

**Stations d'observation des conditions maritimes
2019-2021 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent
pour les problèmes d'érosion côtière**

Projet MTQ-ISMER R841.1

Rapport final

Présenté au ministère des Transports du Québec

Urs Neumeier et Sylvain Joly

Décembre 2021

Référence complète : Neumeier, U., Joly, S., 2021. Stations d'observation des conditions maritimes 2018-2021 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, xiii + 97 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 " *Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière* ", financé par le ministère des Transports du Québec (MTQ). 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.

Quatre houlographes ont été installés du printemps 2018 au printemps 2021 au large de Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière-Pentecôte et du printemps 2020 au printemps 2021 au large de Paspébiac. Ces instruments mesurent les vagues, les courants, l'épaisseur des glaces et les niveaux d'eau. Également, le projet a continué les mesures du niveau d'eau dans la baie des Chaleurs avec un marégraphe installé au quai de Paspébiac de juin 2020 à avril 2021.

Pour chaque site, les données obtenues sur ces trois années de monitoring sont mises en perspective avec les données acquises précédemment. À St-Ulric, les tempêtes interviennent encore majoritairement au cours de l'automne et peuvent se développer jusqu'au mois de janvier, voire février comme ce fut le cas en 2021. Les tempêtes enregistrées de mai 2018 à mai 2021 ont généré des vagues plus fortes que lors de la période 2010-2014 mais légèrement moins élevées que lors de la période 2014-2018. La tempête la plus forte a généré des vagues de 4,05 m en provenance du nord-nord-est au début janvier 2019.

Au Cap d'Espoir, les tempêtes interviennent également durant l'automne, mais peuvent être aussi recensées jusqu'au début février. Quelques tempêtes en avril ont été mesurées. Les vagues mesurées lors de ces événements extrêmes entre mai 2018 à mai 2021 sont les moins élevées comparativement à la période 2010-2018. La tempête la plus forte (le même événement qu'à St-Ulric) a généré des vagues de 5,81 m en provenance de l'est-sud-est au début janvier 2019.

À Rivière-Pentecôte, il y a eu une diminution nette de l'intensité et la fréquence des événements de tempête avec très peu de vagues dépassant les 4 m. Les vagues de tempêtes les plus élevées ont atteint 4,29 m et provenaient de l'est, il s'agit de la même tempête enregistrée aux 2 autres sites précédents au début janvier 2019.

Enfin, à Paspébiac, la tempête qui a généré les plus hautes vagues dans la baie des Chaleurs a eu lieu le 2 février 2021 et les vagues ont atteint 3,17 m de hauteur significative. Il s'agit du record pour ce secteur sur six années d'enregistrement. Hormis cette tempête issue de

l'est (101°), la presque totalité des plus fortes vagues sur la période 2018-2021 provenaient du secteur ouest, soit de l'intérieur de la baie des Chaleurs. À l'inverse des autres sites, la baie des Chaleurs présente une tendance à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes par rapport à la période 2015-2018.

Les données de glace montrent une tendance à la diminution de la couverture hivernale des glaces, associée à un amincissement des floes de glace. Cependant cette tendance sur seulement 3 ans peut s'avérer très ponctuelle. La poursuite du monitoring des conditions océanographiques sur plusieurs années permettrait de confirmer ou d'infirmer ce signal.

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. Pendant le présent projet, il n'y a pas eu d'événements exceptionnels. Lors des projets précédents aux mêmes sites, les surcotes et les niveaux marins absolus ont été plus élevés. Ainsi, la plus forte surcote durant ce projet à Saint-Ulric était de 0,87 m, comparé à 1,32 m en décembre 2016, à Cap d'Espoir de 0,77 m comparé à 1,05 en janvier 2018, à Rivière-Pentecôte de 0,88 m comparé à 1,36 m en décembre 2016, et à Paspébiac de 0,83 m comparé à 1,13 m en janvier 2018. La plus forte surcote enregistrée par le marégraphe dans la marina de Paspébiac était 0,87 m lors de la tempête du 3 février 2021, alors qu'en janvier 2018 la surcote mesurée était de 1,08 m. Le signal de surcote est similaire dans le port de Paspébiac et au site F, avec des différences de ± 10 cm.

Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	xi
Remerciements.....	xiii
1. Introduction	1
2. Acquisition des données	3
2.1. Sites d'étude	3
2.2. Description des instruments des mouillages	10
2.3. Configuration des mouillages.....	11
2.4. Programmation des mouillages	13
2.5. Nomenclature	15
2.6. Déroulement des missions et des déploiements	16
2.7. Description du marégraphe de Paspébiac.....	19
3. Traitement des données	23
3.1. Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants.....	23
3.2. Traitement et contrôle de qualité des données de vagues	24
3.3. Traitement et contrôle de qualité des données de courants	29
3.4. Traitement des données de glace.....	30
3.5. Traitement des données du marégraphe	32
3.6. Archivage des données.....	36
4. Résultats des instruments.....	39
4.1. Données de vagues	39
4.2. Données de courants.....	60
4.3. Glaces hivernales.....	63
4.4. Niveaux d'eau des mouillages.....	69
4.5. Niveau d'eau du marégraphe de Paspébiac	80
5. Synthèse des conclusions et recommandations	87
6. Description des fichiers	89
Références.....	93
Annexe 1 : Liste des paramètres de vagues	94
Annexe 2 : Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues	96

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 – 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 des projets précédents (points noirs).....	9
Figure 7 – 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.....	12
Figure 8 – 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.....	13
Figure 9 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes).	14
Figure 10 – Périodes de déploiement des mouillages aux quatre sites avec le nom de chaque déploiement (en bleu déploiements financés par le MSP, en magenta déploiements du projet CC07.1, en vert déploiements du projet CC17.1, en rouge déploiements du présent projet R841.1). L'asymétrie des périodes estivales et hivernales est due aux disponibilités très limitées des bateaux de pêches pour opérer.	18
Figure 11 – Position du marégraphe (flèche verte) dans le port de Paspébiac.	21

Figure 12 – Schéma et photo du montage du marégraphe. L'altitude des capteurs de pression variaient de quelques millimètres d'un déploiement à l'autre.	22
Figure 13 – Vue générale du marégraphe installé dans l'angle du quai et du tube temporaire utilisé pour les mesures manuelles.	22
Figure 14 – 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).....	27
Figure 15 – Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1).....	28
Figure 16 – Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.	30
Figure 17 – 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.	32
Figure 18 – Mesures manuelles de niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Paspébiac le 15 novembre 2020 avant et après le remplacement du marégraphe.....	34
Figure 19 – Relation entre la température de l'eau et les différences de niveaux d'eaux mesurés par les deux capteurs de pression installés en parallèle pour le marégraphe de Paspébiac durant le déploiement 2020A (gauche) et le déploiement 2020B (droite).	35
Figure 20 – Exemple des petites oscillations avec des périodes de 5-20 minutes, ainsi que du lissage avec un filtre passe-bas.	36
Figure 21 – 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.....	37
Figure 22 – Exemples de jeu de données disponibles sur le site internet de l'OGSL pour les sites de Rivière-Pentecôte (haut) et de Paspébiac (bas).	38
Figure 23 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} à St-Ulric et Paspébiac en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 (2015-2018 à Paspébiac) et 2018-2021.	40
Figure 24 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues à Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 et 2018-2021.....	41
Figure 25 – Évolution temporelle des événements de grosses tempêtes aux quatre sites d'études en se basant sur l'ensemble des données disponibles. Les valeurs correspondent à la moyenne sur un an des 3 plus fortes tempêtes. La date de coupure pour discriminer les années a été choisie au 1 ^{er} mai. À noter qu'au	

site de St-Ulric, il n’y a pas eu d’enregistrement de données du 11 mars au 17 juin 2015, à Cap d’Espoir du 1 ^{er} février au 22 mai 2015, et à Rivière Pentecôte du 10 mars au 22 juin 2015.	42
Figure 26 – Roses de vagues pour St-Ulric et Cap d’Espoir pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d’occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L’échelle radiale exponentielle (0,001 / 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.	44
Figure 27 – Roses de vagues pour Rivière-Pentecôte et Paspébiac pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d’occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L’échelle radiale exponentielle (0,001 / 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.	46
Figure 28 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	51
Figure 29 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site B (Cap d’Espoir). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	52
Figure 30 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	53
Figure 31 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site F (Paspébiac). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	54
Figure 32 – Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des plus fortes tempêtes observées aux sites A, B, E et F durant le projet ($n = 44;44;28;24$). Les triangles en bleu correspondent à la période 2010- avril 2018 et les triangles en rouge, mai 2018 - juin 2021.	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 évènements au-dessus du 93 ^e percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.....	58
Figure 35 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites A et B de mai 2018 à juin 2021.....	61
Figure 36 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites E et F de juin 2018 à juin 2021.	62
Figure 37 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les trois hivers du projet...65	
Figure 38 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les trois hivers du projet.	66
Figure 39 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant les trois hivers du projet (à noter que l'instrument n'a pu enregistrer de données valides de glace le premier hiver à partir du 9 janvier 2019).	67
Figure 40 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers du projet.	68
Figure 41 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	72
Figure 42 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	73
Figure 43 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	74
Figure 44 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) au cours de l'année prévue au projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).	75
Figure 45 – Niveaux d'eau mesurés, prédictions de marées avec T_TIDE et surcotes pendant l'événement du 25 février 2019.	76
Figure 46 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2020-06-22 au 2021-04-01: niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.	82
Figure 47 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac et par l'AWAC F au large de Paspébiac. Détail sur huit jours en janvier 2021. Pour AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximatif par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.....	83

Figure 48 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac et par l'AWAC F au large de Paspébiac. La différence entre les deux séries montre des variations saisonnières liées à la salinité et la température de l'eau. Pour AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximatif par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.....84

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).	10
Tableau 3 – Synthèse des paramètres de programmation des instruments.	15
Tableau 4 – Début et fin approximative de chaque période de déploiement. Pour les dates exactes de chaque mouillage, voir Tableau 2.	16
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.....	19
Tableau 6 – Liste des visites de terrain pour le marégraphe de Paspébiac.	20
Tableau 7 – Signification des différents bits de l’octet du flag de qualité des données de courants.	29
Tableau 8 – Détails de chaque déploiement du marégraphe de Paspébiac (instrument utilisé, période de mesure en heure UTC, offset des instruments, altitude du capteur de pression de l’instrument inférieur (instr. inf.) par rapport au zéro des cartes marines).	34
Tableau 9 – Les 40 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2021 aux sites A et B. Les tempêtes de la période avant mai 2018 sont surlignées en grisé.	48
Tableau 10 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2021 aux sites E et F. Les tempêtes de la période avant mai 2018 sont surlignées en grisé.	49
Tableau 11 – Hauteurs de vagues H_{m0} pour différentes périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel.	59
Tableau 12 – Statistiques sur les couvertures de glace annuelles à chaque site.	64
Tableau 13 – Liste des 18 plus fortes surcotes et des 18 plus fortes décotes observées aux sites A et B, 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.	77
Tableau 14 – Liste des 12 plus fortes surcotes et des 12 plus fortes décotes observées aux sites 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.	78
Tableau 15 – Liste des 18 plus hauts niveaux marins observés aux sites A et B et les 12 plus hauts niveaux marins observés au sites E et F, 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.	79
Tableau 16 – Liste des 15 plus fortes surcotes, des 15 plus fortes décotes et des 15 plus haut 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. Les événements survenus pendant que le présent projet s'occupait du marégraphe sont marqués en gras.	85
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).....	96
Tableau 18 – Codes explicatifs du contrôle de qualité.	97

Remerciements

Les mouillages ont été préparés et entretenus par Bruno Cayouette. La plupart des opérations de terrain (mouillages et marégraphes) ont été réalisées par Bruno Cayouette, Christian Boutot, Frédéric Bélanger, Zélie Schuhmacher, Gilles Desmeules et Sylvain Joly.

Les mouillages ont été récupérés et réinstallés avec des bateaux de pêche des différents ports : *Le Belle Mer* et *Corina Pride* (pêcheur Roger Ouellet) et *L'Anse aux Basques* (pêcheur Sébastien Labonté) à Matane; *Miss Amy Lynn* (pêcheur Gilles Duguay) et *Kalynic* (pêcheur Carmel Dubé) à Sainte-Thérèse-de-Gaspé/Grande-Rivière; *Jérôme Isabelle* (pêcheur Sylvain Gauthier) à Rivière-Pentecôte. La mise en place initiale des mouillages du projet a été effectuée lors de la dernière mission du projet précédent 2014-2017 financé par le MTQ (*projet MTQ-ISMER CC07.1*) ou lors d'un autre projet avec le MTQ pour le site de Paspébiac (*projet MTQ-ISMER CC17.1*). Le *Néreis*, bateau de 4,7 m de l'ISMER a été utilisé pour le marégraphe de Paspébiac.

Le plongeur Mario Déraspe a 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.

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). Pierre Gaudreau et Michel Michaud ont assuré la coordination du projet au MTQ.

1. Introduction

La côte est un environnement dynamique, où le trait de côte s'ajuste continuellement à l'influence de diverses forces (vagues, courants, glaces hivernales) en fonction de la lithologie du littoral et de la disponibilité de sédiments meubles. Le recul du trait de côte, l'érosion côtière, est un processus souvent naturel qui est aussi nécessaire pour l'apport en sédiments des secteurs adjacents. Toutefois, l'érosion côtière entre en conflit à l'occupation statique du territoire côtier par nos sociétés modernes. 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, 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).

L'érosion côtière est principalement causée par les vagues avec aussi des contributions par les courants et les glaces hivernales, et l'action de ces agents est modulée par les niveaux d'eau. En effet, le niveau d'eau détermine l'étage de la plage qui est principalement remanié par les vagues, lors de tempêtes majeures. En cas de hauts niveaux dus 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).

Une bonne connaissance du climat de vague est donc nécessaire pour étudier la morphodynamique littorale et surtout pour planifier les interventions de génie côtier. Pour définir le climat de vague d'un secteur, il est essentiel d'avoir des séries temporelles de hauteur, période et direction des vagues couvrant l'année complète, incluant la fin de l'automne et le début de l'hiver, qui sont la période avec les plus fortes tempêtes. De plus, les séries temporelles doivent être assez longues pour pouvoir estimer les périodes de retour des événements extrêmes. Il est recommandé de calculer la période de retour seulement de 2-3 fois la durée de la série temporelle disponible, par exemple 10 années de données devraient être utilisées seulement pour estimer l'événement extrême se produisant tous les 20 ou 30 ans (USACE, 2002).

Le présent projet financé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) a deux 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). Il fait la suite de plusieurs projets qui avaient déjà mesuré les vagues à ces sites.

Un premier 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 pendant quatre ans. À Sept-Îles les vagues avaient aussi été mesurées près de la côte pendant le semestre estival.

Ensuite, le projet CC07.1 intitulé "*Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière*", qui avait été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, 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). Une station de marégraphe a aussi été ajoutée dans le port de Paspébiac. Ce projet a enregistré des données jusqu'au printemps 2018.

Le projet CC17.1 intitulé "*Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town*", qui a été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, a pris en charge pendant deux ans (printemps 2018 à printemps 2020) des mesures de vagues au site de Paspébiac et du marégraphe de Paspébiac, en plus d'étudier en détail le secteur de Hope Town.

Le présent projet R841.1 prend la suite de ces différents projets en mesurant les vagues à Saint-Ulric, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte du printemps 2018 au printemps 2021, ainsi que les vagues à Paspébiac et la marée dans le port de Paspébiac du printemps 2020 au printemps 2021.

Ce rapport décrit les instruments et les méthodes utilisés, puis présente les données récoltées durant les trois années qu'a duré le 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.

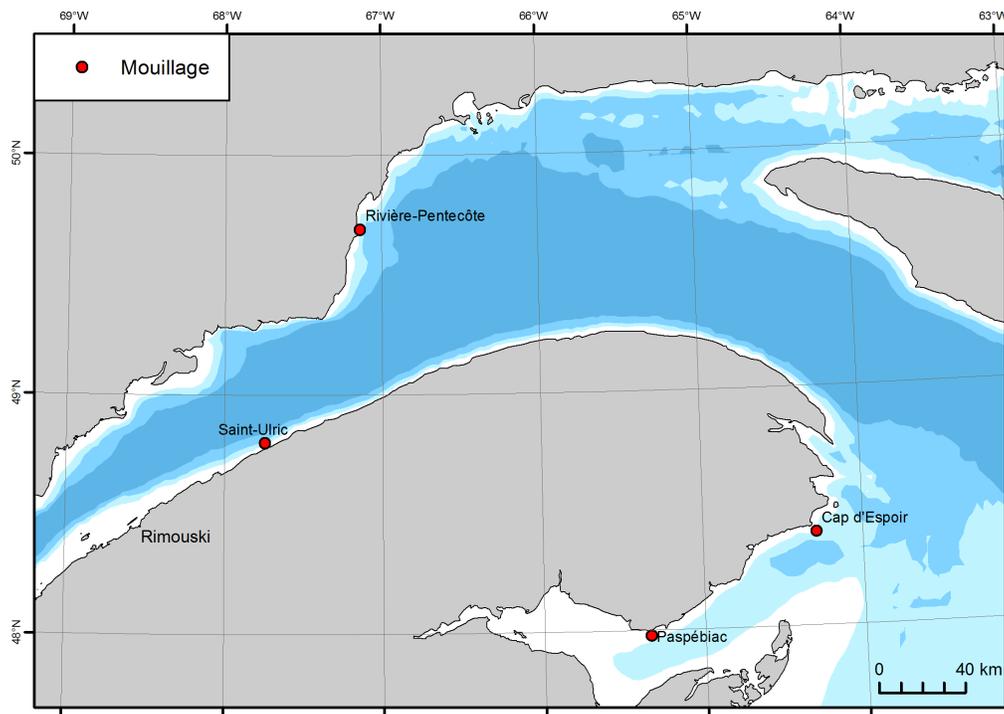


Figure 1 – Position des sites d'études dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

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 degrés 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 $+42^{\circ}$.

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 elle 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.

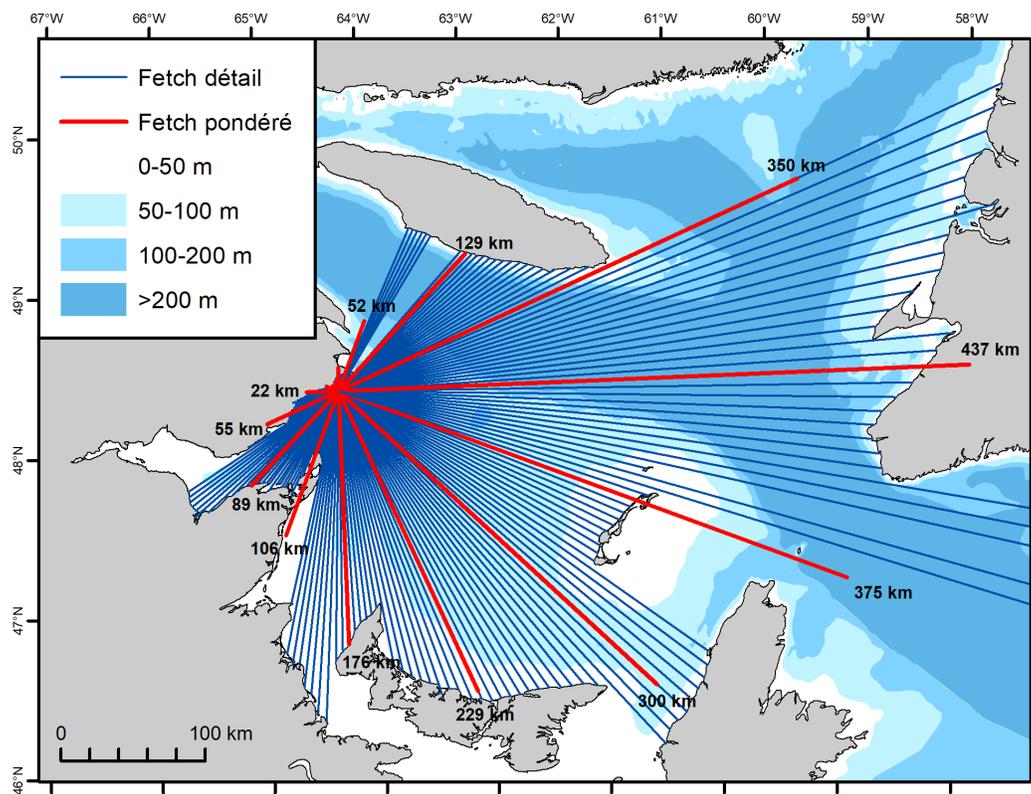
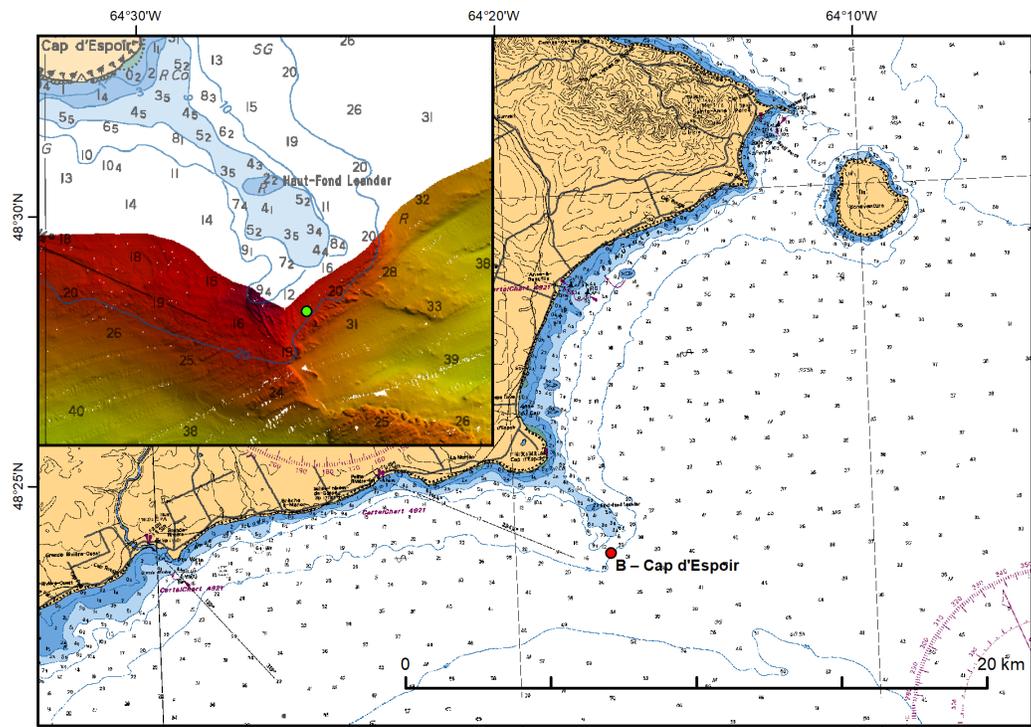


Figure 3 – (Haut) Position du mouillage B (Cap d'Espoir); l'agrandissement montre la position exacte (point vert) sur le flanc externe du haut-fond Leander avec la bathymétrie multifaisceau du Service hydrographique du Canada; Profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage B par secteur de 3° en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

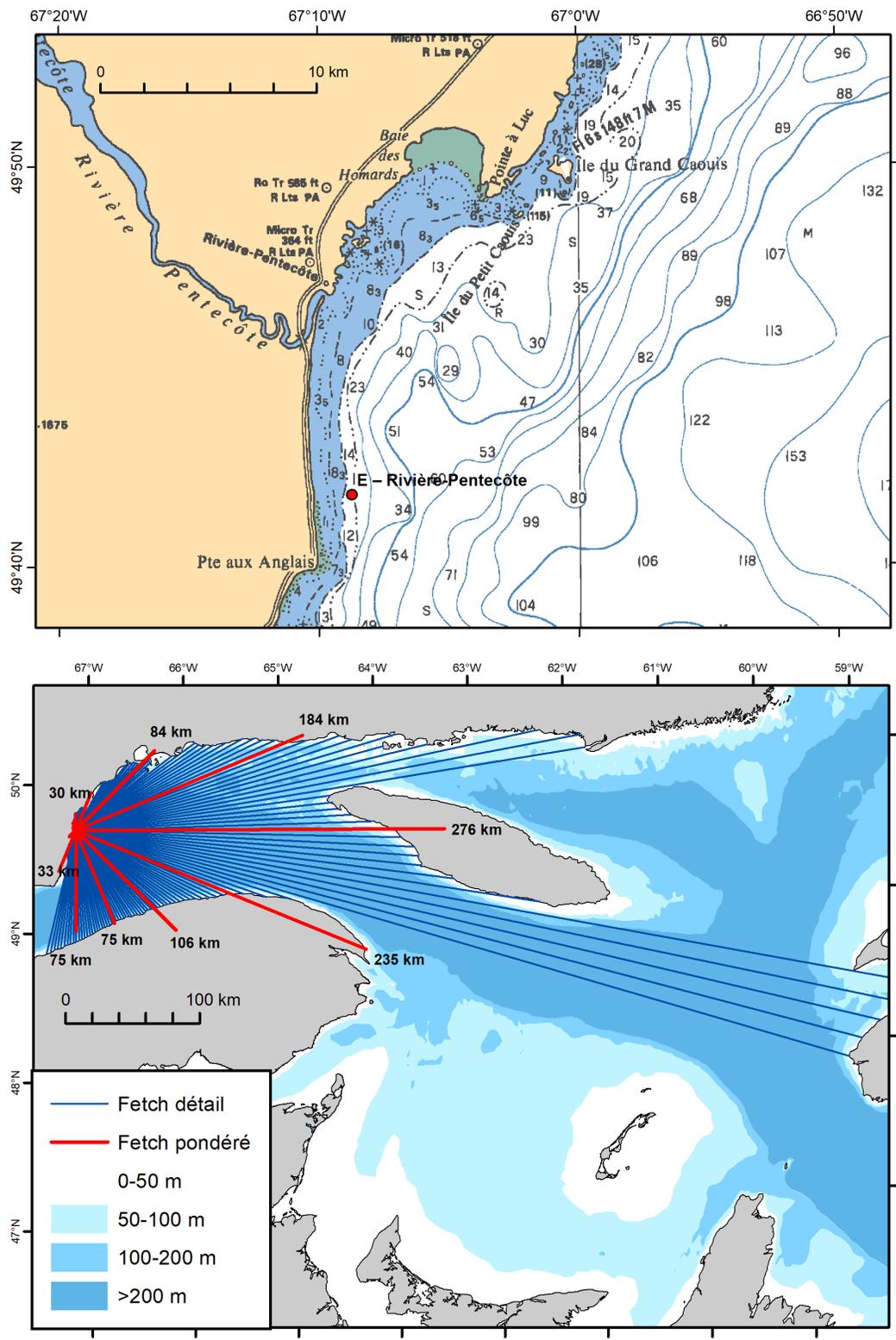


Figure 4 – (Haut) Position du mouillage E (Rivière-Pentecôte); profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage E par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

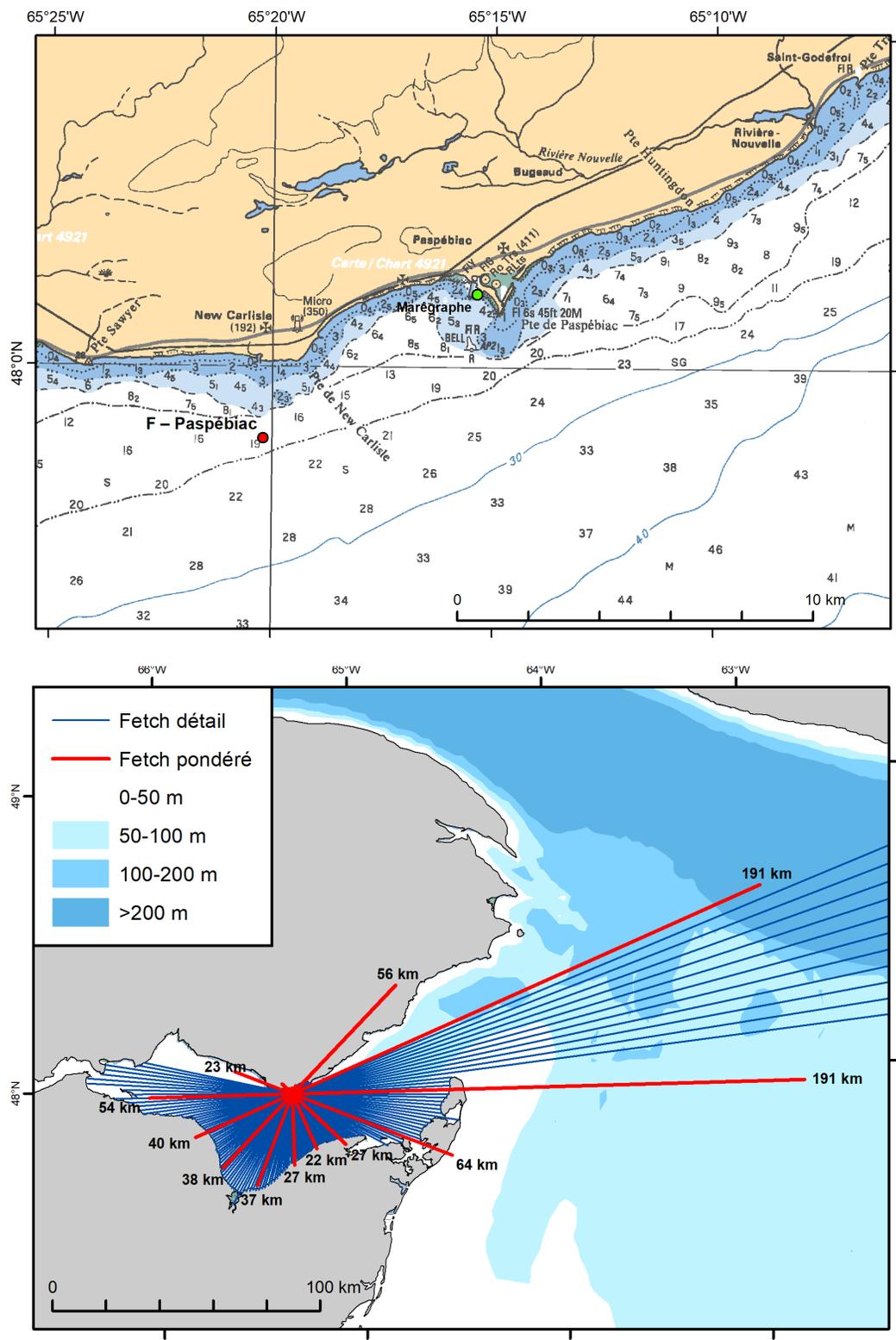


Figure 5 – (Haut) Positions du mouillage F (Paspébiac) et du marégraphe dans le port de Paspébiac; profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage F par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

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 6 indiquent la position exacte de chaque mouillage.

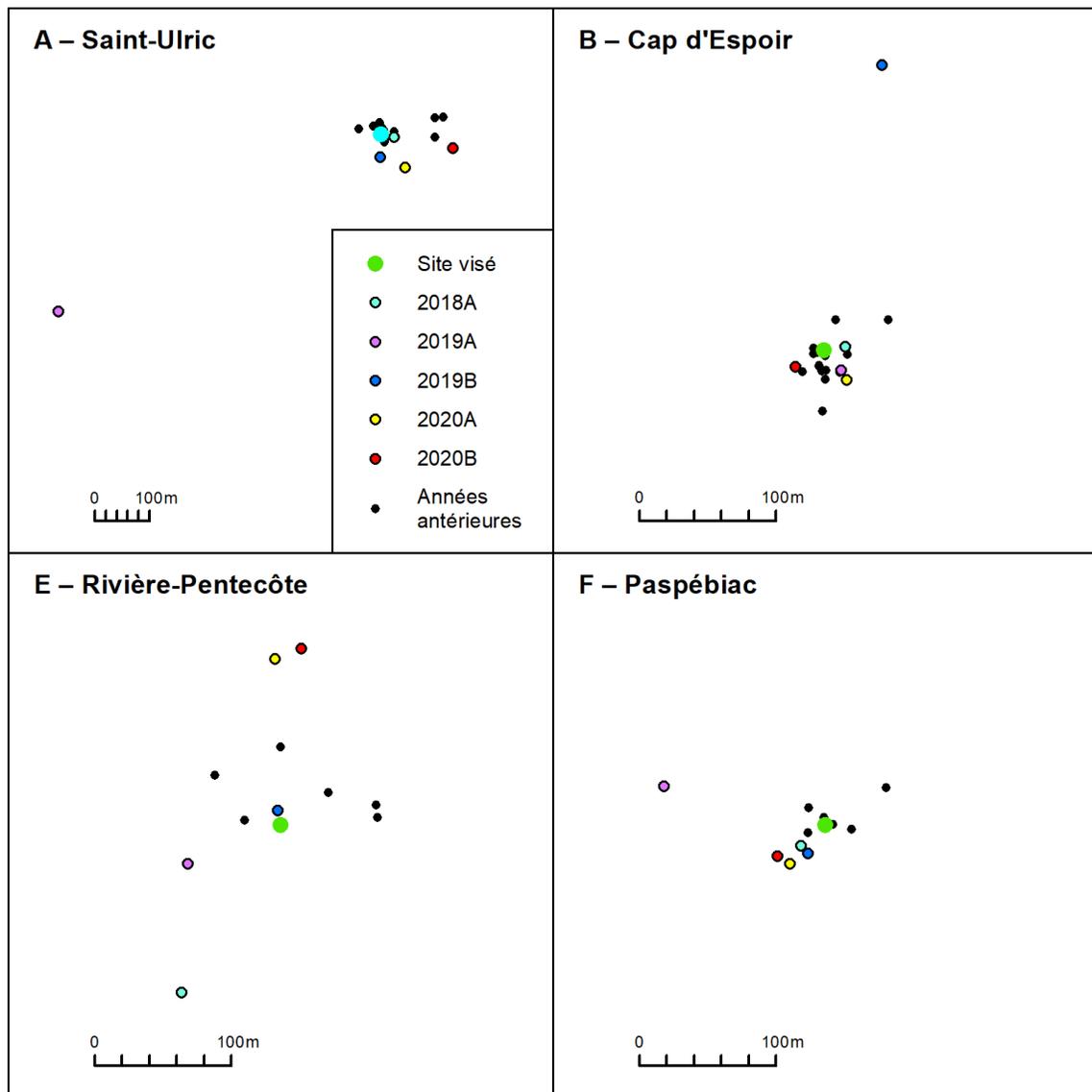


Figure 6 – Vue détaillée de la position de chacun des déploiements aux quatre sites, ainsi que du point visé (cible). En plus des déploiements du présent projet (gros cercles), les déploiements des projets précédents (points noirs).

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
2018A	SPA18A	2018-05-15 10:06	2019-07-04 12:06	48° 47,997' N	67° 44,580' W	31,9
2019A	SPA19A	2019-06-11 10:10	2019-10-22 07:10	48° 47,823' N	67° 45,087' W	31,5
2019B	SPA19B	2019-10-22 08:10	2020-05-28 05:10	48° 47,977' N	67° 44,601' W	31,5
2020A	SPA20A	2020-05-28 06:10	2020-10-04 13:10	48° 47,967' N	67° 44,564' W	31
2020B	SPA20B	2020-10-04 15:09	2021-05-09 12:09	48° 47,986' N	67° 44,492' W	30,9
<i>B – Cap d'Espoir</i>						
cible B				48° 23,350' N	64° 17,350' W	37,1
2018A	SPB18A	2018-08-01 12:05	2019-07-05 10:05	48° 23,351' N	64° 17,337' W	37,2
2019A	SPB19A	2019-07-05 11:10	2019-10-09 06:10	48° 23,342' N	64° 17,340' W	37,3
2019B	SPB19B	2019-10-09 08:09	2020-06-21 13:09	48° 23,462' N	64° 17,308' W	35,2
2020A	SPB20A	2020-06-21 14:10	2020-10-23 05:10	48° 23,338' N	64° 17,337' W	37,3
2020B	SPB20B	2020-10-23 06:09	2021-05-30 05:09	48° 23,344' N	64° 17,367' W	36,9
<i>E – Rivière-Pentecôte</i>						
cible E				49° 41,770' N	67° 08,700' W	34
2018A	SPE18A	2018-09-06 11:06	2019-07-18 13:06	49° 41,704' N	67° 08,761' W	28,4
2019A	SPE19A	2019-07-18 14:10	2019-10-26 07:10	49° 41,755' N	67° 08,758' W	28,5
2019B	SPE19B	2019-10-26 08:09	2020-07-01 09:09	49° 41,776' N	67° 08,702' W	30,5
2020A	SPE20A	2020-07-01 11:10	2020-10-04 05:10	49° 41,836' N	67° 08,703' W	31,1
2020B	SPE20B	2020-10-04 07:10	2021-05-20 04:10	49° 41,840' N	67° 08,687' W	31,7
<i>F – Paspébiac</i>						
cible F				47° 58,900' N	65° 20,200' W	34
2018A §	SPF18A	2018-04-10 14:11	2018-10-15 07:11	47° 58,892' N	65° 20,215' W	33
2018B §	SPF18B	2018-10-15 08:10	2019-05-10 14:10	47° 58,898' N	65° 20,185' W	33
2019A §	SPF19A	2019-05-10 17:11	2019-10-16 06:11	47° 58,917' N	65° 20,295' W	32,3
2019B §	SPF19B	2019-10-16 08:10	2020-06-21 04:10	47° 58,889' N	65° 20,211' W	33,4
2020A	SPF20A	2020-06-21 06:11	2020-10-23 12:11	47° 58,885' N	65° 20,222' W	33
2020B	SPF20B	2020-10-23 13:09	2021-05-30 12:09	47° 58,888' N	65° 20,229' W	32,9

Profondeur sous le zéro des cartes marines.

§ Les déploiements SPF18A, SPF18B, SPF19A et SPF19B à Paspébiac ont été financé avec le projet MTQ-ISMER CC17.1.

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 60 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 7) ou en uréthane (modèle GP-TRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×127×56 cm, Figure 8), 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;

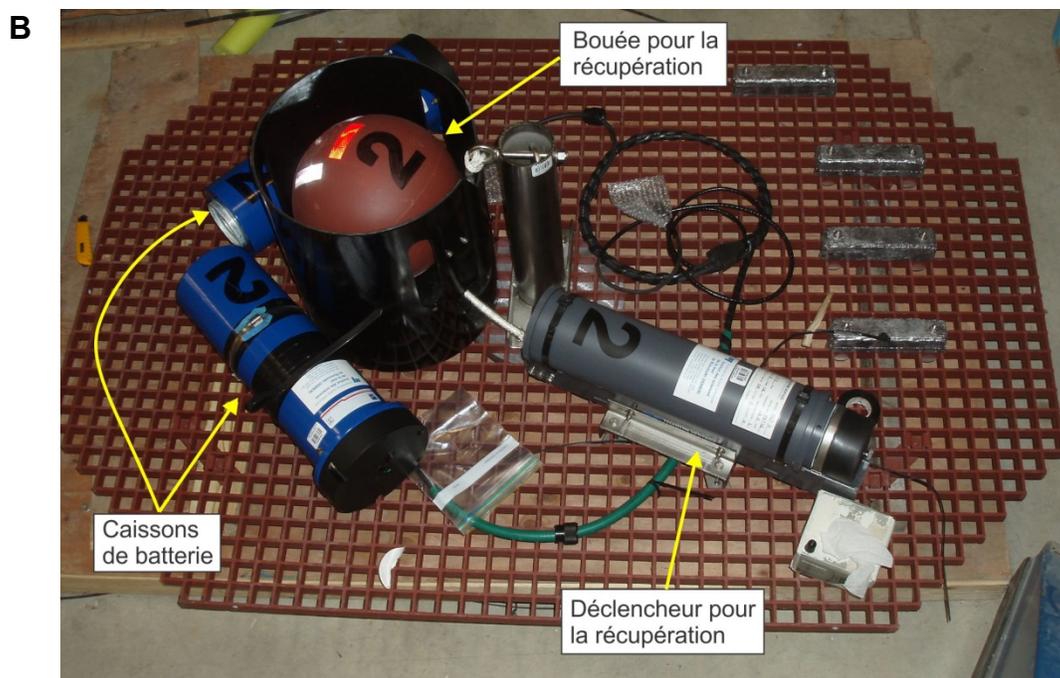
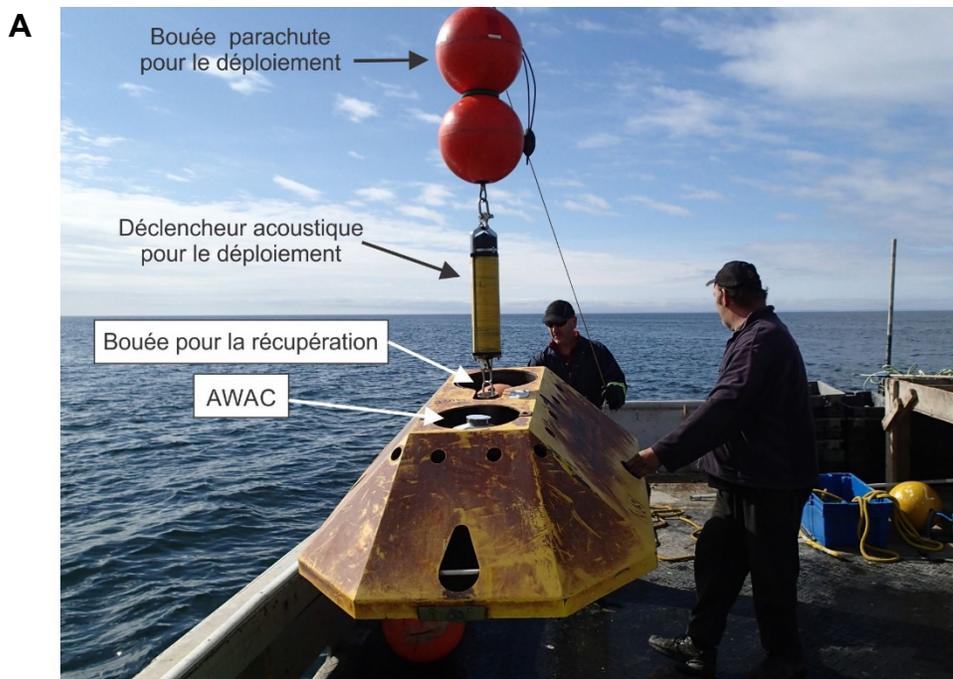


Figure 7 – Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée 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 contrepois 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.

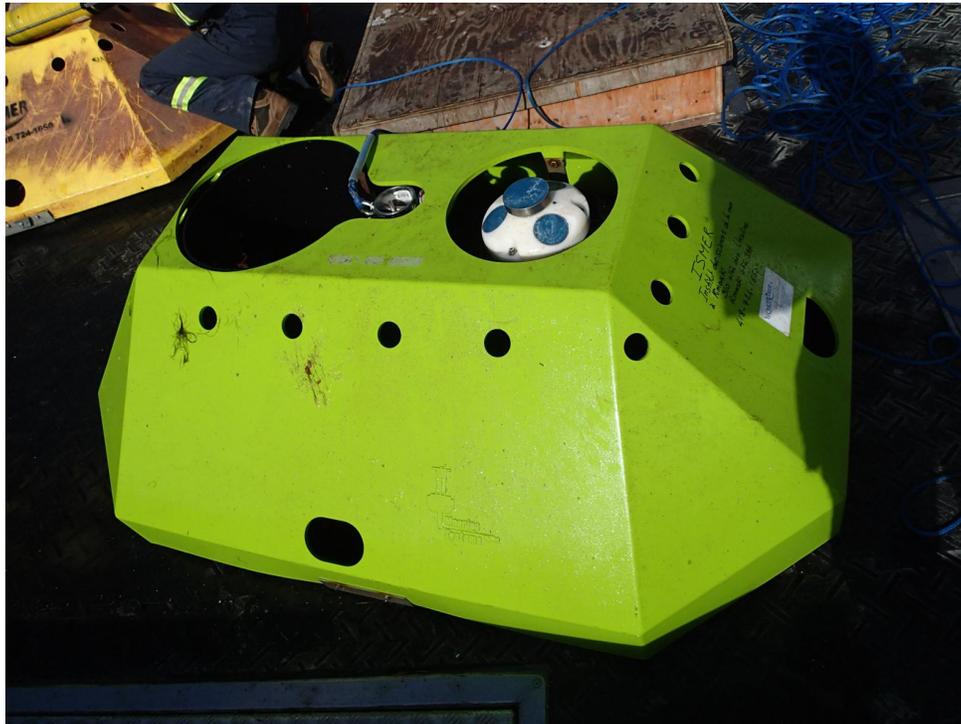


Figure 8 – Plateforme GP-TRBM avec AWAC après la récupération à bord du bateau de pêche Miss Amy Lynn. La bouée utilisée pour la récupération a été relâchée par le largueur acoustique et la corde en Spectra est déroulée.

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 9) :

- 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.

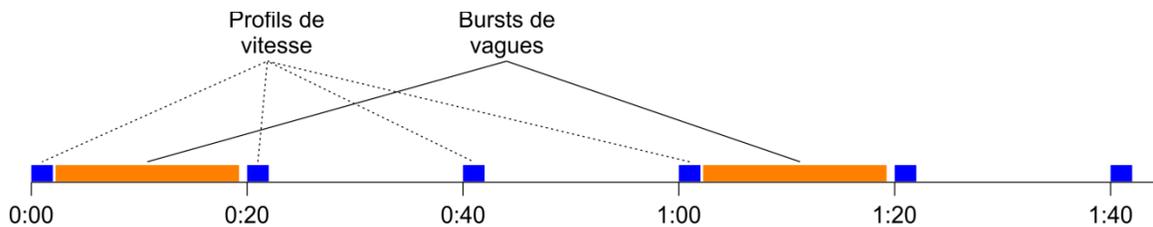


Figure 9 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes).

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
Blanking distance	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Période moyennée ^a	80 – 150 s	60 – 120 s	60 – 140 s	75 – 150 s
Measurement load ^a	50 %	25 - 50 %	25 - 50 %	25 - 50 %
Power level	high	idem	idem	idem
Coordinate system	ENU	idem	idem	idem
Compass update rate	20 min.	idem	idem	idem
Salinité	29	30	31	32
Vitesse du son	calculé ^b	idem	idem	idem
Précision vitesse horiz.	1,6 – 1,9 cm/s	1,6 – 3,2 cm/s	1,5– 3,2 cm/s	1,4 – 2,2 cm/s
Précision vitesse vert.	0,5 – 0,6 cm/s	0,5 – 1 cm/s	0,5 – 1 cm/s	0,5 – 0,7 cm/s
Vagues				
Intervalle entre mesures	1 heure	idem	idem	idem
Fréquence	1 Hz / 2 Hz ^c	idem	idem	idem
Durée	1024 s	idem	idem	idem
Wave sampling cell size	dynamique	idem	idem	idem

^a 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.

^b 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.

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.

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
2018A	18A	avril/mai 2018	octobre 2018 (F) juillet 2019 (A, B, E) ^a
2018B	18B	octobre 2018 (F)	mai 2019 (F) ^a
2019A	19A	mai / juillet 2019	octobre 2019
2019B	19B	octobre 2019	mai / juillet 2020
2020A	20A	mai / juillet 2020	octobre 2020
2020B	20B	octobre 2020	mai 2021

^a Uniquement le mouillage F a été remplacé à l'automne 2018 et redéployé pour la période 2018B. Les autres mouillages sont restés à l'eau du printemps 2018 à l'été 2019 (période 2018A rallongée).

2.6. Déroulement des missions et des déploiements

Les déploiements 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 scientifiques 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 trois 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 10. Néanmoins il y a eu deux problèmes de récupération de mouillage qui 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 au mois de juin 2019 : Échec de la récupération du mouillage, la bouée était bloquée et n'a pu être libérée en surface. Le plongeur Mario Déraspe a permis la libération de la bouée et quelques jours plus tard l'instrument est récupéré sans souci.
- Cap d'Espoir au mois de juin 2019 : Comme pour St-Ulric, la bouée était bloquée malgré la réponse positive du déclencheur acoustique et la récupération a nécessité l'intervention du plongeur Mario Déraspe pour libérer la bouée. L'instrument est récupéré quelques jours plus tard.

Pour ce projet, il n'y a eu que deux problèmes mineurs lors de la récupération de l'instrument qui ont nécessité l'intervention d'un plongeur et des sorties de bateaux supplémentaires. Par rapport aux nombreux problèmes rencontrés lors du dernier projet, c'est encourageant. Ces deux incidents sont certainement liés au fait que les instruments ont été immergés plus longtemps que d'habitude (~1 an), augmentant ainsi le risque d'échec lors de la récupération à cause de l'ensablement des mécanismes de libération de la bouée ou un emmêlement de la corde.

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.

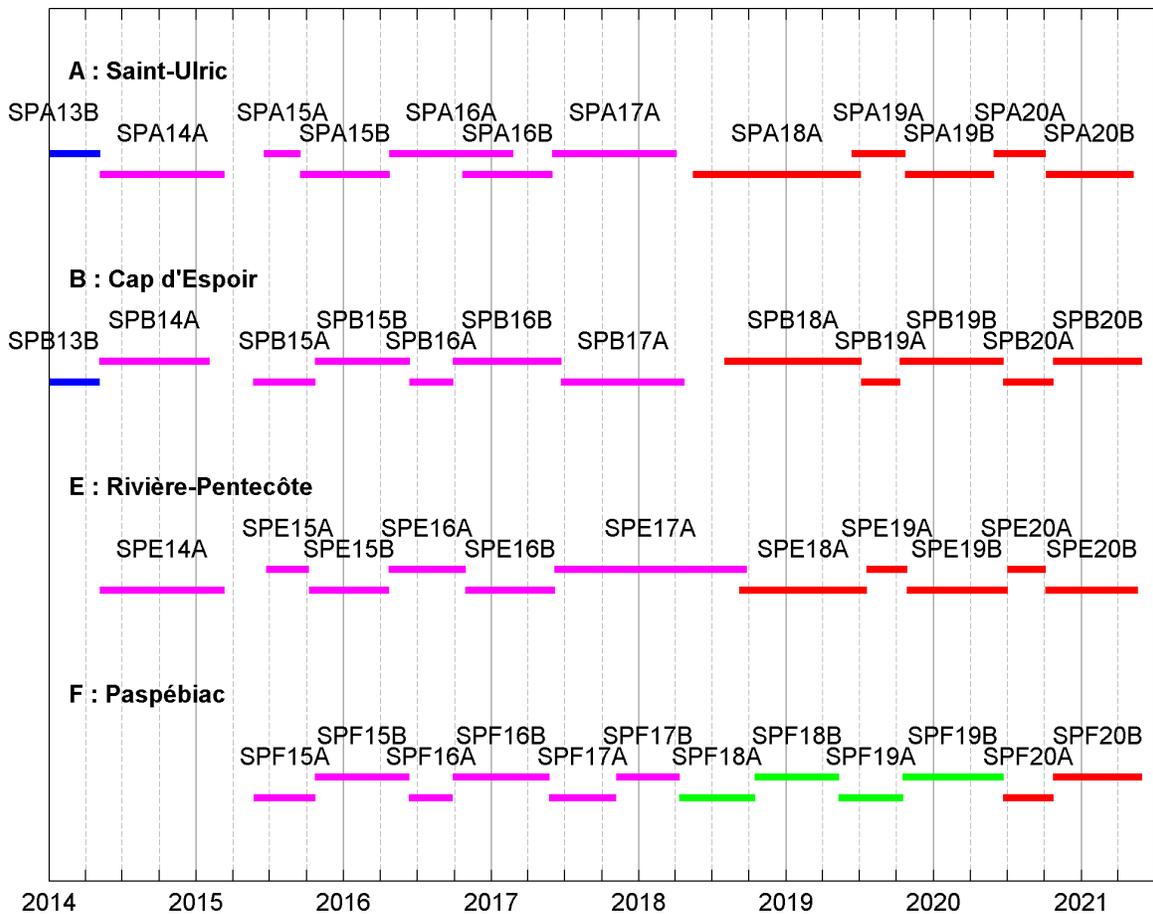


Figure 10 – Périodes de déploiement des mouillages aux quatre sites avec le nom de chaque déploiement (en bleu déploiements financés par le MSP, en magenta déploiements du projet CC07.1, en vert déploiements du projet CC17.1, en rouge déploiements du présent projet R841.1). L'asymétrie des périodes estivales 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
2018-04-10	SPF18A	Paspébiac	1813_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2018-05-15	SPA18A	St-Ulric	1814_MTQ	été-hiver	Belle Mer
2018-08-01	SPB18A	Cap d'Espoir	1815_MTQ	été-hiver	Miss Amy Lynn
2018-09-06	SPE18A	Rivière-Pentecôte	1816_MTQ	été-hiver	Jérôme Isabelle
2018-10-15	SPF18B	Paspébiac	1817_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2019-05-10	SPF19A	Paspébiac	1906_MTQ	été	Corina Pride
2019-06-11	SPA19A	St-Ulric	1909_MTQ	été	L'Anse aux Basques
2019-07-05	SPB19A	Cap d'Espoir	1910_MTQ	été	Kalynic
2019-07-18	SPE19A	Rivière-Pentecôte	1911_MTQ	été	Jérôme Isabelle
2019-10-09	SPB19B	Cap d'Espoir	1921_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2019-10-16	SPF19B	Paspébiac	1922_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2019-10-22	SPA19B	St-Ulric	1923_MTQ	hiver	L'Anse aux Basques
2019-10-26	SPE19B	Rivière-Pentecôte	1924_MTQ	hiver	L'Anse aux Basques
2020-05-28	SPA20A	St-Ulric	2024_MTQ	été	L'Anse aux Basques
2020-06-21	SPF20A	Paspébiac	2025_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2020-06-21	SPB20A	Cap d'Espoir	2025_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2020-07-01	SPE20A	Rivière-Pentecôte	2026_MTQ	été	L'Anse aux Basques
2020-10-03	SPE20B	Rivière-Pentecôte	2027_MTQ	hiver	L'Anse aux Basques
2020-10-03	SPA20B	St-Ulric	2027_MTQ	hiver	L'Anse aux Basques
2020-10-23	SPB20B	Cap d'Espoir	2028_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2020-10-23	SPF20B	Paspébiac	2028_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn

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. Le système utilise deux instruments RBR TGR-2050 mesurant la pression et la température, qui ont été fournis par le MTQ. Ils sont placés dans un tube en plastique ABS noir de 3,666 m de long et de 5 cm de diamètre intérieur, l'un directement sur l'autre. Le capteur de pression du premier instrument est à environ 93 mm de la base du tube, celui du second instrument est 265 mm plus haut. 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 11). 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 12 et Figure 13). 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. De plus, ces instruments achetés il y a une dizaine d'année par le MTQ ont un capteur de pression qui n'est pas réellement compensé pour les variations de température. Le marégraphe est programmé en heure UTC pour enregistrer toutes les 5 minutes une mesure moyennée sur 45 secondes.

Ce marégraphe a été financé avec le projet CC07.1 de juillet 2015 à mai 2018, puis par le projet CC17.1 de mai 2018 à juin 2020. Le présent projet est responsable du marégraphe à partir de juin 2020. Tableau 6 indique les visites de terrain pour le marégraphe. Les remplacements ont été effectués aux marées basses de vive-eau en utilisant une petite embarcation amenée depuis Rimouski. Deux tubes ABS ont été préparés pour le projet et ils ont été utilisés alternativement. Lors des remplacements, le nouveau tube était préparé avec les nouveaux instruments 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.

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

Date	Début période	Activités	n° série des marégraphes installés
2020-06-22	2020A	Remplacement du marégraphe	16495 + 16492
2020-08-18		Inspection visuelle et mesures manuelles	
2020-11-15	2020B	Remplacement du marégraphe	16486 + 13322
2021-04-01	2021A	Remplacement du marégraphe	16495 + 16492 ^a

^a Ces instruments ont été réinstallés le 2021-04-01 pour le projet R841.2, qui assurera la suite des mesures de niveau d'eau à Paspébiac à partir de 2022.

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 13). 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 (vagues et vent).

Un levé topographique avait 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 (Neumeier et Joly, 2019). Les points ont été mesurés à partir de la borne géodésique 91L9025 située sur le muret central du quai. Ce relevé avait déterminé l'altitude de la surface en acier au-dessus des mesures manuelles par rapport à différents références verticales, à savoir 3,196 m par rapport au zéro des cartes marines, 2,295 m par rapport au niveau marin moyen 1928 (CGVD28 Canadian Geodetic Vertical Datum 1928) et 1,824 m 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.



Figure 11 – Position du marégraphe (flèche verte) dans le port de Paspébiac.

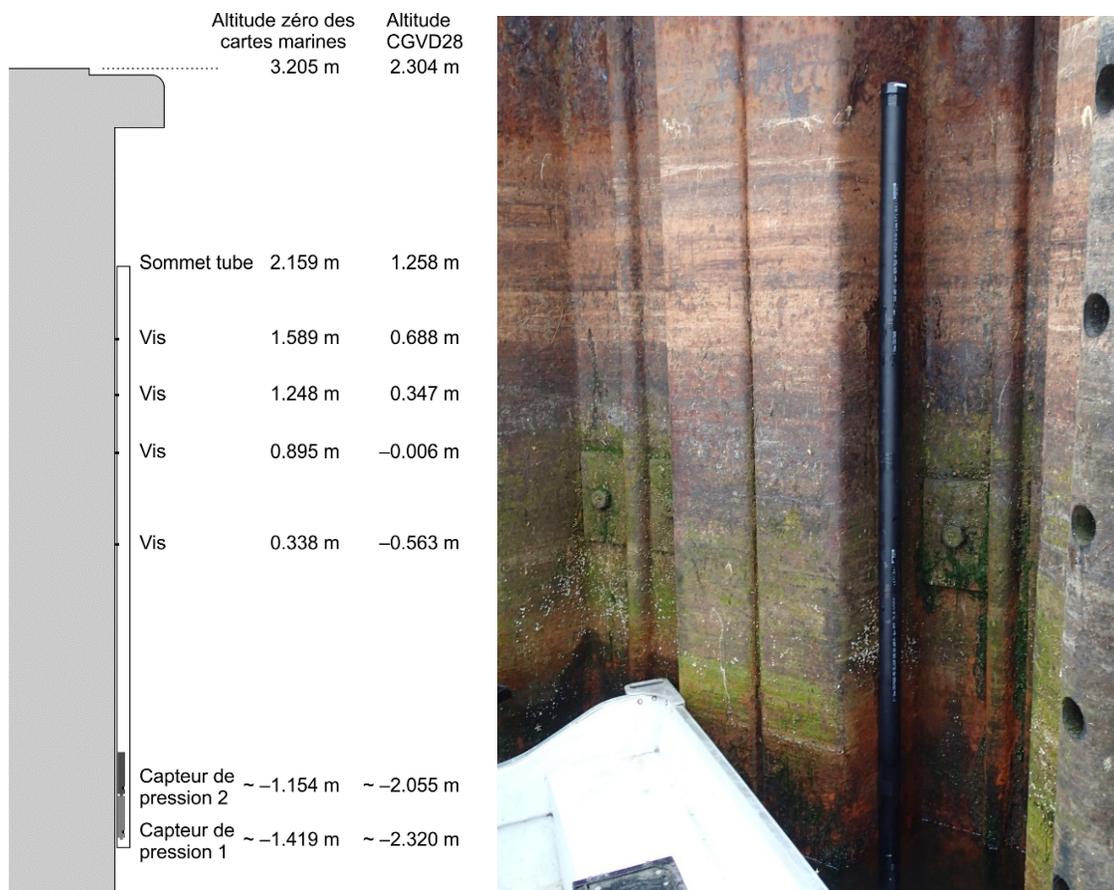


Figure 12 – Schéma et photo du montage du marégraphe. L'altitude des capteurs de pression variaient de quelques millimètres d'un déploiement à l'autre.



Figure 13 – Vue générale du marégraphe installé dans l'angle du quai et du tube temporaire utilisé pour les mesures manuelles.

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 lors d'un déploiement à Rivière-Pentecôte (SPE18A). Lors d'un évènement de tempête en janvier 2019, le cardan a tourné au-delà des 10° par rapport à la verticale, et semblait bloqué sans être capable de revenir en position verticale. (Par la suite, la configuration du contrepoids du cardan de cet instrument a été modifiée pour éviter que ce problème se reproduise.) C'est pourquoi il y a très peu de données valides (seulement quelques tempêtes) à Rivière-Pentecôte pour la période du 11 janvier au 18 juillet 2019. 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 à partir des données de pression avec l'interface *qcwave_gui* (cf. section 3.2).

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.

Au début du projet au printemps 2018 chaque mouillage déployé aux sites A, B et E a été programmé pour une période d'un an et les instruments ont enregistré jusqu'en juillet 2019.

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 jusqu'à la période 2020A, puis 17° ouest pour la dernière période 2020B, pour Cap d'Espoir 18° ouest, pour Rivière-Pentecôte 18° ouest et Paspébiac 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 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 14) :

- 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).

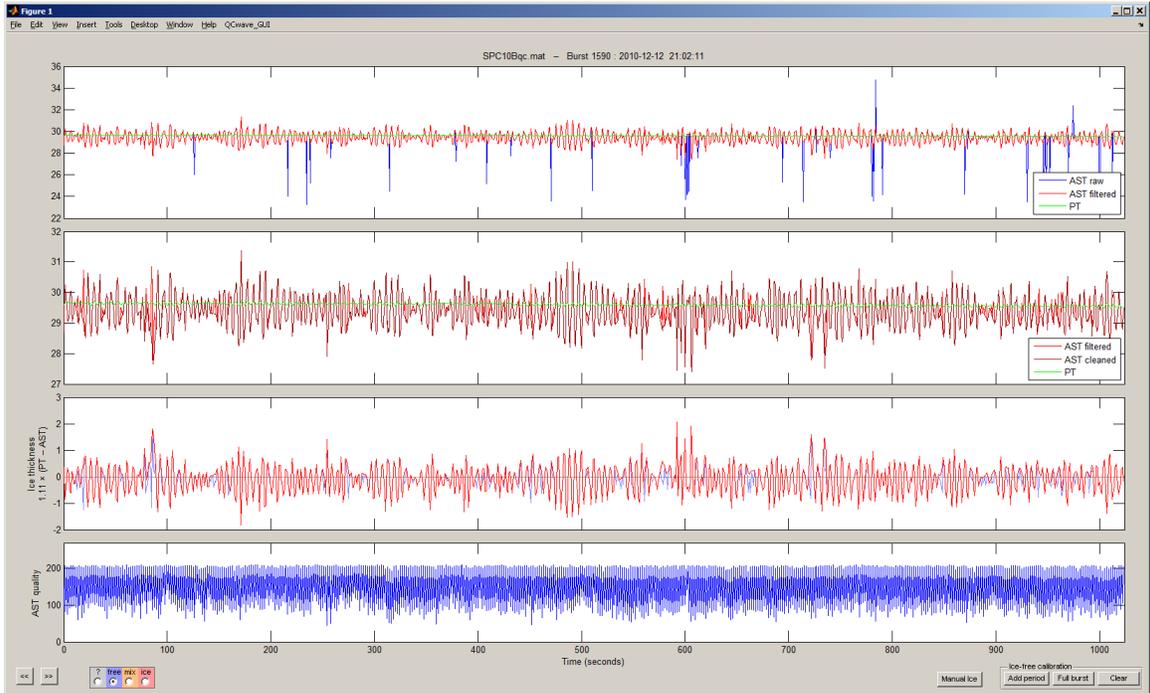
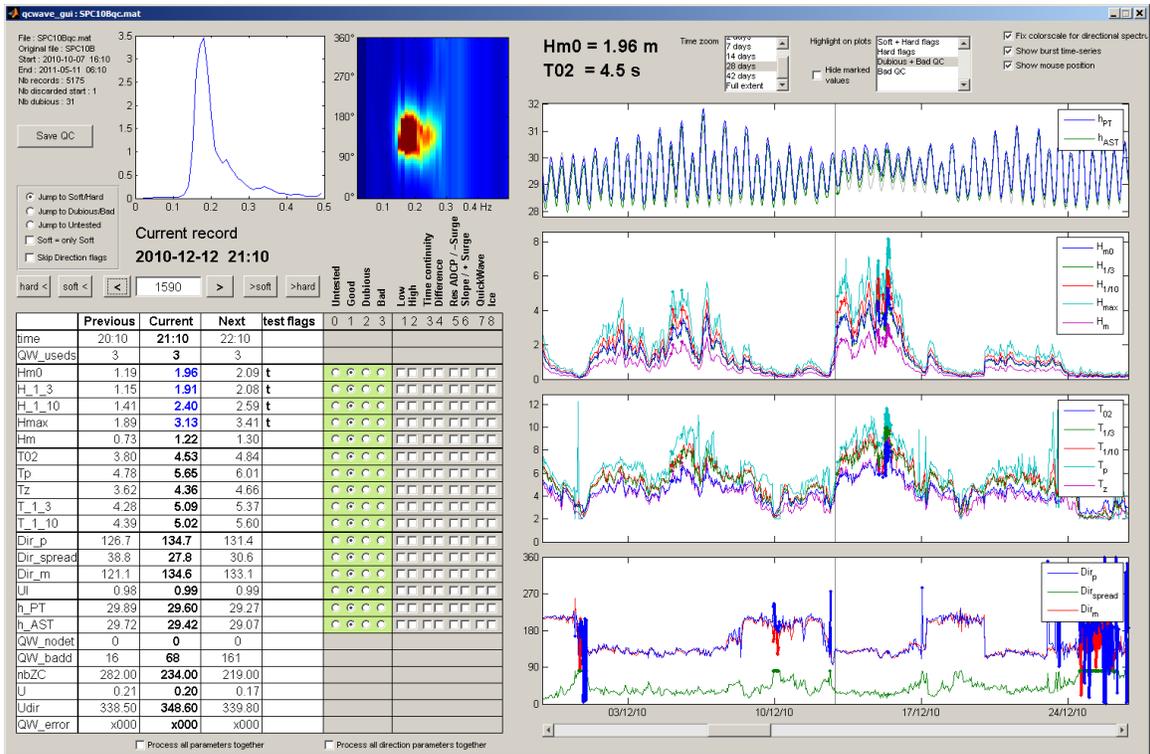


Figure 14 – Interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas).

Afin de faire la liste des plus fortes tempêtes et de pouvoir calculer les périodes de retour, les plus fortes tempêtes furent déterminées avec un algorithme écrit par Urs Neumeier, qui

- 1) interpole jusqu'à trois heures de données manquantes dans les séries temporelles;
- 2) trouve en premier tous les maxima dans la série temporelle de H_{m0} ;
- 3) élimine ensuite les maxima suivants, car ils sont considérés faisant partie d'une tempête plus importante (Figure 15) :
 - a) les maxima qui ne sont pas séparés d'au moins 6 heures d'une valeur plus grande de H_{m0} dans la série temporelle;
 - b) les maxima qui sont à moins de 12 heures d'un maxima plus grand;
 - c) les maxima qui sont à moins de 24 heures d'un maxima plus grand dont la direction moyenne des vagues diffère de moins de 60° ;
 - d) les maxima qui ne sont pas séparés d'un maxima plus grand par une diminution de H_{m0} d'au moins la moitié du plus petit maxima.

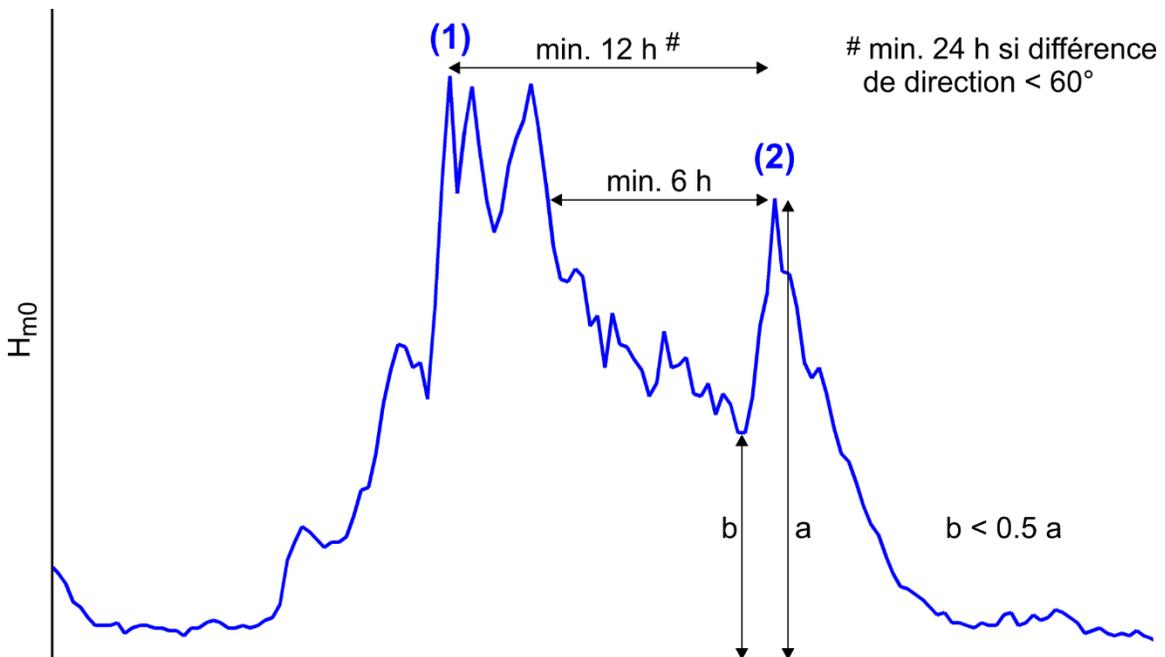


Figure 15 – Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1).

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 pour 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 hauteur 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 ± 1 heure 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) de chaque faisceau qui doit être supérieur à 3 dB.

Le contrôle de qualité est terminé manuellement avec l'interface graphique *awac_qc*, qui permet d'une part de visualiser et de zoomer dans les données et d'autre part d'attribuer les flags de qualité (Figure 16). 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 7.

Tableau 7 – 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

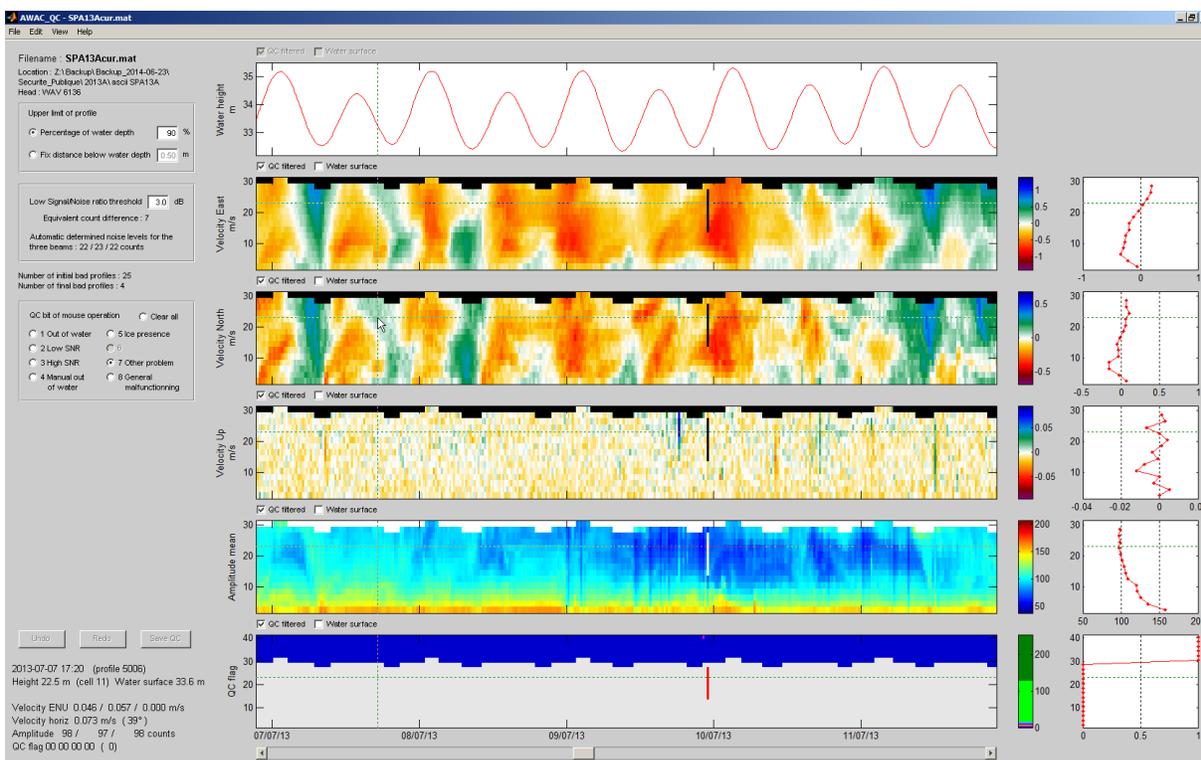


Figure 16 – Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.

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 17).

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 17).

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.

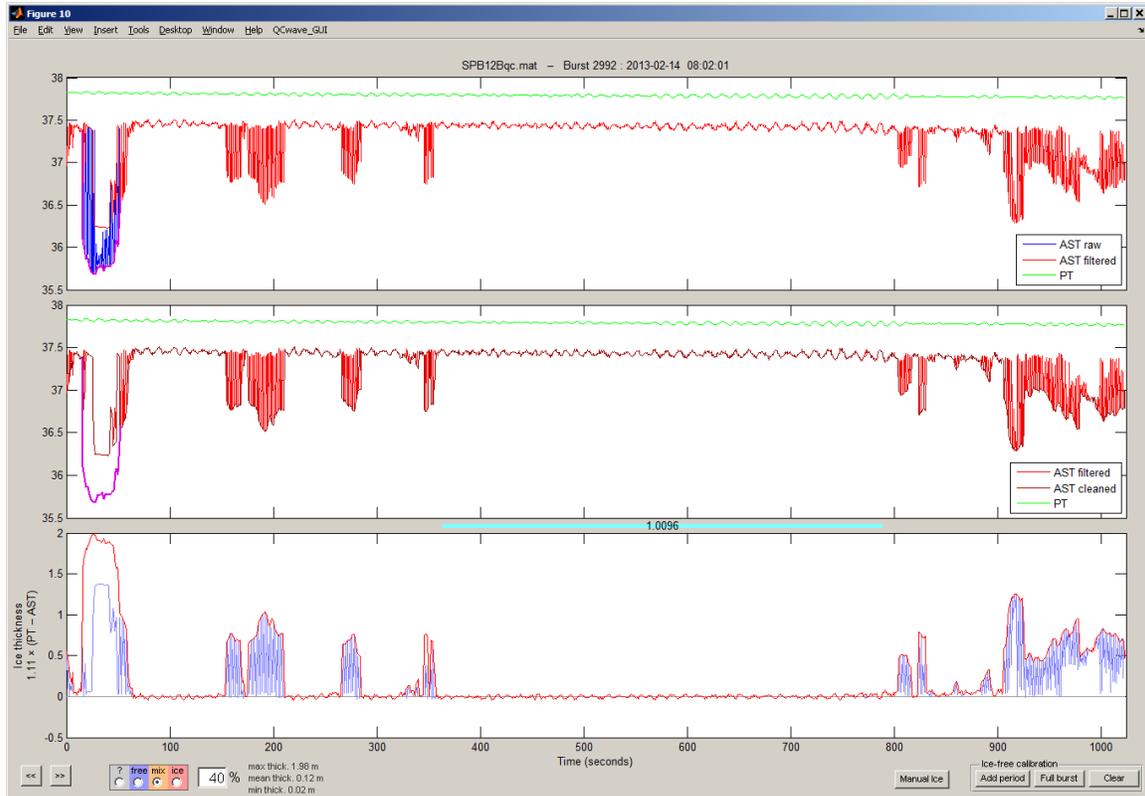


Figure 17 – Seconde fenêtre de l'interface graphique « qwave_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l'interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L'épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances 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 correction de pression atmosphérique a été effectuée avec 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. Un baromètre enregistreur RBR DR-1050 a été installé dans le garage du MTQ à New Carlisle comme source secondaire en cas de défaillance prolongée de la station météorologique d'Environnement Canada, mais il n'a pas été nécessaire de l'utiliser.

La pression de la station météo EC de New Carlisle a été convertie à 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 8). 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.

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 18). 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 marégraphe. L'altitude de chaque marégraphe a été déterminée pour le début et pour la fin de son déploiement (Tableau 8).

Deux capteurs de pression enregistraient simultanément à Paspébiac. Les deux ont mesurés des valeurs très similaires, mais avec des différences allant jusqu'à 7 cm, surtout durant le semestre estival. Cette différence est fortement corrélée avec la température, c'est-à-dire les deux instruments ont des réponses différentes face aux variations de température (Figure 19). 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.

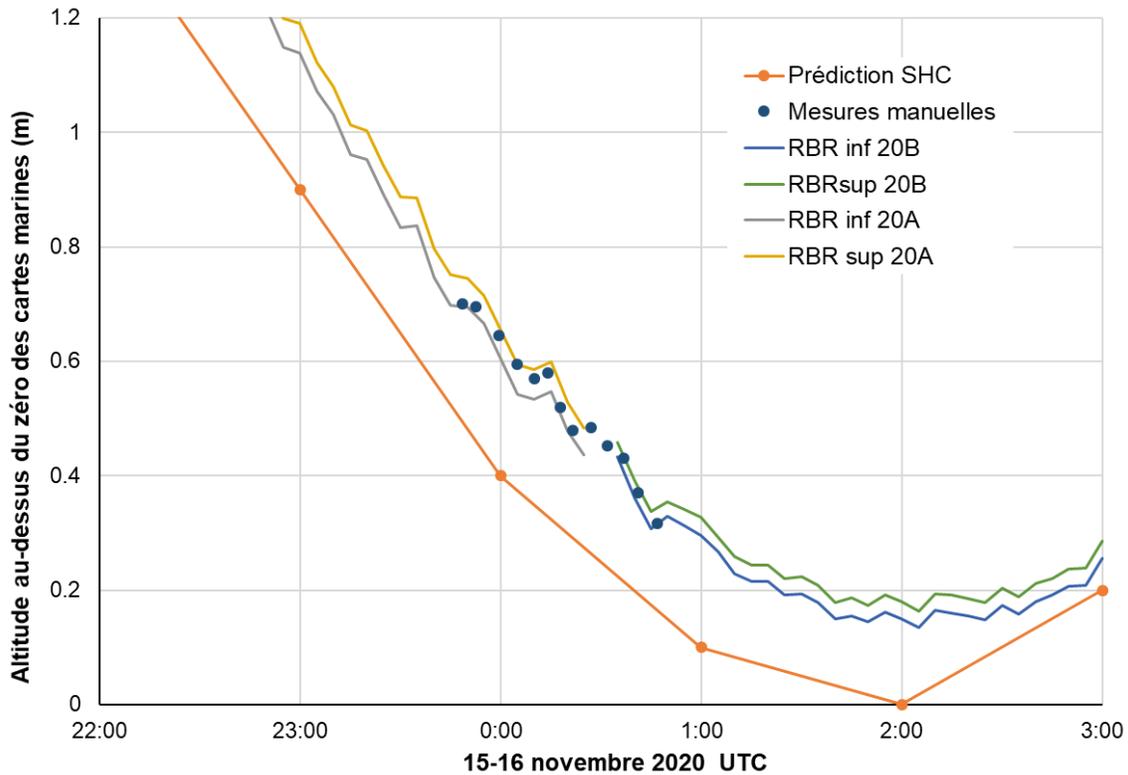


Figure 18 – Mesures manuelles de niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Paspébiac le 15 novembre 2020 avant et après le remplacement du marégraphe.

Tableau 8 – Détails de chaque déploiement du marégraphe de Paspébiac (instrument utilisé, période de mesure en heure UTC, offset des instruments, altitude du capteur de pression de l'instrument inférieur (instr. inf.) par rapport au zéro des cartes marines).

Période	2020A	2020B
Instrument inférieur	TGR-2050 n° 16495	TGR-2050 n° 16486
Instrument supérieur	TGR-2050 n° 16492	TWR-2050 n° 13322
Première donnée valide	2020-06-22 13:55	2020-11-16 00:35
Dernière donnée valide	2020-11-16 00:25	2021-04-01 14:25
Offset instrument inférieur	0,017 dbar	0,015 dbar
Offset instrument supérieur	-0,05 dbar	0,07 dbar
Altitude instr. inf. début	-1,426 m ^a	-1,395 m
Altitude instr. inf. fin	-1,391 m	-1,380 m
Altitude instr. inf. utilisé	-1,409 m	-1,387 m

^a Altitude déterminée le 19 août 2020 et non à l'installation, car les mesures manuelles après l'installation n'étaient pas fiables.

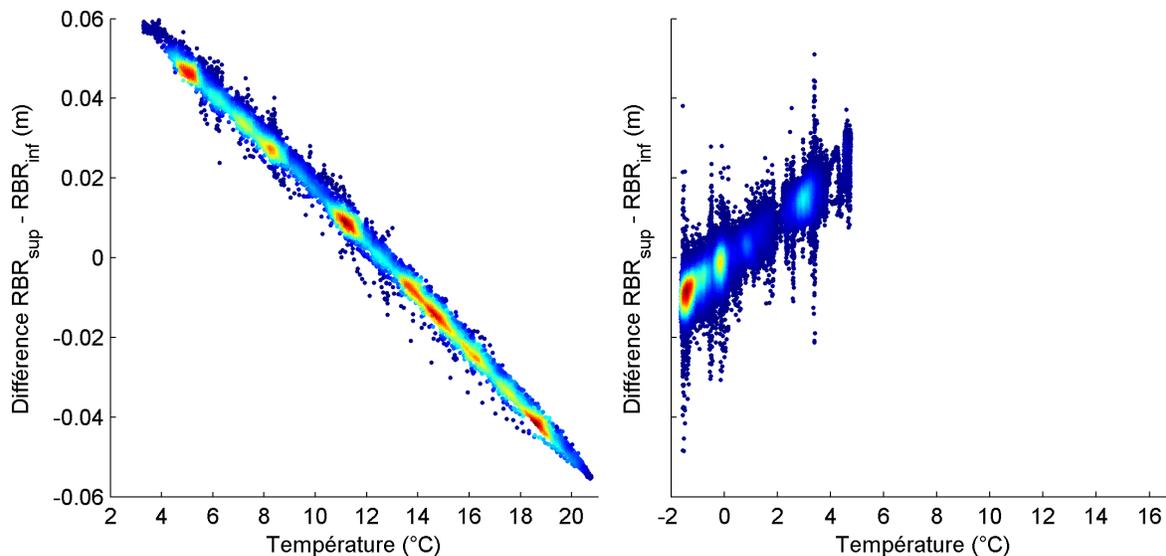


Figure 19 – Relation entre la température de l'eau et les différences de niveaux d'eaux mesurés par les deux capteurs de pression installés en parallèle pour le marégraphe de Paspébiac durant le déploiement 2020A (gauche) et le déploiement 2020B (droite).

Les enregistrements des marégraphe montrent des petites oscillations avec une période de 15-25 minutes et généralement une amplitude de 1-3 cm, allant à 4-15 cm pendant des tempêtes (Figure 20). 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 de tempête ont été déterminées en calculant en premier les harmoniques de marée à partir des niveaux d'eau mesurés. La série temporelle des niveaux d'eau a été analysée avec la boîte à outils T_TIDE dans Matlab (Pawlowicz et al., 2002) pour déterminer ces harmoniques de marées, puis celles-ci sont utilisées pour 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.

Pour la comparaison entre les niveaux d'eau du marégraphe de Paspébiac exprimés par rapport à CGVD28 et les niveaux d'eau enregistrés par l'AWAC du site F (Paspébiac), ces derniers ont été en premier ramenés au niveau marin moyen observé lors de chaque déploiement, puis la valeur de 0,098 m a été ajoutée (constante déterminée par la différence des moyennes des niveaux d'eau des deux séries de données). Le déphasage entre les deux signaux de marée a été déterminé en (1) calculant la somme des carrés des différences entre les deux séries pour différents déphasages de -120 s à +120 s par pas de 0.25 s, puis en (2) déterminant le déphasage avec la moindre des différences.

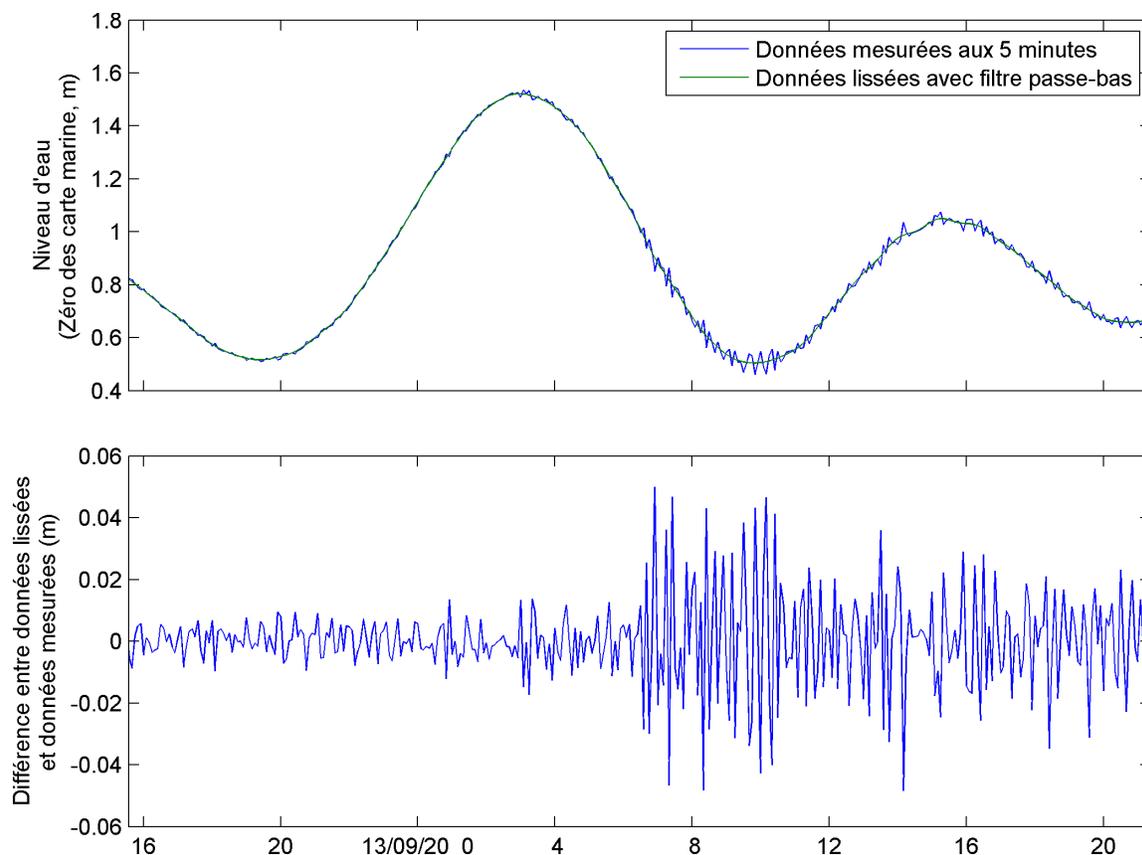


Figure 20 – Exemple des petites oscillations avec des périodes de 5-20 minutes, ainsi que du lissage avec un filtre passe-bas.

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 6.

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 courants ont également été sauvegardées dans le Système de gestion de données environnementales (SGDE) de l'ISMER. Le SGDE-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://sgde.ogsl.ca/datatype>. 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 21). 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 22).

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.

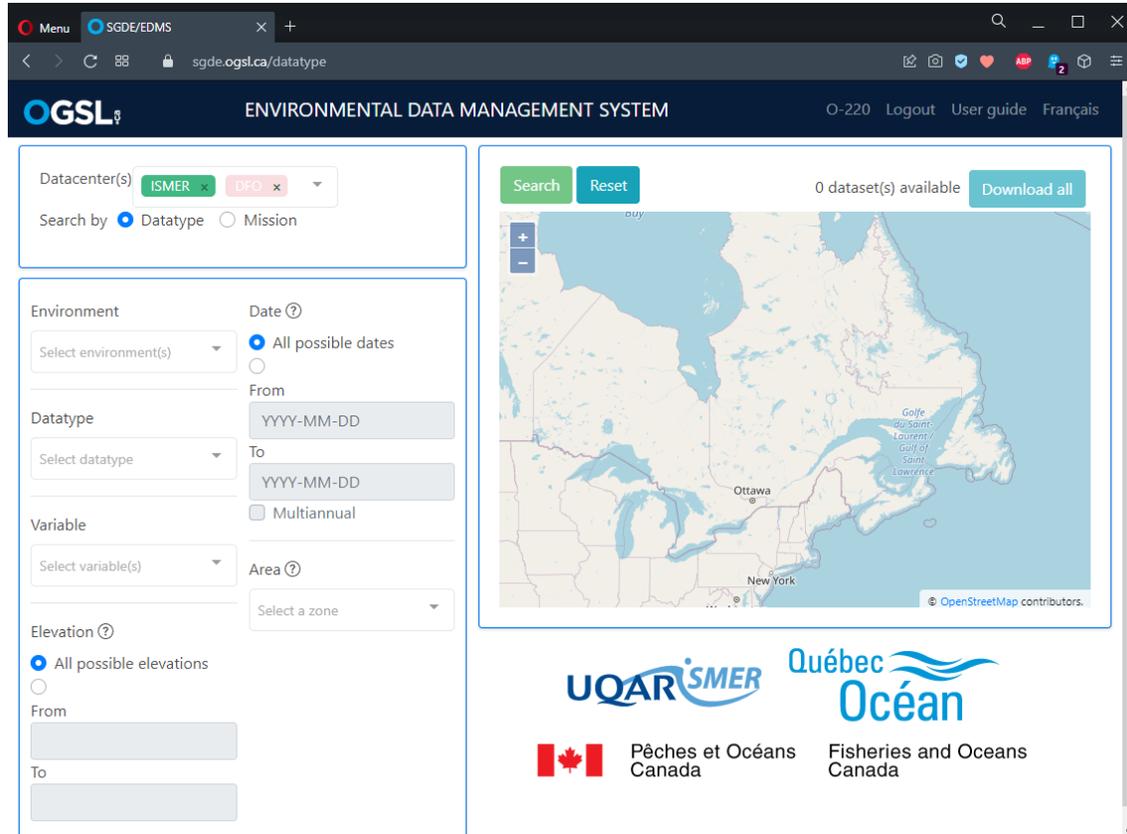


Figure 21 – Page d'accès aux archives de données environnementales sur le site de l'Observatoire Global du Saint-Laurent. La recherche peut se faire par type de variables ou bien par identifiant de mission.

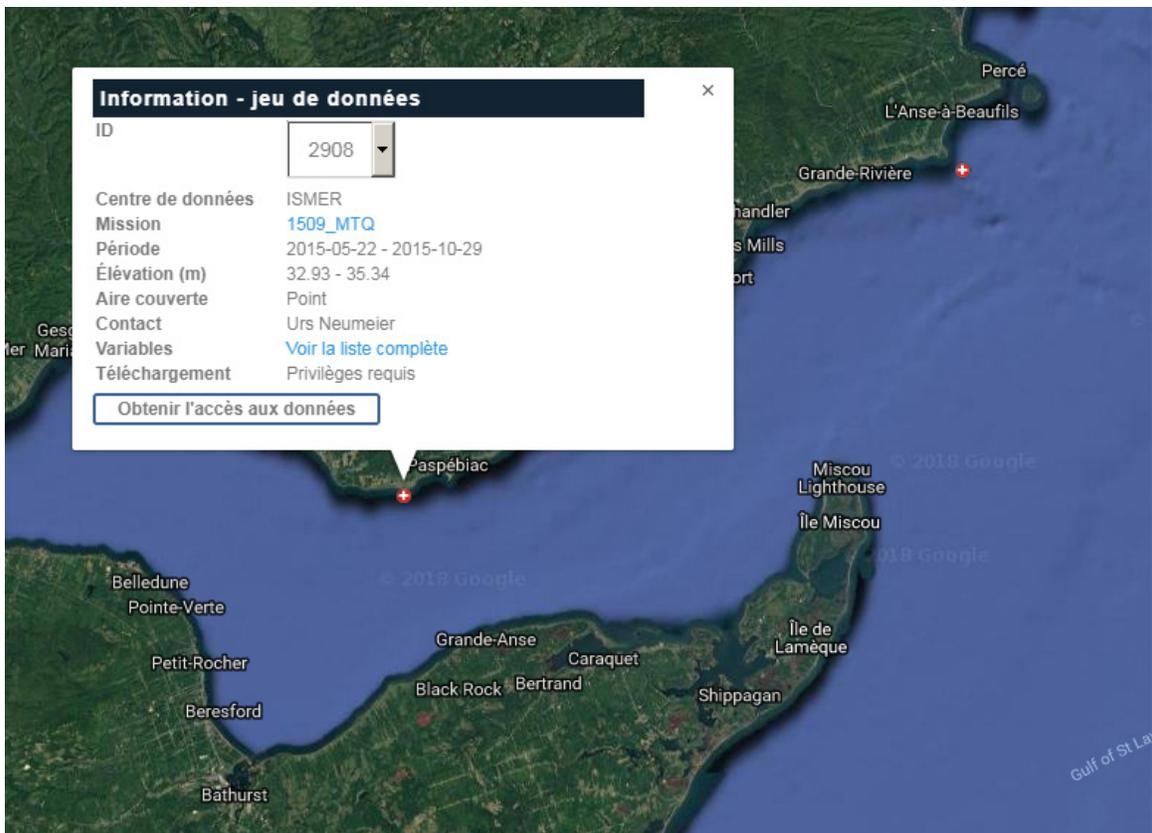
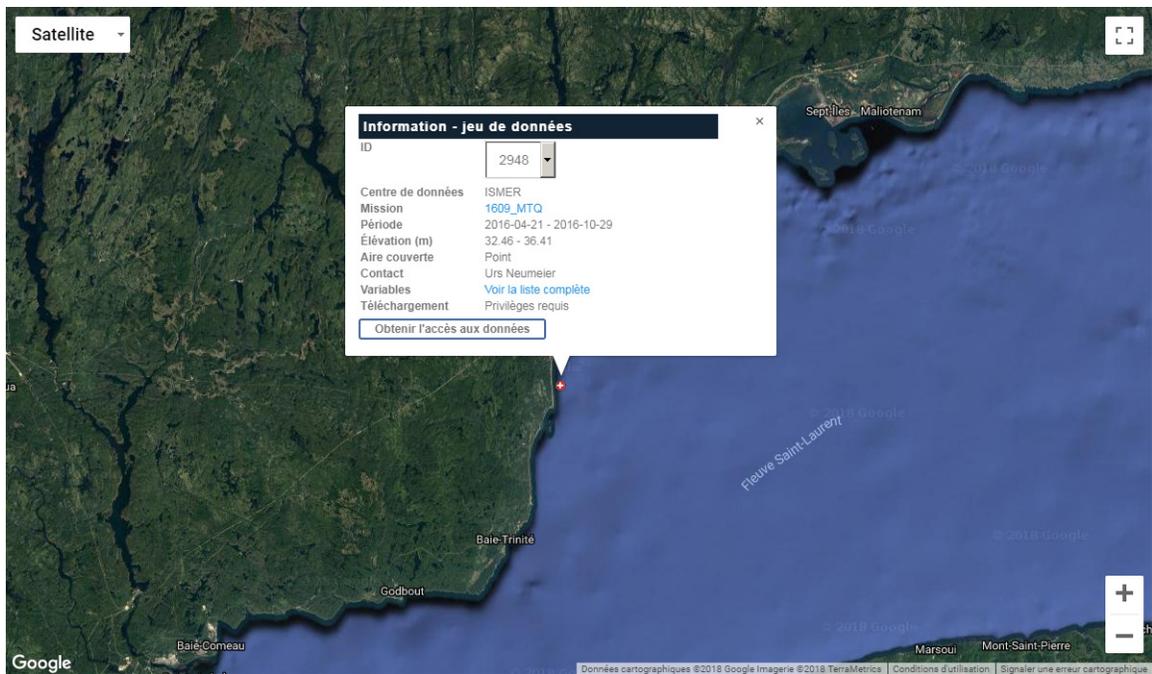


Figure 22 – Exemples de jeu de données disponibles sur le site internet de l'OGSL pour les sites de Rivière-Pentecôte (haut) et de Paspébiac (bas).

4. Résultats des instruments

4.1. Données de vagues

Afin de permettre les comparaisons homogènes entre sites et distinguer des variabilités géographiques cohérentes, les données de Paspébiac sont présentées dans leur intégralité (2018-2021) plutôt que seulement le jeu de données 2020-2021 prévu pour ce contrat avec le MTQ.

Également, les données 2010-2014 de St-Ulric et Cap d'Espoir acquises lors d'un projet antérieur financé par le MSP, ainsi que celles couvrant la période 2014-2018 associée au précédent projet financé par le MTQ et avec l'inclusion du nouveau site de Rivière-Pentecôte, ont été incorporées aux données nouvellement acquises pour tenter d'observer des tendances à moyen terme (~ 12 ans) et présentées sur certaines figures. Ainsi, nous avons enregistrées au total des séries temporelles de 93 216 heures au site de St-Ulric, 88 276 heures au site de Cap d'Espoir, 59 186 heures au site de Rivière-Pentecôte et 52 789 heures au site de Paspébiac. Seules les données de la période 2018-2021 sont présentées en détail dans ce rapport.

Les données de vagues ont été compilées pour calculer les probabilités de dépassement des hauteurs de vagues (Figure 23 et Figure 24). 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. Sur ces graphiques de probabilité de dépassement, pour St-Ulric (site A) et Cap d'Espoir (site B) sont comparées trois périodes qui correspondent aux projets successifs de monitoring des conditions océanographiques dans l'estuaire et le golfe, soit celle allant de mai 2010 à avril 2014, celle de mai 2014 à avril 2018, et enfin la période prévue par le présent contrat, de mai 2018 à juin 2021. Pour Rivière-Pentecôte (site E), la comparaison s'effectue seulement à partir de 2014, et 2015 pour le site de Paspébiac (F).

Sur la première figure des courbes de probabilité de dépassement, sont présentés les sites de St-Ulric et Paspébiac (Figure 23). Pour chaque site, il n'y a pas de différence, quelle que soit la période considérée, pour les vagues les plus fréquentes, soient celles inférieures à 1,5 m. À St-Ulric les tempêtes enregistrées de mai 2018 à mai 2021 ont généré des vagues plus fortes que lors de la période 2010-2014 mais légèrement moins élevées que lors de la période 2014-2018. Au site de Paspébiac, les données acquises entre mai 2018 et mai 2021 mettent en évidence des vagues plus importantes lors des événements de tempêtes par rapport à la période précédente. Les vagues mesurées ont dépassé les 3 m de hauteur significative. Ainsi, dans la baie des Chaleurs les tempêtes ont généré des vagues beaucoup plus hautes lors des trois dernières années comparativement à la période du début du monitoring de ce site, alors que dans l'estuaire, au niveau de St-Ulric, la tendance est à une légère diminution de la hauteur des vagues de tempêtes.

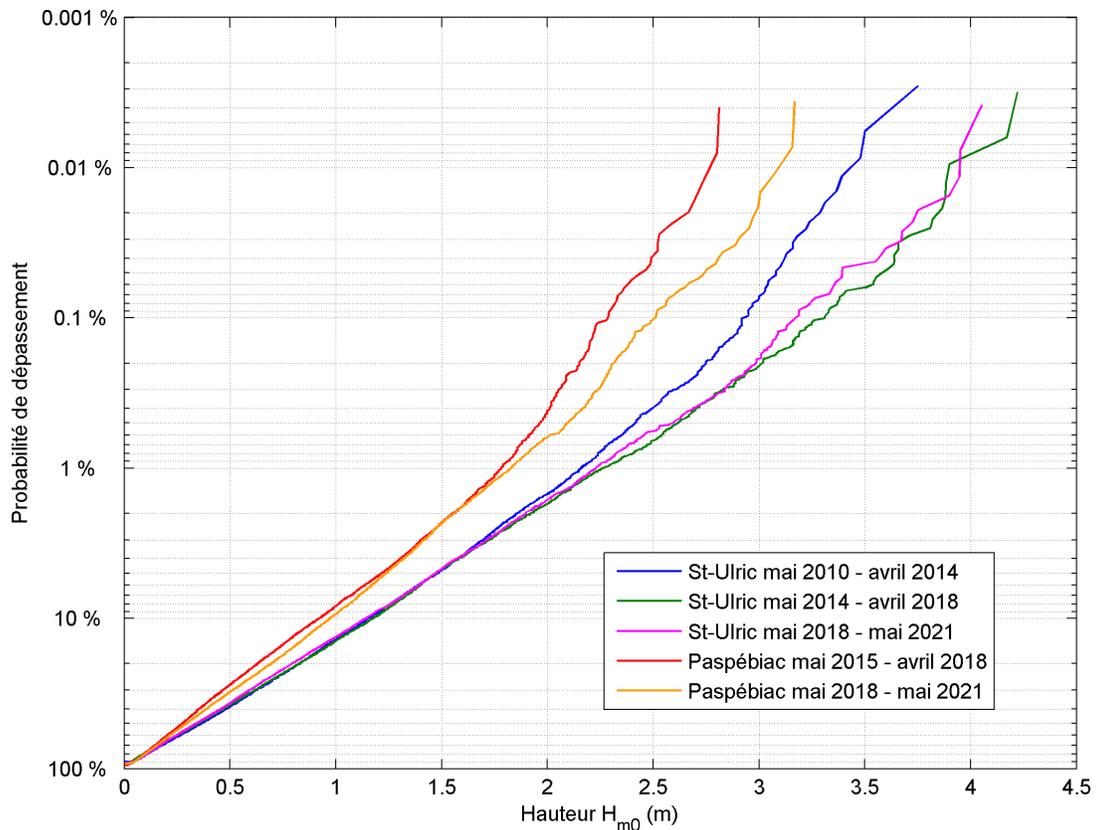


Figure 23 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} à St-Ulric et Paspébiac en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 (2015-2018 à Paspébiac) et 2018-2021.

La Figure 24 illustre les courbes de probabilité de dépassement pour les deux stations du golfe, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte, avec les comparaisons des périodes précédentes. Pour les vagues inférieures à 3 m, il n'y a pas de différence entre les périodes de monitoring pour chacun des sites. À Cap d'Espoir, les vagues mesurées lors des événements de tempêtes entre mai 2018 à mai 2021 sont les moins élevées comparativement aux deux autres périodes de suivi. Les vagues de tempêtes ont été les plus hautes lors de la période 2014-2018. Pour le site de Rivière-Pentecôte, la tendance à la diminution dans l'intensité et la fréquence des événements de tempêtes est très nette et les vagues excédant les 4 m ont été très rares pendant la période 2018-2021 par rapport à la période précédente.

Ainsi, au niveau des deux sites du golfe (sites B et E) et de celui de l'estuaire (site A), nous observons une tendance à la diminution de l'intensité des événements de tempêtes, mesurées par les hauteurs significatives des vagues, comparativement aux périodes précédentes. À l'inverse, dans la baie des Chaleurs, au site de Paspébiac (F), les tempêtes, sur la période 2018-2021, ont généré des vagues plus élevées, dépassant les 3 m, par rapport à la première période de suivi, de 2015 à 2018. Toutefois, le découpage arbitraire des différentes périodes de monitoring selon les dates des contrats, peut induire un biais dans la visualisation et l'interprétation des résultats.

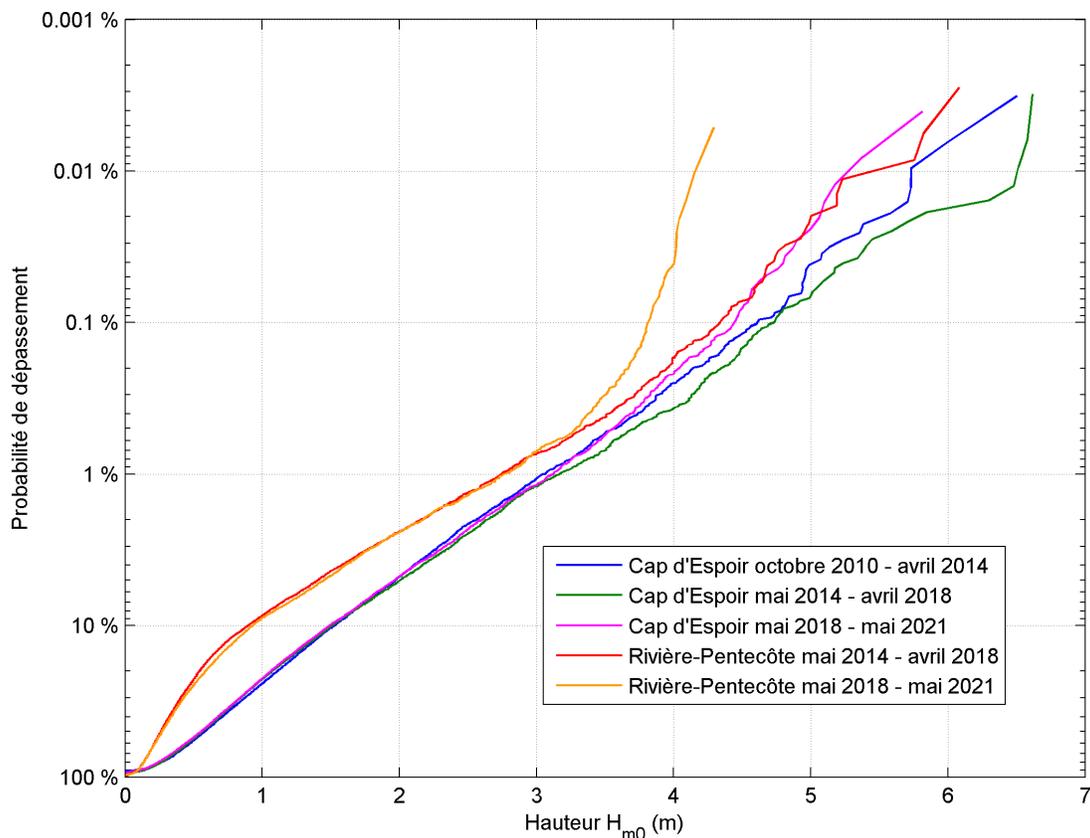


Figure 24 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues à Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte en fonction des périodes de monitoring, soit 2010-2014, 2014-2018 et 2018-2021.

Pour éviter un éventuel biais dans les tendances observées induit par le choix des différentes périodes, nous avons représenté l'évolution des événements de tempête les plus élevés pour chacun des sites (Figure 25). Sur la figure, chaque point représente la moyenne des trois (3) plus hautes vagues de tempêtes enregistrées chaque année. Au lieu du 1^{er} janvier, nous avons fixé la date de coupure le 1^{er} mai, ce qui correspond au début du suivi et au remplacement des instruments sous l'eau. Cette représentation met l'emphase sur la variabilité interannuelle des fortes tempêtes.

À St-Ulric, après avoir été relativement stable au début de la décennie, les hauteurs des vagues de tempêtes les plus importantes augmentent de manière nette à partir de l'automne 2014 avec une moyenne à 3,45 m jusqu'à l'hiver 2019 avec une moyenne de 3,59 m, à l'exception de la période 2015-2016 où les vagues de tempête sont demeurées les plus faibles. Par la suite il y a eu une diminution progressive des hauteurs de vagues de tempête de l'été 2019 jusqu'au printemps 2021. Cette tendance à la diminution dans les hauteurs de vagues est également visible sur les données de Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte. L'augmentation lors de la deuxième moitié de la décennie confirme ce qu'illustre les courbes de probabilité de dépassement pour le site de St-Ulric (Figure 23).

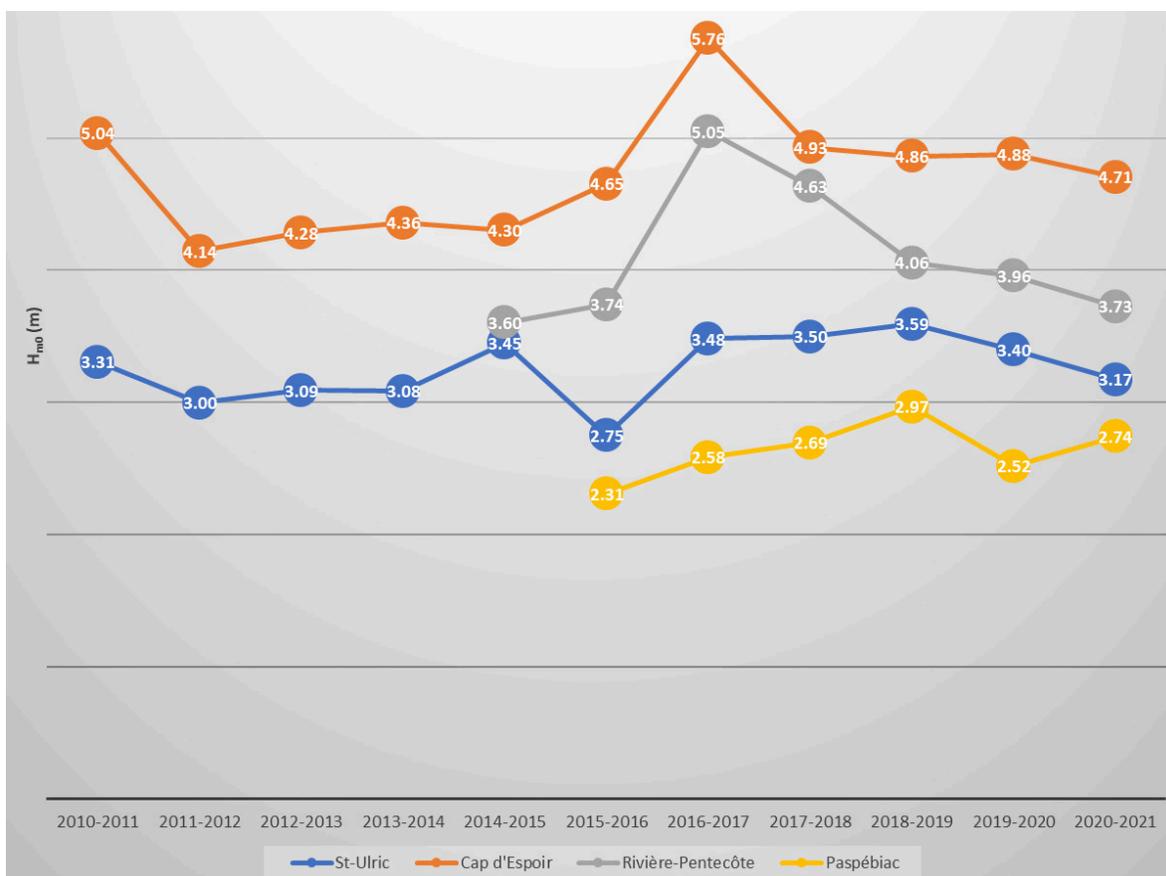


Figure 25 – Évolution temporelle des événements de grosses tempêtes aux quatre sites d'études en se basant sur l'ensemble des données disponibles. Les valeurs correspondent à la moyenne sur un an des 3 plus fortes tempêtes. La date de coupure pour discriminer les années a été choisie au 1^{er} mai. À noter qu'au site de St-Ulric, il n'y a pas eu d'enregistrement de données du 11 mars au 17 juin 2015, à Cap d'Espoir du 1^{er} février au 22 mai 2015, et à Rivière Pentecôte du 10 mars au 22 juin 2015.

À Cap d'Espoir, le début de la décennie est marqué par une tempête d'ampleur qui a produit les vagues parmi les plus hautes mesurées ($H_{m0} \rightarrow 6,5$ m). C'est à partir de l'automne 2015 que les tempêtes génèrent des vagues de plus en plus fortes dans le golfe avec un pic à 5,76 m en 2016-2017 pour la moyenne des 3 événements. Par la suite, cette valeur demeure très proche de 5 m malgré une légère tendance à la diminution. Pour cette région du golfe, les années 2016 à 2019 ont connu les tempêtes les plus fortes de la décennie à l'exception de la tempête de décembre 2010.

Au site de Rivière-Pentecôte, le monitoring des conditions de vagues n'a commencé qu'à partir du printemps 2014. Depuis cette date les tempêtes ont généré des vagues de plus en plus élevées avec un pic en 2016-2017, tel qu'observé à Cap d'Espoir, avec une moyenne à 5,05 m. Par la suite les hauteurs des vagues de tempêtes n'ont cessé de décroître. Cette tendance à la diminution confirme ce qu'illustre les courbes de probabilités de dépassement de la Figure 24.

Enfin, pour le site de Paspébiac, où le suivi des conditions de vagues n'a commencé qu'au printemps 2015, les données montrent une augmentation progressive des hauteurs de vagues de tempête jusqu'en 2018-2019 avec notamment à l'automne 2018 deux tempêtes successives qui ont généré des vagues de 3,16 et 3,07 m (Tableau 10). En 2020-2021, bien que la moyenne des hauteurs de vagues des trois plus importantes tempêtes soit de 2,74 m, une tempête a généré des vagues de 3,17 m, soit le record pour ce site. Ces quelques événements à la fin 2018 et en 2021 ont été suffisant pour illustrer une tendance à l'augmentation de l'intensité des tempêtes dans la baie des Chaleurs au cours des trois dernières années en comparaison du début de la période de suivi.

Les roses des vagues pour chaque site sont présentées afin de visualiser les secteurs de provenance des fortes vagues (Figure 26 et Figure 27). Les données de la période 2018-2021 ont été comparées avec l'ensemble des données précédentes pour chaque site. Dans l'ensemble, à St-Ulric, les vagues les plus hautes proviennent du secteur nord-est (Figure 26). Les vagues en provenance de l'ouest demeurent encore présentes et plusieurs grosses tempêtes issues de cette direction ont été enregistrées à St-Ulric, dont la deuxième tempête en importance sur cette période ($H_{m0} \rightarrow 3,75$ m; dir : 266°). La tempête qui a généré, au cours de la période 2018-2021, les vagues les plus élevées ($H_{m0} \rightarrow 4,05$ m) était originaire du nord-nord-est (25°). La rose des vagues calculée sur la période 2018-2021 est très similaire à celle de la période 2010-2018, suggérant un climat de vagues de tempête relativement conservateur dans ce secteur de l'estuaire du St-Laurent.

À Cap d'Espoir, les vagues les plus hautes ($H_{m0} > 4,5$ m) proviennent en général du secteur de l'est-nord-est allant jusqu'à l'est-sud-est. Par ailleurs, les tempêtes en provenance du secteur sud-ouest et sud génèrent des vagues de plus de 3,5 m et sont encore très présentes. La tempête qui a produit les vagues les plus hautes ($H_{m0} \rightarrow 5,81$ m) en 2018-2021 provenaient de l'est-sud-est (110°). Le patron géographique dans la provenance des vagues de tempête demeure très similaire sur cette période 2018-2021 à ce qui avait été observé les années précédentes.

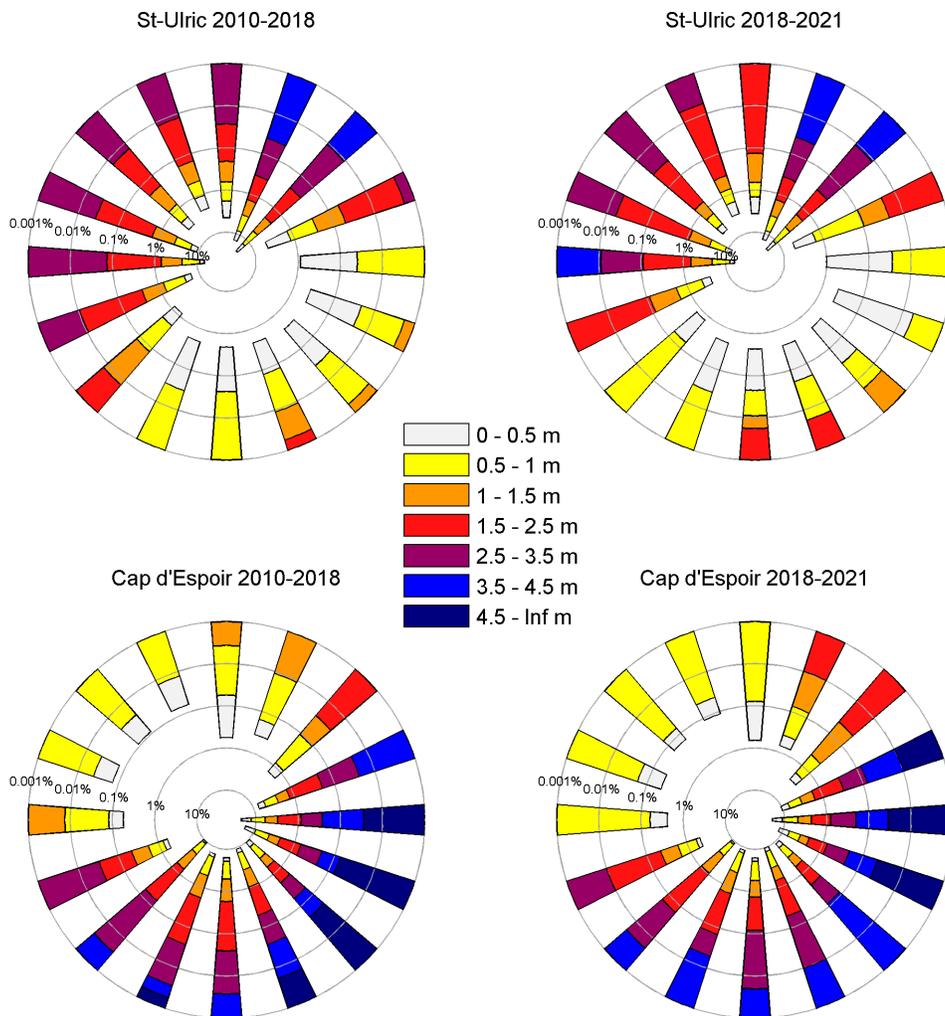


Figure 26 – Roses de vagues pour St-Ulric et Cap d'Espoir pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 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.

À Rivière-Pentecôte (Figure 27), la diminution des hauteurs de vagues de tempêtes est également observable à travers l'illustration de la rose des vagues. Les vagues les plus élevées ont pour origine les secteurs est-nord-est et est, mais les hauteurs atteintes sont très inférieures à ce qui a été mesuré les années précédentes. Les vagues de tempêtes les plus élevées ($H_{m0} \rightarrow 4,29$ m) au cours de la période 2018-2021 provenaient de l'est (92°). Comme pour les deux sites précédents, il n'y a pas de changement dans le patron spatial des vagues de tempête.

Enfin, à Paspébiac, hormis la tempête qui a généré les plus hautes vagues ($H_{m0} \rightarrow 3,17$ m) depuis le début du monitoring de ce site et qui provenaient de l'est (101°), la presque totalité des plus fortes vagues de tempêtes sur la période 2018-2021 provenaient du secteur ouest, soit de l'intérieur de la baie des Chaleurs. Il y a eu également plusieurs tempêtes générant des vagues supérieures à 2 m en provenance du nord-est lors de cette période 2018-2021, alors que ce secteur était épargné des vagues élevées lors de la période précédente. Ces sont des vagues qui longent la côte en provenance de l'embouchure de la baie des Chaleurs. La configuration du bassin de la baie des Chaleurs a un effet certain dans la propagation et la direction des vagues tempêtes.

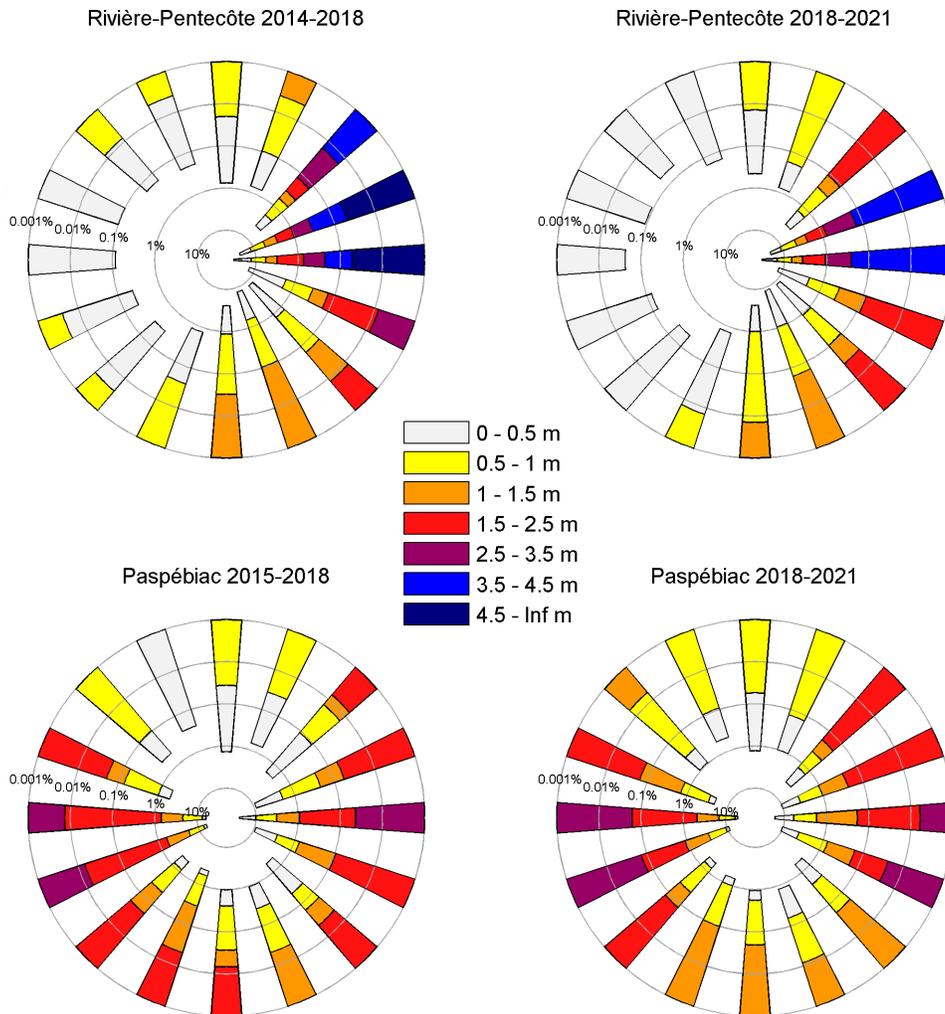


Figure 27 – Roses de vagues pour Rivière-Pentecôte et Paspébiac pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d’occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L’échelle radiale exponentielle (0,001 / 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.

Nous avons répertorié dans les Tableaux 9 et 10 la date, 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 (A) et Cap d'Espoir (B), et des 25 plus fortes tempêtes mesurées à Rivière-Pentecôte (E) et Paspébiac (F). Les tempêtes survenues lors de la période 2010-2018 sont ombragées en gris dans les tableaux.

Pour St-Ulric, la tempête qui a généré les vagues les plus élevées ($H_{m0} \rightarrow 4,05$ m) entre mai 2018 et mai 2021, arrive au deuxième rang sur les 12 années de monitoring et s'est produite le 10 janvier 2019.

Pour Cap d'Espoir, il s'agit de la même tempête mais les vagues les plus hautes ($H_{m0} \rightarrow 5,81$ m) ont été mesurées la veille, le 9 janvier 2019 et arrivent au troisième rang au total.

À Rivière-Pentecôte, toujours la même tempête a généré le 10 janvier 2019 les vagues les plus hautes durant la période septembre 2018 à mai 2021, mais ces vagues n'ont atteint que 4,29 m et arrivent au neuvième rang sur l'ensemble des sept années de monitoring à ce site.

À Paspébiac, cette tempête du début janvier 2019 est passée totalement inaperçue et n'est pas présente dans le classement. La tempête qui a généré les plus hautes vagues dans la baie des Chaleurs a eu lieu le 2 février 2021 et les vagues ont atteint 3,17 m de hauteur significative. Il s'agit de la tempête la plus forte depuis le début du monitoring de cette station. En novembre 2018, deux tempêtes ont également produit des vagues de plus de 3 m. Dans le classement des dix plus fortes tempêtes mesurées à Paspébiac de 2015 à 2021, sept sont intervenues pendant la nouvelle période et lors de toutes ces tempêtes sauf une, les vagues provenaient de l'ouest.

Tableau 9 – Les 40 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2021 aux sites A et B. Les tempêtes de la période avant mai 2018 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 03:20	4.22	6.84	44	1	30/12/2016 09:20	6.61	7.66	117
2	10/01/2019 01:00	4.05	7.07	25	2	15/12/2010 05:20	6.50	7.79	122
3	11/12/2014 04:20	3.90	6.48	23	3	09/01/2019 22:00	5.81	7.20	110
4	15/03/2017 09:20	3.88	6.87	29	4	04/01/2017 14:20	5.59	7.90	114
5	15/12/2010 15:20	3.75	7.57	31	5	11/12/2014 09:20	5.45	7.80	94
6	01/11/2019 19:20	3.75	5.85	266	6	11/01/2016 06:20	5.40	7.15	116
7	03/02/2021 02:00	3.72	6.62	41	7	17/10/2019 21:00	5.10	7.83	67
8	08/03/2018 22:20	3.58	6.55	50	8	14/03/2018 15:20	5.09	7.74	79
9	23/04/2012 14:20	3.48	6.20	33	9	02/12/2016 00:20	5.07	7.19	104
10	25/01/2017 12:20	3.40	6.49	34	10	07/09/2019 23:20	5.06	6.40	84
11	20/01/2019 22:00	3.39	6.06	24	11	05/01/2018 14:20	5.01	7.33	214
12	28/11/2018 06:00	3.34	6.35	28	12	08/04/2012 11:20	4.81	7.56	80
13	14/03/2018 06:20	3.34	6.10	45	13	03/02/2021 05:00	4.80	7.92	85
14	14/02/2014 10:20	3.29	5.49	42	14	17/01/2021 09:00	4.75	7.06	95
15	27/02/2020 20:20	3.25	6.15	36	15	11/01/2017 11:20	4.74	6.99	146
16	03/11/2014 09:20	3.23	5.76	4	16	13/12/2017 09:20	4.69	7.12	97
17	28/12/2010 04:20	3.22	5.76	21	17	30/10/2017 17:20	4.68	6.76	119
18	28/08/2014 09:20	3.22	6.39	25	18	28/11/2018 12:00	4.68	7.09	110
19	17/10/2019 19:20	3.19	6.19	46	19	05/01/2018 02:20	4.64	9.53	96
20	20/01/2013 23:20	3.16	5.67	253	20	06/12/2020 09:00	4.57	7.13	76
21	21/02/2013 04:20	3.16	6.06	37	21	22/12/2012 10:20	4.55	6.26	130
22	16/05/2016 07:20	3.16	6.07	42	22	20/01/2013 15:20	4.50	5.84	128
23	15/12/2019 14:20	3.15	5.74	265	23	06/12/2017 09:20	4.49	7.00	148
24	14/11/2018 08:00	3.13	5.13	262	24	25/01/2017 16:20	4.48	6.86	96
25	27/03/2014 05:20	3.04	5.52	328	25	14/12/2019 22:00	4.47	6.70	105
26	18/09/2018 07:00	2.96	5.94	26	26	06/01/2014 20:20	4.44	7.04	136
27	06/12/2010 13:20	2.95	6.17	35	27	18/11/2013 16:20	4.38	6.30	141
28	18/02/2013 10:20	2.95	5.17	292	28	08/04/2016 06:20	4.37	5.83	128
29	14/12/2017 02:20	2.93	5.65	264	29	05/12/2010 03:20	4.35	6.67	116
30	12/11/2019 15:20	2.93	5.82	33	30	01/12/2020 07:00	4.27	6.79	132
31	02/11/2020 21:00	2.93	5.19	309	31	21/12/2010 14:20	4.26	6.52	100
32	26/01/2014 12:20	2.92	5.08	260	32	27/11/2013 18:20	4.26	6.62	129
33	30/12/2016 17:20	2.91	5.17	274	33	13/01/2016 12:20	4.19	6.23	76
34	03/11/2018 20:00	2.90	6.16	22	34	10/03/2018 05:20	4.13	6.87	86
35	21/12/2010 06:20	2.89	6.07	37	35	06/12/2010 11:20	4.12	6.44	123
36	06/12/2020 07:00	2.87	5.86	46	36	22/12/2018 10:00	4.10	6.92	140
37	05/05/2011 21:20	2.85	6.14	27	37	28/10/2018 14:00	4.08	6.63	115
38	04/04/2019 05:00	2.84	5.00	265	38	15/12/2013 19:20	4.04	5.76	69
39	02/03/2017 06:20	2.82	5.88	30	39	02/11/2020 09:00	4.03	6.98	127
40	25/11/2013 00:20	2.81	5.19	302	40	16/10/2010 01:20	4.02	6.67	122

Tableau 10 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2021 aux sites E et F. Les tempêtes de la période avant mai 2018 sont surlignées en grisé.

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 11:20	6.08	7.41	67	1	02/02/2021 22:00	3.17	5.53	101
2	11/12/2014 04:20	5.23	7.27	85	2	04/11/2018 00:20	3.16	5.23	240
3	13/12/2017 10:20	4.92	7.48	78	3	14/11/2018 10:20	3.07	5.34	274
4	30/10/2017 17:20	4.73	7.24	84	4	04/01/2018 21:20	2.81	6.60	85
5	04/01/2017 13:20	4.61	6.98	64	5	16/12/2019 03:20	2.81	5.28	246
6	01/12/2016 20:20	4.46	6.68	69	6	05/01/2018 12:20	2.80	5.04	261
7	25/01/2017 15:20	4.40	7.04	58	7	30/12/2016 07:20	2.74	5.29	89
8	07/04/2017 10:20	4.33	6.71	65	8	11/11/2018 00:20	2.67	5.30	254
9	10/01/2019 01:00	4.29	6.84	92	9	02/11/2020 18:00	2.65	5.05	278
10	17/04/2018 20:20	4.25	6.80	87	10	04/04/2019 11:20	2.56	5.21	268
11	05/04/2018 00:20	4.14	7.15	88	11	16/12/2016 05:20	2.52	5.04	250
12	11/01/2016 04:20	4.08	6.72	78	12	20/12/2015 06:20	2.52	5.45	256
13	18/10/2019 01:20	4.04	6.89	76	13	15/03/2017 03:20	2.49	4.84	79
14	13/12/2020 18:20	4.02	6.71	85	14	11/11/2017 04:20	2.47	5.12	259
15	23/10/2016 05:20	4.01	6.70	84	15	16/11/2019 05:20	2.41	4.95	246
16	14/12/2019 23:00	4.01	6.62	84	16	16/12/2020 02:00	2.40	5.18	276
17	19/11/2017 16:20	3.99	6.56	89	17	14/03/2018 10:20	2.38	4.93	86
18	28/10/2018 13:00	3.95	6.45	80	18	24/11/2020 07:00	2.37	5.34	275
19	05/01/2018 04:20	3.94	6.92	80	19	25/01/2017 06:20	2.36	4.70	78
20	10/11/2018 20:00	3.93	6.68	81	20	17/10/2019 15:20	2.33	4.44	61
21	17/01/2021 05:20	3.89	6.40	81	21	13/01/2017 14:20	2.33	5.24	257
22	06/05/2017 16:20	3.85	7.13	60	22	27/12/2017 05:20	2.32	4.85	263
23	28/02/2020 01:00	3.82	8.15	74	23	28/10/2018 10:20	2.32	4.95	79
24	15/03/2018 00:20	3.79	7.45	96	24	17/10/2020 22:20	2.30	5.05	257
25	08/05/2017 07:20	3.76	6.61	67	25	30/10/2017 15:20	2.29	5.12	92

Les hauteurs significatives des vagues H_{m0} mesurées de mai 2018 à juin 2021 sont présentées sous forme de séries temporelles pour chaque site avec les 15 plus fortes tempêtes mises en évidence (Figures 28 à 31). Outre l'information sur le régime saisonnier des vagues à un site donné, ces graphiques nous renseignent également sur l'intensité de la présence de glace de mer au cours de la période hivernale.

À St-Ulric, les tempêtes interviennent encore majoritairement au cours de l'automne et peuvent se développer jusqu'au mois de janvier, voire février comme ce fut le cas en 2021. On observe quelques événements au printemps avec des vagues surpassant les 2 m. L'été, les hauteurs de vagues demeurent faibles. Lors de la dernière année illustrée, du printemps 2020 au printemps 2021 (Figure 28, panneau du bas), les tempêtes ont été peu nombreuses et la présence de glace est quasi invisible.

Au Cap d'Espoir, il y a eu cinq grosses tempêtes au cours de l'automne 2018 où les vagues ont dépassé les 4 m de hauteur significative avec notamment deux événements majeurs en janvier 2019. À l'automne 2019, malgré deux tempêtes précoces en septembre et octobre où les vagues ont atteint 5 m, il y a eu peu d'événements qui ont généré des grosses vagues par la suite. C'est seulement au printemps 2020, que deux tempêtes, le 10 et le 14 avril, ont généré des vagues de près de 4 m. À l'automne 2020, les tempêtes ont été régulières et fréquentes, et deux tempêtes majeures en janvier et février 2021 ont été recensées. La présence en continue de vagues pendant cette dernière saison hivernale révèle la quasi absence de glace dans cette zone du golfe.

Dans le nord-ouest du golfe, au site de Rivière-Pentecôte, une tempête en janvier 2019 a tourné le cardan de l'instrument au-delà d'une inclinaison de 10° . C'est pourquoi il y a très peu de données valides (seulement quelques tempêtes) à Rivière-Pentecôte pour la période du 11 janvier au 18 juillet 2019. La particularité du site de Rivière-Pentecôte, c'est la dichotomie dans les hauteurs de vagues : il y a soit de très hautes vagues de tempêtes, soit des vagues très faibles. Cette spécificité est confirmée par la forme de la courbe des probabilités de dépassement (Figure 24). En 2018-2019, les vagues de tempêtes sont concentrées dans la deuxième partie de l'automne. L'année d'après les tempêtes ont été moins présentes à l'automne 2019 et une seule tempête majeure au printemps 2020 est recensée. Les données lors de la dernière année, avec seulement trois tempêtes où les vagues ont dépassé 3 m, confirment la diminution de la fréquence et de l'intensité des événements de tempête pour cette zone du golfe. Deux de ces tempêtes ont eu lieu en janvier et en février, probablement facilitée par la très faible présence de glace lors de cette dernière année.

Dans la baie des Chaleurs, l'automne 2018 a connu plusieurs tempêtes très rapprochées dans le temps, dont deux où les vagues ont dépassé les 3 m de hauteur significative, ce qui n'avait encore jamais été mesuré depuis le printemps 2015. Au printemps, les vagues dépassent rarement les 2 m. Contrairement à ce qui est observé à St-Ulric et Rivière-Pentecôte, il n'y a pas de diminution dans le nombre des tempêtes et des hauteurs de vagues dans la baie des Chaleurs lors de la dernière année d'enregistrement. Les glaces ont été très peu présentes lors de ce dernier hiver, et au début du mois de février 2021, une tempête a généré des vagues de 3,17 m.

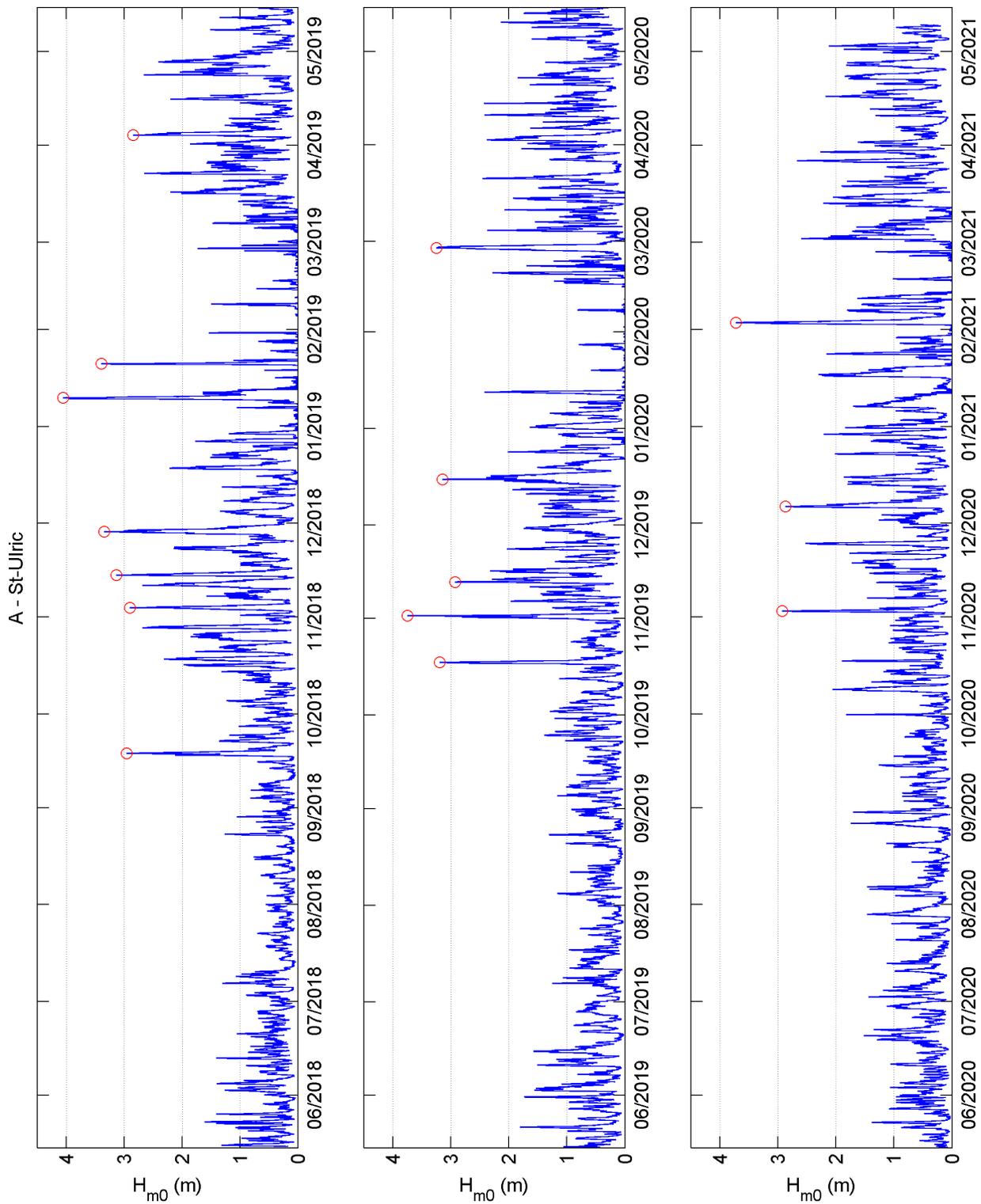


Figure 28 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

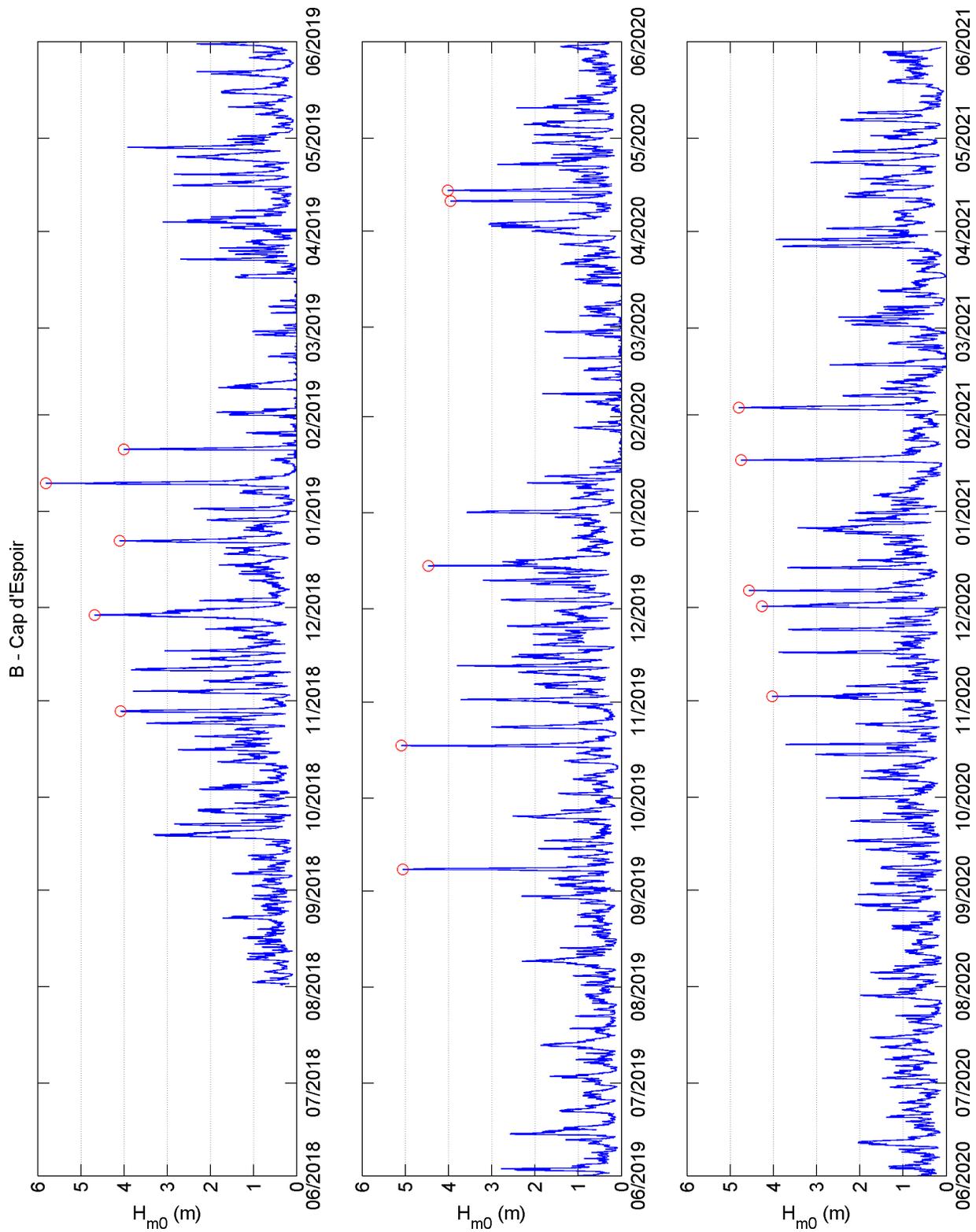


Figure 29 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site B (Cap d'Espoir). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

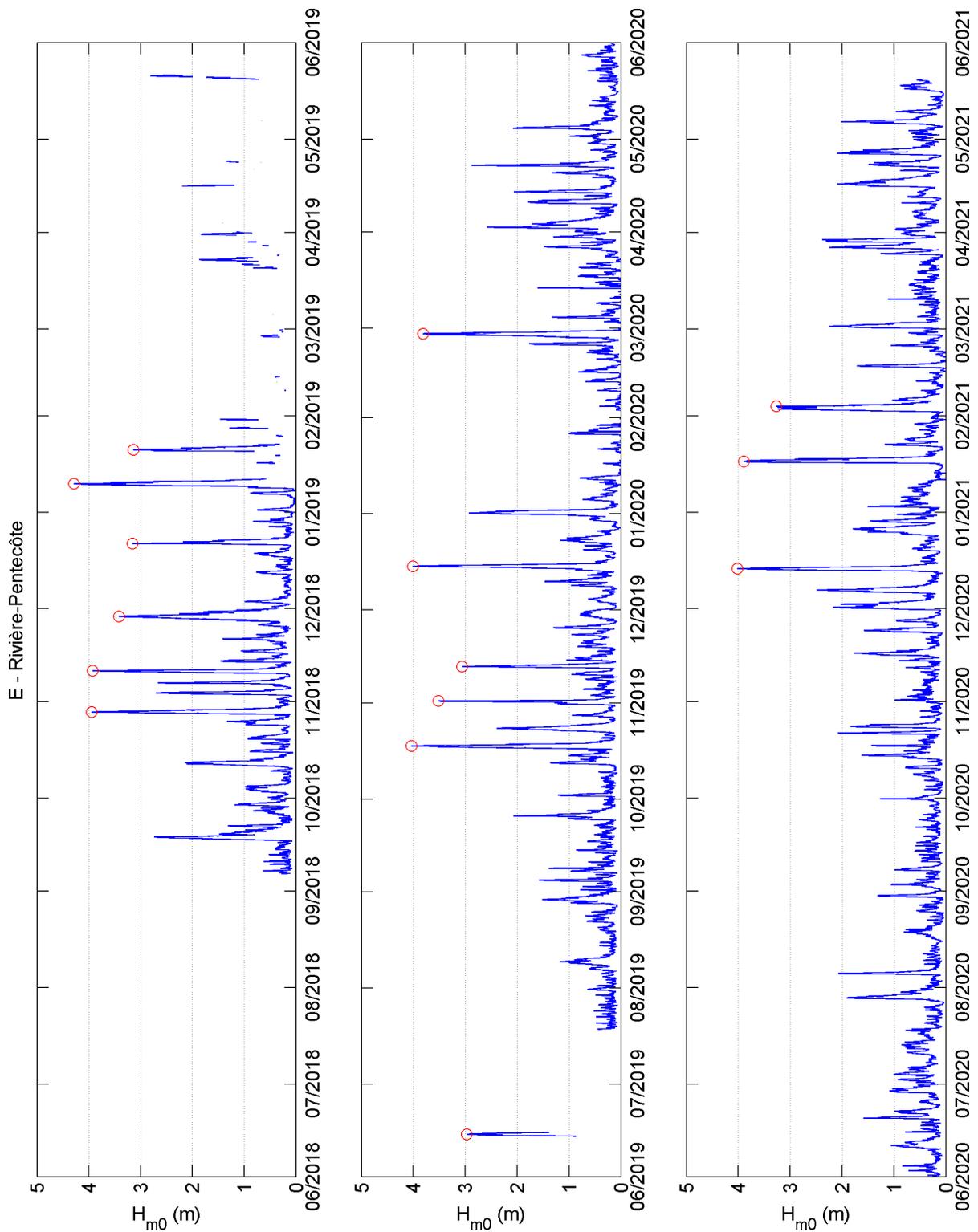


Figure 30 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

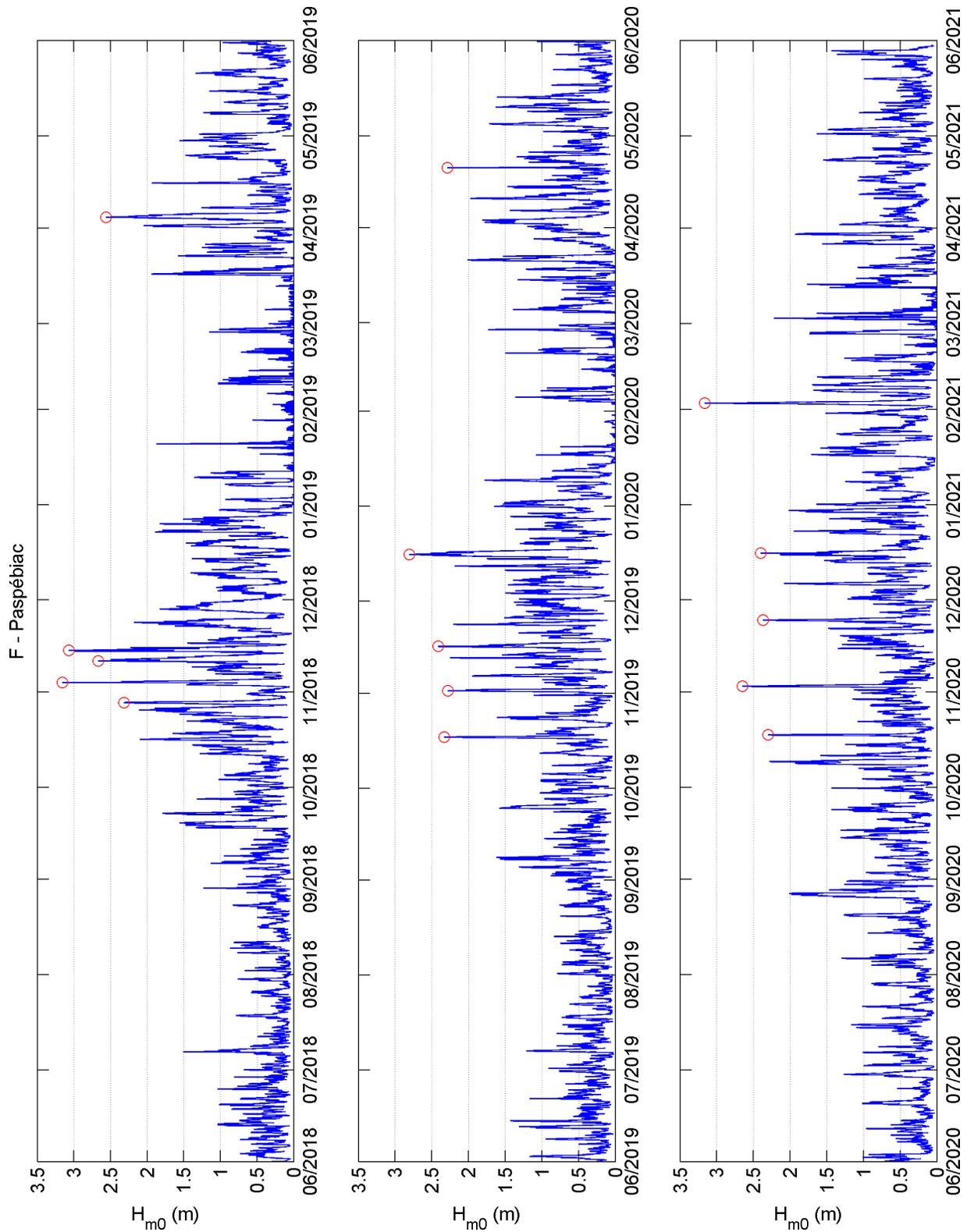


Figure 31 – Série temporelle des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées au site F (Paspébiac). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges

La répartition spatiale des plus fortes tempêtes survenues à chaque site est représentée à la Figure 32. Les tempêtes de la période 2018-2021 sont identifiées en rouge sur cette figure, alors que les tempêtes avant mai 2018 sont représentées en bleu. À noter que sur cette figure, le nombre de tempêtes est légèrement différent de celui utilisé dans les tableaux, et a été fixé à 4 tempêtes par année de monitoring pour chaque station. Ainsi, pour St-Ulric et Cap d'Espoir, 44 tempêtes sont illustrées, 28 pour Rivière-Pentecôte et 24 pour Paspébiac. Sur cette dernière figure, la tendance à la diminution des hauteurs de vagues de tempête lors de ces trois dernières années peut être discernée pour les stations de St-Ulric, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte. Alors que pour Paspébiac, outre l'augmentation des hauteurs de vagues de tempêtes, on observe un déplacement vers l'ouest dans l'origine des tempêtes.

Les périodes de retour des fortes vagues ont été calculées pour chaque site et selon différentes méthodologies (Figures 33 et 34, Tableau 11). La première distribution probabiliste utilisée est la loi de Pareto généralisée (Coles, 2001), où l'ajustement est réalisé au seuil des 93%. Les deux autres distributions sont celles de Weibull et de Gumbel, pour lesquelles la limite des plus fortes tempêtes utilisées pour l'analyse a été déterminée visuellement sur les graphiques (Figures 33 et 34). Près de 10 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 (6,1 ans) et Paspébiac (5,6 ans). C'est pour cette raison que les périodes de retour de 30 ans ont seulement été calculés pour les deux premiers sites, et que les prédictions s'arrêtent aux périodes de retour de 20 ans pour les deux derniers sites.

Selon la distribution utilisée, les résultats peuvent montrer des différences importantes pour un même site, avec la loi de Pareto généralisée prédisant les plus faibles vagues pour une période de retour donnée. Les données suivent relativement bien les différentes distributions probabilistes, sauf pour le site de Rivière-Pentecôte où les vagues de 3,5 à 4 m sont plus fréquentes et les vagues au-dessus de 4 m moins fréquentes que ce que prédisent les modèles (Figures 33 et 34)

Pour St-Ulric, les vagues dont la hauteur H_{m0} est supérieure à 4,4 m (ou 4,7 m selon les distributions probabilistes utilisées) ont une récurrence aux 20 ans environ (Tableau 11). À Rivière-Pentecôte ce sont des vagues de 6,4 m (ou 7,2 m), qui ont cette récurrence. À Cap d'Espoir ce sont des vagues de 6.9 m (ou 7,2 m), qui ont cette récurrence. Pour le site de Paspébiac dans la baie des Chaleurs, ce sont des vagues de 3,3 (ou 3,7 m) qui ont cette récurrence aux 20 ans.

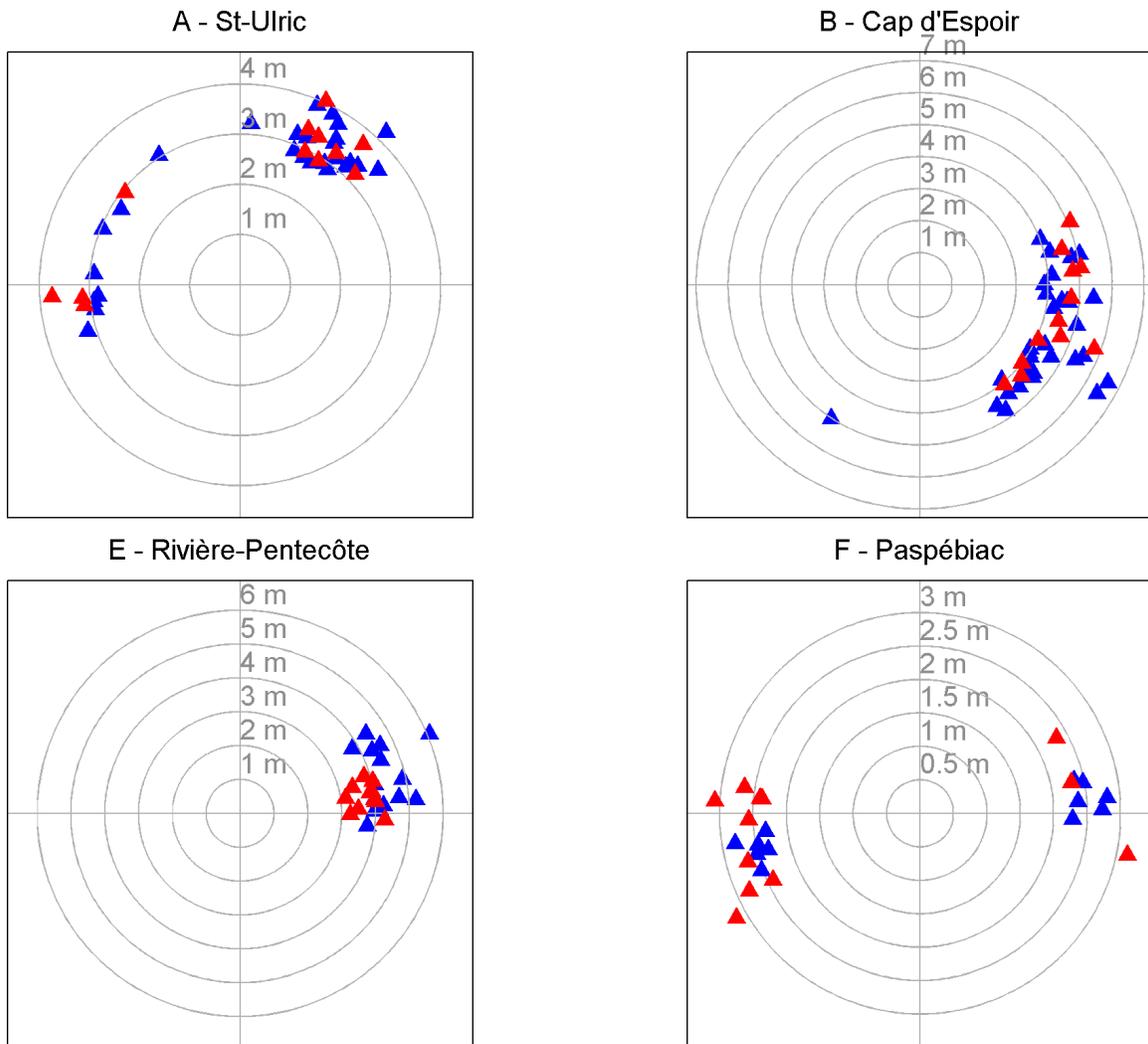


Figure 32 – Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des plus fortes tempêtes observées aux sites A, B, E et F durant le projet ($n = 44; 44; 28; 24$). Les triangles en bleu correspondent à la période 2010- avril 2018 et les triangles en rouge, mai 2018 - juin 2021.

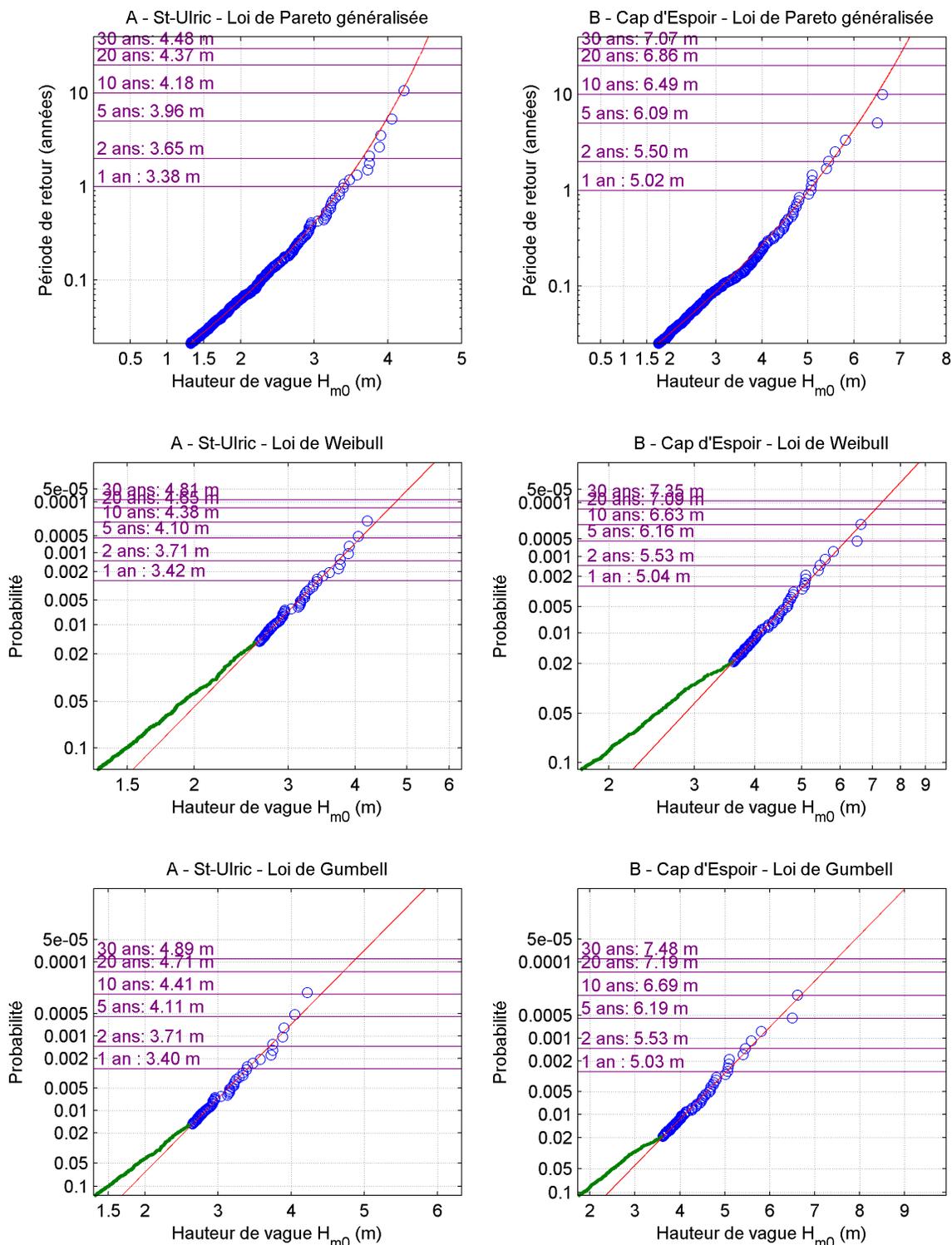


Figure 33 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbell, aux sites A et B. Les tempêtes utilisées pour l’ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de 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.

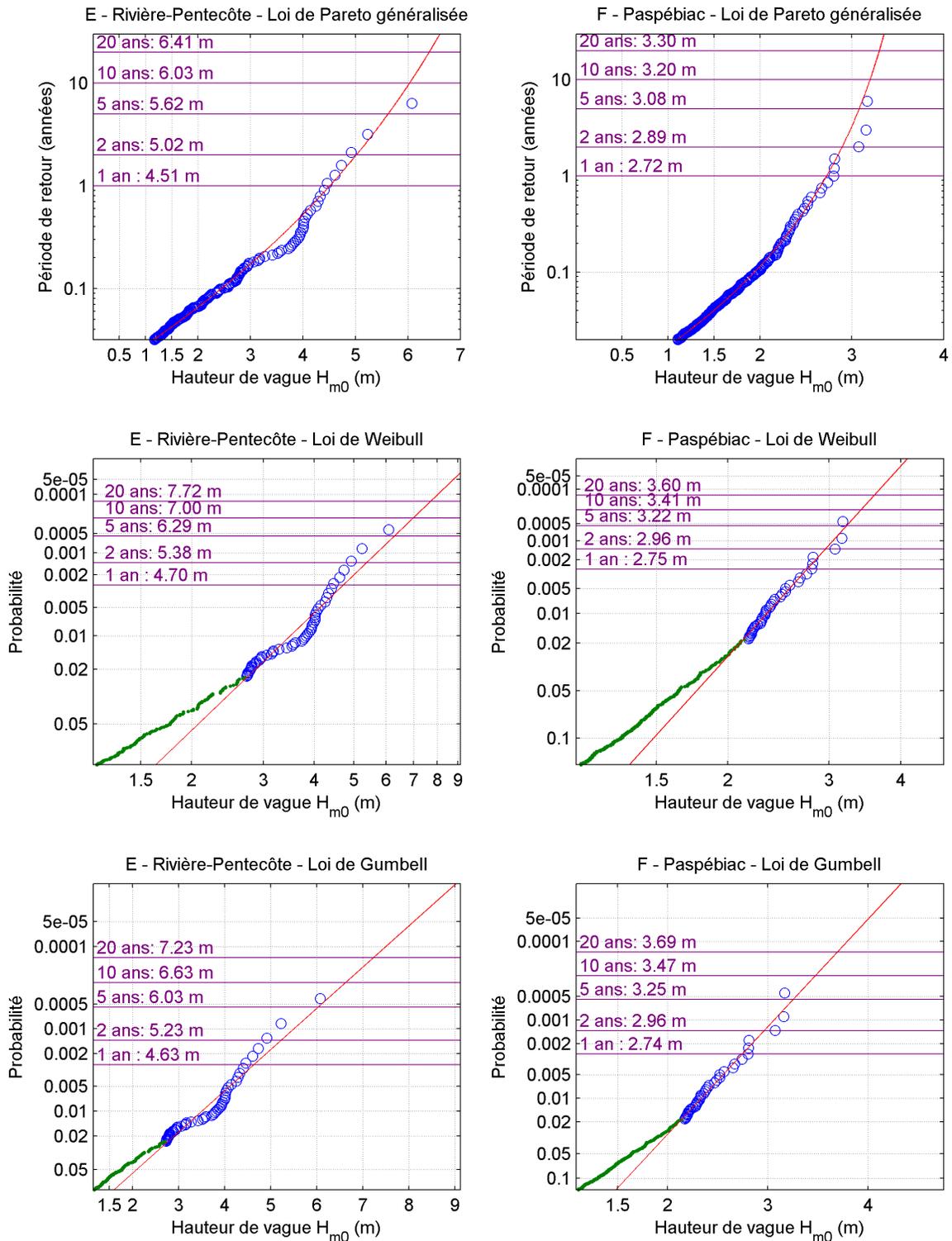


Figure 34 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites E et F. Les tempêtes utilisées pour l’ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto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

Tableau 11 – Hauteurs de vagues H_{m0} pour différentes périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel.

	Loi de Pareto généralisée	Distribution Weibull	Distribution Gumbel
A – Saint-Ulric : 2010-05-03 à 2021-05-09 (10,6 ans [#]) Plus forte tempête : 4,22 m			
1 an	3,38 m	3,42 m	3,40 m
2 ans	3,65 m	3,71 m	3,71 m
5 ans	3,96 m	4,10 m	4,11 m
10 ans	4,18 m	4,38 m	4,41 m
20 ans	4,37 m	4,65 m	4,71 m
30 ans	4,48 m	4,81 m	4,89 m
B – Cap d'Espoir : 2010-10-06 à 2021-05-30 (10,1 ans [#]) Plus forte tempête : 6,61 m			
1 an	5,02 m	5,04 m	5,03 m
2 ans	5,50 m	5,53 m	5,53 m
5 ans	6,09 m	6,16 m	6,19 m
10 ans	6,49 m	6,63 m	6,69 m
20 ans	6,86 m	7,09 m	7,19 m
30 ans	7,07 m	7,35 m	7,48 m
E – Rivière-Pentecôte : 2014-05-06 à 2021-05-20 (6,2 ans [#]) Plus forte tempête : 6,08 m			
1 an	4,51 m	4,70 m	4,63 m
2 ans	5,02 m	5,38 m	5,23 m
5 ans	5,62 m	6,29 m	6,03 m
10 ans	6,03 m	7,00 m	6,63 m
20 ans	6,41 m	7,72 m	7,23 m
F – Paspébiac : 2015-05-22 à 2021-05-30 (6,0 ans [#]) Plus forte tempête : 3,17 m			
1 an	2,72 m	2,75 m	2,74 m
2 ans	2,89 m	2,96 m	2,96 m
5 ans	3,08 m	3,22 m	3,25 m
10 ans	3,20 m	3,41 m	3,47 m
20 ans	3,30 m	3,60 m	3,69 m

[#] La durée en années des données utilisées pour l'analyse tient compte des périodes sans enregistrement et des périodes pour lesquelles données de hauteur de vagues H_{m0} ont été rejetées lors du contrôle de qualité.

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.

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 35 et 36. 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 (Figure 36), 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 la côte produit de forts courants à marée montante. À cet endroit, les courants et les vagues sont orientés dans les mêmes directions.

Le patron directionnel des courants est très conservateur, car lié à la marée et au débit du fleuve St-Laurent pour St-Ulric, ainsi aucun changement par rapport aux données des années précédentes, n'est observable quelle que soit la station considérée.

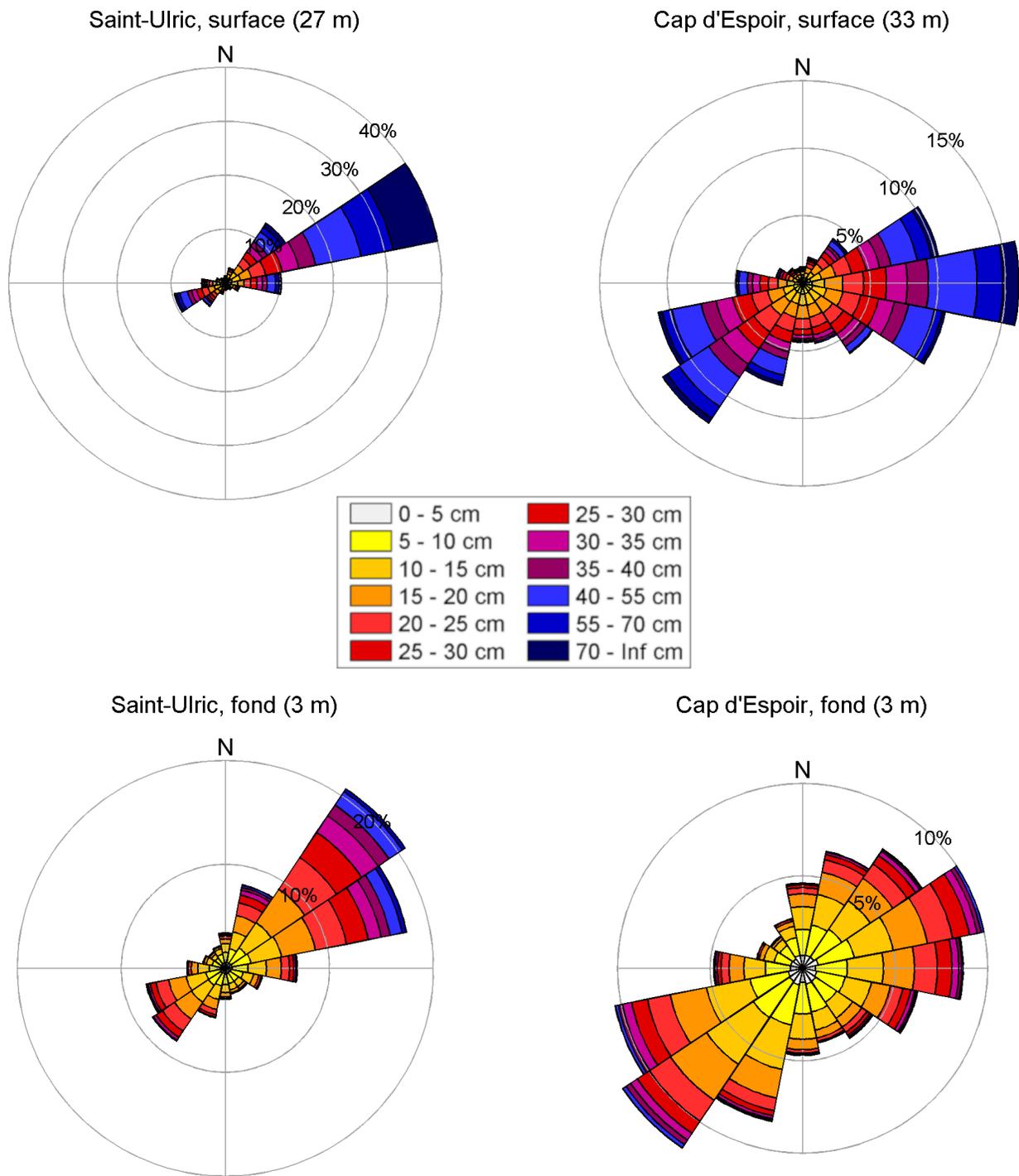
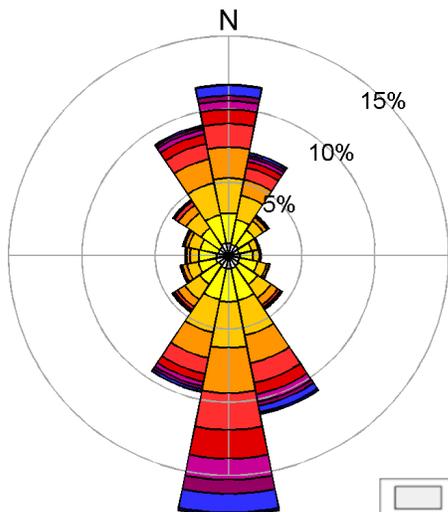
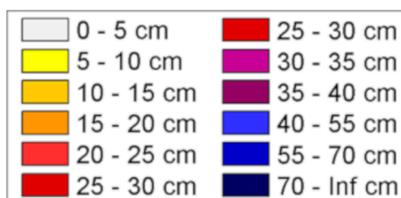
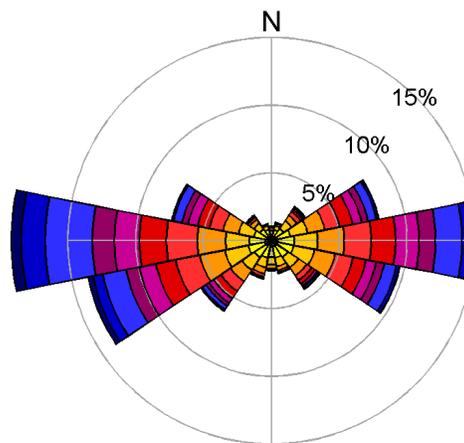


Figure 35 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites A et B de mai 2018 à juin 2021.

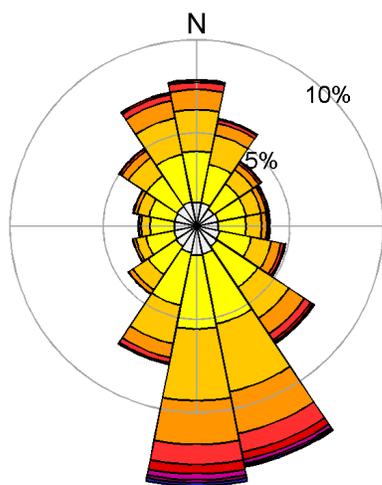
Rivière-Pentecôte, surface (29 m)



Paspébiac, surface (29 m)



Rivière-Pentecôte, fond (3 m)



Paspébiac, fond (3 m)

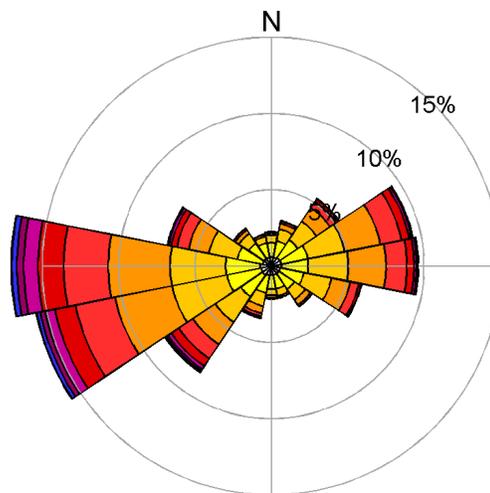


Figure 36 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites E et F de juin 2018 à juin 2021.

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, 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 corrélérer 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 37 à 40). Les séries temporelles recouvrant la période du 15 décembre au 15 avril de l'année suivante sont fractionnées par année afin d'illustrer la variabilité interannuelle de la saison de glace. Chacune des figures illustrent une réduction très nette des conditions de glace en hiver sur les trois années de données présentées, tant par le raccourcissement de la saison que par les épaisseurs moyennes des floes de glace.

À St-Ulric, l'hiver 2018-2019 se situe dans la normale avec l'apparition des premiers signes de glace à la fin du mois de décembre et le retour de l'eau libre dès la mi-mars. Lors du deuxième hiver 2019-2020, la saison de glace est raccourcie avec une quasi disparition des floes de glace dans l'estuaire dès la fin du mois de février. Enfin, le dernier hiver 2020-2021, la saison de glace ne commence qu'à la fin du mois janvier, suivi d'une période d'eau libre importante dans la première quinzaine de février et la disparition de la glace avant la mi-mars. Par ailleurs l'épaisseur calculée des floes de glace est bien inférieure à celle des années précédentes.

Au Cap d'Espoir la saison de glace est très discontinue et la présence de floes de glace semble liée aux conditions de vent. À l'entrée de la baie des Chaleurs, les conditions de glace sont généralement moins importantes que celles observées dans l'estuaire. Le premier hiver, la glace de mer est présente dès le mois de janvier mais les épaisseurs moyennes mesurées sont très modestes. La saison se termine vers la mi-mars, malgré quelques floes détectés autour du 1^{er} avril, qui pourraient toutefois être des débris ou des amas d'algues considérant les épaisseurs mesurées. La deuxième année, en 2019-2020, la saison de glace est raccourcie à environ deux mois, débutant à la mi-janvier et s'achevant à la mi-mars. Les épaisseurs mesurées sont réduites. Enfin, la dernière année de mesure, la glace est quasi inexistante.

À Rivière-Pentecôte, il n’y a pas de données de glace la première année de mesure en 2018-2019 à cause de l’inclinaison trop prononcée de la tête de l’instrument et de son blocage dans cette position jusqu’en juillet 2019. En 2019-2020, la saison de glace, entrecoupée par plusieurs périodes d’eau libre, commence à la mi-janvier et s’achève à la mi-mars. Enfin la dernière année, tel qu’observé à Cap d’Espoir, il n’y a quasiment pas de glace détectée. La côte Nord semble moins propice à l’accumulation de floes de glace très épais.

Dans la baie des Chaleurs à Paspébiac, la première année, la glace commence à apparaître dès le début du mois de janvier et les dernières présences interviennent autour du premier avril. À noter que la saison de glace ne connaît pas de périodes d’eau libre par rapport à ce qui est observé dans l’estuaire et dans le golfe. La deuxième année, en 2019-2020, la saison de glace ne commence qu’après la mi-janvier et se termine vers le début du mois de mars, malgré la présence de quelques floes de glace autour de la mi-mars. Enfin, en 2020-2021, tout comme pour les autres sites, la présence de glace est très réduite ainsi que l’épaisseur mesurée. Au large de Paspébiac, les floes de glace ne sont détectés qu’après la mi-février et se dissipent avant la mi-mars. Ce qui ressort de ces graphiques, est la quasi absence de glace lors du dernier hiver 2020-2021 détectable aux quatre sites monitorés.

Le Tableau 12 résume les conditions de glaces aux quatre sites durant les trois années du projet. Les données calculées, tant par l’équivalence de couverture que par l’épaisseur moyenne, viennent renforcer la tendance observée pour ces trois années d’enregistrement par les Figures 37 à 40.

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			
2018-2019	90	48,2	0,97
2019-2020	85	35,7	0,89
2020-2021	64	21,3	0,47
B – Cap d’Espoir			
2018-2019	89	41,0	0,42
2019-2020	65	35,4	0,27
2020-2021	28	2,5	0,16
E – Rivière-Pentecôte			
2018-2019	n.d.	n.d.	n.d.
2019-2020	87	32,3	0,13
2020-2021	41	2,3	0,06
F – Paspébiac			
2018-2019	90	55,7	0,28
2019-2020	69	34,4	0,23
2020-2021	47	10,4	0,16

^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)

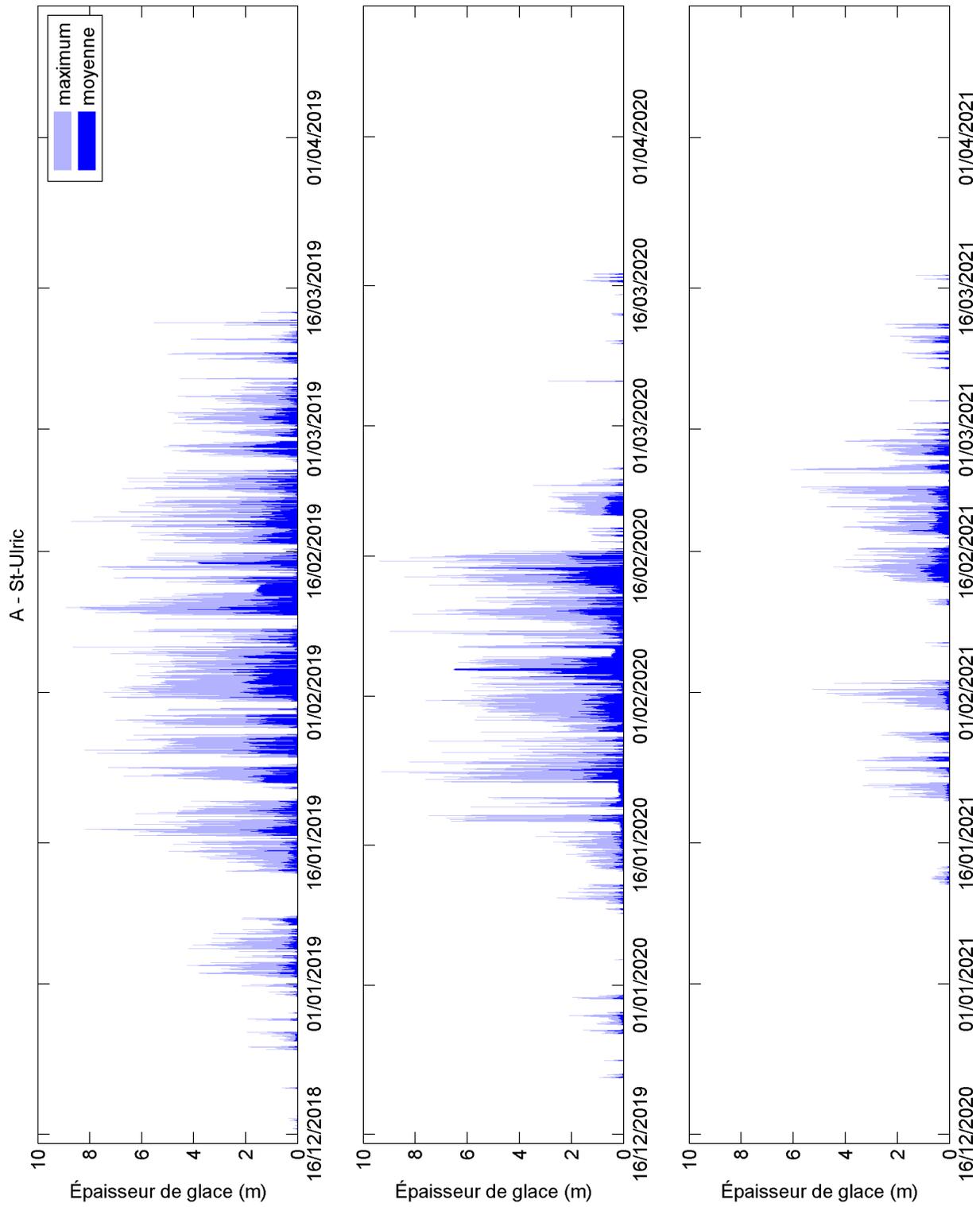


Figure 37 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les trois hivers du projet.

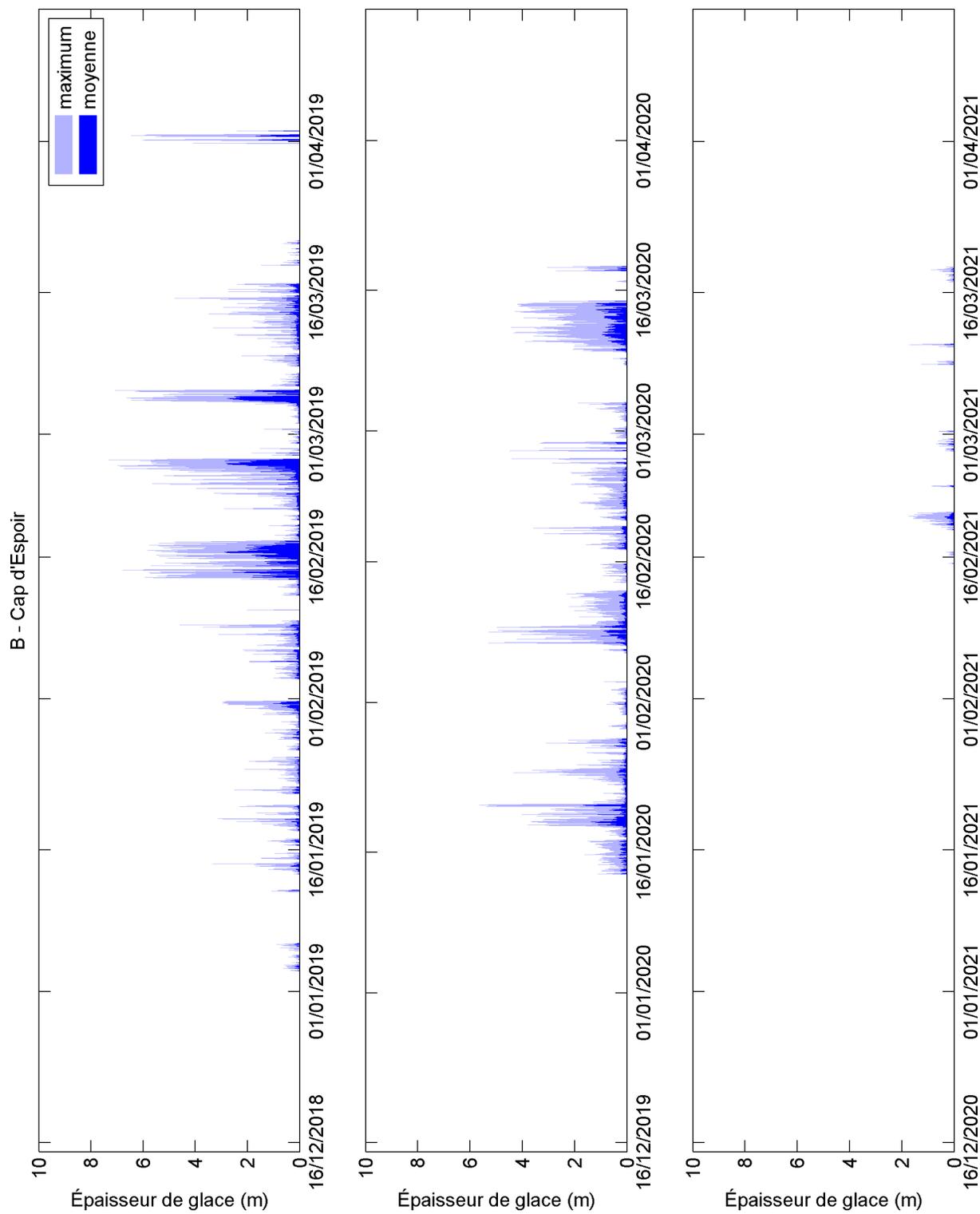


Figure 38 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les trois hivers du projet.

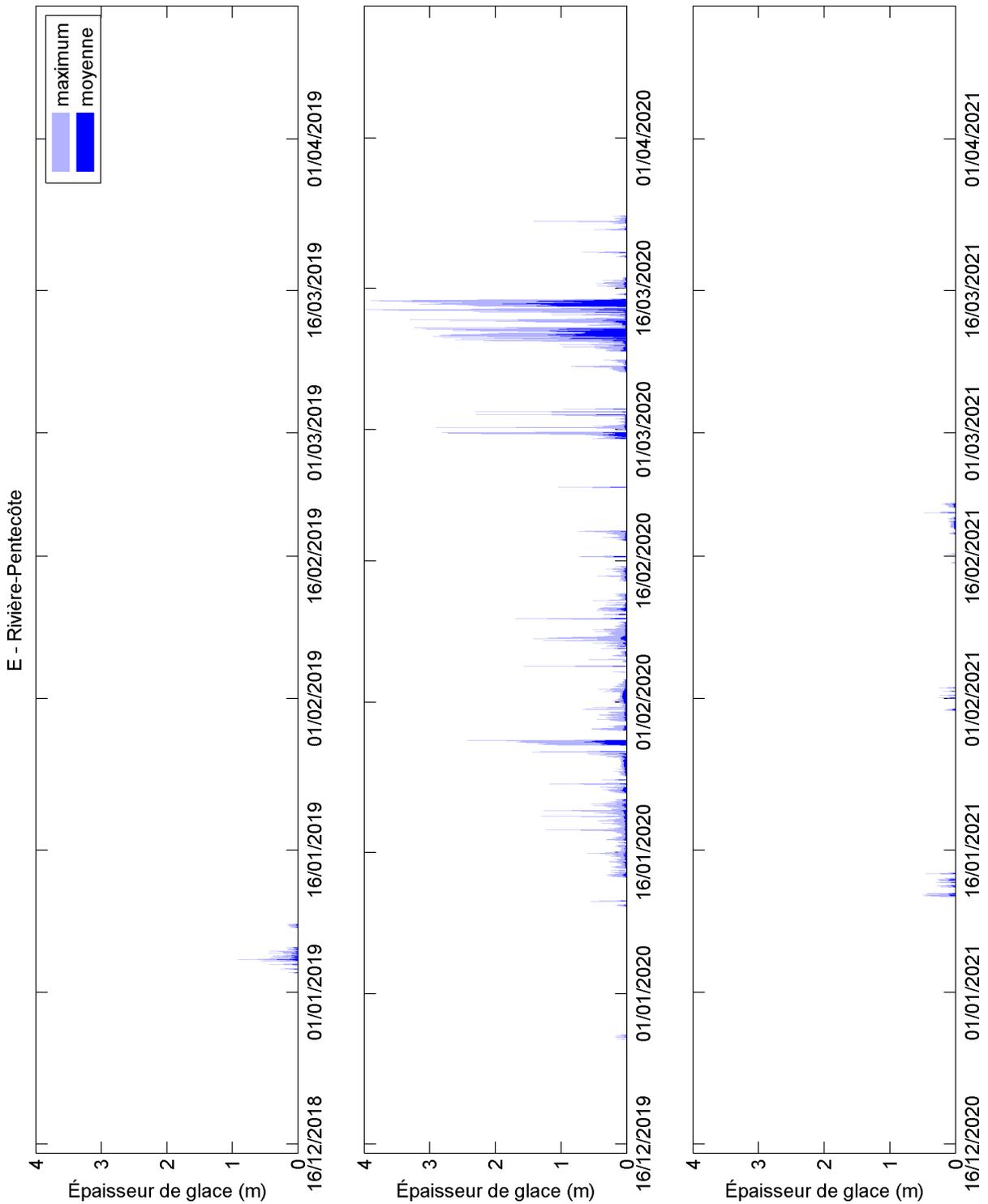


Figure 39 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant les trois hivers du projet (à noter que l'instrument n'a pu enregistrer de données valides de glace le premier hiver à partir du 9 janvier 2019).

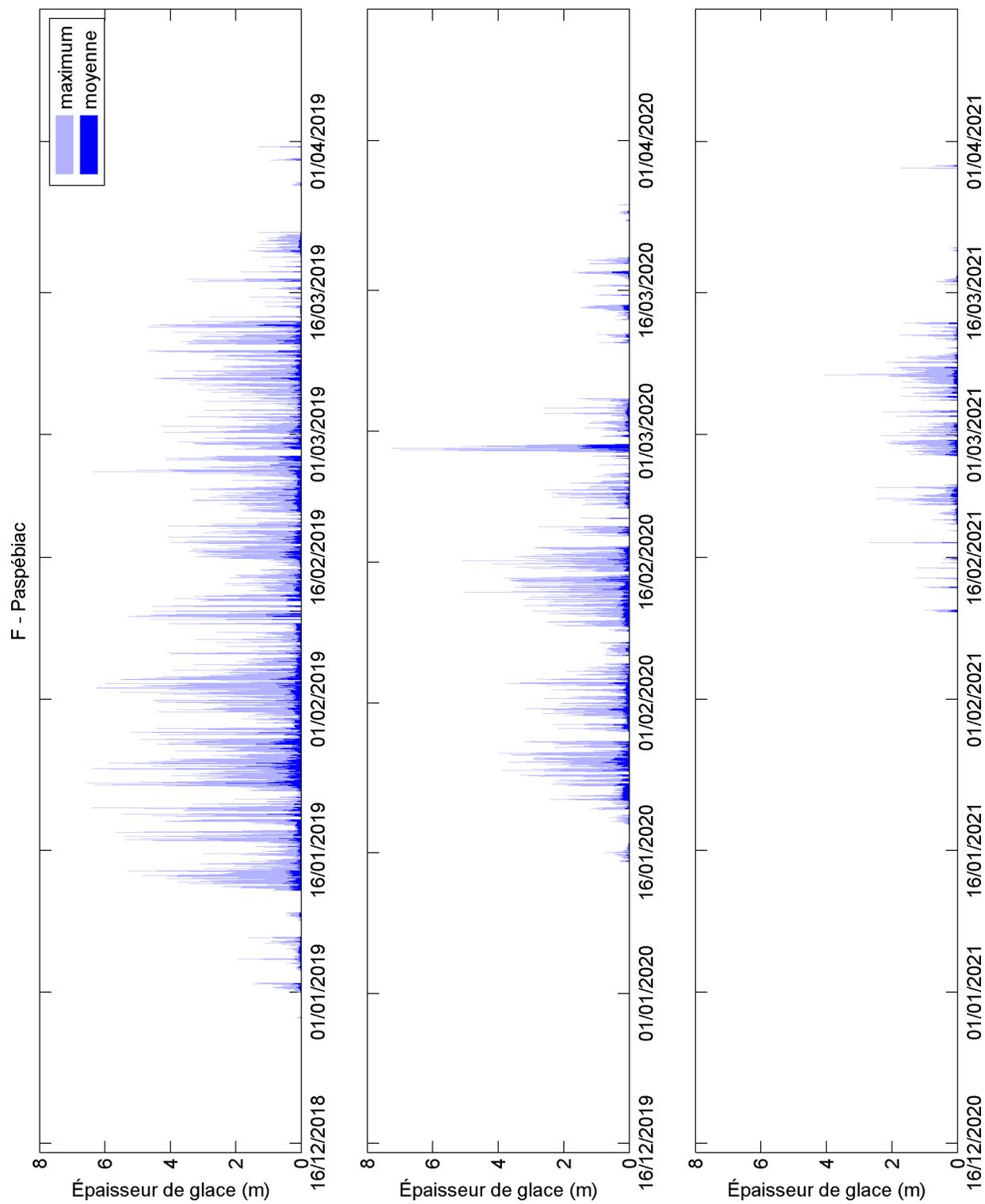


Figure 40 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers du projet.

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 de référence était le niveau marin moyen. À cet effet le niveau d'eau moyen observé durant chaque déploiement (calculé sur les cycles tidaux complets à partir du premier niveau de mi-marée du 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.

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 41 à 44 présentent les variations du niveau d'eau au site de St-Ulric, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte durant 3 ans, et 1 an à Paspébiac (correspondant aux durées de mesure aux différents sites pour le présent projet R841.1), 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 automne et en hiver. 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.

Les Tableaux 13 et 14 répertorient la date et l'heure des plus fortes surcotes et les plus fortes décotes observées à chaque site, quel que soit le moment de la marée, alors que le Tableau 15 répertorie la date et l'heure des plus hauts niveaux marins mesurés. Ces tableaux couvrent toutes les données disponibles aux quatre sites, à savoir 10½ ans au site A, 10 ans au site B (avec 18 événements listés pour ces sites), et ~6 ans aux sites E et F (avec 12 événements listés). Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras dans ces tableaux.

Pendant le présent projet, il y a eu des surcotes importantes et des niveaux marins plus hauts que la normale, mais il n'y a pas eu d'événements exceptionnels. Lors des projets précédents aux mêmes sites, les surcotes et les niveaux marins absolus ont été plus élevés, avec trois à cinq événements plus importants que durant le présent projet (Tableaux 13 et 15). Ainsi, la plus forte surcote durant ce projet à Saint-Ulric était de 0,87 m, comparé à 1,32 m en décembre 2016, à Cap d'Espoir de 0,77 m comparé à 1,05 en janvier 2018, à Rivière-Pentecôte de 0,88 m comparé à 1,36 m en décembre 2016, et à Paspébiac de 0,83 m comparé à 1,13 m en janvier 2018 (Tableaux 13 et 14).

La plus forte surcote durant le projet est survenue le 25 février 2019 aux sites A, B et E. À Paspébiac ce jour-là, c'était la troisième plus forte surcote du projet, mais seulement 0,030 m plus faible que la plus forte surcote (Tableaux 13 et 14). La Figure 45 présente les niveaux d'eau mesurés aux quatre sites lors de cet événement majeur. 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 la figure. Cette surcote de 0,77 à 0,88 m était relativement synchrone entre les quatre sites, mais plus marquée à Rivière-Pentecôte et Saint-Ulric (0,88 m) qu'à Cap d'Espoir et dans la baie des Chaleurs (0,77 et 0,83 m). Comme cette surcote ne s'est pas produite durant les

marées de vive-eau, le niveau marin n'était pas exceptionnellement haut. Cette forte surcote n'était pas accompagnée de fortes vagues à cause du couvert de glace.

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.

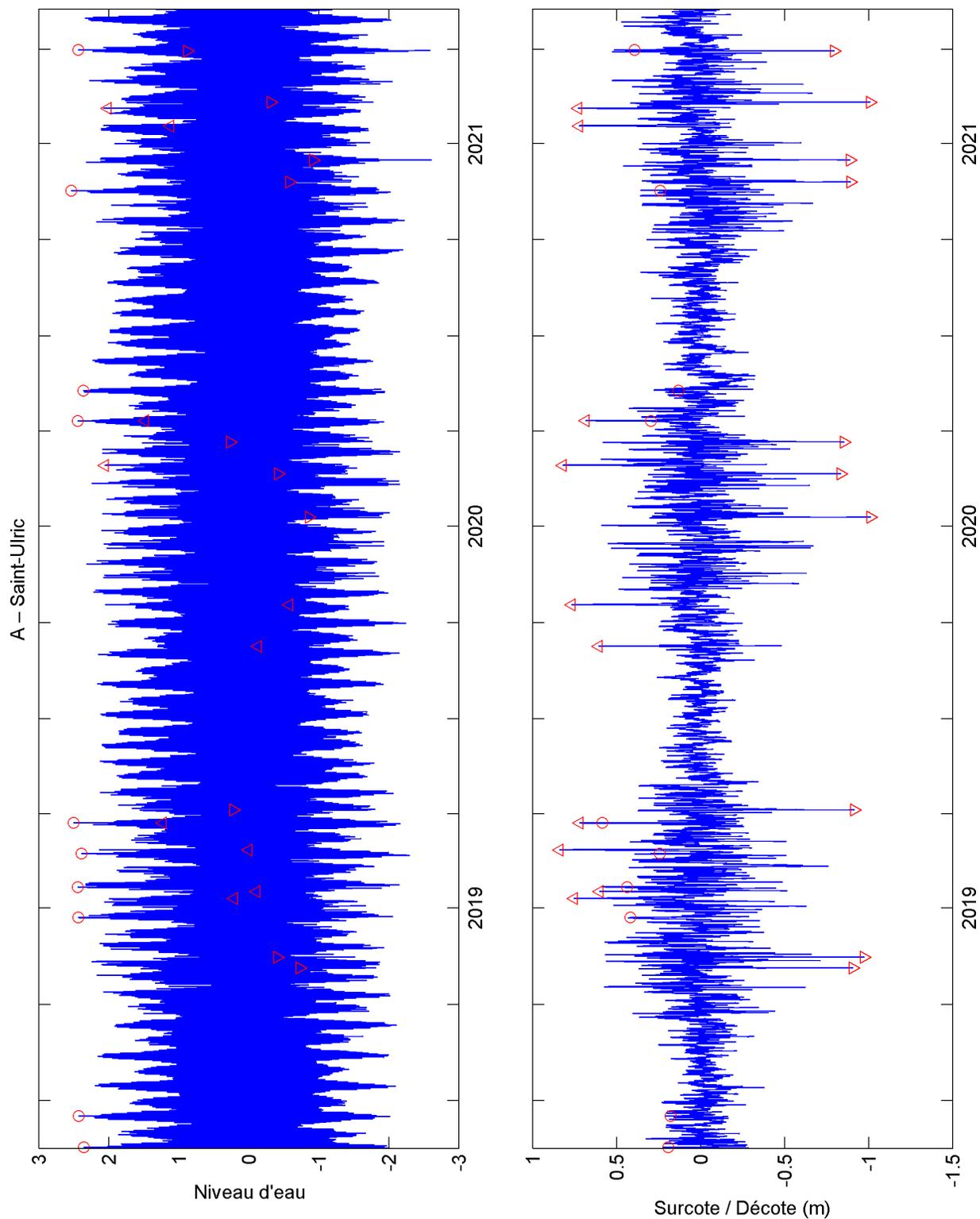


Figure 41 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

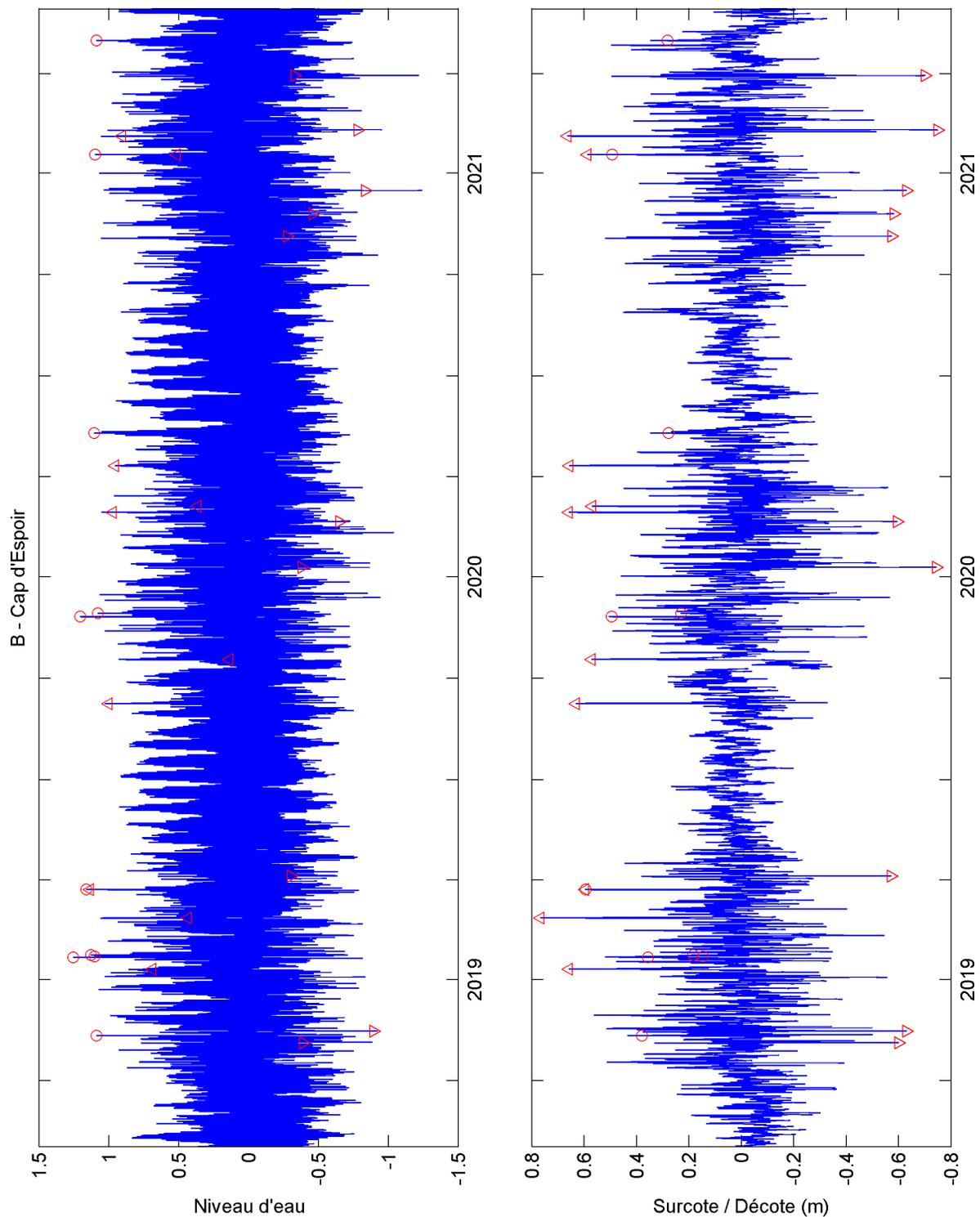


Figure 42 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

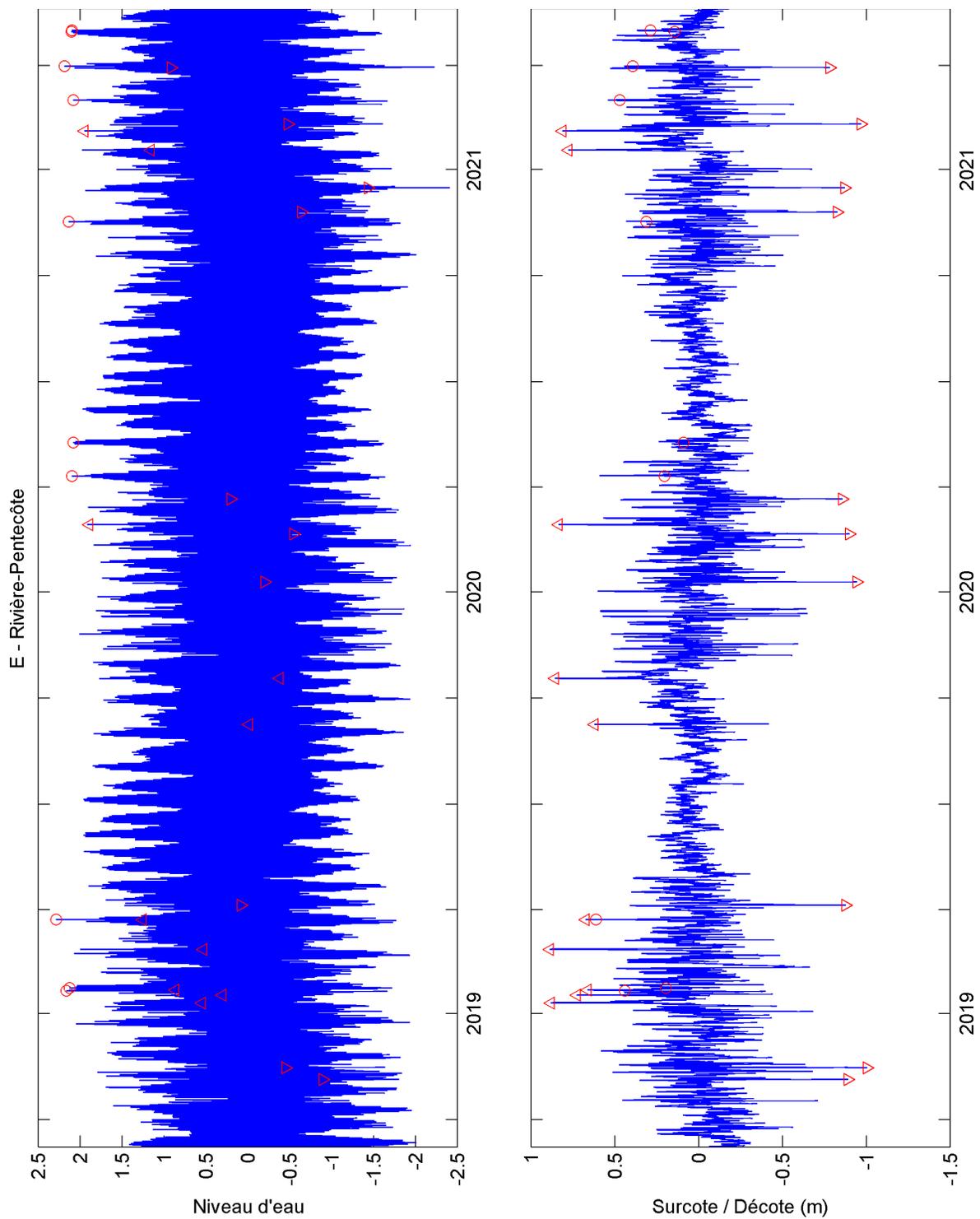


Figure 43 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (▽).

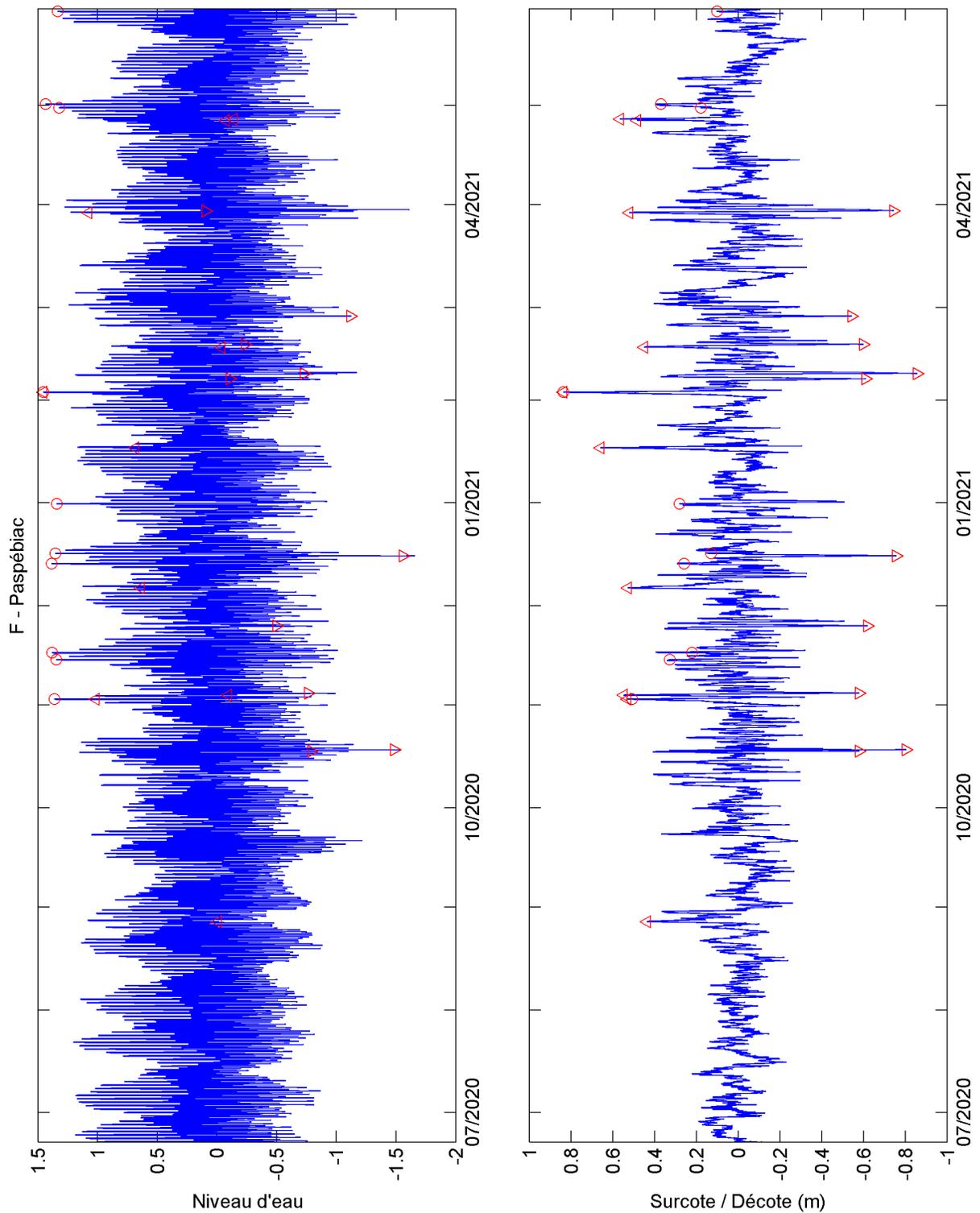


Figure 44 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) au cours de l'année prévue au projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (o), et les dix plus fortes surcotes (Δ) et décotes (∇).

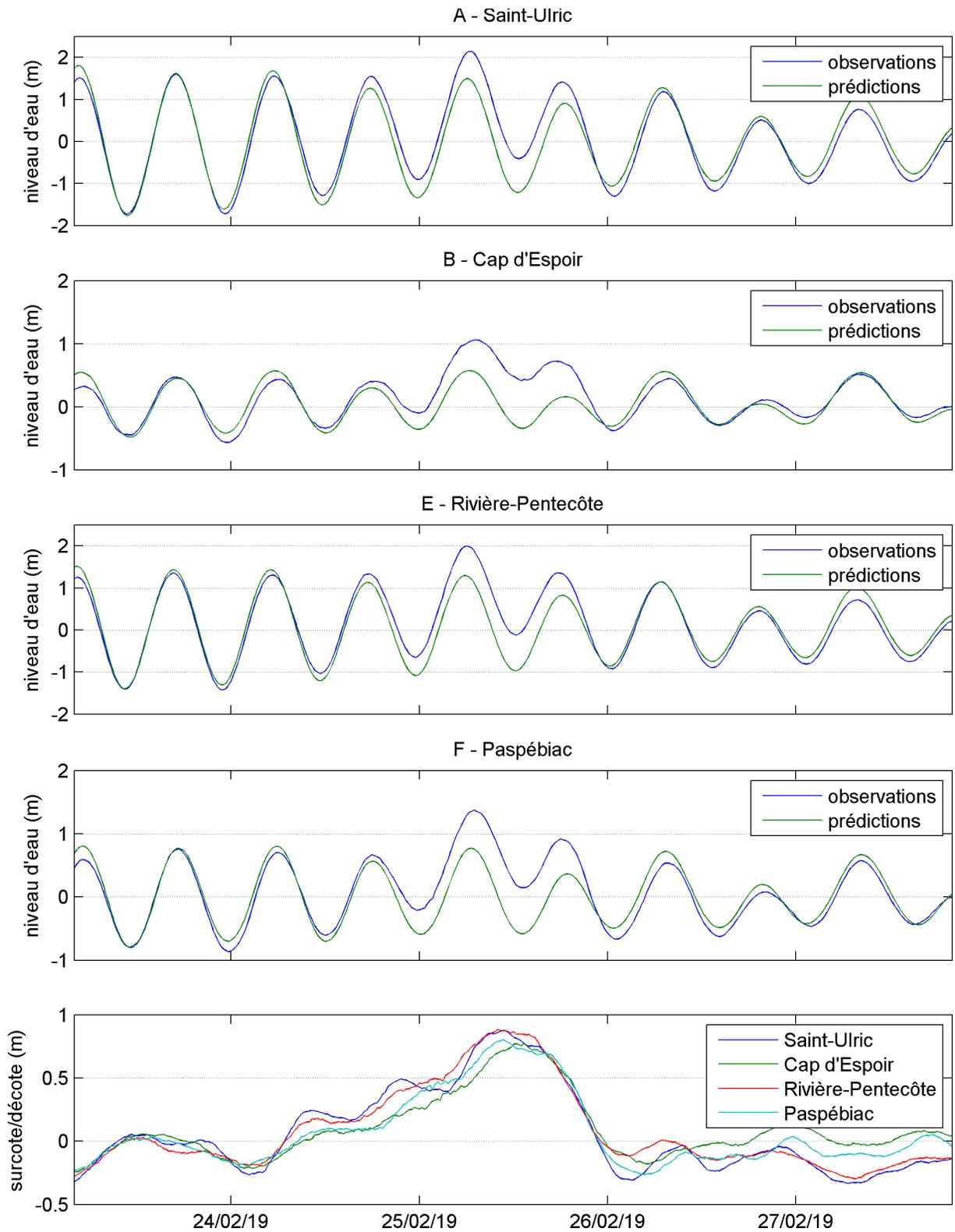


Figure 45 – Niveaux d'eau mesurés, prédictions de marées avec T_TIDE et surcotes pendant l'événement du 25 février 2019.

Tableau 13 – Liste des 18 plus fortes surcotes et des 18 plus fortes décotes observées aux sites A et B, 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.

Saint-Ulric - Surcotes			Saint-Ulric - Décotes		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Décote (m)
2016-12-30 12:00	1,823	1,322	2011-12-09 04:20	-1,434	-1,19
2015-02-15 23:00	1,541	1,005	2014-03-27 16:40	-2,220	-1,089
2018-01-05 01:20	0,818	1,000	2015-01-25 20:40	-0,786	-1,039
2010-12-06 12:40	2,402	0,935	2021-02-09 00:00	-0,311	-1,037
2019-02-25 10:40	0,162	0,870	2015-02-03 23:00	-1,546	-1,020
2014-02-14 14:00	2,411	0,866	2020-01-09 10:20	-0,411	-1,010
2014-01-27 17:40	-0,284	0,830	2018-11-14 20:20	-0,295	-0,969
2012-02-25 14:40	1,687	0,821	2016-04-04 11:20	0,317	-0,956
2010-09-22 10:00	0,327	0,808	2019-04-04 12:00	-0,233	-0,951
2019-10-17 22:00	-0,579	0,774	2020-12-16 00:20	-0,92	-0,941
2015-02-14 20:00	0,706	0,752	2017-12-26 11:00	-1,069	-0,934
2015-03-04 07:40	-0,449	0,751	2014-01-04 11:20	-2,158	-0,925
2019-01-09 23:00	-0,476	0,746	2015-02-14 06:00	-0,925	-0,924
2017-06-11 05:20	1,508	0,746	2014-02-17 03:20	0,363	-0,921
2012-12-22 07:20	1,167	0,741	2016-12-16 18:40	-0,46	-0,918
2020-02-28 05:00	2,058	0,738	2013-12-19 11:40	-0,997	-0,913
2014-03-26 22:40	1,423	0,708	2017-02-06 22:00	-0,351	-0,905
2013-03-22 10:00	1,543	0,708	2020-11-24 19:40	-0,713	-0,905

Cap d'Espoir - Surcotes			Cap d'Espoir - Décotes		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Décote (m)
2018-01-05 05:40	1,228	1,048	2011-12-09 03:40	-0,964	-0,851
2016-12-30 13:40	1,558	0,871	2014-03-27 16:40	-1,216	-0,850
2014-02-14 15:20	1,383	0,843	2013-12-19 12:00	-0,583	-0,809
2014-03-26 23:20	0,836	0,791	2014-02-17 01:40	-0,633	-0,787
2019-02-25 13:20	0,433	0,771	2014-01-04 12:00	-0,878	-0,786
2016-12-16 03:20	0,871	0,765	2020-01-09 11:40	-0,054	-0,752
2012-02-25 12:00	0,538	0,753	2021-02-09 01:20	-0,783	-0,750
2012-02-12 06:40	1,146	0,743	2014-01-27 02:20	-1,071	-0,749
2016-01-13 16:00	1,429	0,700	2021-03-30 02:00	-0,153	-0,748
2020-04-10 16:20	0,954	0,697	2016-12-16 19:40	-0,658	-0,704
2013-02-17 18:40	0,770	0,682	2013-02-05 04:40	-0,735	-0,682
2015-01-25 09:00	0,676	0,676	2020-12-16 00:40	-0,836	-0,679
2010-12-27 18:20	1,143	0,653	2014-01-07 19:00	-0,232	-0,660
2019-09-07 23:00	1,003	0,645	2017-02-06 20:40	-0,727	-0,660
2011-01-22 00:40	0,454	0,637	2017-12-26 10:20	-0,558	-0,648
2017-02-10 08:20	0,340	0,634	2018-02-06 06:20	-0,186	-0,639
2020-02-28 03:20	0,973	0,629	2012-01-28 23:00	-0,901	-0,638
2017-03-15 11:20	0,267	0,626	2013-11-29 00:00	-0,549	-0,636

Tableau 14 – Liste des 12 plus fortes surcotes et des 12 plus fortes décotes observées aux sites 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.

Rivière-Pentecôte - Surcotes			Rivière-Pentecôte - Décotes		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Décote (m)
2016-12-30 11:00	1,467	1,357	2018-11-14 19:40	-0,453	-1,044
2018-01-05 02:00	1,652	1,182	2021-02-09 00:20	-0,432	-1,027
2015-02-15 23:00	1,675	1,146	2020-01-09 10:20	-0,203	-1,004
2019-02-25 10:00	0,532	0,882	2017-02-06 21:40	-0,473	-0,982
2015-03-04 07:40	-0,032	0,859	2016-04-04 10:40	0,164	-0,977
2015-02-14 20:40	1,122	0,850	2020-12-15 23:20	-1,437	-0,970
2019-10-17 22:40	-0,381	0,826	2020-02-19 22:40	-0,546	-0,968
2015-01-04 21:20	-0,124	0,824	2018-11-04 14:00	-0,900	-0,896
2015-01-19 18:00	-0,192	0,812	2020-11-24 19:40	-0,643	-0,889
2019-01-10 01:00	0,546	0,810	2016-12-16 18:00	-0,226	-0,879
2020-02-28 05:00	1,893	0,793	2019-04-04 12:20	0,081	-0,878
2015-01-25 06:20	1,848	0,790	2017-03-11 20:40	-1,917	-0,865

Paspébiac - Surcotes			Paspébiac - Décotes		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Décote (m)
2018-01-05 06:40	1,309	1,131	2019-04-04 12:40	-0,476	-0,933
2018-01-04 23:20	0,184	1,104	2018-11-04 12:00	-0,407	-0,925
2016-12-30 08:00	0,481	1,006	2021-02-08 23:40	-0,730	-0,873
2016-12-30 17:00	1,571	0,915	2018-11-14 18:00	-0,301	-0,865
2016-12-16 03:00	1,163	0,832	2017-02-06 21:00	-0,826	-0,840
2019-09-07 23:20	1,246	0,832	2020-01-09 10:00	-0,561	-0,840
2021-02-03 07:00	1,453	0,820	2017-12-26 09:00	-0,489	-0,810
2019-02-25 10:40	0,612	0,802	2020-10-18 10:00	-1,485	-0,810
2016-01-13 14:00	1,224	0,787	2021-03-30 02:40	0,094	-0,795
2020-02-28 04:00	1,293	0,780	2020-12-15 23:40	-1,368	-0,782
2019-01-20 19:20	0,000	0,753	2016-12-16 20:00	-0,863	-0,767
2019-01-09 20:00	0,791	0,749	2020-02-19 22:20	-0,789	-0,757

Tableau 15 – Liste des 18 plus hauts niveaux marins observés aux sites A et B et les 12 plus hauts niveaux marins observés au sites E et F, 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. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.

Saint-Ulric			Cap d'Espoir		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)
2010-12-06 14:20	2,924	0,892	2016-12-30 14:40	1,609	0,865
2016-12-30 14:20	2,724	1,031	2014-02-14 14:20	1,457	0,840
2015-10-29 15:00	2,664	0,480	2016-01-13 16:00	1,429	0,700
2016-01-13 16:20	2,548	0,669	2016-01-11 15:00	1,353	0,517
2020-11-16 14:40	2,540	0,257	2010-12-06 13:20	1,261	0,489
2018-02-01 14:40	2,537	0,289	2019-01-20 13:40	1,255	0,348
2016-01-11 15:00	2,509	0,527	2017-02-08 12:20	1,251	0,464
2019-03-23 03:20	2,501	0,487	2012-12-30 15:20	1,239	0,524
2012-12-14 14:40	2,461	0,125	2018-01-05 05:40	1,228	1,048
2016-12-14 14:00	2,455	0,172	2019-11-25 13:00	1,205	0,486
2016-05-08 02:40	2,446	0,157	2012-02-12 06:00	1,187	0,721
2019-01-20 13:20	2,443	0,412	2013-12-30 12:00	1,184	0,394
2020-04-10 03:20	2,443	0,238	2013-12-04 14:20	1,182	0,263
2021-03-31 03:40	2,440	0,320	2015-10-29 15:20	1,178	0,387
2016-05-09 03:20	2,439	0,203	2018-01-04 16:20	1,177	0,260
2018-12-22 13:40	2,438	0,408	2018-01-30 13:00	1,175	0,263
2013-07-24 02:40	2,438	0,203	2017-03-12 13:40	1,171	0,619
2018-06-16 03:20	2,432	0,195	2014-01-03 15:40	1,167	0,210

Rivière-Pentecôte			Paspébiac		
Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Date-heure (HNE)	Niveau marin (m)	Surcote (m)
2016-12-30 14:00	2,736	1,255	2016-12-30 15:20	1,834	0,862
2014-12-25 16:00	2,322	0,593	2016-01-13 16:20	1,772	0,745
2018-02-01 14:20	2,316	0,352	2016-01-11 15:00	1,636	0,517
2016-01-11 14:40	2,311	0,583	2019-03-23 04:00	1,615	0,696
2015-10-29 14:40	2,299	0,543	2019-01-20 13:40	1,610	0,417
2019-03-23 03:00	2,285	0,576	2018-01-04 16:20	1,590	0,323
2015-02-19 14:00	2,272	0,368	2019-10-17 16:20	1,522	0,691
2016-01-13 16:00	2,263	0,631	2018-01-05 05:00	1,516	1,043
2018-04-18 03:00	2,253	0,537	2015-10-29 15:20	1,507	0,360
2018-06-16 03:00	2,250	0,294	2018-06-16 03:40	1,491	0,199
2018-01-04 15:20	2,241	0,303	2016-12-14 14:00	1,490	0,198
2018-01-05 04:00	2,238	1,142	2018-01-30 13:00	1,470	0,279

4.5. Niveau d'eau du marégraphe de Paspébiac

Le niveau d'eau a été mesuré au quai de Paspébiac du 2020-06-22 au 2021-04-01 pour le présent projet R841.1. Auparavant, le niveau d'eau avait été mesuré au quai de Paspébiac du 2015-07-04 au 2018-05-01 pour le projet MTQ CC07.1 (avec une lacune du 2016-08-02 au 2017-06-27 à cause de la défaillance d'un instrument), puis du 2018-05-01 au 2020-06-22 pour le projet MTQ CC17.1. La Figure 46 présente les données mesurées pour le présent projet, à savoir 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 assez stable en hiver, entre 0°C et -1,6°C, soit environ le point de congélation de l'eau salée de la baie des Chaleurs. En été la température moyenne est 17° avec des oscillations pouvant atteindre une amplitude de 10°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 46). La marée (marnage) moyenne est 1,11 m, la plus grande est 2,69 m, la moyenne des plus grandes marées mensuelles est de 2,14 m, la moyenne des plus petites marées mensuelles est 0,36 m.

Les marées et surcotes mesurées par l'AWAC au site F à 7 km du port de Paspébiac sont très similaires à celles mesurées par le marégraphe de Paspébiac (Figure 47). Le marnage est environ 0,1 m plus important au site F qu'à Paspébiac. Il y a un léger déphasage avec la marée arrivant 44 secondes plus tôt au site F qu'à Paspébiac, mais la précision des horloges des instruments est seulement de 10-30 secondes (précision lors de l'ajustement des horloges avant les déploiements, dérive des horloges durant les déploiements). À long terme il y a des variations significatives entre Paspébiac et l'AWAC au site F, avec un niveau d'eau mesuré environ 10-15 cm plus haut en hiver au site F (Figure 48). Cela correspond probablement à des variations de la salinité qui changent aussi la masse volumique de la colonne d'eau. 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.**

Surcotes et niveaux maximaux

Les plus fortes surcotes, les plus fortes décotes et les plus hauts niveaux absolus sont indiqués sur les Figures 46 et dans le Tableau 16. La plus forte surcote pendant les 9 mois de déploiement pour le présent projet s'est produite le 2021-02-03, avec une surcote de 0,87 m lors de la marée haute de vive eau, ce qui a produit aussi le plus haut niveau d'eau de la période (1,62 m CGVD28). Il s'agit de la deuxième plus forte surcote enregistrée depuis 2015, mais seulement le huitième plus haut niveau d'eau (Tableau 16).

Le signal de surcote est similaire dans le port de Paspébiac et au site F, avec des différences de ± 10 cm. Pour les plus fortes surcotes, les différences est de ± 7 cm (Tableau 16). Il y a un léger déphasage des surcotes, celles-ci arrivant 26 secondes plus tôt au site F qu'au port de Paspébiac, mais cette différence est dans la précision des horloges des instruments (cf. ci-dessus).

Ces constatations correspondent aux observations faites pour la période 2014-2017 par Neumeier et Joly (2019), qui avaient comparé les enregistrements de niveaux d'eau entre le marégraphe de Paspébiac, l'AWAC de Paspébiac et le marégraphe de Belledune.

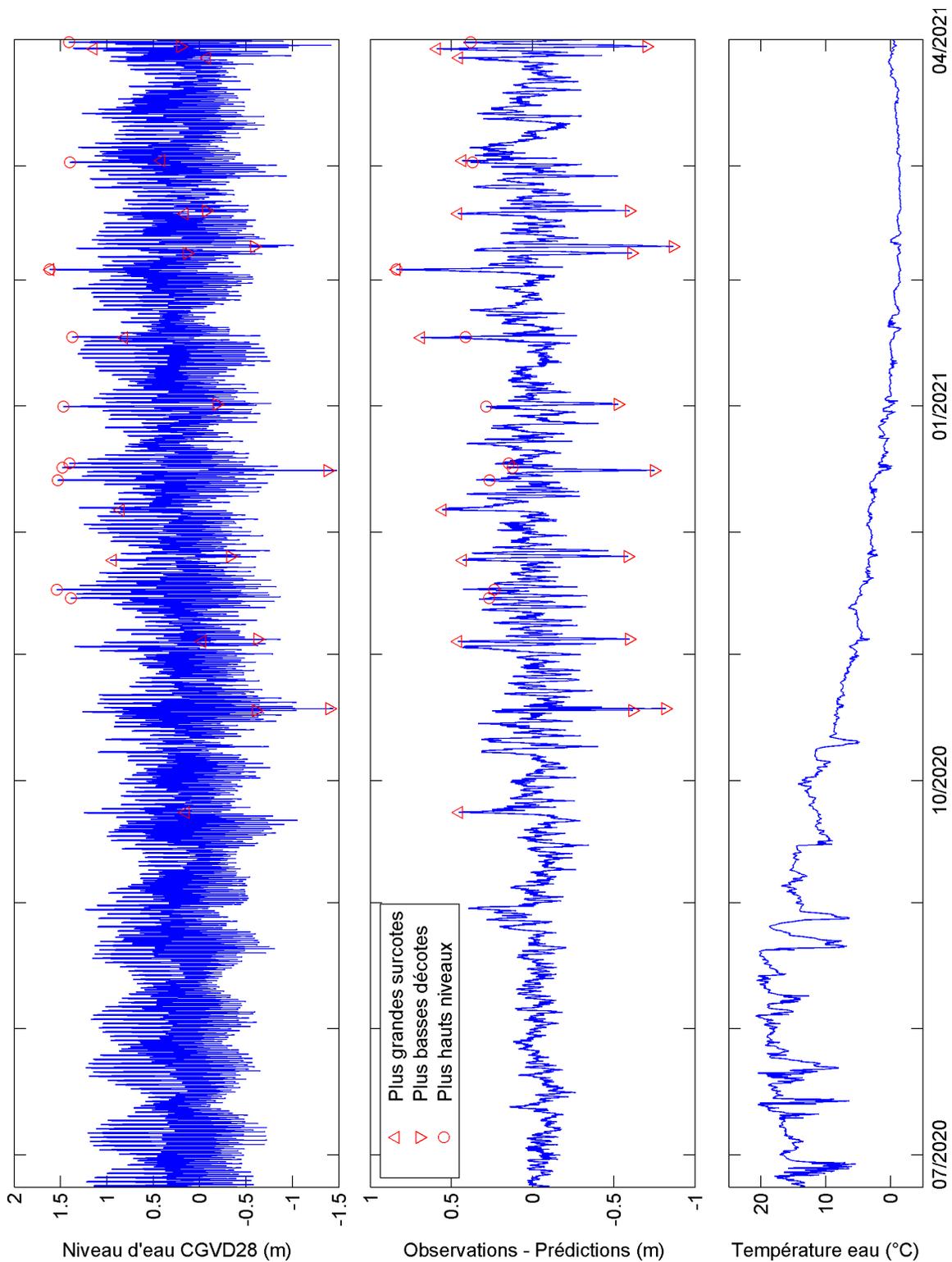


Figure 46 – Données du marégraphe de Paspébiac pour la période du 2020-06-22 au 2021-04-01: niveau d'eau mesuré, différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions calculées, les dix plus fortes surcotes, décotes et niveau absolu, ainsi que la température d'eau mesurée par le marégraphe.

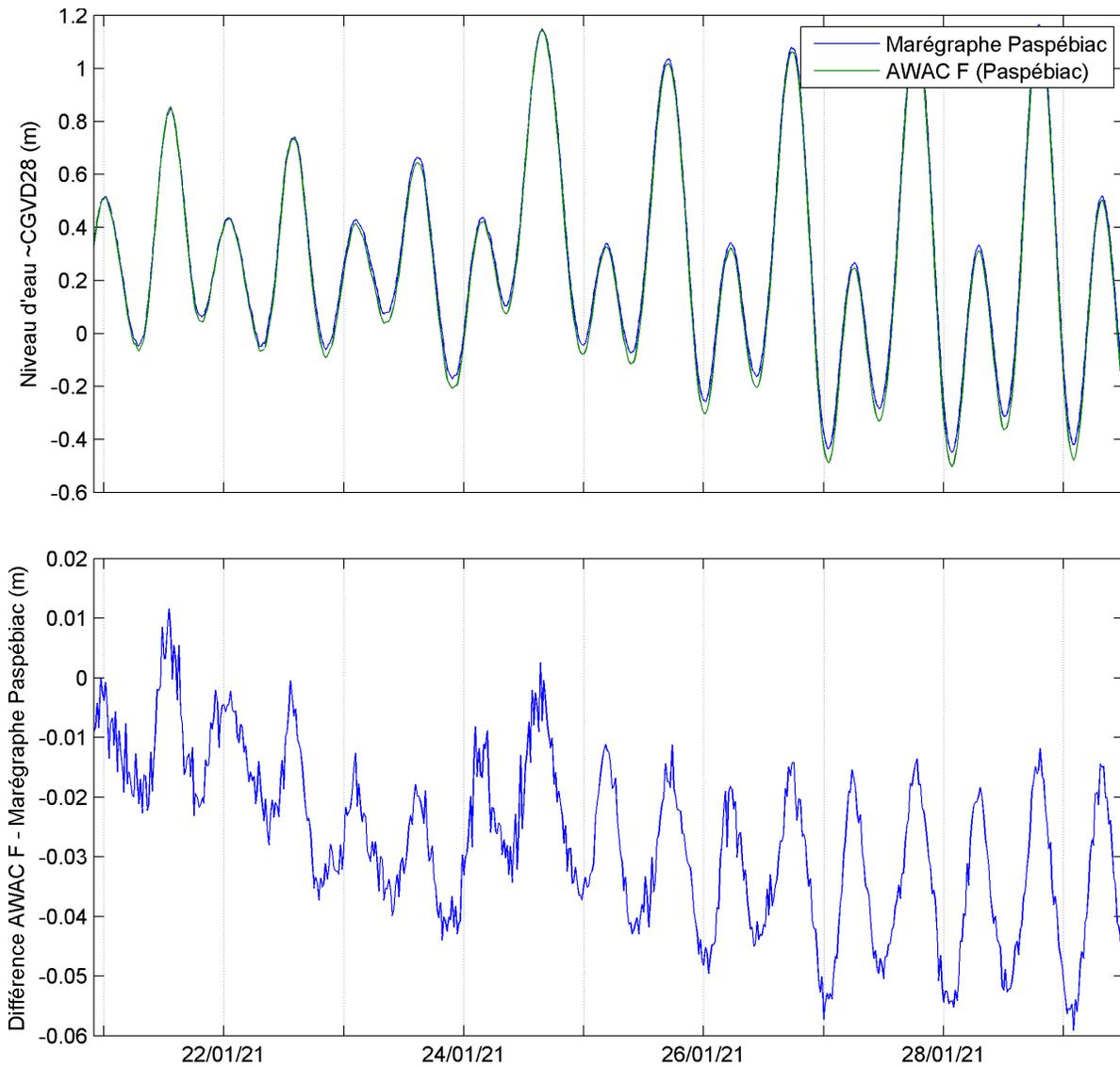


Figure 47 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac et par l'AWAC F au large de Paspébiac. Détail sur huit jours en janvier 2021. Pour AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximatif par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.

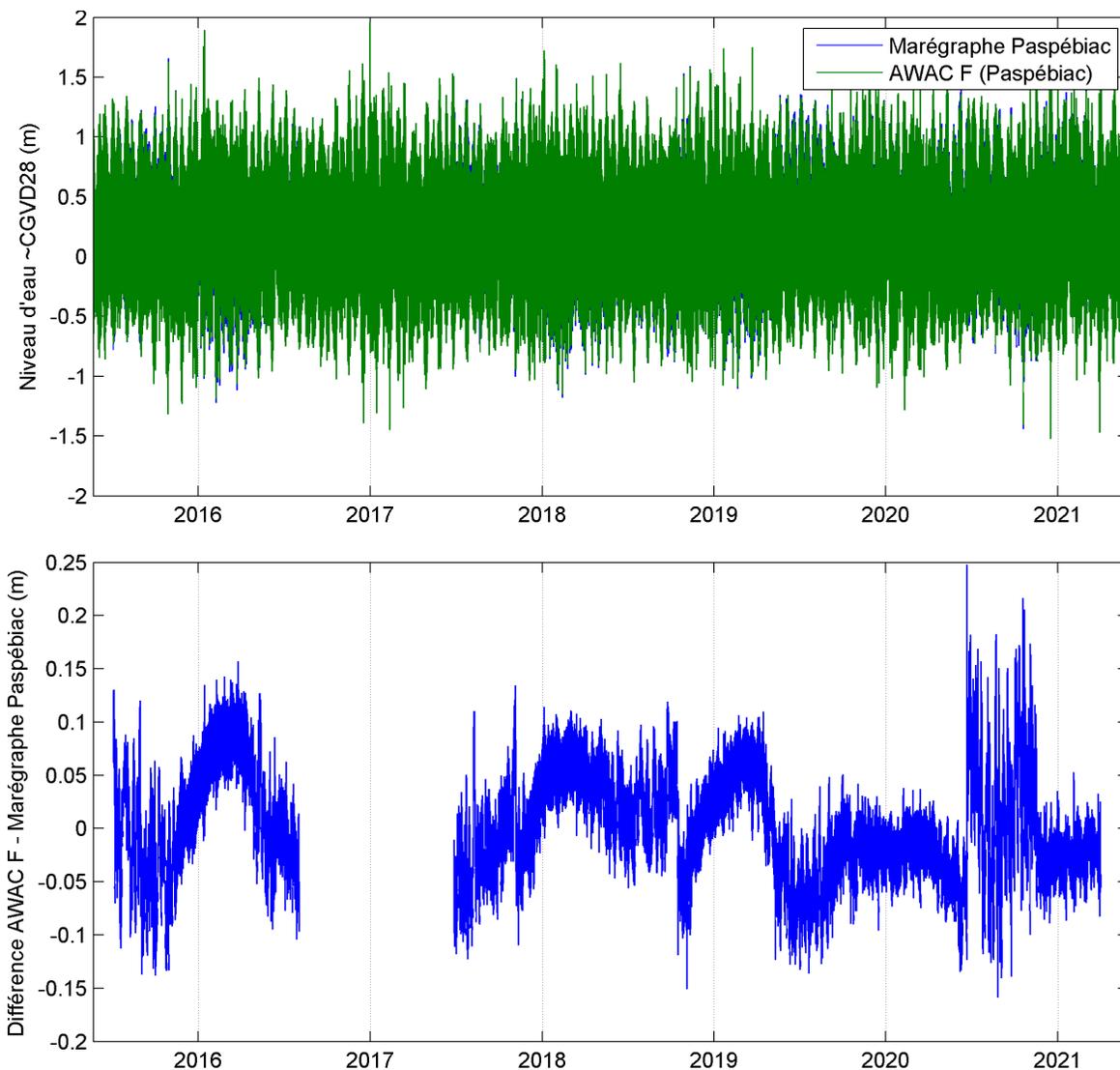


Figure 48 – Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac et par l'AWAC F au large de Paspébiac. La différence entre les deux séries montre des variations saisonnières liées à la salinité et la température de l'eau. Pour AWAC F, le niveau d'eau est seulement approximatif par rapport à CGVD28. Fuseau horaire UTC.

Tableau 16 – Liste des 15 plus fortes surcotes, des 15 plus fortes décotes et des 15 plus haut 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. Les événements survenus pendant que le présent projet s'occupait du marégraphe sont marqués en gras.

Marégraphe Paspébiac - Surcotes				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Surcote au site F (m)	Différence (m) Site F - Marégraphe
2018-01-05 11:15	1.48	1.08	1.11	0.03
2021-02-03 11:40	1.61	0.87	0.80	-0.07
2019-09-08 04:20	1.40	0.85	0.84	-0.01
2020-02-28 09:00	1.42	0.80	0.78	-0.03
2019-02-25 15:40	0.68	0.76	0.81	0.04
2019-10-17 20:05	1.59	0.75	0.72	-0.03
2020-04-10 16:55	0.12	0.75	0.68	-0.06
2016-01-13 19:50	1.59	0.73	0.77	0.04
2021-01-17 18:30	0.82	0.72	0.68	-0.04
2018-03-14 19:10	1.26	0.70	0.67	-0.02
2019-10-18 07:45	0.88	0.69	0.70	0.02
2019-01-21 00:20	0.08	0.68	0.75	0.07
2019-01-10 09:05	1.05	0.67	0.70	0.03
2019-03-23 09:20	1.64	0.66	0.70	0.04
2018-11-29 09:10	0.59	0.66	0.73	0.07
Marégraphe Paspébiac - Décotes				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Décote (m)	Décote au site F (m)	Différence (m) Site F - Marégraphe
2019-04-04 17:40	-0.36	-0.89	-0.93	-0.04
2020-10-18 15:00	-1.38	-0.88	-0.80	0.08
2018-11-04 16:55	-0.22	-0.87	-0.92	-0.05
2018-11-14 22:45	-0.18	-0.86	-0.86	0.00
2021-02-09 04:40	-0.59	-0.84	-0.86	-0.02
2017-12-26 14:20	-0.40	-0.81	-0.80	0.01
2020-01-09 15:10	-0.35	-0.80	-0.84	-0.04
2018-02-13 01:10	-1.16	-0.79	-0.75	0.04
2016-04-04 15:35	-0.06	-0.76	-0.73	0.03
2018-11-15 07:40	-1.01	-0.75	-0.75	0.00
2021-03-30 07:30	0.21	-0.74	-0.77	-0.03
2020-12-16 04:40	-1.19	-0.73	-0.79	-0.05
2020-02-20 03:15	-0.66	-0.73	-0.72	0.02
2018-02-23 16:35	-0.72	-0.72	-0.76	-0.03
2018-02-06 12:25	-0.04	-0.71	-0.69	0.02

Tableau 16 – Suite

Marégraphe Paspébiac - Plus hauts niveaux				
Date-heure (UTC)	Niveau marin (m)	Surcote (m)	Surcote au site F (m)	Différence (m) Site F - Marégraphe
2016-01-13 21:05	1.79	0.68	0.74	0.06
2016-01-11 20:00	1.67	0.46	0.51	0.04
2019-01-20 18:25	1.66	0.40	0.41	0.01
2019-10-17 21:15	1.66	0.71	0.68	-0.02
2015-10-29 20:20	1.66	0.40	0.35	-0.05
2019-03-23 09:00	1.65	0.66	0.70	0.04
2018-01-04 21:05	1.62	0.25	0.31	0.07
2021-02-03 11:35	1.62	0.86	0.79	-0.07
2018-11-10 21:20	1.59	0.52	0.50	-0.02
2018-01-05 09:55	1.59	1.02	1.04	0.02
2019-11-25 18:15	1.59	0.47	0.45	-0.02
2018-06-16 08:50	1.55	0.16	0.20	0.04
2020-11-16 20:10	1.54	0.21	0.16	-0.05
2018-10-28 21:15	1.53	0.42	0.38	-0.04
2020-12-13 17:55	1.53	0.30	0.27	-0.04

5. Synthèse des conclusions et recommandations

La mise en œuvre de ce projet – dans la continuité des précédents – pour l’acquisition de données océanographiques inédites recouvrant différents secteurs à risque de l’estuaire et du golfe du St-Laurent, ainsi que dans la baie des Chaleurs constitue une démarche essentielle dans l’amélioration des connaissances maritimes et donc de la gestion des risques liée à l’occupation du territoire côtier. Les présents résultats obtenus sur trois années seulement s’inscrivent dans la construction d’une base de données océanographiques à haute résolution de plus de dix années dans l’estuaire et à la pointe de la Gaspésie, de sept années pour le secteur nord du golfe, et de six années maintenant pour l’intérieur de la baie des Chaleurs.

Sur ces trois années de suivi des conditions maritimes, l’intensité et la fréquence des événements extrêmes ont évolué dans le temps et présentent des disparités géographiques : nous observons une tendance à la diminution de l’intensité des événements de tempêtes comparativement aux périodes précédentes, soit avant le printemps 2018, au niveau des deux sites ouverts sur le golfe (Cap d’Espoir et Rivière-Pentecôte) et de celui de l’estuaire (St-Ulric). À l’inverse, dans la baie des Chaleurs (Paspébiac) les tempêtes ont généré des vagues plus élevées en comparaison des années 2015 à 2018. Ces vagues de tempêtes sont venues en majorité de l’intérieur de la baie.

Le classement des quatre sites selon le degré d'exposition aux fortes vagues était le même pour ce projet que pour l'ensemble des données disponibles, à savoir Cap d'Espoir (H_{m0} 5,81 m pour ce projet et 6,61 m pour l'ensemble des projets) > Rivière-Pentecôte (4,29 m et 6,08 m) > St-Ulric (4,05 m et 4,22 m) > Paspébiac (3,17 m et 2,81 m).

Les outils mathématiques utilisées pour tenter de projeter la récurrence des événements extrêmes démontrent leur pertinence mais présentent des limites temporelles certaines, d’une part liée à la durée de l’échantillonnage sur laquelle se base ces lois probabilistes, et d’autre part sur la variabilité interannuelle et la non-linéarité de l’intensité des phénomènes environnementaux. Il est recommandé de poursuivre les mesures des vagues pendant plusieurs années notamment dans la baie des Chaleurs et le nord du golfe afin d’affiner les estimations de période de retour au-delà de 20 ans; également de continuer les efforts de mesure dans l’estuaire et au Cap d’Espoir pour observer si la tendance à la diminution des événements extrêmes constatée se poursuit ou non.

Les données de glace ont montré un dernier hiver 2020-2021 exceptionnellement réduit en glace de mer le long de la côte où demeuraient les instruments. Les épaisseurs moyennes mesurées des floes de glace n’ont fait que décroître sur les trois années de suivi. Malgré cette faible présence de glace lors du dernier hiver il n’y a pas eu un plus grand nombre de tempêtes observées. Seule la tempête recensée au début de février 2021 peut être reliée à une absence de glace. La diminution du couvert de glace hivernal n’est donc pas automatiquement corrélée avec une plus grande fréquence et intensité des événements de tempête.

Les données de courants enregistrées pour ce projet sont très similaires à celles déjà acquises précédemment, démontrant le caractère conservateur de ce paramètre océanographique, car très lié aux marées astronomiques et au débit du fleuve St-Laurent.

Les données de niveau d'eau mesurées présentent de nombreux phénomènes de surcotes mais qui ne sont pas forcément en phase avec les plus hauts niveaux, soit lors des marées de vive-eau, ce qui réduit le risque de submersion du littoral. Des surcotes et des niveaux d'eau plus élevés avaient été observés lors des projets précédents.

La prolongation du suivi des conditions océanographiques sur ces stations a permis de développer une expertise scientifique élevée par l'intermédiaire d'une instrumentation performante et un affinage dans la qualité des données transmises au ministère. Il est donc recommandé de poursuivre l'effort de collecte des données scientifiques sur l'ensemble des secteurs côtiers à risque.

6. Description des fichiers

Avec ce rapport sont transmis d'une part toutes les données enregistrées durant la durée du présent projet R841.1, mais aussi des fichiers récapitulatifs de toutes des paramètres de vagues et des niveaux d'eau couvrant tous les projets du MTQ (CC07.1, CC17.1 et R841.1) et le projet du MSP (Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014) aux sites. Les noms des fichiers récapitulatifs sont mis en évidence **en gras** ci-dessous.

Fuseau horaire : Heure normale de l'Est (HNE, UTC-5) pour les mouillages A, B, E et F; UTC pour le marégraphe de Paspébiac.

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_18A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A pour l'ensemble du projet (mai 2018 à mai 2021).
SPB_18A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage B pour l'ensemble du projet (août 2018 à mai 2021).
SPE_18A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage E pour l'ensemble du projet (septembre 2018 à mai 2021).
SPF_20A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage F pour l'ensemble du projet (juin 2020 à mai 2021).
SPA_10A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2010 à mai 2021).
SPB_14A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (octobre 2010 à mai 2021).
SPE_14A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2014 à mai 2021).
SPF_15A-20B_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2015 à mai 2021).

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 3.2);
- 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 :
----------------------------	--

SPA18A.spectre	mouillage A, été 2018 + hiver 2018/2019
SPA19A.spectre	mouillage A, été 2019
SPA19B.spectre	mouillage A, hiver 2019/2020
SPA20A.spectre	mouillage A, été 2020
SPA20B.spectre	mouillage A, hiver 2020/2021
SPB18A.spectre	mouillage B, été 2018 + hiver 2018/2019
SPB19A.spectre	mouillage B, été 2019
SPB19B.spectre	mouillage B, hiver 2019/2020
SPB20A.spectre	mouillage B, été 2020
SPB21B.spectre	mouillage B, hiver 2020/2021
SPE18A.spectre	mouillage E, hiver 2018/2019
SPE19A.spectre	mouillage E, été 2019
SPE19B.spectre	mouillage E, hiver 2019/2020
SPE20A.spectre	mouillage E, été 2020
SPE20B.spectre	mouillage E, hiver 2020/2021
SPF20A.spectre	mouillage F, été 2020
SPF20B.spectre	mouillage F, hiver 2020/21

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 : SPA18A.spectredir mouillage A, été 2018 + hiver 2018/2019 SPA19A.spectredir mouillage A, été 2019 SPA19B.spectredir mouillage A, hiver 2019/2020 SPA20A.spectredir mouillage A, été 2020 SPA20B.spectredir mouillage A, hiver 2020/2021
SPB_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site B : SPB18A.spectredir mouillage B, été 2018 + hiver 2018/2019 SPB19A.spectredir mouillage B, été 2019 SPB19B.spectredir mouillage B, hiver 2019/2020 SPB20A.spectredir mouillage B, été 2020 SPB21B.spectredir mouillage B, hiver 2020/2021
SPE_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site E : SPE18A.spectredir mouillage E, hiver 2018/2019 SPE19A.spectredir mouillage E, été 2019 SPE19B.spectredir mouillage E, hiver 2019/2020 SPE20A.spectredir mouillage E, été 2020 SPE20B.spectredir mouillage E, hiver 2020/2021
SPF_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site F :

SPF20A.spectredir mouillage F, été 2020
SPF20B.spectredir mouillage F, hiver 2020/21

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

SPA18Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2018 + hiver 2018/2019
SPA19Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2019
SPA19Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, hiver 2019/2020
SPA20Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2020
SPA20Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, hiver 2020/2021
SPB18Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2018 + hiver 2018/2019
SPB19Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2019
SPB19Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, hiver 2019/2020
SPB20Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2020
SPB21Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, hiver 2020/2021
SPE18Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, hiver 2018/2019
SPE19Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, été 2019
SPE19Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, hiver 2019/2020
SPE20Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, été 2020
SPE20Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, hiver 2020/2021
SPF20Aprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, été 2020
SPF20Bprofils.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, hiver 2020/21

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

ABEF_glace.xlsx Fichier Excel avec les statistiques de glace aux sites A, B, E et F, avec une feuille Excel pour chaque site/hiver. Pour chaque burst il y a les statistiques suivantes : pourcentage de couverture de glace, épaisseur maximale, moyenne et minimale des flots de glace (m), écart-type de l'épaisseur des flots de glace (m).

Niveaux d'eau

ABEF_niveaux_eau_projet.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 pour la durée du projet, avec une feuille Excel pour chaque site.

ABEF_niveaux_eau_tout.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 couvrant tous les projets MTQ/MSP à ces sites, avec une feuille Excel pour chaque site.

Maregraphe_Paspebiac_20a-20b Fichier avec les données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac pour la durée du projet : 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.

Maregraphe_Paspebiac_15a-20b Fichier avec les données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac couvrant tous les projets MTQ à ce site : 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

- Coles, S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, 208 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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'houllographe 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 subi 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.