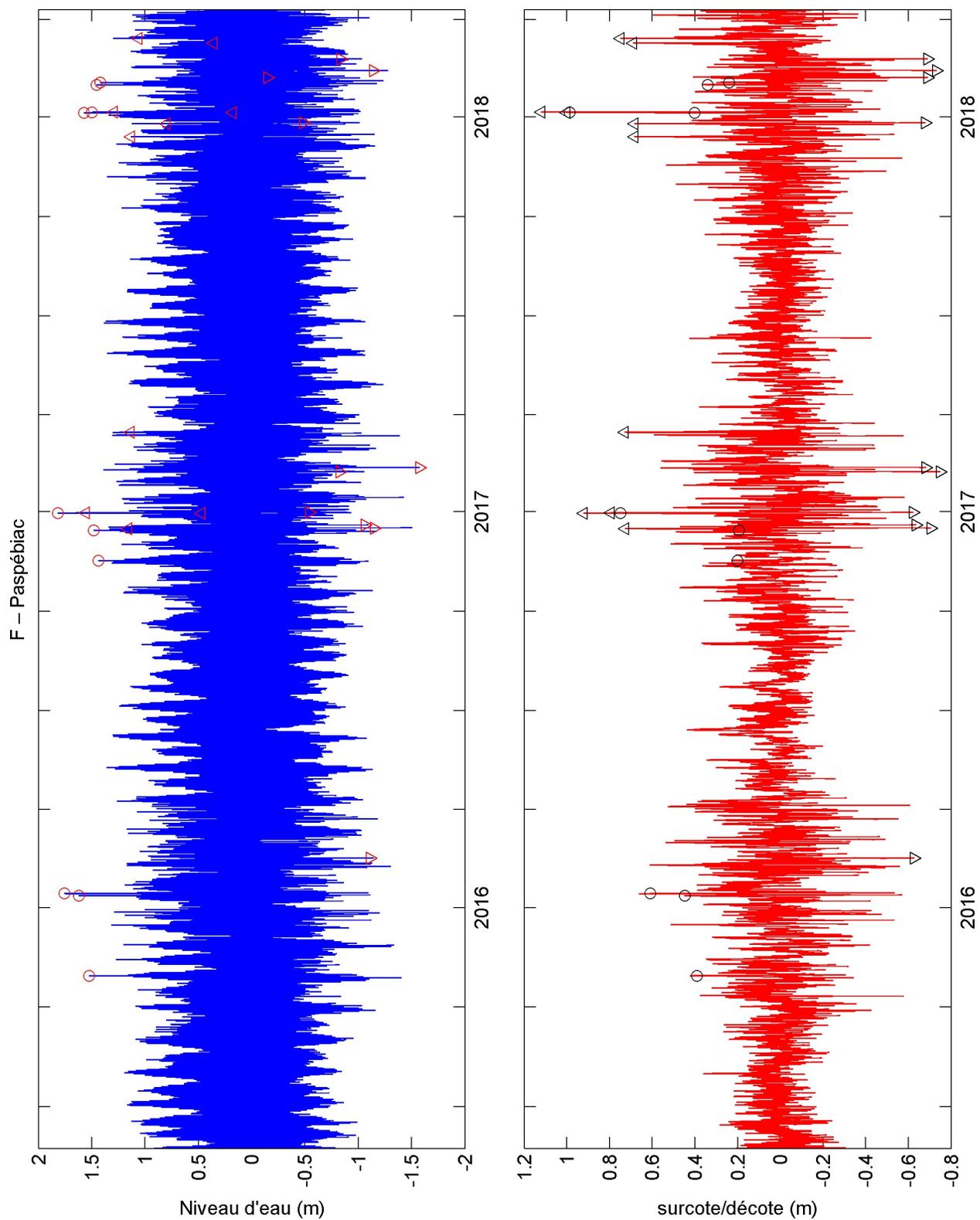


Figure 48 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) durant les trois ans. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

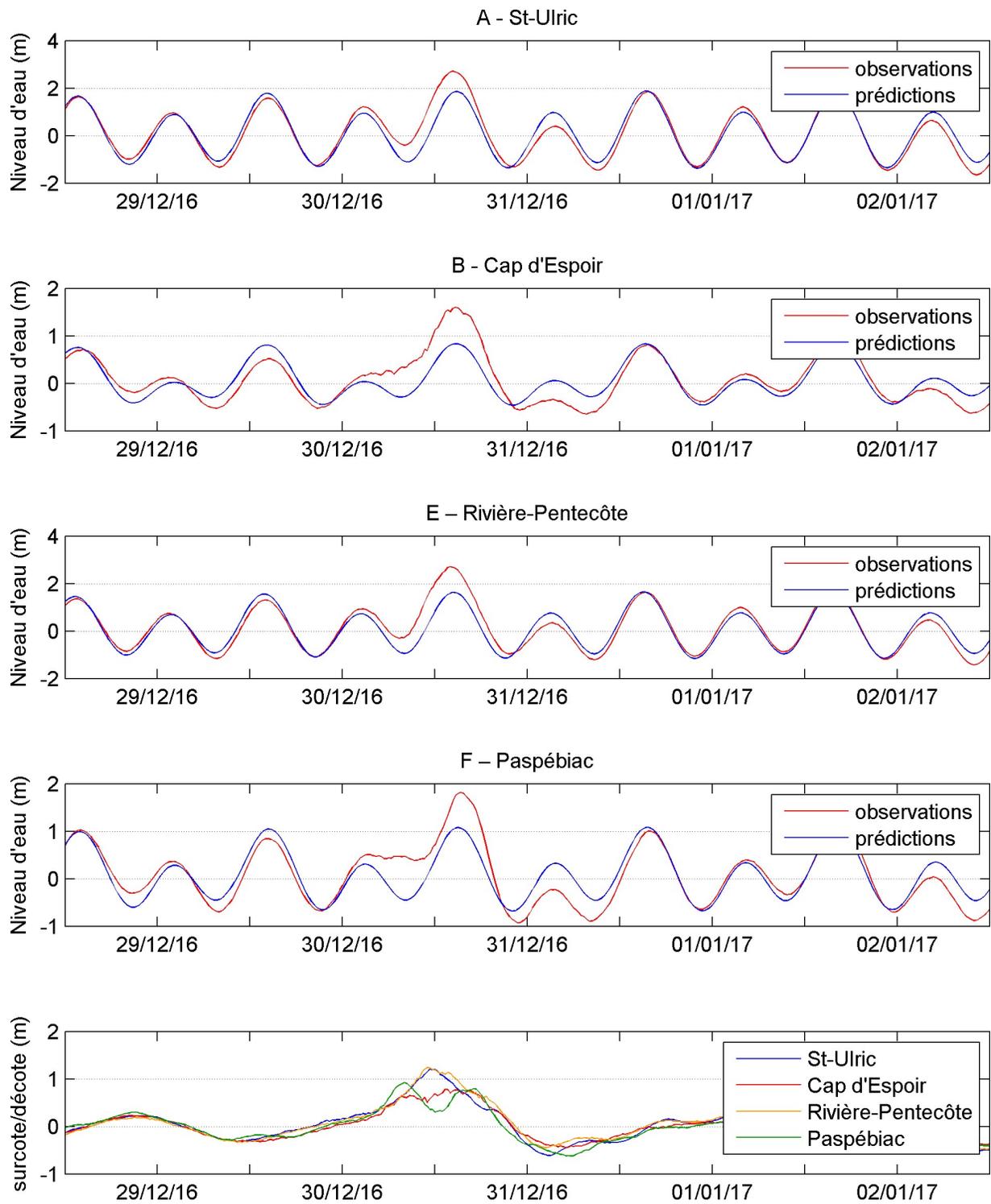


Figure 49 – Niveaux d'eau mesurés, prédictions de marées avec *T_TIDE* et surcotes pendant la tempête du 30 décembre 2016.

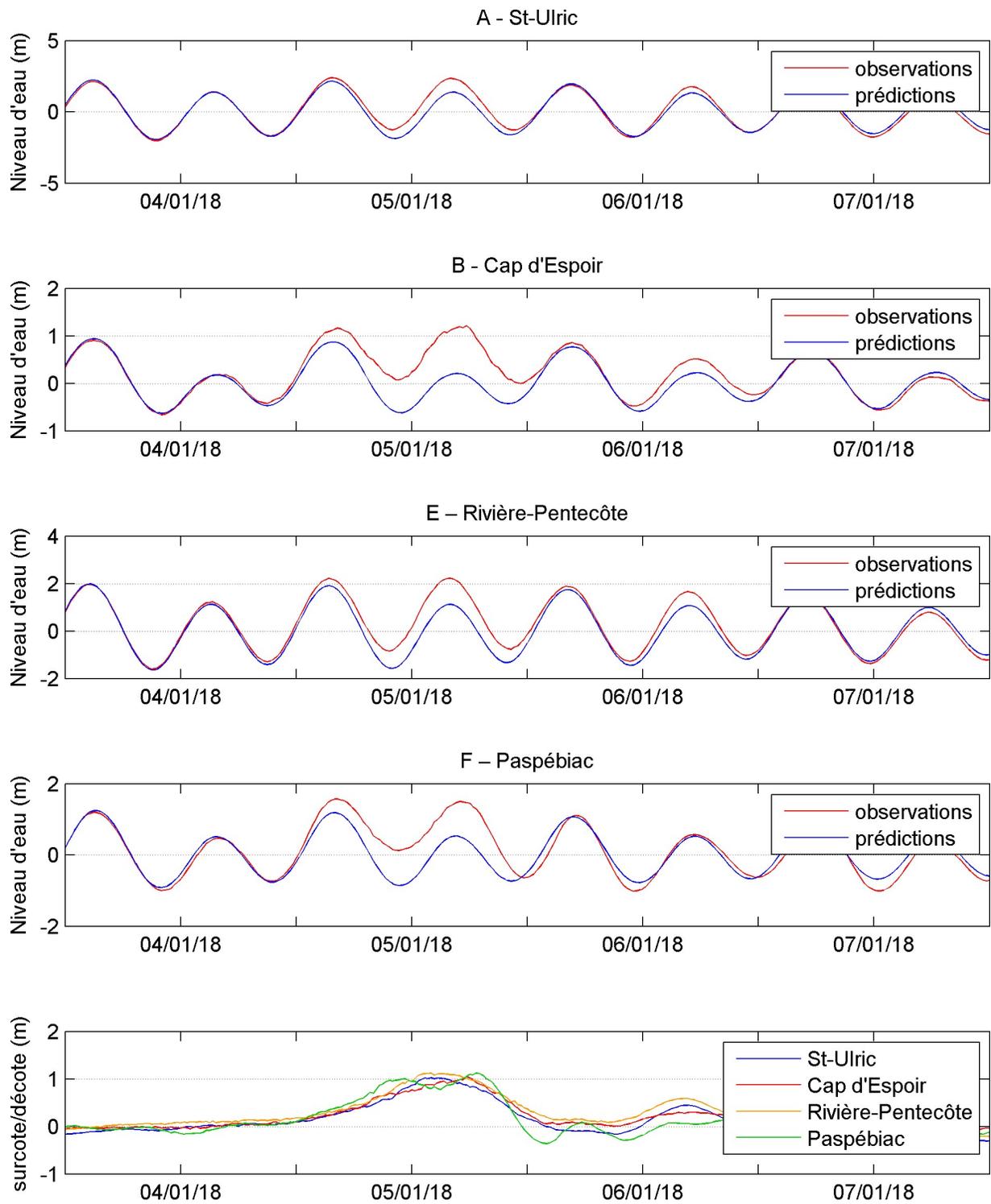


Figure 50 – Niveaux d'eau mesurés, prédictions de marées avec T_TIDE et surcotes pendant la tempête du 5 janvier 2018.

Tableau 13 – Liste des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes observées aux sites A, B, E et F, avec l'heure, la surcote/décote par rapport aux prédictions de marée et le niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) à ce moment-là.

Saint-Ulric - Surcotes			Saint-Ulric - Décotes		
Date-heure (HNE)	Surcote (m)	Niveau marin (m)	Date-heure (HNE)	Décote (m)	Niveau marin (m)
2016-12-30 11:20	1,20	1,34	2015-02-03 23:00	-1,02	-1,55
2018-01-05 02:00	1,02	1,36	2015-01-25 20:40	-0,95	-0,79
2015-02-15 23:00	0,78	1,53	2017-12-26 11:00	-0,91	-1,07
2015-03-04 07:40	0,77	-0,45	2016-12-16 18:40	-0,85	-0,46
2016-12-16 02:20	0,65	1,72	2017-02-06 22:00	-0,84	-0,35
2017-03-15 08:20	0,64	-0,45	2016-04-04 11:20	-0,83	0,31
2016-04-01 06:20	0,63	1,18	2015-02-14 06:00	-0,81	-0,93
2015-02-14 19:20	0,60	0,47	2017-03-11 21:20	-0,81	-2,04
2017-12-13 12:20	0,60	1,41	2018-02-12 21:00	-0,81	-1,41
2017-01-04 16:40	0,58	1,53	2017-11-11 08:40	-0,81	-0,10

Cap d'Espoir - Surcotes			Cap d'Espoir - Décotes		
Date-heure (HNE)	Surcote (m)	Niveau marin (m)	Date-heure (HNE)	Décote (m)	Niveau marin (m)
2018-01-05 05:40	1,05	1,21	2017-02-06 20:40	-0,64	-0,73
2016-12-30 13:20	0,78	1,51	2016-12-16 19:40	-0,61	-0,66
2016-12-16 03:20	0,73	0,87	2016-12-19 10:40	-0,58	-0,86
2015-01-25 11:20	0,65	0,31	2017-12-26 10:20	-0,56	-0,56
2017-12-13 14:40	0,62	0,52	2018-02-12 19:40	-0,56	-0,93
2017-03-15 11:20	0,60	0,26	2015-01-25 20:00	-0,54	-0,30
2018-04-05 00:40	0,59	0,48	2016-02-15 14:00	-0,53	-0,88
2017-03-12 13:40	0,58	1,16	2016-04-04 10:20	-0,52	-0,19
2016-01-13 16:00	0,58	1,42	2018-02-06 06:20	-0,52	-0,19
2015-01-27 21:20	0,57	0,68	2017-12-24 19:00	-0,51	-0,07

Rivière-Pentecôte - Surcotes			Rivière-Pentecôte - Décotes		
Date-heure (HNE)	Surcote (m)	Niveau marin (m)	Date-heure (HNE)	Décote (m)	Niveau marin (m)
2016-12-30 11:00	1,24	1,46	2016-04-04 11:00	-0,85	0,19
2018-01-05 02:00	1,12	1,63	2016-12-19 08:20	-0,82	-0,80
2015-02-15 23:00	0,97	1,66	2015-02-03 23:00	-0,81	-0,98
2015-03-04 07:40	0,93	-0,04	2017-02-06 21:40	-0,81	-0,47
2017-12-13 11:20	0,80	1,59	2016-12-16 18:00	-0,81	-0,22
2015-01-05 00:40	0,80	1,37	2018-02-12 20:40	-0,80	-1,15
2015-01-19 18:00	0,72	-0,20	2017-03-11 21:20	-0,77	-1,61
2015-02-14 19:20	0,71	0,80	2017-11-11 08:20	-0,76	-0,34
2017-10-30 19:20	0,70	0,82	2015-01-25 20:40	-0,74	-0,72
2013-11-28 01:00	0,67	1,71	2017-01-14 05:00	-0,73	-0,34

Tableau 13 (suite)

Paspébiac - Surcotes			Paspébiac - Décotes		
Date-heure (HNE)	Surcote (m)	Niveau marin (m)	Date-heure (HNE)	Décote (m)	Niveau marin (m)
2018-01-05 06:40	1,12	1,30	2017-02-06 21:00	-0,75	-0,83
2018-01-04 23:20	1,00	0,18	2018-02-12 21:00	-0,73	-1,14
2016-12-30 08:00	0,92	0,47	2016-12-16 20:40	-0,70	-1,15
2016-12-30 17:00	0,80	1,56	2018-02-23 11:40	-0,69	-0,84
2018-03-14 14:40	0,75	1,06	2018-02-06 07:40	-0,69	-0,15
2017-03-15 05:40	0,73	1,14	2017-02-10 21:00	-0,68	-1,57
2016-12-16 03:00	0,73	1,16	2017-12-26 09:00	-0,68	-0,49
2018-03-10 01:20	0,69	0,36	2016-12-19 12:40	-0,64	-1,06
2017-12-13 11:00	0,68	1,13	2016-02-15 15:00	-0,63	-1,11
2017-12-25 15:40	0,68	0,80	2016-12-31 05:40	-0,62	-0,54

Tableau 14 – Liste des 10 plus hauts niveaux marins observés aux quatre sites, avec l'heure, le niveau marin (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et la surcote/décote par rapport aux prédictions de marée à ce moment-là.

Saint-Ulric			Cap d'Espoir		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)
2016-12-30 14:20	2,72	0,90	2016-12-30 14:40	1,60	0,76
2015-10-29 15:00	2,66	0,55	2016-01-13 16:00	1,42	0,58
2016-01-13 16:20	2,54	0,47	2016-01-11 15:00	1,34	0,47
2018-02-01 14:40	2,52	0,39	2017-02-08 12:20	1,24	0,35
2016-01-11 15:00	2,50	0,43	2018-01-05 05:40	1,21	1,05
2016-12-14 14:00	2,45	0,22	2015-10-29 15:20	1,19	0,42
2016-11-16 15:00	2,41	0,17	2018-01-04 16:20	1,16	0,31
2014-11-09 15:20	2,41	0,51	2018-01-30 13:00	1,16	0,32
2018-01-04 15:40	2,40	0,25	2017-03-12 13:40	1,16	0,58
2016-05-08 02:40	2,39	0,12	2014-11-09 15:00	1,12	0,40

Rivière-Pentecôte			Paspébiac		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)
2016-12-30 14:00	2,72	1,12	2016-12-30 15:20	1,82	0,75
2014-12-25 16:00	2,30	0,56	2016-01-13 16:20	1,76	0,61
2016-01-11 14:40	2,30	0,53	2016-01-11 15:00	1,62	0,45
2018-02-01 14:20	2,29	0,31	2018-01-04 16:20	1,58	0,40
2015-10-29 14:40	2,29	0,52	2015-10-29 15:20	1,53	0,39
2015-02-19 14:00	2,25	0,39	2018-01-05 05:00	1,50	0,99
2016-01-13 16:00	2,25	0,52	2016-12-14 14:00	1,48	0,20
2018-06-16 03:00	2,23	0,33	2018-01-30 13:00	1,46	0,34
2018-04-18 03:00	2,23	0,45	2016-11-16 15:20	1,44	0,20
2018-01-04 15:20	2,22	0,31	2018-02-01 15:00	1,42	0,24

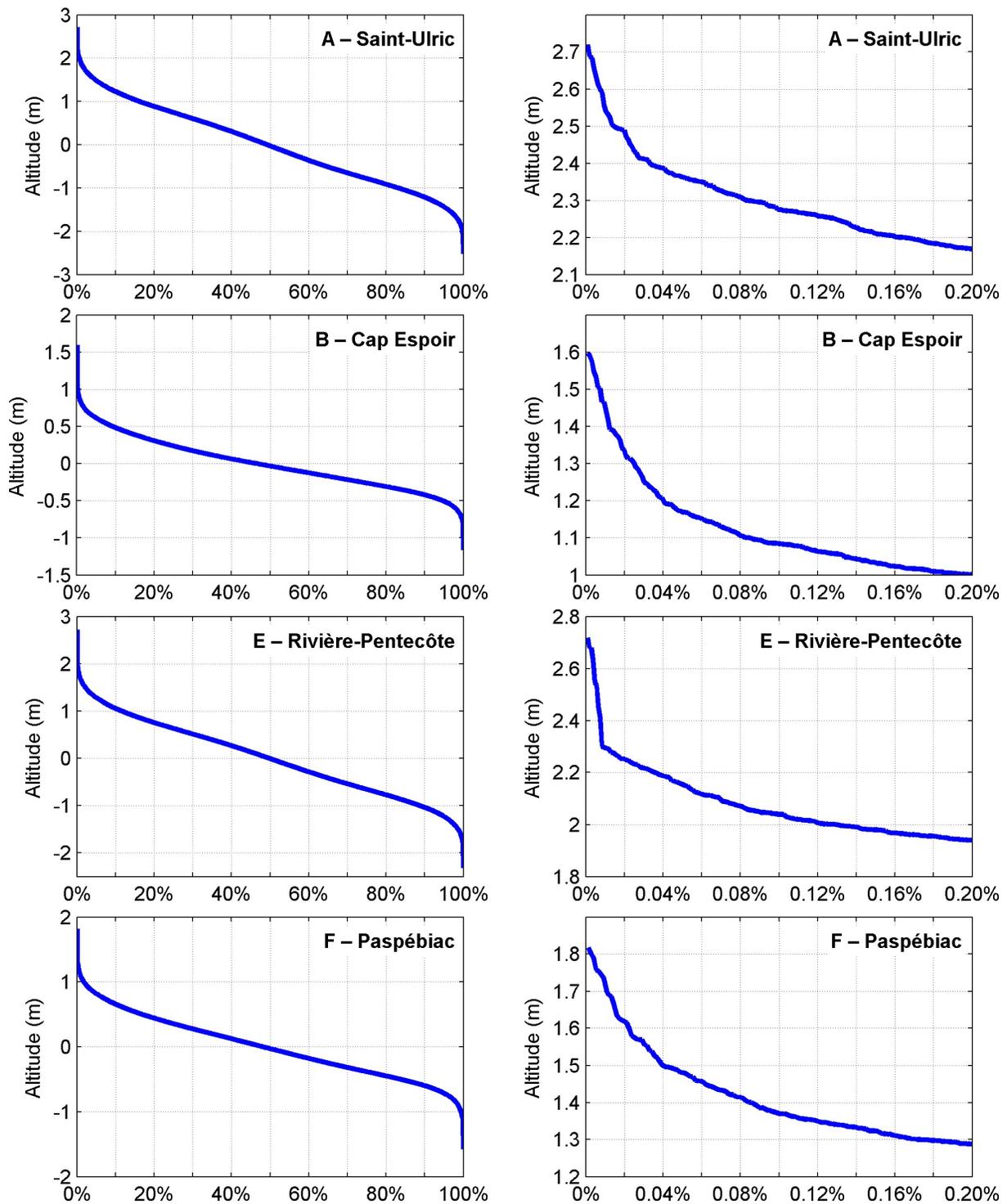


Figure 51 – Fréquence d'inondation selon les données mesurées durant les quatre ans (l'ensemble des données et le détail sur les 1% les plus hauts). L'altitude est par rapport au niveau marin moyen mesuré par les instruments.

4.5. Niveau d'eau du marégraphe de Paspébiac

Le niveau d'eau a été mesuré au quai de Paspébiac du 2015-07-04 au 2018-05-01 (le projet MTQ CC17.1 poursuit les mesures sur le même site après cette date). Toutefois il n'y a pas de données entre 2016-08-02 12:55 et 2017-06-27 14:50 à cause de la défaillance d'un instrument (cf. section 2.7). Les Figures 52 et 53 présentent le niveau d'eau et la température d'eau mesurés ainsi que les surcotes et décotes pour ce port du centre nord de la baie des Chaleurs.

La température est très stable en hiver, près de $-1,6^{\circ}\text{C}$, soit environ le point de congélation de l'eau salée de la baie des Chaleurs. En été la température moyenne est 15° avec des oscillations pouvant atteindre une amplitude de 8°C et des maxima de température dépassant 20°C . À certains moments les oscillations suivent le cycle tidal, mais généralement les variations sont à plus long terme et sont probablement liées aux tempêtes et aux conditions météorologiques.

La série temporelle de niveau d'eau correspond bien aux marées semi-diurnes de la baie des Chaleurs, avec un cycle morte-eau à vive-eau bien marqué et une asymétrie des deux marées semi-diurnes lors des marées de vive-eau (Figure 54). La marée (marnage) moyenne est 1,14 m, la plus grande est 2,40 m, la moyenne des plus grandes marées mensuelles est 2,1 m, la moyenne des plus petites marées mensuelles est 0,5 m.

Le marégraphe permanent du Service hydrographique du Canada (SHC) le plus proche est à Belledune, distant de 45 km vers le sud-ouest du côté néo-brunswickois de la baie des Chaleurs (Figure 6). Le signal de marée de Paspébiac est en phase avec celui de Belledune (différence de moins de 10 minutes, Figure 54). Le marnage est plus important à Belledune, 0,4 m de plus aux marées de vive-eau et 0,2 m de plus aux marées de morte-eau (Figure 54). La différence entre les deux marégraphes (Belledune - Paspébiac) est toujours comprise entre $-0,4$ m et $+0,3$ m (Figure 55), résultante du marnage plus important à Belledune et des différences lors des surcotes (cf. ci-dessous). Lorsque lissés par un filtre passe-bas de 48 heures pour éliminer le signal de marée diurne et semi-diurne, les différences varient entre -15 cm et $+7$ cm, provoquées par des surcotes (Figure 55). Il n'y a pas de variations saisonnières marquées, ce qui indique que les mesures du marégraphe de Paspébiac ne sont pas affectées par les variations de température été-hiver, en considérant le marégraphe du SHC à Belledune (trois capteurs de pression complétés par une mesure de salinité) comme référence. Toutefois lors du premier déploiement 2015A qui s'est terminé le 2015-11-17, les niveaux d'eau à Belledune sont environ 3 cm plus bas; ceci pourrait être causé partiellement par une imprécision dans la détermination de l'altitude de l'instrument de Paspébiac pour ce déploiement.

Les marées mesurées par l'AWAC au site F à 7 km du port de Paspébiac sont intermédiaires entre Paspébiac et Belledune : le marnage est environ 0,1 m plus important qu'à Paspébiac, différence plus ou moins constante aussi bien pour les marées de vive-eau que celles de morte-eau (Figure 54). À long terme il y a des variations significatives entre Paspébiac et l'AWAC au site F, avec un niveau d'eau mesuré environ 10 cm plus haut en hiver au site F, et des oscillations de 10 cm avec une cyclicité de 4-7 jours visible sur la

série avec un filtre passe-bas de 48 heures (Figure 55). Cela correspond probablement à des variations de la salinité qui changent aussi la masse volumique de la colonne. Des variations de la température des couches superficielles et un possible biais du capteur de pression de l'AWAC avec la température pourraient aussi contribuer à ces différences. **Le niveau d'eau mesuré par l'AWAC au site F correspond donc à ± 15 cm au niveau d'eau du marégraphe de port de Paspébiac.**

Les prédictions de marée calculée avec T_TIDE à partir de l'ensemble des données enregistrées pour le projet sont très similaires aux prédictions du SHC disponibles sur le site <http://www.marees.gc.ca/fra/station?sid=2235> (Figure 56). Les prédictions avec T_TIDE correspondent légèrement mieux aux données enregistrées que les prédictions du SHC (Figure 56) mais cette différence est peut-être seulement due à la moins bonne résolution des prédictions du SHC (0,1 m).

Surcotes et niveaux maximaux

Les 10 plus fortes surcotes, les 10 plus fortes décotes et les 10 plus hauts niveaux absolus sont indiqués sur les Figures 52 et 53 et dans le Tableau 15. La plus forte surcote s'est produite le 2018-01-05 avec un double pic, le premier à marée basse (surcote 1,08 m, niveau 0,28 m CGVD28) et le deuxième à marée haute de vive-eau (surcote 1,14 m, niveau 1,52 m CGVD28, Figure 57). Le même événement a produit les premières ou deuxièmes plus fortes surcotes aux sites A, B, E et F (Tableau 13 et Figure 50). Les dix plus fortes surcotes se sont produites durant les mois froids entre novembre et mars (Tableau 15).

Les deux plus hauts niveaux marins se sont produits à deux jours d'intervalle les 2016-01-13 (1,81 m) et 2016-01-11 (1,73 m) lors des marées de vive-eau. Comme pour les surcotes, la saison froide concentre les hauts niveaux, avec les 7 plus hauts niveaux entre le 29 octobre et le 30 janvier (Tableau 15).

Le signal de surcote est similaire au site F et à Belledune (Figure 57). Les surcotes extrêmes sont 10-25 cm plus élevées à Belledune, qui est située plus à l'intérieur de la baie des Chaleurs où l'effet entonnoir pourrait être plus fort. La différence entre les surcotes mesurées au site F et dans le port de Paspébiac est au maximum de ± 12 cm. Il serait donc possible de suppléer à la défaillance du marégraphe entre 2016-08-02 et 2017-06-27 en combinant les prédictions de marées pour Paspébiac par T_TIDE et les surcotes observées au site F; la marge d'erreur du résultat pourrait raisonnablement être considérée de ± 12 cm.

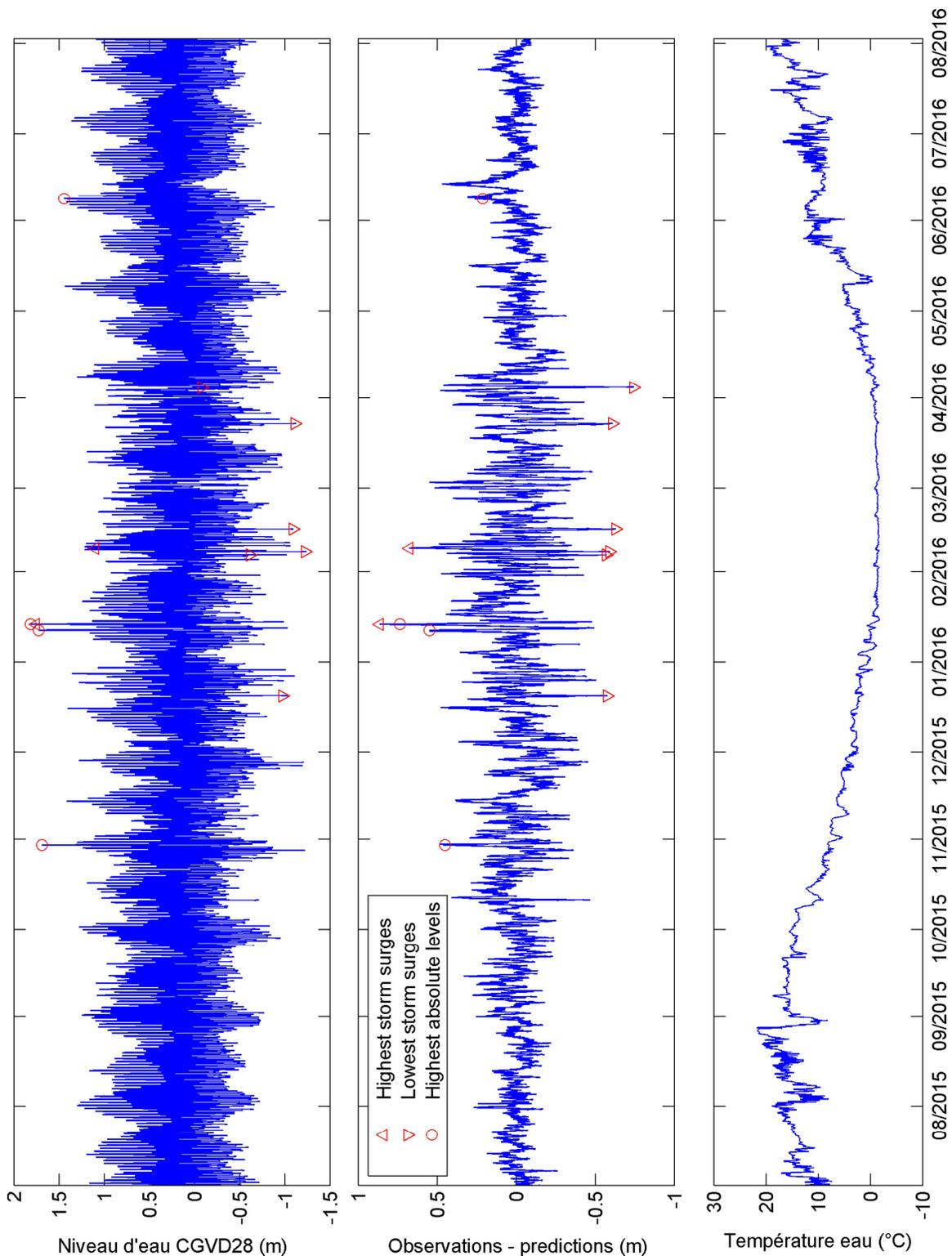


Figure 52 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2015-07-04 au 2016-08-02 : niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu entre juillet 2015 et mai 2018, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.

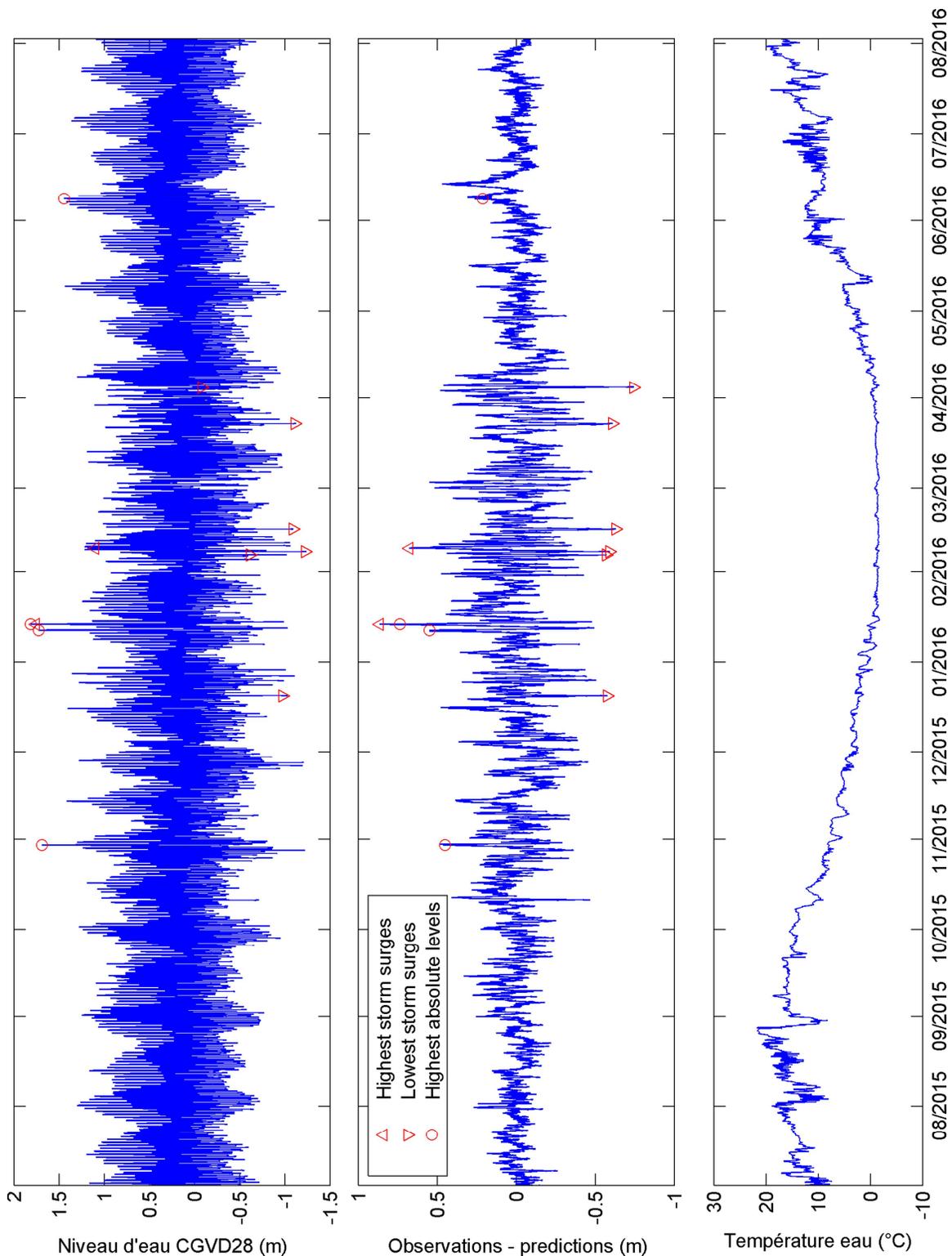


Figure 53 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2015-08-27 au 2016-05-01 : niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu entre juillet 2015 et mai 2016, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.

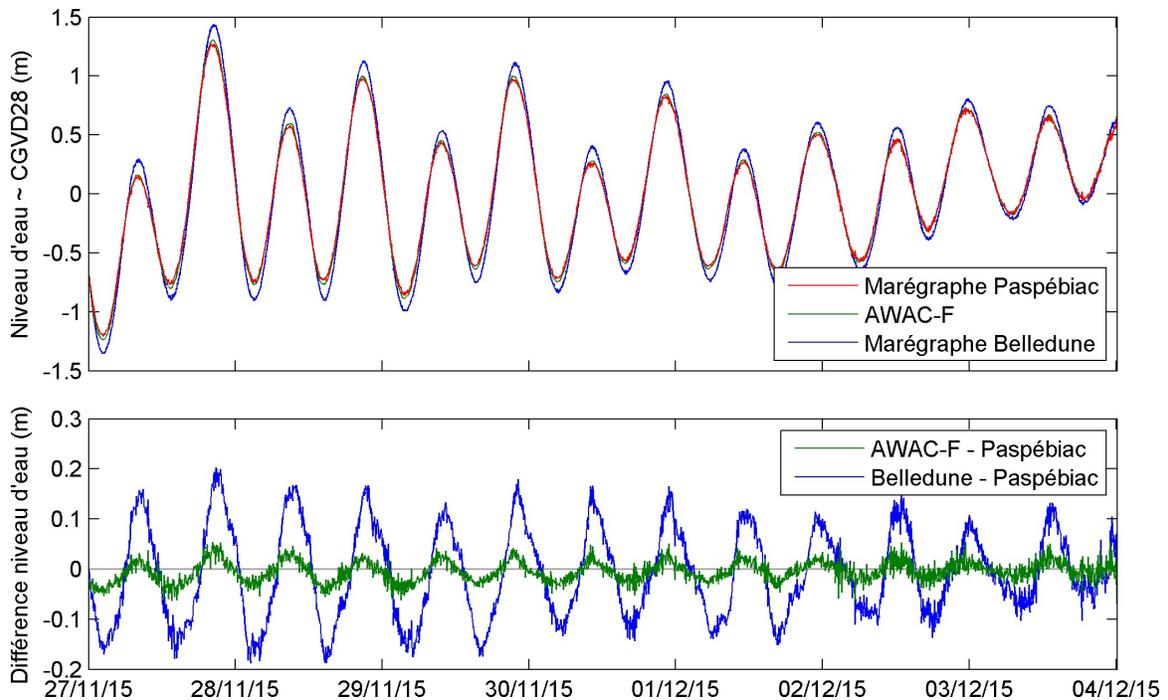


Figure 54 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés à Paspébiac, à Belledune (marégraphe SHC) et par l'AWAC F au large de Paspébiac, exemple de 7 jours. Pour Belledune et l'AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximativement par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.

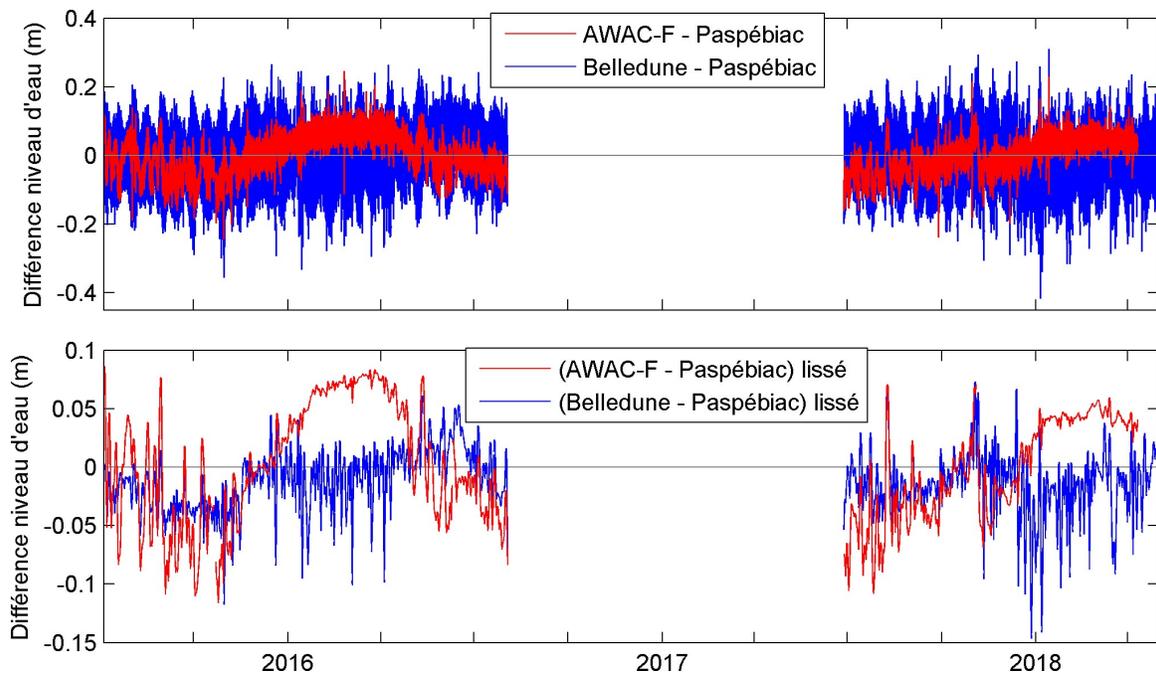


Figure 55 – Différences entre les niveaux d'eau mesurés à Paspébiac, à Belledune (marégraphe SHC) et par l'AWAC F au large de Paspébiac, différences détaillées et différences lissées avec un filtre passe-bas de 48 heures.

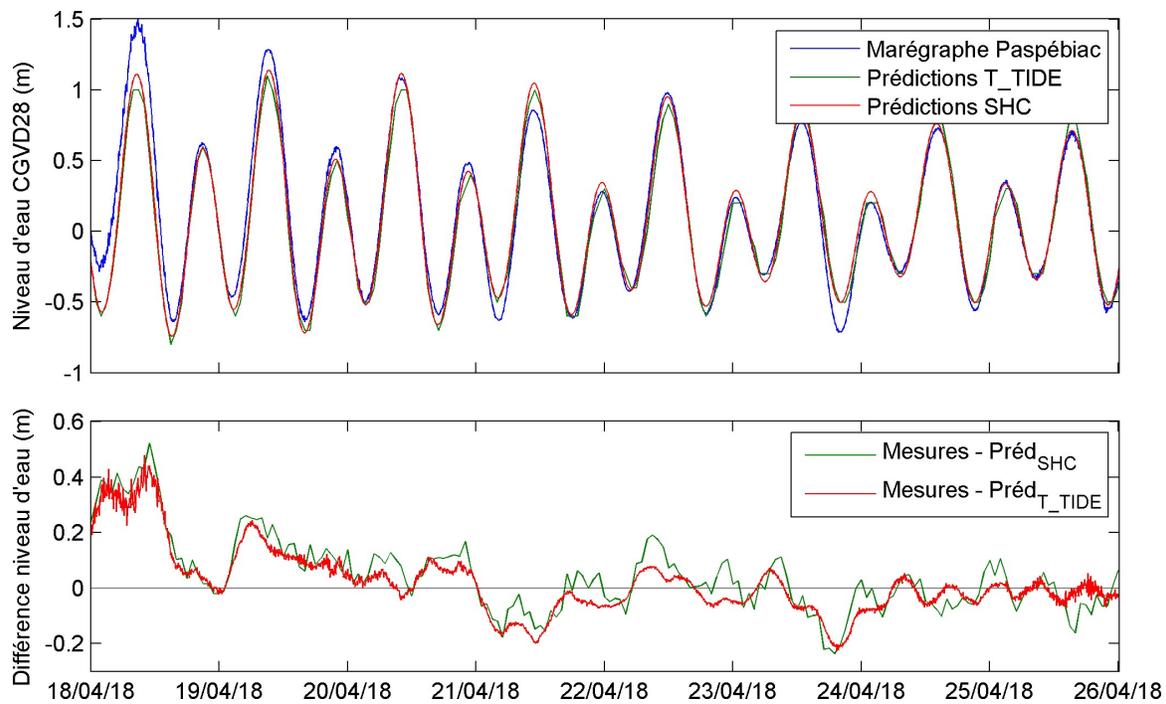


Figure 56 – Comparaison entre le niveau d'eau mesuré à Paspébiac, les prédictions de marées avec T_TIDE (harmoniques calculées à partir du niveau mesuré) et les prédictions de marées du SHC, exemple de 8 jours.

Tableau 15 – Liste des 10 plus fortes surcotes, des 10 plus fortes décotes et des 10 plus hauts niveaux observés au marégraphe du port de Paspébiac (niveau marin par rapport à CGVD28). La surcote/décote mesurée par l'AWAC au site F et la différence avec celle du marégraphe de Paspébiac est indiquée à titre de comparaison

Marégraphe Paspébiac - Surcotes				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Surcote au site F (m)	Différence Site F - Marégraphe
2018-01-05 11:20	1.52	1.14	1.08	-0.07
2018-01-05 04:10	0.28	1.08	1.09	0.01
2016-01-13 20:10	1.76	0.86	0.75	-0.12
2018-03-14 19:25	1.28	0.79	0.69	-0.10
2017-12-25 20:10	0.84	0.73	0.64	-0.09
2016-02-09 06:40	1.10	0.68	0.66	-0.02
2018-03-14 11:55	0.44	0.67	0.61	-0.07
2018-03-10 06:05	0.43	0.67	0.70	0.03
2017-12-13 21:50	0.29	0.63	0.49	-0.14
2017-11-17 23:20	0.27	0.61	0.51	-0.09

Marégraphe Paspébiac - Décotes				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Décote (m)	Décote au site F (m)	Différence Site F - Marégraphe
2017-12-26 14:00	-0.37	-0.77	-0.80	-0.03
2018-02-13 01:20	-1.15	-0.76	-0.77	-0.01
2016-04-04 15:40	-0.08	-0.74	-0.73	0.02
2018-02-06 12:25	-0.04	-0.720	-0.71	0.00
2018-02-23 16:40	-0.76	-0.66	-0.70	-0.04
2016-02-15 19:25	-1.09	-0.630	-0.62	0.01
2016-03-23 01:45	-1.11	-0.61	-0.54	0.06
2016-02-08 02:00	-1.23	-0.59	-0.57	0.02
2015-12-20 07:10	-0.98	-0.58	-0.56	0.02
2017-12-26 14:00	-0.37	-0.77	-0.80	-0.03

Marégraphe Paspébiac - Plus hauts niveaux				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Surcote au site F (m)	Différence Site F - Marégraphe
2016-01-13 21:15	1.81	0.74	0.72	-0.02
2016-01-11 19:55	1.73	0.55	0.47	-0.08
2015-10-29 20:15	1.69	0.45	0.38	-0.07
2018-01-05 09:55	1.65	1.06	0.99	-0.08
2018-01-04 20:55	1.64	0.33	0.32	-0.01
2018-01-30 18:05	1.51	0.33	0.30	-0.04
2017-11-06 20:35	1.50	0.22	0.18	-0.04
2018-04-18 08:50	1.50	0.40	–	–
2018-02-01 20:10	1.47	0.23	0.21	-0.02
2016-06-08 09:25	1.45	0.21	0.20	-0.02

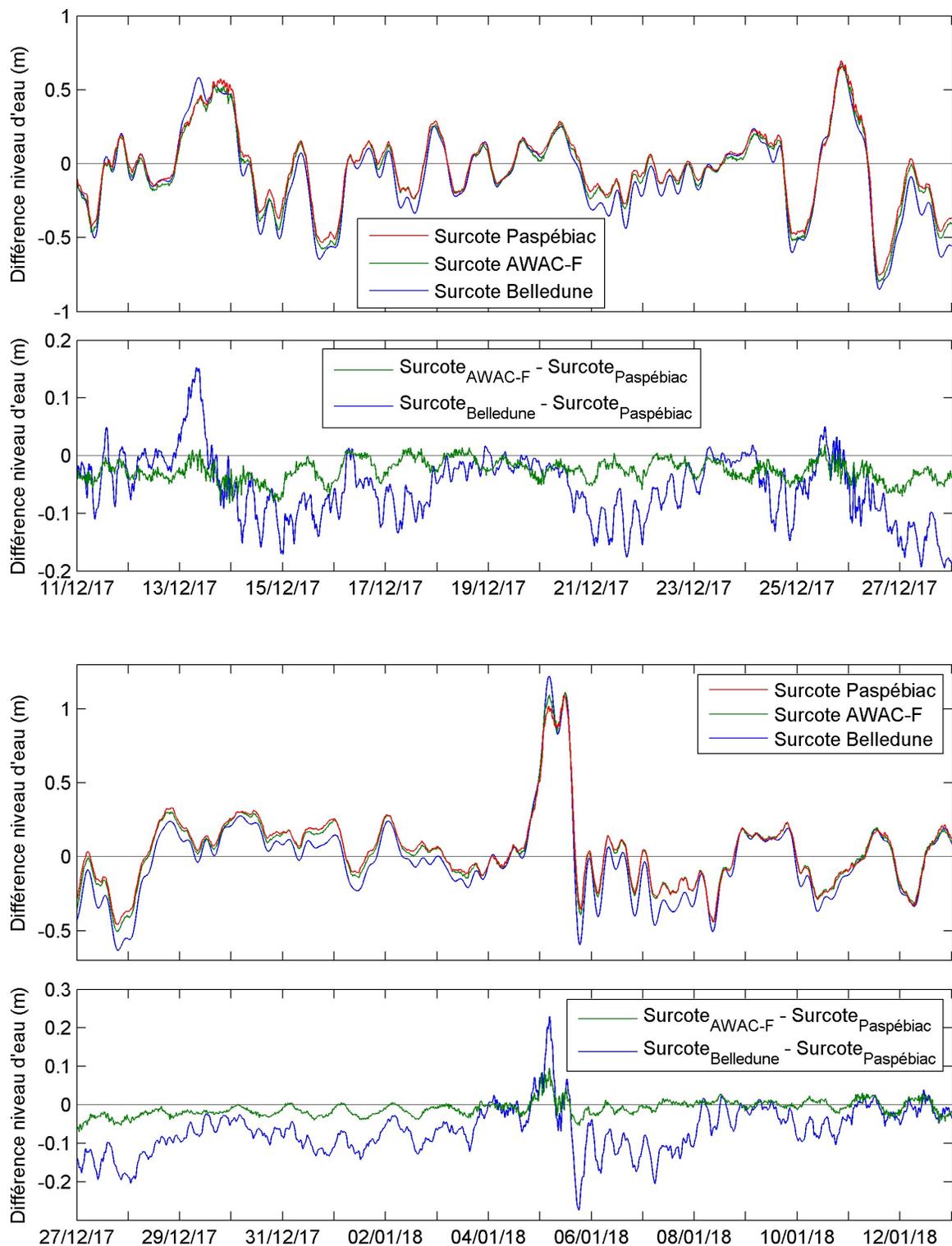


Figure 57 – Comparaison entre les surcotes (observation - prédictions de T-TIDE) au marégraphe de Paspébiac, au marégraphe de Belledune (SHC), et à l'AWAC au large de Paspébiac, exemple de deux périodes de 17 jours. Les observations des deux premiers sites ont été lissées avec un filtre passe-bas de 60 minutes pour le calcul de la surcote.

5. Modélisation

Le troisième objectif général du projet était d'évaluer l'impact des changements climatiques, notamment la diminution de la glace de mer et la hausse du niveau marin, sur les courants, les vagues et le transport sédimentaire près de la côte. Cet objectif devait être réalisé en modélisant numériquement les courants et les vagues dans la baie des Chaleurs et le transport sédimentaire dans deux secteurs côtiers. Les objectifs spécifiques 5^a et 6^b établissaient les étapes pour cela.

Cet objectif général n'a malheureusement pas pu être atteint. Il était prévu que le volet modélisation du projet soit principalement réalisé par un étudiant au doctorat. L'étudiante Edwige Boudiere a commencé à travailler sur la modélisation en mai 2015. Début janvier 2016 elle a toutefois décidé d'abandonner ses études de doctorat et la participation au projet. Il n'a pas été possible de recruter un autre étudiant (le projet devait initialement se terminer déjà en janvier 2018). Une auxiliaire de recherche, Marion Bandet qui a un doctorat en océanographie physique, a travaillé pour plusieurs mois sur la modélisation de septembre 2016 à mars 2017, mais a ensuite décidé d'abandonner le projet. Urs Neumeier et Sylvain Joly aussi ont travaillé sur différents aspects de la modélisation, mais n'ont pas eu assez de temps pour atteindre l'objectif, étant aussi occupés par différentes autres tâches.

À cause de ces difficultés l'équipe de recherche n'a pas réussi à implémenter entièrement le modèle numérique. Par conséquent, les différents scénarios futurs convenus avec le comité de suivi n'ont pas pu être réalisés et il n'y a pas de résultats correspondants aux objectifs à montrer. Néanmoins ce chapitre présente succinctement les travaux réalisés pour le volet modélisation.

Modèle utilisé

La modélisation a été effectuée avec Delft3D en utilisant les modules FLOW (courants et marées), WAVE (vagues, identique au modèle de vague SWAN) et MORPHOLOGY (transport sédimentaire et changement de la bathymétrie). La version standard de Delft3D génère des erreurs si la température de l'eau est inférieure à 0°C, alors que l'eau salée gèle seulement à environ -1.8°C. Le code source de Delft3D a été modifié pour mettre la limite de ce test à -2°C (sauf pour l'eau arrivant des rivières), et le programme a été recompilé.

^a Objectif spécifique 5 : Implémenter un modèle numérique reproduisant courants, vagues et transport sédimentaire en milieu côtier, tenant aussi compte de la présence de glace de mer; calibrer ce modèle avec des mesures côtières des vagues et des courants (acquises en dehors du présent projet); et vérifier la performance du modèle à partir de données existantes sur les transports sédimentaires et les bilans sédimentaires à certains sites.

^b Objectif spécifique 6 : Évaluer avec ce modèle numérique l'impact : (a) de différentes conditions de tempête extrême; (b) de la diminution de la glace de mer; et (c) de la hausse du niveau marin sur les courants, sur les vagues et sur la dynamique sédimentaire en zone littorale. Cela permettra d'établir les relations entre les vagues au large et la dynamique sédimentaire à la côte et d'estimer l'impact des changements climatiques.

Domaine et grilles

Les deux sites d'études ont été sélectionnés par le comité de suivi. **Le site de Bonaventure** s'étend de Pointe-Bonaventure à l'est jusqu'à Saint-Siméon-de-Bonaventure à l'ouest et inclus l'embouchure de la rivière Bonaventure. La route 132 y est directement adjacente au rivage sur un premier tronçon de 3,4 km, du centre de Bonaventure vers l'ouest, et sur un second tronçon de 2,3 km à Saint-Siméon-de-Bonaventure. **Le site de Saint-Godefroi** s'étend de Pointe Huntingdon à Pointe-Smith (Shigawake). Il inclut la lagune de Hope Town, dans laquelle se jettent les rivières Saint-Godefroi et Paspébiac. La route 132 passe sur une distance de 0,5 km sur l'étroite flèche sableuse entre la mer et cette lagune.

La modélisation a été effectuée avec trois niveaux de grilles curvilinéaires imbriquées (Figure 58). La première grille générale G1 couvre toute la baie des Chaleurs jusqu'au méridien 64°W vers l'est. La seconde grille régionale G2 couvre la partie centrale nord de la baie des Chaleurs, incluant Bonaventure et St-Godefroi. Deux grilles locales G3A et G3B sont centrées respectivement sur Bonaventure et sur St-Godefroi–Hope Town. Delft3D est utilisé en mode 3D avec 12-15 couches pour représenter correctement la stratification en salinité et en température. Les simulations des trois niveaux de grilles comprenaient les vagues, les courants et les niveaux d'eau. Il était prévu d'ajouter le transport sédimentaire pour les grilles locales G3A et G3B.

Toutes les données de bathymétrie existantes ont été obtenues du Service Hydrographique du Canada, bureaux régionaux de Mont-Joli (région Québec) et de Dartmouth (région Atlantique), et aussi de Simon Senneville (ISMER). Elles ont été complétées par le trait de côte et des points supplémentaires dans les estuaires en se basant sur les cartes marines et les photographies aériennes. Elles ont ensuite été sous-échantillonnées ou interpolées sur une grille régulière de 100 m de résolution pour établir la bathymétrie des grilles G1 et G2 (cf. ci-dessous, Figure 58). Les données non sous-échantillonnées ont été utilisées pour les grilles locales G3A et G3B. La référence verticale de la bathymétrie a été convertie du zéro des cartes marines au niveau marin moyen.

Forçage

À la limite est de la grille G1 ouverte sur le golfe du Saint-Laurent (trait rouge sur la Figure 58), les conditions aux frontières ont été définies pour les niveaux d'eau, la salinité, la température et les courants à partir du modèle ROM de Simon Senneville et pour les vagues (hauteur significative, période du pic d'énergie, direction et dispersion directionnelle) à partir du modèle WaveWatch III de Dany Dumont.

Le modèle reproduit le débit d'eau douce des sept principales rivières (Tableau 16). Pour la grille G3B, les deux petites rivières se jetant dans la lagune de Hope Town (la Paspébiac et la St-Godefroi) sont également incluses. Les débits mensuels moyens ont été calculés à partir des données des stations hydrométriques disponibles, puis ajustés pour

l'embouchure en fonction de la superficie totale du bassin versant et la superficie du bassin versant en amont des stations hydrométriques. Le modèle est forcé avec une interpolation linéaire sur une série temporelle ayant le débit moyen de chaque mois le 16 du mois.

Il était prévu que le modèle utilise si possible les vents et la pression atmosphérique du nouveau modèle à haute résolution d'Environnement Canada SHRPD (résolution 2.5 km) pour bien reproduire les particularités de la baie des Chaleurs. Les sorties SHRPD sont archivées quotidiennement sur un serveur de l'ISMER depuis janvier 2017. Ces données en format GRIB2 ont été converties et formatées pour être utilisée par Delft3D. Par contre, il n'a pas été possible d'obtenir les données passées d'Environnement Canada (faible disponibilité de la personne de contact et erreurs répétées dans la sélection des données fournies par cette personne).

Il était prévu d'inclure l'effet de la glace de mer dans le modèle un utilisant comme forçage les données issues du modèle MOR de Simon Senneville. Il était prévu de modifier le code de calcul de Delft3D pour inclure l'atténuation des vagues par glace. Toutefois avec le départ de l'étudiante Edwige Boudiere cela n'a pas été réalisé.

Des données de granulométrie des sédiments trouvées dans plusieurs publications (rapports, mémoires de maîtrise, cartes marines) ont été géoréférencées pour pouvoir établir une grille d'entrée de granulométrie pour Delft3D pour les domaines G3A (Bonaventure) et G3B (St-Godefroi). Les zones avec de la roche affleurant ou qui sont recouverts de blocs grossiers ont été géoréférencées comme zones sans sédiments transportables. Par contre, le transport sédimentaire a été testé dans le modèle juste avec un sédiment spatialement uniforme, et pas avec une grille de granulométrie réaliste.

Tableau 16 – Débit des rivières reproduites dans le modèle avec la période des données utilisées pour calculer les débits moyens.

Rivière	Période analysée	Débit moyen (m ³ /s)	Débit moyen du mois de mai (m ³ /s)
Restigouche *	1968-2012	267,2	987,8
Cascapedia	1978-2013	81,8	326,6
Bonaventure	1983-2013	51,7	197,3
Nepisiguit	1921-2005	44,6	161,0
Petite Cascapedia	1961-1981	34,8	128,1
Nouvelle	1694-2013	27,3	111,3
Grande-Riviere	1972-1997	18,1	78,0
Jacquet	1964-2012	10,8	42,1
Paspébiac	#	2,7	12,0
St-Godefroi	#	1,4	6,2

* Le débit de la Restigouche inclut le débit de la Matapédia, son tributaire.

Débit estimé à partir la superficie du bassin versant et le débit de la Grande-Rivière.

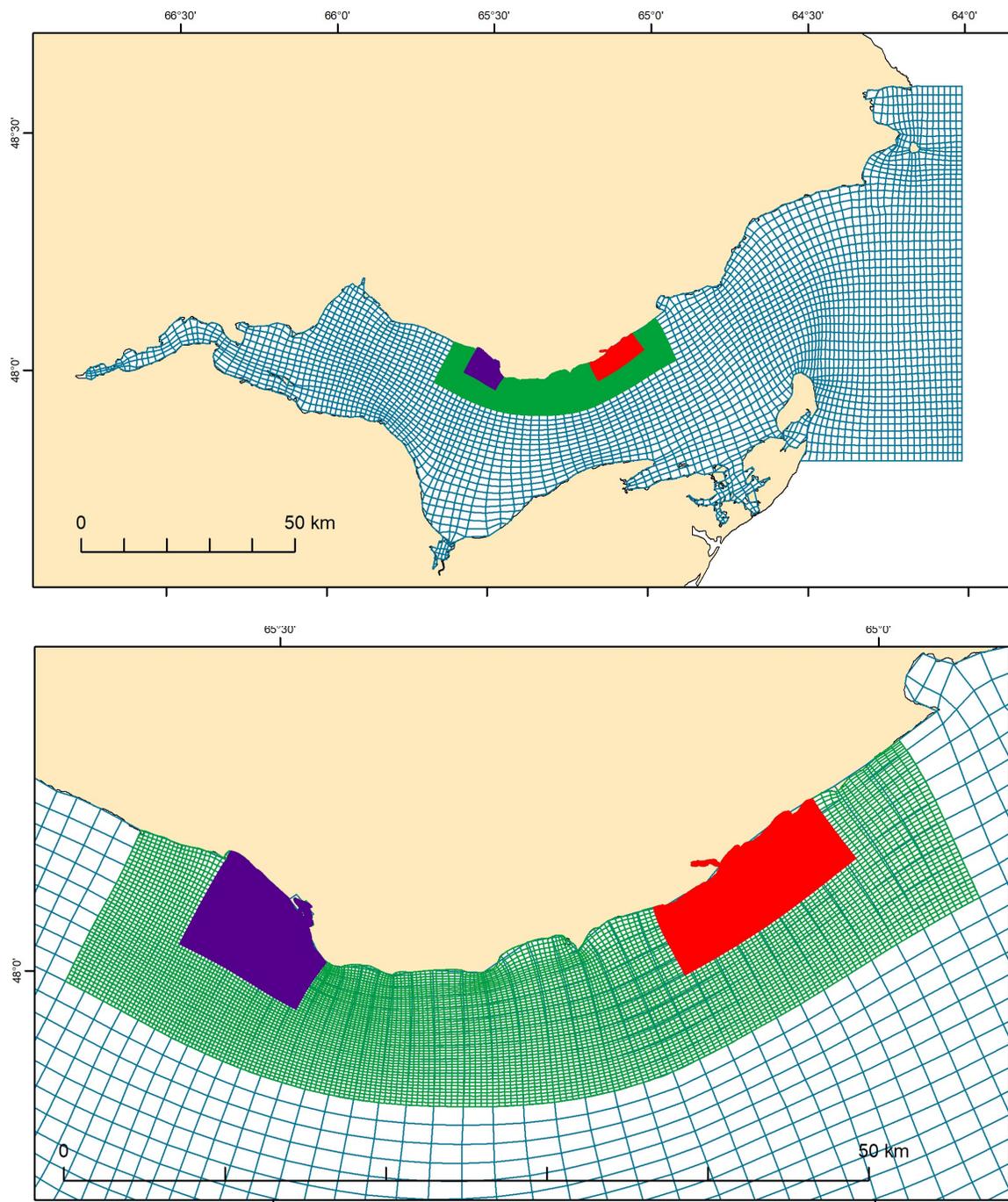


Figure 58 – Grilles curvilinéaires utilisées pour la modélisation : G1 en bleu, G2 en vert, G3A (Bonaventure) en violet et G3B (Saint-Godfroi) en rouge.

Tests effectués

Les tests ont montré que ces forçages permettaient de reproduire de manière satisfaisante la marée enregistrée au marégraphe de Belledune. Ensuite le modèle a été testé sur les trois niveaux de grilles G1, G2 et G3A/G3B. Différents problèmes liés à l'imbrication des grilles G1-G2, G2-G3A et G2-G3B ont été résolu, notamment en ajustant la position des limites externes des grilles G3A et G3B pour réduire de nombreux problèmes d'écoulement irréalistes aux frontières des grilles G3A et G3B, ainsi que dans les zones de très faibles profondeurs (lagunes et embouchures de rivières).

L'utilisation des grilles à fine échelle G3A et G3B engendre des limitations techniques pour le pas de temps de la modélisation, car le nombre de Courant ($C = u \Delta t / \Delta x$, avec u vitesse, Δt pas de temps et Δx taille de la cellule) doit être inférieur à 1 pour obtenir des sorties du modèle hydrodynamique qui soient valables. L'utilisation d'un pas de temps déjà réduit à 1 minute n'était malheureusement pas suffisant pour les grilles G3A et G3B, et il aurait été impensable de faire tourner le modèle sur une longue période de temps. Des tests supplémentaires auraient été nécessaires pour choisir un compromis entre la taille des grilles et la durée de simulation.

Lors des différentes simulations réalisées, les panaches d'eau douce à l'embouchure des rivières se retrouvent mélangés sur toute la profondeur de la colonne d'eau très rapidement (Figure 59). Aucune stratification verticale n'est observée, avec des isohalines complètement verticaux, ce qui paraît irréaliste, et semble indiquer un mélange trop important entre l'eau salée de la Baie des Chaleurs et l'eau douce des rivières.

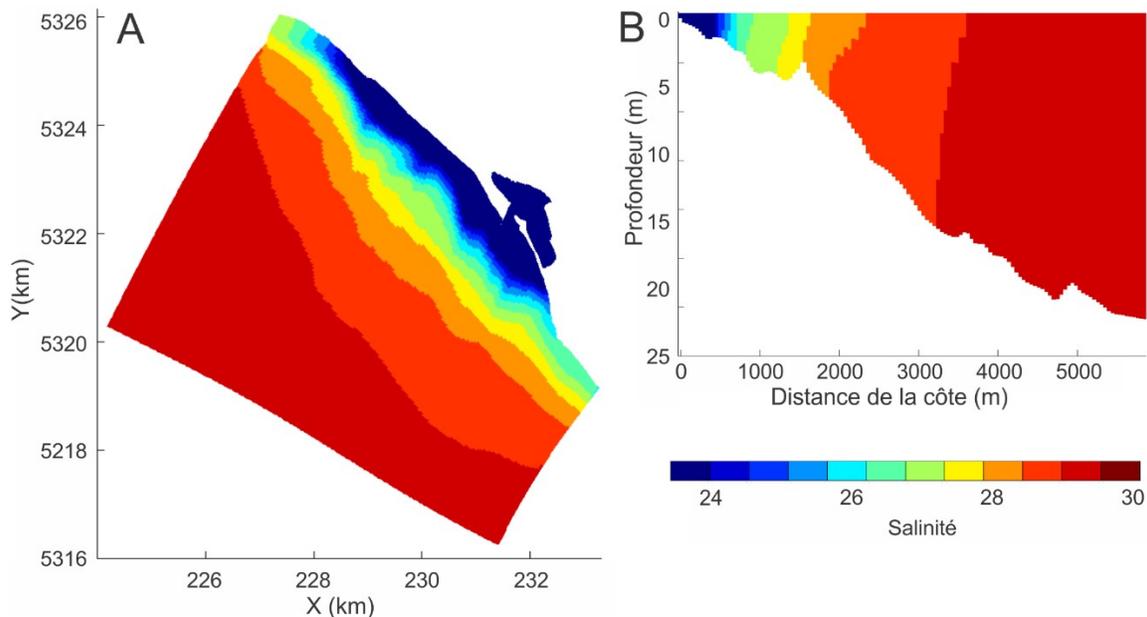


Figure 59 – Exemple de la modélisation hydrodynamique pour la grille de Bonaventure le 2014-11-28 à 13:40. (A) Salinité de la couche de surface, (B) Salinité sur un profil perpendiculaire à la côte.

6. Discussion et conclusions

Ce projet a permis l'acquisition d'excellentes et précieuses séries temporelles pluriannuelles de vagues pour quatre sites au large des côtes du Québec. Ce jeu de données est unique, en particulier pour la couverture de la période hivernale, et est très utile pour caractériser les conditions vagues des quatre secteurs étudiés et pour planifier correctement les interventions de génie côtier pour protéger les routes et les bâtiments.

Les résultats décrivent bien les conditions de vagues et des tempêtes pour les quatre sites. Pour Rivière-Pentecôte et pour Paspébiac, il s'agit des premières données pluriannuelles. Les vagues les plus fortes ont été mesurées à Cap d'Espoir, qui est très exposé aux vagues du golfe du Saint-Laurent, avec des tempêtes venant des secteurs nord-est, est et sud-est (H_{m0} maximal 6,6 m, tempêtes maximales de l'est-sud-est). Rivière-Pentecôte et toute la côte entre Port-Cartier et Pointe-des-Monts est exposé aux très fortes vagues produites dans le golfe du St-Laurent avec des tempêtes venant seulement du secteur est, toutefois le fetch est plus court et les vagues sont un peu moindres qu'à Cap d'Espoir (H_{m0} maximal 6,1 m). Le secteur de Saint-Ulric et plus généralement toute la côte entre Matane et Sainte-Flavie sont surtout exposés aux vagues du nord-est provenant du l'extrémité nord-ouest du golfe (H_{m0} maximal 4.2 m) mais reçoivent aussi des vagues plus petites de l'ouest venant de l'estuaire du Saint-Laurent (H_{m0} maximal 3.2 m). La baie des Chaleurs est encore plus protégée que l'estuaire du Saint-Laurent, et le site de Paspébiac est exposé aussi bien aux vagues venant de l'intérieur de la baie des Chaleurs (direction des vents dominant) que des vagues venant de l'ouest provenant du golfe (H_{m0} maximal 2.8 m dans les deux directions).

L'automne et l'hiver sont les saisons les plus venteuses avec les vagues de tempête majeures concentrées entre fin octobre et mars. Les plus fortes tempêtes intervenaient entre fin décembre et début janvier pour les quatre sites. Cela est surprenant, car dans le passé les ingénieurs considéraient que la présence de glace de mer réduisait la génération des vagues et atténuait les vagues à partir de mi-décembre, protégeant efficacement la côte des tempêtes. Le fait que des tempêtes majeures se produisent jusqu'à mi-janvier est une illustration du réchauffement climatique présentement en cours. Comme la glace de mer diminuera ces prochaines décennies à cause du réchauffement climatique (Senneville et al., 2014), il faut s'attendre à encore plus de tempêtes majeures durant les mois de janvier et de février.

Pour St-Ulric et Cap d'Espoir, la durée de 8 et 7½ années de données permet d'observer l'évolution à moyen terme. Aux deux sites les hauteurs des vagues extrêmes ont augmenté de 2010-2014 à 2014-2018. Cela est très marqué à Saint-Ulric dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, avec des vagues de 3 m ou plus qui sont 3 fois plus fréquentes par rapport au début de la décennie. Au site de Cap d'Espoir, la différence entre les deux périodes n'est remarquable que sur les très hautes vagues de plus de 5,73 m (Figure 24). Pour les deux sites, la plus forte tempête des huit dernières années est survenue dans les deux derniers hivers, dépassant la tempête historique du 15 décembre 2010, et quatre des cinq plus fortes tempêtes sont survenues durant les quatre dernières années. Pour le site de St-

Ulric, les tempêtes qui génèrent des vagues en provenance de l'ouest sont aussi plus fréquentes à la fin de la décennie qu'au début.

Pour l'ensemble des quatre sites, incluant donc Rivière-Pentecôte et Paspébiac, l'activité des tempêtes était plus importante au cours de la période mai 2016 à mai 2018. Au quatre sites la plus forte tempête était soit fin décembre 2016 (Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte le 2016-12-30), soit début janvier 2018 (Saint-Ulric et Paspébiac les 2018-01-04/05). La première tempête a fait des dégâts majeurs à Percé (promenade et restaurant détruits, bâtiments endommagés) et Gaspé. La seconde a fait des dégâts importants à Matane-sur-Mer.

Les séries temporelles sont encore trop courtes pour en déterminer directement le climat de vagues, qui est habituellement défini sur des périodes de 30 ans. Le problème se pose particulièrement pour les nouveaux sites de Rivière-Pentecôte et de Paspébiac, alors que pour Saint-Ulric et Cap d'Espoir il est possible maintenant d'estimer raisonnablement une période de retour de 20 ans. Cette limitation des mesures sur 3-4 ans est illustrée par le fait que la période 2014-2018 a été plus tempétueuse que la période du précédent projet 2010-2014, et que la tempête du 15 décembre 2010, qui était qualifiée d'exceptionnelle à l'époque, a déjà été dépassée 6-7 ans plus tard.

Pour Saint-Ulric et pour Cap d'Espoir, il y a maintenant 8 années de données de vagues, incluant les données du projet précédent 2010-2014 financé par le MSP. Cela permet une première caractérisation du climat de vagues, bien que des données additionnelles seraient très utiles. Pour Rivière-Pentecôte et pour Paspébiac, les données couvrent seulement respectivement 4 et 3½ années. L'expérience acquise aux deux autres sites, nous montre que cette période est largement insuffisante pour obtenir des statistiques robustes sur le climat de vagues. Pour ces sites il est fortement recommandé de continuer les mesures de vagues pendant encore plusieurs années afin d'obtenir les données indispensables pour correctement définir les climats de vagues des secteurs étudiés et pouvoir ainsi donner aux ingénieurs des informations fiables.

Ces résultats de vagues remplissent l'objectif général A (*Améliorer les connaissances du climat de vagues à quatre sites du golfe et de l'estuaire du Saint Laurent ainsi que de la Baie des Chaleurs*) et les objectifs spécifiques 1 (*Définir le climat de vagues aux sites de Rivière Pentecôte et Paspébiac*) et 2 (*Améliorer la connaissance du climat de vagues aux sites de Saint-Ulric et de Cap d'Espoir en étendant les mesures existantes de 3 années supplémentaires*).

Les données de courant documentent les mouvements des masses d'eau qui sont dominés par des cyclicités tidales et dont l'orientation est déterminée par la géomorphologie sous-marine avec généralement des courants parallèles à la côte. Les courants sont influencés non seulement par les marées, mais également par les tempêtes et d'autres conditions de vents inhabituelles, ainsi que par des variations saisonnières. Toutefois ces phénomènes n'ont pas été examinés en détail pour ce projet dédié principalement aux vagues.

Les AWAC ont aussi permis de déterminer l'épaisseur de la glace de mer hivernale avec des mesures à haute densité (mesure à 1 Hz durant 17 minutes toutes les 60 minutes). Ces données illustrent l'épaisseur variable que peut avoir la glace, avec des épaissements parfois bien supérieurs à ceux annoncés par le Service canadien des glaces dans les cartes de glace. Il n'y a toutefois pas eu de validation indépendante des épaisseurs mesurées, ce qui serait utile pour vérifier les épaisseurs de plusieurs mètres parfois observées. Ces données illustrent la grande variabilité qui peut exister d'un hiver à l'autre au niveau des conditions de glace, tant pour le timing que pour leurs caractéristiques physiques. Il y a eu présence accrue de glace lors du dernier hiver 2017-2018 détectable aux quatre sites monitorés, ce qui n'a cependant pas empêché le développement d'une tempête majeure dans l'estuaire du St-Laurent et dans la baie des Chaleurs début janvier 2018 puis une autre tempête à mi-mars 2018.

Les niveaux d'eau mesurés dans le port de Paspébiac documentent les surcotes pour la partie centrale de la côte québécoise de la baie des Chaleurs. La plus forte surcote de 1,08 m a été mesurée durant la tempête exceptionnelle du début janvier 2018. De manière générale les plus fortes surcotes se sont produites entre les mois de novembre et de mars, et les plus hauts niveaux d'eau atteints entre fin octobre et janvier. Ces données ont aussi confirmé la validité des prédictions de marée par le Service hydrographique du Canada. Une défaillance d'instrument a interrompu la collecte de données durant 10 mois, mais néanmoins 2 ans de données ont été enregistrés sur les 2½ ans prévus initialement, et la période manquante pourrait être approximée avec les données de l'AWAC de Paspébiac.

Les niveaux d'eau ont été enregistrés non seulement par le marégraphe dans le port de Paspébiac, mais aussi par les AWAC. Ces dernières données sont moins précises, car les variations temporelles de salinité dans la colonne d'eau de 28-38 m au-dessus de l'instrument ne sont pas connues et que les niveaux d'eau mesurés ne sont pas reliés à un référentiel d'altitude précis, mais seulement au niveau marin moyen tel que mesuré par les instruments. Néanmoins, ces niveaux d'eau peuvent être utilisés pour étudier les surcotes et décotes de tempêtes. La comparaison entre l'AWAC au large de Paspébiac avec le marégraphe dans le port de Paspébiac indique que la différence entre les deux mesures est généralement inférieure à 10 cm, avec exceptionnellement des différences de 15 cm. Au cours de la présente étude, les surcotes ont dépassé le seuil de 1 mètre aux quatre sites avec AWAC, notamment lors des tempêtes du 30 décembre 2016 et 5 janvier 2018.

Ces résultats de courants, d'épaisseur de glace et niveau d'eau remplissent l'objectif général B (*Mesurer aux mêmes sites les courants, les glaces hivernales et les niveaux d'eau*) et les objectifs spécifiques 3 (*Mesurer aux mêmes sites les courants et caractériser la couverture de glace pendant les hivers*) et 4 (*Évaluer l'aléa submersion dans la Baie des Chaleurs en mesurant avec précision les niveaux d'eau avec un marégraphe installé à Paspébiac*).

Le troisième objectif général projet (*Évaluer l'impact des changements climatiques, notamment la diminution de la glace de mer et la hausse du niveau marin, sur les courants, les vagues et le transport sédimentaire près de la côte*) n'a malheureusement

pas été atteint. En effet, à cause du départ de l'étudiante chargée de ce volet, l'objectif spécifique 5 n'a été que partiellement réalisé (*Implémenter, calibrer valider un modèle numérique reproduisant courants, vagues et transport sédimentaire en milieu côtier, tenant aussi compte de la glace de mer, pour la baie des Chaleurs*), l'implémentation du modèle n'ayant pas été achevée. Cela a empêché la réalisation de l'objectif spécifique 6 (*Évaluer avec ce modèle numérique l'impact : de différentes conditions de tempête extrême; de la diminution de la glace de mer; et de la hausse du niveau marin sur les courants, sur les vagues et sur la dynamique sédimentaire en zone littorale*).

7. Description des fichiers

Fuseau horaire : Heure normale de l'Est (HNE), soit UTC-5.

Pour les bursts de vagues et les données de glace, le temps indiqué est le milieu de la période échantillonnée qui durait 1024 s. Par contre, pour les profils de courants, le temps indiqué est le début de la période de mesures qui durait entre 90 et 150 s (cf. Tableau 3).

Données de vagues

SPA_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A pour l'ensemble du projet (mai 2014 à avril 2018).
SPB_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage B pour l'ensemble du projet (mai 2014 à avril 2018).
SPE_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage E pour l'ensemble du projet (mai 2014 à septembre 2018).
SPF_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage F pour l'ensemble du projet (mai 2015 à avril 2018).

Ces fichiers Excel contiennent chacun trois feuilles de calcul avec :

- 1) tous les résultats des calculs incluant les valeurs mauvaises ainsi qu'un code de qualité pour chaque donnée (cf. section 3.3);
- 2) seulement les résultats bons ou douteux, les résultats mauvais ayant été remplacés par -999;
- 3) seulement les résultats bons, les résultats douteux ou mauvais ayant été remplacés par -999.

SP_ABCD_spectre.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres non directionnels des vagues :
SPA14A.spectre	mouillage A, hiver 2014/2015
SPA15A.spectre	mouillage A, été 2015
SPA15B.spectre	mouillage A, hiver 2015/2016
SPA16A.spectre	mouillage A, été 2016
SPA16B.spectre	mouillage A, hiver 2016/2017
SPA17A.spectre	mouillage A, été 2017 + début hiver 2017/18
SPB14A.spectre	mouillage B, hiver 2014/2015
SPB15A.spectre	mouillage B, été 2015
SPB15B.spectre	mouillage B, hiver 2015/2016
SPB16A.spectre	mouillage B, été 2016
SPB16B.spectre	mouillage B, hiver 2016/2017
SPB17A.spectre	mouillage B, été 2017 + début hiver 2017/18
SPE14A.spectre	mouillage E, hiver 2014/2015
SPE15A.spectre	mouillage E, été 2015
SPE15B.spectre	mouillage E, hiver 2015/2016

SPE16A.spectre	mouillage E, été 2016
SPE16B.spectre	mouillage E, hiver 2016/2017
SPE17A.spectre	mouillage E, été 2017 + hiver 2017/18
SPF15A.spectre	mouillage F, été 2015
SPF15B.spectre	mouillage F, hiver 2015/2016
SPF16A.spectre	mouillage F, été 2016
SPF16B.spectre	mouillage F, hiver 2016/2017
SPF17A.spectre	mouillage F, été 2017
SPF17B.spectre	mouillage F, début hiver 2017/18

Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres non directionnels en $\text{m}^2 \text{Hz}^{-1}$ avec les fréquences en première ligne et les date/heures en première colonne.

SPA_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site A : SPA14A.spectredir mouillage A, hiver 2014/2015 SPA15A.spectredir mouillage A, été 2015 SPA15B.spectredir mouillage A, hiver 2015/2016 SPA16A.spectredir mouillage A, été 2016 SPA16B.spectredir mouillage A, hiver 2016/2017 SPA17A.spectredir mouillage A, été 2017 + début hiver 2017/18
SPB_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site B : SPB14A.spectredir mouillage B, hiver 2014/2015 SPB15A.spectredir mouillage B, été 2015 SPB15B.spectredir mouillage B, hiver 2015/2016 SPB16A.spectredir mouillage B, été 2016 SPB16B.spectredir mouillage B, hiver 2016/2017 SPB17A.spectredir mouillage B, été 2017 + début hiver 2017/18
SPE_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site E : SPE14A.spectredir mouillage E, hiver 2014/2015 SPE15A.spectredir mouillage E, été 2015 SPE15B.spectredir mouillage E, hiver 2015/2016 SPE16A.spectredir mouillage E, été 2016 SPE16B.spectredir mouillage E, hiver 2016/2017 SPE17A.spectredir mouillage E, été 2017 + hiver 2017/18
SPF_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site F : SPF15A.spectredir mouillage F, été 2015 SPF15B.spectredir mouillage F, hiver 2015/2016 SPF16A.spectredir mouillage F, été 2016 SPF16B.spectredir mouillage F, hiver 2016/2017 SPF17A.spectredir mouillage F, été 2017

SPF17B.spectredir mouillage F, début hiver 2017/18

Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres directionnels en $\text{m}^2 \text{Hz}^{-1} \text{degrés}^{-1}$ 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 courants

SP_ABEF_profils.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les profils de vitesses :

SPA14Aprofils.xlsx	Mouillage A, hiver 2014/2015
SPA15Aprofils.xlsx	Mouillage A, été 2015
SPA15Bprofils.xlsx	Mouillage A, hiver 2015/2016
SPA16Aprofils.xlsx	Mouillage A, été 2016
SPA16Bprofils.xlsx	Mouillage A, hiver 2016/2017
SPA17Aprofils.xlsx	Mouillage A, été 2017 + début hiver 2017/18
SPB14Aprofils.xlsx	Mouillage B, hiver 2014/2015
SPB15Aprofils.xlsx	Mouillage B, été 2015
SPB15Bprofils.xlsx	Mouillage B, hiver 2015/2016
SPB16Aprofils.xlsx	Mouillage B, été 2016
SPB16Bprofils.xlsx	Mouillage B, hiver 2016/2017
SPB17Aprofils.xlsx	Mouillage B, été 2017 + début hiver 2017/18
SPE14Aprofils.xlsx	Mouillage E, hiver 2014/2015
SPE15Aprofils.xlsx	Mouillage E, été 2015
SPE15Bprofils.xlsx	Mouillage E, hiver 2015/2016
SPE16Aprofils.xlsx	Mouillage E, été 2016
SPE16Bprofils.xlsx	Mouillage E, hiver 2016/2017
SPE17Aprofils.xlsx	Mouillage E, été 2017 + hiver 2017/18
SPF15Aprofils.xlsx	Mouillage F, été 2015
SPF15Bprofils.xlsx	Mouillage F, hiver 2015/2016
SPF16Aprofils.xlsx	Mouillage F, été 2016
SPF16Bprofils.xlsx	Mouillage F, hiver 2016/2017
SPF17Aprofils.xlsx	Mouillage F, été 2017
SPF17Bprofils.xlsx	Mouillage F, début hiver 2017/18

Ces fichiers Excel contiennent chacun neuf feuilles de calcul avec les vitesses Est, Nord, verticale et la magnitude de vitesse horizontale (U) en m/s, la direction en degrés depuis le Nord, l'amplitude du signal pour chaque faisceau acoustique en *count*, et les données des capteurs auxiliaires (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 la tête de l'instrument au-dessus du fond est de 0,5 m aux sites A, B et C, et de 0,3 m au site D.

Données de glaces

SP_ABEF_glance.xlsx Fichier Excel avec les statistiques de glace aux sites A, B, E et F, avec une feuille Excel pour chaque site/hiver.

Niveaux d'eau

SP_ABC_niveaux_eau.xlsx Fichier Excel avec le niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen) et les surcotes/décotes (par rapport aux prédictions avec T_TIDE) aux sites A, B, E et F, avec une feuille Excel pour chaque site.

Maregraphe_Paspebiac.xlsx Fichier avec les données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac : le niveau d'eau par rapport à CGVD28, les prédictions avec T_TIDE, les surcotes/décotes (par rapport aux prédictions avec T_TIDE) et la température.

Références

- Bernatchez, P., Dubois, J.M.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58, 45-71.
- Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., Da Silva, L., 2015. Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis à Ouranos, 53 p. doi:10.13140/RG.2.1.4367.0881
- Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P., 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec Projet X008.1. Rapport remis au ministère des Transports du Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 226 p. + annexes. doi:10.13140/RG.2.1.3626.5122
- 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.
- Flater, D., 2008. XTide version 2.10. <http://www.flaterco.com/xtide/>. 2008-02-09.
- 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.
- Galbraith, P.S., Chassé, J., Caverhill, C., Nicot, P., Gilbert, D., Pettigrew, B., Lefavre, D., Brickman, D., Devine, L., and Lafleur, C., 2016. *Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2015*. Canadian Science Advisory Secretariat, Research Document 2016/056, v + 90 p.
- Galbraith, P.S., Chassé, J., Caverhill, C., Nicot, P., Gilbert, D., Pettigrew, B., Lefavre, D., Brickman, D., Devine, L., and Lafleur, C., 2017. *Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2016*. Canadian Science Advisory Secretariat, Research Document 2017/044, v + 91 p.
- Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2016. Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Collection Études et recherches en transport, Ministère des Transports du Québec, 297 p.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28, 929-937.
- Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., Saucier, F., 2009. Vulnérabilité des communautés côtières de l'est du Québec aux impacts des changements climatiques. *Houille Blanche*, 2009/2, 59-66. doi:10.1051/lhb/2009015

Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S., Villeneuve, R., 2014. Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques. Collection Études et recherches en transport, Ministère des Transports du Québec, 383 p.

USACE, 2002. Coastal Engineering Manual. US Army Corps of Engineers, Engineer Manual EM 1110-2-1100, Washington, D.C. (6 volumes).

Annexe 1 : 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 17 minutes). Deux méthodes différentes existent pour ces calculs : l'analyse spectrale et l'analyse temporelle (basée sur les passages à zéro, appelée *zero downcrossing*, abrégé ici en *zero-crossing*).

Il existe de nombreux paramètres statistiques de vagues. Leur disponibilité dépend du type d'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), la période du pic d'énergie du spectre des vagues T_p 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_{AST}	m	hauteur de l'eau mesurée avec le faisceau acoustique de l'AWAC (Acoustic Surface Tracking)
H_{m0}	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale
$H_{1/3}$	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues)
$H_{1/10}$	m	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
H_{max}	m	hauteur de la plus grande vague (méthode zero-crossing)
H_m	m	hauteur moyenne (méthode zero-crossing)
H_{rms}	s	hauteur <i>root-mean-square</i> (racine de la moyenne des carrés des hauteurs, méthode zero-crossing)
T_p	s	période du pic d'énergie du spectre des vagues
T_{02}	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme $(m_0/m_2)^{0.5}$
T_{01}	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme m_0/m_1
T_z	s	période moyenne des vagues (calcul par zero-crossing)
$T_{1/3}$	s	période moyenne du tiers des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)

$T_{1/10}$	s	période moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
T_{max}	s	période de la vague la plus grande (H_{max}) du burst (méthode zero-crossing)
T_p	s	période calculée du pic d'énergie, définie comme $m_2 m_1 m_0^{-2}$
Dir_m	°	direction moyenne (direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)
Dir_p	°	direction du pic d'énergie (direction moyenne de la bande de fréquence de T_p , direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)
Dir_{spread}	°	Dispersion directionnelle des vagues (\pm variance) calculée pour le pic de fréquence
UI		Index d'unidirecticité (<i>Unidirectivity index</i>)
U	m/s	vitesse moyenne dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP (près de la surface pour AWAC-AST, près du fond pour Aquadopp Profiler)
Udir	°	direction du courant moyen dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP
$QW_{usedspectrum}$		Méthode utilisée pour calculer les vagues non-directionnelles : 0 = pression, 1 = vitesses orbitales, 3 = AST (faisceau acoustique de l'AWAC, Acoustic Surface Track). 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).

ice-coverage_% 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.

Annexe 2 : Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues

Les principaux paramètres de vagues peuvent avoir subis un contrôle de qualité, dont le résultat est indiqué dans un flag hexadécimal à 3 chiffres. Le contrôle de qualité ne modifie pas les données elles-mêmes. L'utilisateur doit vérifier le flag de qualité avant d'utiliser une donnée. Les données marquées comme erronées ne doivent jamais être utilisées, sauf si une réévaluation du contrôle de qualité est effectuée en vérifiant la série temporelle du burst. Les données marquées comme douteuses peuvent être utilisées avec précaution, mais la qualité de la donnée devrait être réévaluée avant de baser une conclusion importante uniquement sur cette valeur.

Le chiffre de gauche (poids fort) indique la validité des données selon le Tableau 17.

Les deux chiffres hexadécimaux de droite indiquent pourquoi une valeur est marquée comme erronée ou douteuse, c'est-à-dire quel test elle a échoué. Huit erreurs possibles sont codées sur 8 bits selon le Tableau 18. Le résultat est représenté en hexadécimal comme deux chiffres. (Plusieurs codes d'erreur hexadécimaux peuvent s'additionner, par exemple $04 + 08 + 20 = 2C$)

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*

Tableau 17 – Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues, avec les flags utilisés dans ce projet et les valeurs équivalentes des flags utilisés dans le Système de gestion de données environnementale de l'ISMER (SGDE).

Flag projet	Description de la validité	Flag SGDE
0	Non vérifié	0
1	Bon	1
2	Douteux (probablement bon)	3
3	Erroné	4
9	Manquant (données n'ont jamais été enregistrées)	9

Tableau 18 – Codes explicatifs du contrôle de qualité.

bit	Valeur hexadécimale	Pour paramètres	tests manqués
1	01	tous	valeur trop basse
		Dir _m , Dir _{Tp}	direction venant de la côte
2	02	tous	valeur trop grande
3	04	tous	test de continuité temporelle
4	08	H _{max} , H _{1/10} , H _{1/3}	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} , T _{1/3}	comparaison de T ₀₁ , T ₀₂ , T _z , T _{1/10} , T _{1/3} (flag si différence à la médiane des T trop grandes)
		T _p , T _{pc}	comparaison de T _p et T _{pc} avec T ₀₂
		Dir _m , Dir _{Tp}	comparaison de Dir _m et Dir _{Tp}
		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 _m , Dir _{Tp} , Spr _{Dir} , UDI	période trop courte pour déterminer la direction (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

* 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 tout ou sur une partie du burst.