Transports et Mobilité durable
Québec

# Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town

**Projet CC17.1**

## Rapport final

**Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec**

**Urs Neumeier, Zélie Schuhmacher et Sylvain Joly**

**mars 2023**

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

**Référence complète :** Neumeier, U, Schuhmacher, Z., Joly, S., 2023. Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town. Rapport final préparé pour le ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, mars 2023, xviii + 197 p.

# RÉSUMÉ

L'érosion côtière est un processus naturel qui affecte particulièrement les plages sableuses et dont l'intensité risque d'augmenter au Québec avec les futurs changements climatiques. Ces mouvements dynamiques du trait de côte entrent en conflit avec les infrastructures statiques, notamment avec les routes qui longent souvent la côte de près au Québec. Sur la côte gaspésienne de la baie des Chaleurs, le barachois (lagune) de Hope Town est fermé par une flèche littorale sableuse, sur laquelle est construite la route 132. Plus de la moitié de la flèche littorale est déjà protégée par un enrochement. En 2012, un champ d'épis a été construit sur l'extrémité sud-ouest de la flèche pour protéger la plage menacée par l'érosion côtière. Cette opération a été accompagnée d'une recharge de plage de 4 500 $m^3$.

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a initié le présent projet afin de (1) déterminer l'évolution morphosédimentaire passée et présente de la flèche littorale, (2) mesurer les conditions hydrodynamiques auxquelles est exposée la plage du champ d'épis et (3) définir l'impact du champ d'épis sur les différentes plages.

Des mouillages ont été installés au large et près de la côte pour mesurer pendant 2½ ans les conditions de vagues, de courants et de niveaux d'eau. L'évolution passée du trait de côte a été déterminée à partir de photographies aériennes couvrant la période de 1963 à 2018. Les variations saisonnières et pluriannuelles de la morphologie de plage ont été mesurées avec des relevés topographiques durant 3 ans. Enfin des échantillonnages de sédiments ont documenté les variations saisonnières de la granulométrie.

À l'intérieur de la baie des Chaleurs, les événements de tempêtes génèrent des vagues puissantes qui se propagent principalement d'ouest en est ou à l'inverse d'est en ouest. La forme spécifique en coude de la baie permet à la côte à l'est de Paspébiac, notamment le secteur de Hope Town, d'être épargnée par les grosses vagues venant de l'ouest. La plage de Hope Town n'est ainsi soumise qu'aux grosses vagues en provenance du golfe du St-Laurent et la direction prédominante des vagues puissantes est d'est-sud-est. Au cours des 32 mois d'étude, il y a eu plusieurs tempêtes durant lesquelles les vagues ont presque atteint 3 m de hauteur significative à 2 km au large, et des vagues de 2 m ont été enregistrées à 500 au large de la plage et de 1,5 m en bas de la plage. Ces tempêtes ont lieu à l'automne, de septembre à janvier inclusivement, mais aussi dans une moindre mesure à la fin de l'hiver, en mars-avril lors d'un éventuel dégel hâtif de la baie. L'été, le potentiel énergétique des vagues dans les processus d'érosion demeure faible.

L'enregistrement des courants proche de la plage indiquent une asymétrie des courants de marée avec une dominance vers l'ouest-sud-ouest, qui contribue à la dérive littorale des sédiments allant vers le sud-ouest dans ce secteur.

L'amplitude des marées et des surcotes augmente légèrement entre Hope Town et Paspébiac, situé 12 km vers l'ouest, plus à l'intérieur de la baie des Chaleurs. Les niveaux d'eau à Hope Town peuvent être calculés à partir des niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac, qui est maintenu depuis 2015 par plusieurs projets successifs du MTQ.

Au cours de l'hiver, les données des instruments ont révélé une présence de la glace de mer plus faible devant Hope Town, qu'au milieu de la baie des Chaleurs au large de Paspébiac. Ces périodes ponctuelles d'eau libre en plein hiver pourraient permettre le développement de vagues qui atteindraient la côte. Mais c'est surtout la perte hâtive au printemps de l'effet protecteur de la glace qui est déterminant pour l'érosion, comme le soulignent deux tempêtes observées au large de Hope Town en mars 2018 avec des vagues supérieures à 2 m.

La flèche littorale de Hope-Town est très dynamique. Nourrie par la dérive littorale qui transporte les sédiments érodés des falaises situées au nord-est, son approvisionnement sédimentaire est cependant entravé par la présence d'un enrochement situé en amont dans le sens de la dérive littorale. Cette problématique risque de prendre de l'ampleur considérant la hausse du niveau de la mer liée aux changements climatiques.

L'analyse des photographies aériennes indique un taux de recul moyen de la flèche littorale de -0,64 m/an pendant la période 1963-2018. La période la plus érosive reste celle qui a suivi le démantèlement à la fin des années 1960 de la jetée construite à l'extrémité ouest de la flèche, tandis que la plage adjacente au sud-ouest a engraissé en parallèle. En revanche, la recharge de plage et la construction des épis réalisées par le MTQ en 2012 ont favorisé une progradation temporaire de la flèche, qui actuellement semble reculer lentement.

Les modèles numériques de terrain produits à partir des relevés topographiques montrent l'adaptation saisonnière du profil de plage aux variations du régime hydrodynamique. L'été, les sédiments s'accumulent sur le haut de la plage. L'automne, ils sont transférés sur le bas de la plage lors d'un rééquilibrage des profils de plage, et les pertes vers le large sont plus conséquentes à cause de l'accroissement du régime énergétique. L'hiver, la partie inférieure de la plage présente des déficits, toutefois la glace de mer joue un rôle protecteur sur la côte en atténuant l'énergie des vagues entre janvier et mars et le pied de glace fige le sommet de la plage. La granulométrie reflète également les variations des conditions hydrodynamiques et des processus de dépôt et d'érosion : le sédiment est plus fin en août lorsque les conditions sont plus calmes, alors qu'il est plus grossier à la fin de la période hivernale au mois de mai.

La plage a engraissé de 250 $m^3$ la première année (2017-2018), elle a ensuite perdu 1400 $m^3$ la deuxième année (2018-2019) avant d'engraisser de 1300 $m^3$ la troisième année (2019-2020). En moyenne, la plage à engraissée de 47 ±778 $m^3$/an (moyenne ±erreur standard) durant les trois ans du projet. Enfin, durant la période de construction de la plage en été, la partie nord s'engraisse davantage que la partie sud : une zone d'accumulation est clairement visible à l'extrémité nord-est de la plage. Ceci illustre l'efficacité des épis à piéger le sédiment en transit le long de la côte. Toutefois, considérant la restriction de l'apport sédimentaire dû à la présence de l'enrochement, les recharges de sable ponctuelles seront nécessaires pour maintenir la plage et mitiger l'érosion à l'avenir.

# TABLE DES MATIÈRES

**Résumé** ..... **iii**

**Table des matières** ..... **v**

**Liste des figures** ..... **vii**

**Liste des tableaux** ..... **xvi**

**Remerciements** ..... **xviii**

**1 Introduction** ..... **1**

1.1 Contexte du projet ..... 1
1.2 Site d'étude ..... 2
1.3 Objectifs ..... 6
1.4 Communications scientifiques reliées au projet ..... 7

**2 Matériel et méthodes** ..... **9**

2.1 Marégraphes de Paspébiac et de Hope Town ..... 9
2.2 Traitement des données de niveau d'eau ..... 12
2.3 Configuration et programmation des mouillages ..... 17
2.4 Programmation des mouillages ..... 21
2.5 Traitement des données de vagues, de courants et de glace ..... 22
2.6 Configuration du courantomètre dans le chenal de la lagune et traitement des données ..... 23
2.7 Géoréférencement des photographies aériennes et traçage du trait de côte ..... 32
2.8 Calcul du déplacement du trait de côte ..... 37
2.9 Relevés topographiques et traitement de ces données ..... 38
2.10 Granulométrie et minéralogie ..... 43
2.11 Caméra automatique observant la zone de déferlement et géorectification des images obliques ..... 46

**3 Niveaux d'eau** ..... **51**

**4 Vagues** ..... **61**

4.1 Positions des mouillages et périodes de déploiement ..... 61
4.2 Vagues mesurées ..... 64

**5 Courants et Glace de mer** ..... **77**

5.1 Courants mesurés au large ..... 77
5.2 Courants mesurés dans le chenal ..... 79
5.3 Glace de mer ..... 92

**6 Variations du trait de côte de 1963 à 2018** ..... **95**

6.1 Zone 1 : Falaise rocheuse SO ..... 99
6.2 Zone 2 : Basse falaise meuble SO ..... 99
6.3 Zone 3 : Flèche littorale ..... 101

6.4 Zone 4 : Côte aménagée ..... 103
6.5 Zone 5 : Falaise rocheuse NE ..... 106

**7 Morphodynamique de la plage et variations saisonnières ..... 108**
7.1 Modèles numériques de terrain et volumes de plage ..... 110
7.1.1 Plage à épis ..... 112
7.1.2 Plage sud-ouest ..... 120
7.1.3 Données des rapports annuels de suivi ..... 122
7.2 Variations granulométriques ..... 123

**8 Analyses minéralogiques ..... 131**

**9 Caméra observant la zone de déferlement ..... 134**

**10 Modélisation ..... 139**
10.1 Description du modèle ..... 139
10.2 Validation du modèle ..... 146
10.3 Scénarios modélisés ..... 154
10.4 Résultats de modélisation ..... 155

**11 Discussion ..... 159**

**12 Conclusions ..... 164**

**13 Liste des fichiers ..... 167**

**14 Références ..... 172**

**Annexe 1 : Liste des paramètres de vagues ..... 177**

**Annexe 2 : Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues ..... 179**

**Annexe 3 : Traitement des données de vagues, de courants et de glace enregistrées par les AWAC et les Aquadopp Profilers ..... 181**
Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants ..... 181
Traitement et contrôle de qualité des données de vagues ..... 182
Traitement et contrôle de qualité des données de courants ..... 186
Traitement des données de glace ..... 187

**Annexe 4 : Spécifications techniques des photographies aériennes utilisées pour le traçage des traits de côte historiques ..... 190**

**Annexe 5 : Variations temporelle de l'accrétion / érosion moyenne de chaque profil ..... 191**

**Annexe 6 : Variations volumétriques saisonnières ..... 194**

**Annexe 7 : Position de la zone de déferlement ..... 196**

# LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de la baie des Chaleurs avec la position de Hope Town, Paspébiac, ainsi que des mouillages de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et Cap d'Espoir (B). ..... 4

Figure 2. Carte de la région Hope Town – St-Godefroi avec la lagune de Hope Town, la flèche littorale fermant celle-ci et la position des différents instruments. La bathymétrie est par rapport au zéro des cartes marines avec les données fournies par le Service hydrographique du Canada. ..... 4

Figure 3. Carte de la flèche littorale de Hope Town montrant les différents secteurs du site d'étude. ..... 5

Figure 4. Photographie montrant les cinq épis de la plage de Hope Town, qui sont constitués à moitié d'une palissade de bois et à moitié d'un alignement de blocs de pierre, juin 2020. ..... 6

Figure 5. Position du marégraphe de Paspébiac sur le quai de Paspébiac. ..... 9

Figure 6. Schéma de l'installation du marégraphe de Paspébiac avec le tube servant de puits de tranquillisation et des deux capteurs de pression. Les altitudes des capteurs de pression variaient légèrement d'un déploiement à l'autre (cf. Tableau 1). ..... 10

Figure 7. Exemple de la détermination de l'altitude du marégraphe de Paspébiac avec les mesures manuelles effectuées le 17 avril 2019. Les données du déploiement 18B ont été ajustée avec une altitude de -1,414 m, celles du déploiement 19A avec une altitude de -1,426 m ..... 14

Figure 8. Différence des niveaux d'eau mesurés entre les deux instruments pour le marégraphe de Paspébiac. Chaque période de déploiement semestrielle est représentée séparément. La couleur indique la densité des points. ..... 15

Figure 9. Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée sur le fond. (B) Mouillage MTRBM ouvert avec la bouée pour la récupération (la corde de récupération est dans le cylindre noir, le déclencheur acoustique Benthos (gris), les deux caissons batteries (bleu) et des lests de plomb pour assurer la stabilité de la plateforme. ..... 18

Figure 10. Trépied en fibre de verre SeaSpider avec l'AWAC-AST 1 MHz installé sur un cardan. Le caisson de batterie est installé entre deux jambes du trépied. ..... 19

Figure 11. Aquadopp Profiler (cylindre horizontal supérieur) avec le caisson de batterie additionnel (cylindre horizontal inférieur). (A) Avant la mise à l'eau. (B) Après la récupération avec une forte colonisation de la structure par la vie aquatique (biofouling). ..... 20

Figure 12. Instruments installés au site HOB (à gauche), à savoir un RBR duet T.D|wave 16 et un RBR TWR-2050, et au site HOC (à droite), à savoir un RBR duet T.D|wave 16. ..... 21

Figure 13. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune, avant le nettoyage et le contrôle de qualité. Sont représentés la hauteur de l'eau, les vitesses (axe du chenal, transverse, vertical), le rapport signal sur bruit (SNR) et l'indice de corrélation (qualité de la qualité des mesures). Les couleurs bleu, vert et rouge représentent les trois composantes de vitesse ou les données des trois faisceaux de l'ADCP. ..... 27

Figure 14. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune, après le nettoyage et le contrôle de qualité des données de vitesse. Les données ont été moyennées pour chaque burst de 45 s. Les couleurs bleu, vert et rouge représentent les trois composantes de vitesse (axe du chenal, transversal, vertical). La corrélation des bursts considérés comme valides est en bleu, celle des bursts considérés comme mauvais est en gris. ..... 28

Figure 15. Positions des sections transversales 1 à 11, qui ont été utilisées pour le calcul du débit du chenal..... 30

Figure 16. Profils topographiques des sections transversales du chenal 1 à 11, qui ont été utilisées pour le calcul du débit du chenal. La position géographique des sections transversales est indiquée à la Figure 15..... 31

Figure 17. Différence entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe HOB (par rapport à CGVD2013) et par le Vector (par rapport au capteur de pression) en bleu. Les valeurs utilisées pour ramener les niveaux d'eau mesurés par le Vector à CGVD2013 sont représentés en rouge..... 32

Figure 18. Trait de côte, limite eau-terre et ouvrages de protection tels qu'identifiés sur la photographie aérienne de 2018 du Ministère Pêches et Océans. ..... 35

Figure 19. Exemples de tracés historiques du trait de côte sur la plage sud-ouest. Sur cette portion de côte meuble basse, l'indicateur géomorphologique du trait de côte utilisé est le sommet du talus végétalisé. ..... 36

Figure 20. Position des traits de côte historiques, des transects générés par DSAS et espacés de 10 m et des points d'intersection. ..... 37

Figure 21. Exemple de régression linéaire générée par DSAS afin d'extraire, sur chaque transect, le taux de déplacement de la côte (m/an). La pente de la régression linéaire représente ce taux (1,34 m/an). Adapté de Himmelstoss et al. (2018). ..... 38

Figure 22. Positions des profils topographiques levés (et de la position x=0) ainsi que des houlographes aux sites HOB et HOC. Les coordonnées sont en MTM 5. Le fond de carte est une image satellite fournie par ESRI (World Image Satellite). ..... 40

Figure 23. Zonation de la plage à épis et de la plage sud-ouest en différents secteurs de plage. Les épis sont représentés en brun. La position de la PMSGM et du NMM est indiquée. L'étendue globale des polygones correspond à la couverture commune des MNT des 10 campagnes de terrain. ..... 42

*Figure 24. Zonation de la plage à épis en deux secteurs (Nord/Sud). Les épis sont représentés en brun. L'étendue globale des polygones correspond à la couverture commune des MNT des 10 campagnes de terrain.* ..... 43

Figure 25. Localisation des échantillons de sédiment prélevés pour les analyses minéralogiques sur la plage à épis, la plage sud-ouest et les falaises de St-Godefroi. ..... 46

Figure 26. Schéma illustrant l'étendue de la zone de déferlement. La distance **A** indique la position de la limite interne de la zone de déferlement. La distance **B** indique la position de la limite externe de la zone de déferlement. Les distances **A** et **B** sont exprimées positives en direction de la mer. ..... 48

Figure 27. Photographie de la caméra Reconyx observant la zone de déferlement des vagues, installée le 17 septembre 2019 sur le poteau Hydro-Québec au sommet de l'enrochement en bordure de la route 132. ..... 49

Figure 28. Interface graphique programmée sous Matlab pour faire défiler les images géorectifiées d'une rafale de la caméra observant la zone de déferlement. Les trais bleus indiquent la position des profils topographiques 14, 11 et 8. Les petits points rouges sont les limites externes sélectionnées pour la zone de déferlement pour cette rafale d'images. ..... 50

Figure 29. Comparaison des niveaux mesurés par l'AWAC de Paspébiac (F), l'AWAC de Saint-Godefroi (HOE) et le marégraphe de Hope Town (HOB) par rapport au marégraphe de Paspébiac, avec un filtre passe-bas de 24 heures. Tous les niveaux ont été exprimés par rapport au niveau marin moyen mesuré. ..... 51

Figure 30. Exemple des marées mixtes surtout semi-diurnes mesurées par les marégraphes de Paspébiac et Hope Town, ainsi que la différence entre ces deux sites. La série temporelle des différences maximales est en phase avec celle de niveaux d'eau. ..... 52

Figure 31. Comparaison des données des marégraphes de Paspébiac et de Hope pendant la période de fonctionnement commune, à gauche les niveaux d'eau enregistrés, à droite les surcotes et décotes calculées. La fonction identité est tracée en noir et la régression linéaire en magenta. ..... 53

Figure 32. Niveaux d'eau mesurés à Paspébiac et surcotes d'après l'analyse avec la boîte à outil Matlab T_TIDE pour la durée du projet (novembre 2017 à juin 2020)..... 55

Figure 33. Niveaux d'eau mesurés à Hope Town (site HOB) et surcotes d'après l'analyse avec la boîte à outil Matlab T_TIDE pour les déploiements mai-novembre en 2018 et 2019. ..... 56

Figure 34. Comparaison des niveaux mesurés et des surcotes pour l'AWAC de Paspébiac (F), l'AWAC de Saint-Godefroi (HOE), le marégraphe de Hope Town (HOB) et le marégraphe de Paspébiac. Tous les niveaux sont exprimés par rapport au niveau marin moyen mesuré. ..... 60

Figure 35. Position des mouillages et instruments installés. (Haut) Carte général avec la bathymétrie en brasse. (Bas) Vue détaillée devant St-Godefroi et la lagune de Hope Town, avec la bathymétrie par Lidar et multifaisceau. ..... 63

Figure 36. Cartes des positions exactes des différents déploiements des mouillages pluriannuels F, HOD et HOE durant le projet. ..... 64

Figure 37. Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues $H_{m0}$ aux sites de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et devant la plage à épis de Hope-Town (HOD) et en bas de cette plage (HOC et HOB). Pour les sites F et HOE sont représentées toutes les données disponible (#) et seulement la période commune avec le déploiement à HOD (//). ..... 65

Figure 38. Roses de vagues pour les sites de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et Hope-Town (HOD). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction. ..... 67

Figure 39. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées aux sites de Paspébiac (bleu) et de St-Godefroi (rouge). Les 15 plus fortes tempêtes durant les 32 mois du projet sont indiquées avec des cercles (F) et des losanges (HOE). ..... 69

Figure 40. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées chaque été devant la plage de Hope Town (HOD). Les 15 plus forts événements sont indiqués avec des losanges rouges. ..... 70

Figure 41. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées lors des étés 2018 et 2019 aux sites de de St-Godefroi (HOE), de Hope Town HOD) et directement sur la plage à épis (HOB et HOC). À noter que l'été 2019, seulement l'instrument HOC a fonctionné. ..... 71

Figure 42. Comparaison des hauteurs de vagues mesurées au sites HOB et HOC sur la plage de la flèche littorale de Hope Town entre mai et novembre 2018. ..... 72

Figure 43. Séries temporelles comparant les vagues enregistrées aux cinq sites durant deux événements de tempêtes en septembre 2018. La tempête d'est est mise en évidence en gris clair et la tempête d'ouest est mise en évidence en jaune pâle. ..... 73

Figure 44. Relation entre le rapport des hauteurs de vagues en bas de plage (HOB ou HOC) et au large (HOE) selon la direction des vagues au large (HOE) et le niveau d'eau (représenté par la couleur). Seules les données avec les vagues supérieurs à 0,5 m au large (HOE) sont représentées. ..... 74

Figure 45. Roses des courants (destination des courants) enregistrés au site de Paspébiac (F) et St-Godefroi (HOE). Les données en surface et en profondeur sont présentées. ..... 78

Figure 46. Roses des courants (destination des courants) enregistrés devant la plage de Hope-Town (HOD). Les données en surface et en profondeur sont présentées. ..... 79

Figure 47. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) en été 2019. La vitesse est positive en direction de la lagune. La corrélation des bursts considérés comme valides est en bleu, celle des bursts considérés comme mauvais est en gris. ..... 81

Figure 48. Zoom dans les données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) en été 2019. La référence verticale du niveau d'eau devant la plage

(HOB) a été ajustée pour suivre visuellement le niveau d'eau dans le chenal. La vitesse est positive en direction de la lagune. La taille de la plus grande particule de sédiment déplacée a été calculée avec Sedtrans05. ..... 82

Figure 49. Débit du chenal calculé pour la section transversale 3 et une granulométrie médiane du lit du chenal de 100 mm (débit positif vers la lagune). Le débit cumulatif a seulement été calculé pour trois périodes avec peu de données invalides. ..... 85

Figure 50. Détail du débit du chenal calculé pour la section transversale 3 et une granulométrie médiane du lit du chenal de 100 mm (débit positif vers la lagune) lors des marées de vive eau au début du mois d'août 2019. Le débit cumulatif a seulement été calculé pour trois périodes avec peu de données invalides. ..... 86

Figure 51. Comparaison du débit Q calculé pour les onze sections présentées à la Figure 15 lors des marées de vive eau du début août 2019. Les flèches indiquent les quatre moments choisis pour illustrer à la Figure 52 la sensibilité les débits selon la section considérée. ..... 88

Figure 52. Comparaison du débit (Q) calculé pour les différentes sections transversales par rapport au débit Q calculé pour la section 3 lors des quatre moments : A (flot de vive eau), B (jusant de vive eau), C (flot moyen) et D (jusant moyen). La localisation des sections est présentée à la Figure 15. La position des quatre moments A-D par rapport au cycle des marées est présentée à la Figure 51..... 89

Figure 53. Relation entre une erreur dans l'estimation du niveau d'eau et l'erreur relative induite dans le débit Q calculé pour la section transversale du chenal où le mouillage a été mis à l'eau. L'erreur relative varie en fonction du niveau d'eau, étant maximale lors de la marée basse. ..... 90

Figure 54. Hauteurs et périodes des vagues enregistrées par le courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) à l'été 2019. Le niveau d'eau est par rapport à la position de l'instrument, qui est installé 10 cm au-dessus du fond. ..... 91

Figure 55. Couverture de glace au Site de Paspébiac (F) durant les 32 mois du projet.... 93

Figure 56. Couverture de glace au Site de St-Godefroi (HOE) durant les 32 mois du projet ..... 94

Figure 57. Transects générés par DSAS tous les 10 m sur (A) les zones 1-3, (B) la zone 4 et (C) la zone 5. Les taux de déplacement de la côte, estimés grâce au taux de régression linéaire (TRL), sont également indiqués pour chaque transect (en m/an)..... 96

Figure 58. Taux de déplacement de la côte entre 1963 et 2018 estimés sur chaque transect en utilisant le taux de régression linéaire (en m/an). Les cinq zones côtières sont délimitées sur le graphique entre les traitillés. Des taux de déplacement positifs indiquent une avancée alors que des taux négatifs témoignent d'un recul de la côte..... 97

Figure 59. Taux de déplacement moyen calculé sur les cinq zones côtières déterminé pour chaque intervalle entre photographies aériennes disponibles couvrant la période de 1963 à 2018. La précision estimée est indiquée en grisé. Les taux de recul calculés à très court terme (ex : 1963-1964, 1964-1965, 2005-2007) doivent être interprétés avec précaution car ils ont une précision moindre. ..... 98

Figure 60. Photographie de la falaise rocheuse du sud-ouest (Zone 1). ..... 99

Figure 61. Photographie de la falaise meuble basse du sud-ouest (Zone 2), au talus végétalisé..... 100

Figure 62. Vue aérienne de la flèche littorale (Zone 3) fermant le barachois de Hope-Town (crédit photo : Bernard Audet)..... 102

Figure 63. Photographie de l'état de la jetée en gabions sur la pointe sud de la flèche.. 103

Figure 64. Photographies de la côte aménagée (Zone 4) montrant l'enrochement de la route 132 et le mur de protection en béton aujourd'hui partiellement effondré au pied de la falaise. ..... 104

Figure 65. Vue aérienne de la fin de l'enrochement prolongé à l'est par le mur de protection en béton, partiellement effondré sur la zone intertidale (image aérienne de 2017, largeur de l'image = 115 m)..... 105

Figure 66. Photographie et vue aérienne de la falaise rocheuse NE (Zone 5) vers St-Godefroi (image aérienne de 2017, largeur de l'image = 160 m)..... 107

Figure 67. Modèle numérique d'altitude de la plage à épis de Hope-Town et de la plage adjacente au sud-ouest en août 2020 (référence verticale CGVD2013). Les trois lignes Pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM), Niveau moyen de la mer (NMM) et Terminaison mer des épis délimitent la haute-plage, le haut-estran, le bas-estran et l'avant-plage. Coordonnées NAD83 MTM-5. ..... 109

Figure 68. Variations du profil de plage 19 levé devant l'enrochement de la route 132 sur la plage de la flèche littorale de Hope Town entre mai 2018 et août 2020. Le début du profil (-17 à 0 m) concerne l'enrochement en tant que tel..... 110

Figure 69. MNT saisonniers obtenus par la soustraction des MNT des différentes campagnes topographiques (MNT hiver = MNT mai – MNT novembre; MNT été = MNT août – MNT mai; MNT automne = MNT novembre – MNT août)..... 111

Figure 70. Variations saisonnières des volumes de plage de 2017 à 2020 sur la plage de la flèche littorale et sur la plage sud-ouest. Hiver : novembre à mai; Été : mai à août; Automne : août à novembre..... 112

Figure 71. Variations estivales des volumes de plage sur les parties nord et sud de la flèche littorale de Hope-Town. Les volumes sont calculés sur la base des MNT de l'été (août-mai)..... 114

Figure 72. Dépôts de débordement sur la haute-plage observés à l'automne 2019 et orientés préférentiellement vers le chenal de marée, évidences de transferts sédimentaires entre la mer et le barachois lors de tempêtes. ..... 115

Figure 73. MNT biannuel de la plage à épis entre les première et dernière campagnes estivales (août 2020-août 2018). Les variations du profil de plage sont également décrites sur les transects 5, 8, 11 et 14; l'érosion est identifiée en bleu et l'accrétion en rouge..... 117

Figure 74. Variations saisonnières et pluriannuelles du volume de sédiments de plage (2017-2020) et hauteur de vague significative ($H_{m0}$) enregistrée au large à 10 m de profondeur au site HOE. ..... 118

Figure 75. Déséquilibre morphosédimentaire de part et d'autre (amont/aval) des épis par rapport à la direction de la dérive littorale principale représentée en traitillé noir. Les valeurs centimétriques expriment la moyenne, sur les 3 campagnes de mai, de la différence de hauteur des pieux de bois (en bleu) entre les côtés amont (nord) et aval (sud) des structures. Une mesure a été prise tous les 20 pieux sur chaque épi. Des valeurs positives (en vert) indiquent une accumulation du côté amont (nord) alors que des valeurs négatives (en rouge) indiquent une érosion..... 119

Figure 76. MNT biannuel de la plage sud-ouest entre les première et dernière campagnes estivales (août 2020 à août 2018). ..... 121

Figure 77. Variations saisonnières et pluriannuelles du volume de sédiments de plage (2017-2020)..... 122

Figure 78. Série temporelle des volumes de plage cumulés entre 2013 et 2019 et calculés pour les 4 zones de la plage à épis (haute-plage, haut-estran, bas-estran et avant-plage) sur la base des données topographiques de Lamontagne et Lefebvre (2014), Lamontagne (2014, 2017) et Lamontagne et Xhardé (2020). Les variations totales cumulées sont reportées en rouge. ..... 123

Figure 79. Pour chaque campagne, pourcentage d'échantillons associés aux différentes classes granulométriques selon leur valeur de $D_{50}$. ..... 125

Figure 80. Diamètre médian des grains ($D_{50}$) des sédiments récoltés en mai, août et octobre 2018, 2019 et 2020 sur la plage à épis de Hope-Town. Les 4 bandes de couleur représente la zonation de la plage, allant de la haute-plage en vert à l'avant plage en bleu foncé. ..... 126

Figure 81. Diamètre médian des grains (D50) des sédiments récoltés le long des profils 5, 8, 11 et 14 sur la plage à épis de Hope-Town au cours des 8 différentes campagnes d'échantillonnage. La zonation de plage est reportée sur la figure entre traitillés (haute-plage, haut-estran, bas-estran et avant-plage)..... 127

Figure 82. Diamètre médian des grains (D50) des sédiments récoltés en avril 2018 sur la plage sud-ouest au-devant de la basse falaise meuble. ..... 128

Figure 83. Proportion de gravier (> 5 mm dans les données de BPR) des échantillons collectés par la firme BPR (Lamontagne et Lefebvre, 2014; Lamontagne, 2014; Lamontagne et Xhardé, 2020). En plus de gravier, les échantillons sont composés de sable (0,08-5 mm dans les données de BPR) et de moins de 1% de silt..... 130

Figure 84. Composition minéralogique des échantillons récoltés à même les falaises rocheuses de St-Godefroi (A) et sur les plages de Hope-Town (B). ..... 132

Figure 85. Photographies enregistrées par la caméra Reconyx à Hope Town le 25 novembre 2019 à 09:00 (un niveau de marée de -0,28 m CGVD2013, une surcote de 0,43 m et des vagues de 0,77 m) et le 26 mars 2020. ..... 136

Figure 86. Positions de la zone de déferlement (indiquée par rapport à une ligne reliant la terminaison avale des épis, avec des valeurs positives vers le large) pour les profils topographiques 11 et 14 en fonction du niveau d'eau et de la hauteur des vagues $H_{m0}$. (Haut) La limite externe est indiquée par un code de couleur. (Bas) La limite interne, qui dépend directement du niveau d'eau et du profil de plage. ..... 137

Figure 87. Largeur de la zone de déferlement pour les profils topographiques 14 et 11 en fonction de la hauteur de vagues $H_{m0}$..... 138

Figure 88. Grille de modélisation grossière G4 avec la bathymétrie de la grille et la position des mouillages ayant mesurés les courants et le niveau d'eau. L'étendue de la grille fine est indiquée en vert. Les profondeurs de la carte marine sont en brasses/pieds. ..... 140

Figure 89. Grille de modélisation fine G5 avec la bathymétrie de la grille. La grille grossière G4 est indiquée en orange. ..... 141

Figure 90. Grille de modélisation des vagues G4w avec la bathymétrie de la grille et la position des mouillages ayant mesurés les vagues. Les profondeurs de la carte marine sont en brasses/pieds. ..... 143

Figure 91. Répartition initiale du sédiment pour la modélisation du transport sédimentaire sur la grille G5. ..... 145

Figure 92. Roses de courant au site HOD pour les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler et les courants modélisés par Delft3D sur la grille G4. ..... 149

Figure 93. Comparaison des séries temporelles des courants au site HOD pour les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler et les courants modélisés par Delft3D sur la grille G4. La composante du courant $V_{58°}$ correspond à l'orientation dominante, alors que $V_{328°}$ est la composante normale à l'axe principal..... 149

Figure 94. Comparaison des débits du chenal de la lagune de Hope Town (haut) calculés à partir des données du courantomètre (voir section 5.2) et (bas) modélisés par Delft3D. Les périodes illustrées ne sont pas les mêmes, mais les deux exemples couvrent un cycle similaire morte eau/vive eau. Le débit est positif vers la lagune..... 150

Figure 95. Exemples des conditions dans le chenal de la lagune de Hope Town selon les mesures du courantomètre (A, B et C) et selon la modélisation par Delft3D avec la grille G4 (D, E et F). Pour les données de courant, les observations de terrain représentent le courant mesuré à 45-50 cm du fond au centre du chenal (B) alors que les résultats de modélisation correspondent au courant moyen pour l'ensemble du transect du chenal (E). Le courant et le débit sont positifs vers la lagune. ..... 151

Figure 96. Analyses statistiques de la comparaison entre les observations des mouillages et la modélisation par Delft3D pour le site HOD. La comparaison est effectuée pour deux jeux de données (toutes les vagues et les vagues avec $H_s > 0,4$ m) et pour les paramètres hauteur significative ($H_s$), période moyenne ($T_{01}$) et direction des vagues (Dir). ..... 152

Figure 97. Analyses statistiques de la comparaison entre les observations des mouillages et la modélisation par Delft3D pour les sites HOB et HOC. La comparaison est effectuée pour deux jeux de données (toutes les vagues et les vagues

avec $H_s$ > 0,4 m) et pour les paramètres hauteur significative ($H_s$) et période moyenne ($T_{01}$). ..... 153

Figure 98. Exemples de la modélisation des vagues sur la grille G4w. (Haut) Tempête provenant du l'est ($H_{m0}$ 2,19 m, $T_{02}$ 8,3 s, Direction 107°). (Bas) Tempête venant du sud-sud-ouest ($H_{m0}$ 1,84 m, $T_{02}$ 7,5 s, Direction 199°). ..... 156

Figure 99. Exemples de l'évolution morphologique selon la modélisation du transport sédimentaire avec Delft3D pour les conditions de l'année 2018. (Haut) Évolution de la bathymétrie. (Bas) Modification de la bathymétrie (érosion ou sédimentation) relatif au début de la modélisation (16 mai 2018). ..... 157

Figure 100. Évolution morphologique selon la modélisation du transport sédimentaire avec Delft3D pour les conditions de l'année 2018. (Haut) Profil perpendiculaire à la plage entre le troisième épi et le quatrième épi à partir du sud. (Bas) Profil entre le premier et le deuxième épi à partir du sud. ..... 158

Figure 101. Variabilité saisonnière des vagues à Cap d'Espoir calculée comme la moyenne des plus grandes vagues mesurées chaque mois d'octobre 2010 à mai 2021 (trait bleu). L'étendue entre le minimum et le maximum des plus grandes vagues mesurées chaque mois est indiquée en bleu clair. Les lignes traitillées verticales représentent le moment des relevés topographiques effectuées en mai, en août et en novembre à Hope Town. ..... 159

Figure 102. Mouvements de trait de côte de la flèche littorale de Hope Town de 2001 à 2018, incluant un scénario hypothétique des mouvements entre 2017 et 2016. ..... 162

Figure 103. 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). ..... 185

Figure 104. Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants. ..... 187

Figure 105. 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. ..... 189

Figure 106. Accrétion ou érosion moyenne sur les profils 1 à 9 (partie sud de la plage à épis), les profils 10 à 18 (partie nord de la plage à épis) et 31-36 (plage sud-ouest) pour chaque campagne topographique, par rapport au premier levé en novembre 2017. ..... 193

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 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 par rapport au zéro des cartes marines). ..... 11

Tableau 2. Détails de chaque déploiement du marégraphe de Hope Town (instrument utilisé, période de mesure en heure UTC, offset des instruments, altitude CGVD2013 du capteur de pression de l'instrument inférieur. ..... 12

Tableau 3. Synthèse de la programmation des AWAC et de l'Aquadopp Profiler. Une plage de valeur est indiquée pour les paramètres qui changeaient d'un déploiement à l'autre. ..... 22

Tableau 4. Directions des courants de flot et de jusant mesurés par le Vector dans le chenal de la lagune, et rotation appliquée aux données lors du traitement. Les directions sont en degrés par rapport au référentiel XYZ du Vector (direction X = 90°). ..... 25

Tableau 5. Liste des différentes campagnes topographiques et des travaux effectués lors de chacune d'elle. ..... 39

Tableau 6. Tableau récapitulatif des travaux effectués lors de chaque campagne d'échantillonnage granulométrique (nombre d'échantillons prélevés et secteur de plage échantillonné). ..... 44

Tableau 7. Listes déploiements de la caméra automatique Reconyx observant la zone de déferlement. ..... 47

Tableau 8. Caractéristique des marées à Paspébiac et Hope Town calculées à partir prédictions de marées de T_TIDE basées sur les données des marégraphes de Paspébiac (juillet 2015 à juin 2020) et de Hope Town. ..... 52

Tableau 9. Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrés à Paspébiac entre le 6 novembre 2017 et le 22 juin 2020 ..... 57

Tableau 10. Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Hope Town (site HOB) durant les deux déploiements, à savoir du 16 mai au 24 novembre 2018 et entre le 8 mai et le 28 novembre 2019, ..... 58

Tableau 11. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le marégraphe de Paspébiac de juillet 2015 à juin 2020, les composantes les plus importantes sont marquées en gras. Erreur estimée de l'amplitude et de la phase avec un intervalle de confiance de 95%. Rapport signal sur bruit (SNR) ..... 59

Tableau 12. Position et période d'enregistrement des mouillages installés. ..... 62

Tableau 13. Liste des 15 plus fortes tempêtes mesurées entre novembre 2017 et juillet 2020 aux sites F, HOE et jusqu'en octobre 2020 pour le site HOD. À noter que le site HOD n'est disponible qu'en période estivale. ..... 68

Tableau 14. Régressions linéaires multiples pour prédire les rapports $H_{m0_HOB}$ / $H_{m0_HOE}$ (HratioB) et $H_{m0_HOC}$ / $H_{m0_HOE}$ (HratioC) à partir de la direction des vagues au large ($Dir_{HOE}$), le niveau d'eau et la période des vagues au large ($T_{02_HOE}$). Seulement les données avec les vagues supérieurs à 0,5 m au large (HOE) sont utilisées. ..... 75

Tableau 15. Taux de régression linéaire (TRL) moyen ± intervalle de confiance à 95% (LCI95) pour les cinq zones côtières. L'indicateur géomorphologique du trait de côte utilisé pour chaque zone et le nombre de transects en érosion (Er.) ou en accrétion (Ac.) selon le TRL sont également indiqués. ..... 95

Tableau 16. Variations des volumes de plage de la flèche littorale de Hope-Town entre les campagnes topographiques de l'été. ..... 117

Tableau 17. Variations des volumes de plage sur la plage sud-ouest entre les campagnes topographiques de l'été. ..... 121

Tableau 18. Composition minéralogique des échantillons de sédiments des falaises rocheuses de St-Godefroi, de la flèche littorale de Hope-Town et de la plage sud-ouest (composition en pourcentage comme moyenne ±écart-type. Pour les données ajustées (aj.), la composition minéralogique est calculée en ignorant les phyllosilicates qui ne sont pas des traceurs adéquats pour les plages sableuses. ..... 133

Tableau 19. Statistiques de comparaison entre les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler au site HOD et les courants modélisés par Deft3D sur la grille G4. La composante du courant $V_{58°}$ correspond à l'orientation dominante, alors que $V_{328°}$ est la composante normale à l'axe principal. ..... 150

Tableau 20. 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). ..... 179

Tableau 21. Codes explicatifs du contrôle de qualité. ..... 180

Tableau 22. Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants. ..... 186

Tableau 23. Accrétion ou érosion moyenne en millimètre pour les différents profils par rapport au levé de novembre 2017. La position des cinq épis est marquée par un traitillé dans le tableau. ..... 191

Tableau 24. Variations volumétriques saisonnières de la plage à épis par secteurs. ..... 194

Tableau 25. Variations volumétriques saisonnières de la plage à épis par parties nord/sud. ..... 195

Tableau 26. Variations volumétriques saisonnières de la plage sud-ouest par secteur. . 195

Tableau 27. Limite externe (L.Ext.), limite interne (L.Int.) et largeur de la zone de déferlement aux profils topographiques 14 et 11, ainsi que le niveau d'eau CGVD2013, la hauteur des vagues $H_{m0}$ et la période des vagues $T_{02}$. ..... 196

# REMERCIEMENTS

Les mouillages ont été préparés et entretenus par Bruno Cayouette, Christian Boutot et Gilles Desmeules. Les opérations de terrain ont été réalisées par Bruno Cayouette (technicien), Christian Boutot (technicien), Gilles Desmeules (technicien), Miranda Blouin (stagiaire technicienne), Frédérik Bélanger (technicien), Michel April-Duchesne, Camille Pastore (étudiante), Zélie Schuhmacher (étudiante), Sylvain Joly (professionnel de recherche) et Urs Neumeier (chercheur).

Les mouillages ont été récupérés et réinstallés avec différents bateaux de pêche de Sainte-Thérèse-de-Gaspé : Le *Corina Pride* du capitaine Roger Ouellet aidé du matelot Reynald Gagné; le *Miss Amy Lynn* du pêcheur Gilles Duguay, aidé de son fils et du matelot Donald. Le *Néreis* et le *Macoma*, bateaux de l'ISMER ont aussi été utilisés pour le marégraphe de Paspébiac ainsi que pour les mouillages côtiers devant Hope Town.

Le plongeur Mario Déraspe a permis à plusieurs occasions de récupérer un mouillage dont la bouée était bloquée ou alors un mouillage trop ensablé dont la ligne de fond a cassé au moment de la récupération.

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

Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030. Le projet a été initié par Daniel Lavallée du ministère des Transports du Québec (MTQ); Michel Michaud et Yves Blanchard ont assuré la coordination du projet au MTQ.

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Contexte du projet

L'érosion côtière est un processus naturel, qui s'est intensifié ces derniers vingt ans et qui continuera à croître dans un contexte de changements climatiques où les tempêtes sont de plus en plus dévastatrices et l'énergie des vagues plus forte. Ce mouvement de dynamisme naturel de la côte entre en conflit avec les infrastructures statiques comme les bâtiments et le réseau routier. Notamment dans l'Est-du-Québec, le tiers de la population et près de 60 % des routes nationales sont situées à moins de 500 m des côtes pour des raisons historiques ou des contraintes géomorphologiques. Les résultats des études indiquent que 34 km de routes sont exposés de manière imminente à l'érosion (un seul événement érosif peut les affecter), alors que 123 km supplémentaires seront exposés d'ici 2100 à cause des effets des changements climatiques (Drejza et al, 2014).

Les ouvrages rigides et longitudinaux qui fixent le trait de côte menacé d'érosion, tel les murs verticaux et les empierrements, sont fréquemment utilisés mais s'accompagnent d'inconvénients majeurs. Malgré l'arrêt de l'érosion de la côte à l'arrière de l'ouvrage et la protection des infrastructures contre l'action des vagues, ils impliquent la réflexion de l'énergie des vagues et sur les côtes basses sablonneuses par exemple, ils provoquent une perte de sable à la base de l'ouvrage à cause de la réflexion des vagues. Ce type de protection entraîne généralement une perte dans le bilan sédimentaire le long des côtes adjacentes (effet de bout). De plus, les ouvrages rigides ont des impacts majeurs sur la faune, sur la flore et sur le paysage. Ils bloquent aussi l'accès à la mer pour les populations locales et les touristes.

Des méthodes alternatives ou complémentaires (c'est-à-dire des solutions mixtes) doivent être envisagées pour assurer la résilience des infrastructures routières contre l'érosion côtière actuelle et future. Parmi ces alternatives, on compte la construction d'épis courts associée à la recharge de plage. Cette méthode vise à créer et maintenir devant les infrastructures une plage capable d'absorber l'énergie des fortes vagues associées aux tempêtes. La construction d'épis peut avoir un impact important sur l'évolution du trait de côte et le transport sédimentaire (Basco, 2008). Cela nécessite donc une conception rigoureuse qui tient compte des conditions environnementales et hydrodynamiques sur un site donné. Un programme de suivi environnemental et d'entretien de la recharge de plage doit également être envisagé, principalement pour éviter l'érosion dans des secteurs adjacents qui seraient privés des sédiments retenus par les épis et pour maintenir la plage entre les épis.

Ce projet s'intéresse à la plage de la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town, plage sur laquelle une recharge de plage a été effectuée et un champ d'épis a été construit en 2012 pour protéger la route 132. L'évolution historique a montré que cette flèche littorale était dynamique. Les efforts passés n'ont pas permis de stabiliser cette plage à long terme. Il est donc très pertinent de suivre l'évolution de la flèche et des plages voisines pour évaluer les effets du nouveau champ d'épis et afin de trouver une solution durable pour la gestion de ce secteur côtier.

De plus, la méthode combinée (recharge de plage et épis) a été très peu utilisée jusqu'à présent au Québec, alors que les conditions hydrodynamiques des côtes québécoises sont particulières avec la présence de glace de mer en hiver. Celle-ci réduit l'énergie des vagues, mais en même temps le pied de glace peut générer la réflexion des vagues sur la plage. Un suivi du cas de Hope Town est donc utile pour valider la conception, d'accroître les connaissances sur cette méthode alternative de protection et d'évaluer sa pertinence dans un milieu côtier soumis aux changements climatiques qui affecteront, notamment, le niveau de la mer, les ondes de tempêtes et les vagues.

## 1.2 Site d'étude

Le site d'étude est situé sur la côte sud de la péninsule gaspésienne dans la partie centrale de la baie des Chaleurs. À 10 km à l'est de Paspébiac, entre St-Godefroi et Hope Town se trouve la lagune de Hope Town (appelé localement barachois de Hope Town), dans laquelle se jettent les rivières Paspébiac et St-Godefroi (Figure 1). Cette lagune est presque totalement fermée par une flèche littorale dirigée vers l'ouest, sur laquelle passe la route 132 (Figure 2). Le site d'étude principal est la plage à l'extrémité de cette flèche littorale (48° 3,7' N, 65° 7,8 ' W, Figure 3).

La formation de Bonaventure affleure sur la côte à l'ouest et à l'est de la lagune, formant des falaises de grès rouge soumises à l'érosion (Xhardé, 2007). Dans ce secteur, la dérive littorale est dirigée vers l'ouest sous l'influence des vagues provenant du golfe du Saint-Laurent. La flèche littorale de Hope Town est le résultat de cette dérive littorale, qui est probablement alimentée en sédiment sableux par l'érosion des falaises. Les sédiments amenés par les rivières Paspébiac et Saint-Godefroi jouent probablement un rôle mineur pour la flèche littorale, car la dérive littorale dirige les sédiments sortant du chenal de la lagune vers la plage Sud-ouest (Figure 3). Cette dernière présente d'ailleurs une granulométrie plus grossière que la plage de la flèche littorale.

Toute flèche littorale est naturellement dynamique, bougeant dans l'espace en fonction de l'apport en sédiment, des tempêtes et des crues. La flèche littorale de Hope Town a été utilisée pour des infrastructure humaines, dont la permanence entre en contradiction avec le dynamisme de la géomorphologie côtière. D'une part, la principale route de la Gaspésie, la route 132, a été construite sur la flèche et cette route franchit le chenal de la lagune sur un pont. D'autre part, l'entrée de la lagune de Hope Town a été utilisée comme petit port de pêche jusque dans les années soixante.

Dans le passé, une jetée a été construite à l'extrémité ouest de la flèche littorale pour maintenir ouvert à la circulation l'embouchure du chenal et permettre ainsi l'accès au petit port de pêche. Cette jetée faisait office de barrage à la dérive littorale et favorisait la progradation de la plage. Depuis que cette jetée a été retirée à la fin des années 1960, la plage de la flèche littorale a progressivement maigri, menaçant la stabilité de la route 132 (Poirier, 2003). La route sur la partie est de la flèche littorale est protégée par un imposant empierrement, qui a été allongé successivement depuis plus de 20 ans. La partie ouest de la flèche et son extrémité forment une plage appréciée par les touristes mais menacée

d'érosion. Différents ouvrages de stabilisation (murs en bois, petits épis, petits empierrements) ont été installés sur cette plage dans le passé avec des résultats mitigés.

En novembre 2012, le MTMDET a procédé à une recharge de 4 500 $m^3$ de sédiments sur la plage de la flèche littorale et a construit cinq épis (Figure 3) pour accroître une zone de frai pour les éperlans et réduire l'amaigrissement de la plage (Lamontagne et Lefebvre, 2014), selon les recommandations de Poirier (2003) et de Lavallée (2011). Ces épis sont constitués dans leur partie supérieure d'une palissade de pieux s'étendant sur 11-20 m et dans leur partie inférieure d'une double rangée de blocs de pierre s'étendant sur 20-30 m (Figure 4). La partie inférieure est perméable à la dérive littorale. Les épis ont une longueur totale de 40 à 50 m. L'espacement entre les épis est de 50 m. Comme pour tout type d'épi, leur objectif est de réduire la dérive littorale et de retenir le sable localement. Par contre en aval (dans le sens de la dérive littorale, donc vers le sud-ouest) il y a un risque d'un effet de bout avec une érosion de la plage voisine (French, 2001; Basco, 2008).

Après la construction des épis et la recharge de plage de 2012, des suivis ont été effectués par la firme BPR en 2013 (Lamontagne et Lefebvre, 2014), en 2014 (Lamontagne, 2014), en 2017, en 2018 et en 2019 (Lamontagne et Xhardé, 2020), avec chaque fois un relevé topographique et bathymétrique à la fin du printemps, un examen des épis et observations de nature biologique.

Enfin, le pont permettant à la route 132 de franchir le chenal de la lagune a été reconstruit entièrement en 2019-2020. Le nouveau pont est un peu plus haut afin de permettre un bon écoulement dans le chenal, même avec la hausse de niveau marin attendue dans le futur. À cette occasion, la chaussée sur la flèche littorale a aussi été construite un peu plus haut et l'empierrement un peu prolongé vers le sud-ouest.

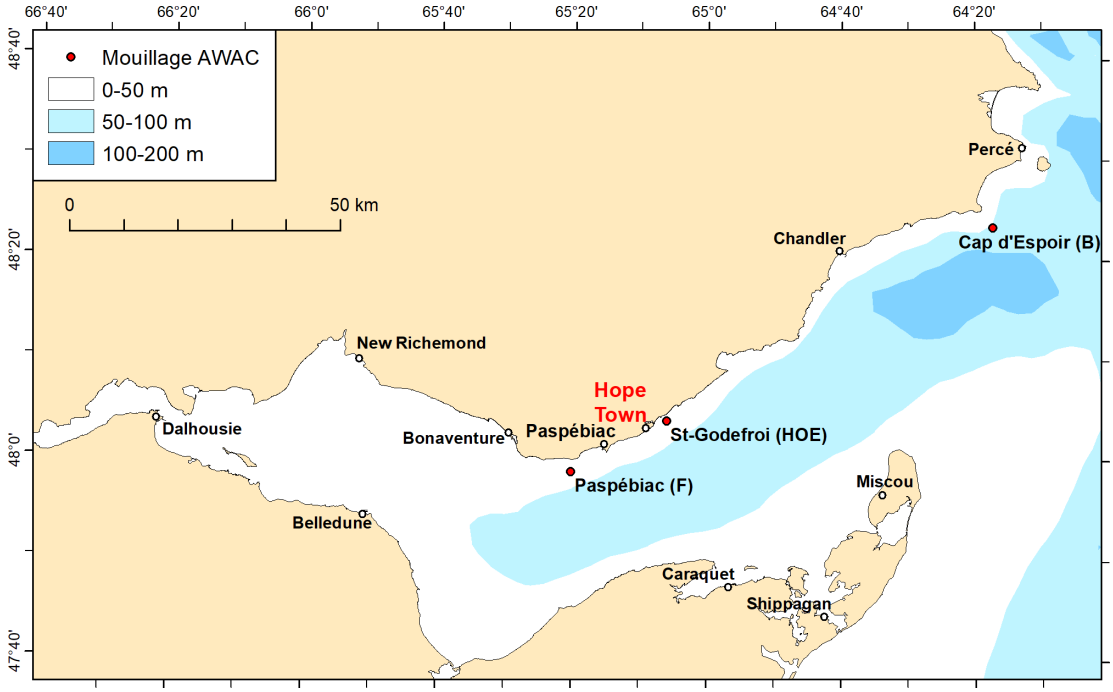



*Figure 1. Carte de la baie des Chaleurs avec la position de Hope Town, Paspébiac, ainsi que des mouillages de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et Cap d'Espoir (B).*

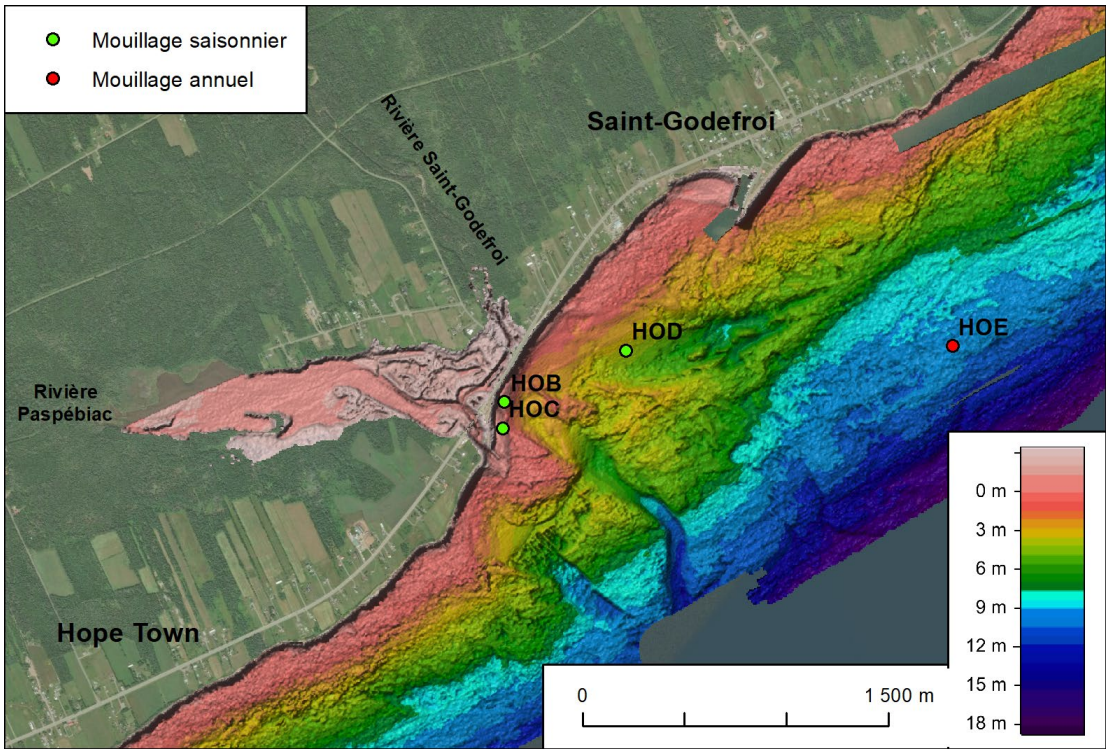



*Figure 2. Carte de la région Hope Town – St-Godefroi avec la lagune de Hope Town, la flèche littorale fermant celle-ci et la position des différents instruments. La bathymétrie est par rapport au zéro des cartes marines avec les données fournies par le Service hydrographique du Canada.*

*Figure 3. Carte de la flèche littorale de Hope Town montrant les différents secteurs du site d'étude.*

*Figure 4. Photographie montrant les cinq épis de la plage de Hope Town, qui sont constitués à moitié d'une palissade de bois et à moitié d'un alignement de blocs de pierre, juin 2020.*

## 1.3 Objectifs

Les principaux objectifs du projet de recherche, tels que définis dans le devis de recherche, sont :

A) Déterminer l'évolution morphosédimentaire passée et présente de la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town;

B) Mesurer les conditions hydrodynamiques auxquelles est exposée la plage de cette flèche littorale;

C) Définir l'impact du champ d'épis sur la plage de la flèche littorale et sur les plages adjacentes dans les présentes conditions et avec les futurs changements climatiques.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

1) Définir l'évolution passée de la plage et de la flèche littorale avant la construction des épis à partir de photographies aériennes historiques et des relevés topographiques existants;

2) Suivre l'évolution morphologique par levé topographique au DGPS pour observer l'évolution de la flèche littorale et des plages adjacentes et ainsi déterminer l'impact du champ d'épis;

3) Suivre l'évolution de la granulométrie des sédiments de plage du champ d'épis pour déterminer l'impact du champ d'épis sur la composition granulométrique;

4) Mesurer le climat de vagues auquel est soumise la plage de la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town;

5) Localiser la position de la zone de déferlement des vagues devant la plage du champ d'épis et déterminer sa position par rapport aux extrémités des épis;

6) Mesurer les niveaux d'eau pour déterminer les caractéristiques locales des marées et des surcotes;

7) Mesurer le courant et le débit dans l'embouchure de la lagune de Hope Town dans le but d'évaluer le rôle de l'embouchure sur la dérive littorale;

8) Implanter un modèle numérique reproduisant les vagues, les courants et le transport sédimentaire pour la flèche littorale afin de simuler la réaction de la plage à divers scénarios (hausse du niveau marin, tempêtes extrêmes, etc.), ce qui permettra d'évaluer l'évolution du site avec les futurs changements climatiques;

9) Évaluer les possibilités d'implanter ce type d'ouvrages de protection sur d'autres sites.

L'objectifs spécifique 8 n'a pas été entièrement atteint. En effet, des problèmes de stabilité du modèle numérique pour le transport sédimentaire n'ont pas pu être résolus pour les simulations devant reproduire le cycle saisonnier printemps-été-automne. Les résultats partiels de modélisation sont inclus dans le rapport, mais il n'a pas été possible d'évaluer l'évolution du site en fonction de divers scénarios de hausse du niveau marin ou d'augmentation des vagues de tempêtes.

## 1.4 Communications scientifiques reliées au projet

Schuhmacher, Z., Neumeier, U., 2019. Reconstitution historique et évolution morphosédimentaire de la plage à épis de Hope Town (Baie des Chaleurs) : résultats préliminaires. Forum québécois en sciences de la mer, Rimouski, 11-13 novembre 2019.

Affiche scientifique à une conférence régionale

Neumeier, U., Schuhmacher, Z., 2020. Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis, barachois de Hope Town en Gaspésie. Journée transfert de connaissance, Résilience des infrastructures et adaptation aux changements climatiques. Ministère des Transports du Québec. Colloque en ligne, 12 novembre 2020.

Présentation orale lors d'un colloque du MTQ

Schuhmacher, Z., Neumeier, U., 2020. Geomorphological evolution of a sand spit beach with groin field exposed to winter sea ice (Gulf of St. Lawrence, Canada). AGU Fall Meeting 2020, 1-17 décembre 2020.

Affiche scientifique à une conférence internationale (mode virtuel)

Schuhmacher, Z., 2020. Évolution historique et morphosédimentaire de la plage à épis située sur la flèche littorale de Hope Town, Baie des Chaleurs. Séminaire à l'ISMER/UQAR, Rimouski, 11 décembre 2020.

Présentation orale dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

Schuhmacher, Z., Neumeier, U., 2021. Beach morphodynamics and historical coastline evolution of a sand spit with groin field exposed to winter sea ice (Gulf of St. Lawrence, Canada). Coastal Dynamics 2021, Delft, Pays-Bas, 28 juin au 2 juillet 2021.

Présentation orale à une conférence internationale (mode virtuel)

# 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

## 2.1 Marégraphes de Paspébiac et de Hope Town

*Marégraphe de Paspébiac*

Un marégraphe a enregistré les niveaux d'eau dans le port de Paspébiac pour le projet CC07.1 du 4 juillet 2015 au 1er mai 2018. Toutefois il n'y a pas de données du 2 août 2016 au 27 juin 2017 à cause d'un instrument dysfonctionnel. Le présent projet a assuré la maintenance de ce marégraphe à partir du 1er mai 2018 au 22 juin 2020. Après cette date, la maintenance de ce marégraphe est assurée par le projet T841.1

Le marégraphe est placé dans un tube en plastique ABS noir de 3,666 m de long et de 5 cm de diamètre, qui est fermé à la base et qui sert de puits de tranquillisation. Ce tube est fixé sur la paroi d'acier du quai dans un renfoncement, juste au premier angle du quai principal sur le côté intérieur du quai (248436 / 5320269, MTM 5, Figure 5). Le tube est fixé à la paroi en acier avec quatre vis en acier inoxydable marin placées entre 0,34 et 1,6 m au-dessus du zéro des cartes marines (Figure 6). Le plastique ABS (acrylonitrile butadiène

*Figure 5. Position du marégraphe de Paspébiac sur le quai de Paspébiac.*

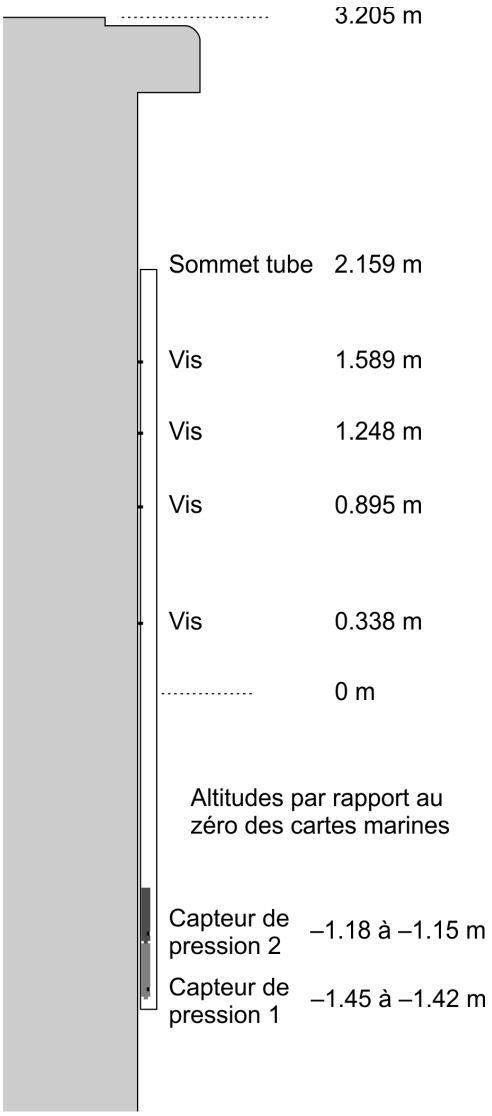



*Figure 6. Schéma de l'installation du marégraphe de Paspébiac avec le tube servant de puits de tranquillisation et des deux capteurs de pression. Les altitudes des capteurs de pression variaient légèrement d'un déploiement à l'autre (cf. Tableau 1).*

styrène) a un coefficient de dilatation thermique d'environ $7\times10^{-5}$/°C, ce qui correspond à une dilatation de 2,8 mm pour une longueur de 2 m et une différence de température de 20°C, soit moins que la marge d'exactitude des instruments (cf. ci-dessous).

Pour se prémunir contre la défaillance d'un instrument, deux marégraphes RBR TGR-2050 (ou un RBR TGR-2050 et un RBR TWR-2050) sont placés dans le tube. L'instrument supérieur repose directement sur l'instrument inférieur et la distance verticale entre les deux capteurs de pression est 265 mm. L'instrument inférieur a le capteur de pression à environ 93 mm de la base du tube.

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 ±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. Parfois un RBR TWR-2050 est utilisé pour l'instrument supérieur, qui a les mêmes dimensions

physiques et le même type de capteur que les RBR TGR-2050, mais une pleine échelle de pression de 10 m. Le Tableau 1 indique les instruments utilisés pour chaque déploiement.

Les instruments étaient programmés avec une fréquence d'échantillonnage aux 5 minutes. Chaque valeur enregistrée correspond à la moyenne des mesures à 1 Hz durant 40 s pour les RBR TGR-2050 et durant 22 s pour les RBR TWR-2050. L'horloge des instruments était ajustée à l'heure UTC avant le déploiement et vérifiée à la récupération. La dérive de l'horloge des instruments était généralement de l'ordre de 20 s et toujours inférieure à 50 s, ce qui est négligeable pour des mesures aux 5 minutes.

Cinq opérations de maintenance ont été effectuées pour le marégraphe de Paspébiac dans le cadre du présent projet en utilisant une petite embarcation de l'ISMER (Boston Whaler *Néreis* de 4,7 m) comme plateforme de travail, à savoir le 1er mai 2018, le 23 octobre 2018, le 17 avril 2019, la nuit du 16 au 17 septembre 2019 et le 22 juin 2020. Entre le démontage de l'ancien tube ABS avec les anciens instruments et l'installation du nouveau tube ABS avec les nouveaux instruments, il y a généralement 10-15 minutes sans mesures. Toutefois, il y a un trou dans les données d'environ 2 heures le 1er mai 2018 entre la fin du projet précédent CC07.1 et le début du présent projet, car les instruments avaient été programmés par mégarde en Heure Normale de l'Est (HNE) au lieu de l'heure UTC, et ils ont commencé à enregistrer seulement à 17:00 UTC, soit 2 heures après les opérations de maintenance.

Après le démontage et l'installation, des lectures manuelles du niveau d'eau ont été effectuées avec la sonde *Heron Little Dipper* dans un tuyau servant de puits de tranquillisation installé. La surface d'acier au-dessus des mesures manuelles (2,295 m CGVD28 selon le relevé topographique effectué en juillet 2015) servait comme niveau de

*Tableau 1. 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 par rapport au zéro des cartes marines).*

| Période | 2018A | 2018B | 2019A | 2019B |
|---|---|---|---|---|
| Instrument inférieur | TGR-2050 n° 16686 | TWR-2050 n° 21549 | TGR-2050 n° 16486 | TWR-2050 n° 21549 |
| Instrument supérieur | TWR-2050 n° 21543 | TGR-2050 n° 16495 | TWR-2050 n° 21545 | TGR-2050 n° 16491 |
| Première donnée valide | 2018-05-01 17:00:00 | 2018-10-23 23:20:00 | 2019-04-17 22:00:00 | 2019-09-17 03:00:00 |
| Dernière donnée valide | 2018-10-23 23:10:00 | 2019-04-17 21:45:00 | 2019-09-17 02:50:00 | 2020-06-22 13:50:00 |
| Offset instrument inférieur | 0,03 dbar | -0,21 dbar | 0,04 dbar | 0,03 dbar |
| Offset instrument supérieur | 0,24 dbar | 0,09 dbar | -0,22 dbar | -0,21 dbar |
| Altitude instrument inférieur | -1,446 m | -1,433 m | -1,419 m | -1,440 m |

référence. Ces mesures ont été effectuées pendant 15 minutes toutes les 3-5 minutes au début et à la fin de chaque déploiement. Elles ont été utilisées pour déterminer l'altitude précise des deux instruments.

*Marégraphe de Hope Town*

Le marégraphe de Hope Town a été installé durant six mois en 2018 et en 2019 sur l'avant-plage de la flèche littorale de Hope Town. L'instrument a été fixé sur un tube vertical en acier ancré dans le sédiment à 14 m devant le cinquième épi (site HOB, coordonnées 257 838,8 / 5 325 264,2, MTM 5, Figure 3). Il était retiré durant l'hiver pour ne pas être endommagé ou arraché par la glace de mer.

Il s'agissait d'un houlographe RBR TWR-2050 qui a été utilisé comme marégraphe, c'est-à-dire programmé pour enregistrer une moyenne du niveau d'eau sur une période de 60 secondes toutes les 5 minutes. L'houlographe a été programmé en heure UTC.

Le marégraphe était installé ou récupéré à pied lors de marées de vive eau quand il n'y avait plus que 0,3-0,4 m d'eau au site. Il a fonctionné du 16 mai au 24 novembre en 2018 et du 8 mai au 28 novembre en 2019 (Tableau 2). L'altitude du marégraphe a été déterminée en mesurant chaque année par DGPS le sommet du boîtier du TWR-2050 lors d'un relevé DGPS de la plage. Le capteur de pression du TWR-2050 est 218 mm sous le sommet du boîtier.

*Tableau 2. Détails de chaque déploiement du marégraphe de Hope Town (instrument utilisé, période de mesure en heure UTC, offset des instruments, altitude CGVD2013 du capteur de pression de l'instrument inférieur.*

| Période | 2018A | 2019A |
|---|---|---|
| Instrument inférieur | TWR-2050 n° 21542 | TWR-2050 n° 21547 |
| Première donnée valide | 2018-05-16 14:10:00 | 2019-05-08 16:05:00 |
| Dernière donnée valide | 2018-11-24 01:50:00 | 2019-11-28 02:00:00 |
| Offset instrument | -0,11 dbar | -0,11 dbar |
| Altitude instrument | -1,513 m | -1,299 m |

## 2.2 Traitement des données de niveau d'eau

*Traitement des données des marégraphes*

L'ensemble des calculs pour obtenir le niveau d'eau d'un marégraphe avec capteur de pression est résumé dans l'équation suivante

$$z_{eau} = \frac{p_{rbr} - p_{atm0} + p_{offset}}{g\,\rho} + z_{rbr} \qquad (I)$$

avec $z_{eau}$ l'altitude du niveau d'eau (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 $s^{-2}$), $\rho$ la masse volumique de l'eau (kg $m^{-3}$) et $z_{rbr}$ l'altitude du capteur de pression du marégraphe (m).

Les données des marégraphes ont été corrigées avec la pression atmosphérique mesurée par la station météo de New Carlisle (altitude 46,4 m), qui a été convertie à la pression au niveau de la mer (× 1,00552) pour obtenir $p_{atm0}$. Toutefois, pendant les quatre jours du 6 au 10 octobre 2019 que cette station météo était hors service, la pression mesurée par la station météo de Cap d'Espoir (9001, altitude 14,4 m, conversion × 1,00171) a été utilisée.

La constante $p_{offset}$ a été déterminée pour chaque instrument en comparant les lectures hors de l'eau juste avant l'installation et juste après la récupération avec la pression atmosphérique ajustée au niveau de la mer. La valeur de $p_{offset}$ est indiquée dans les Tableaux 1 et 2.

La pression de la colonne d'eau est convertie en hauteur de colonne d'eau en divisant par la gravité (9,8087 m $s^{-2}$ à Paspébiac et 9,80875 m $s^{-2}$ à la flèche littorale de Hope Town selon la base de données de Ressources Naturelles Canada) et par la masse volumique de l'eau. Cette dernière est calculée avec l'équation d'état de l'eau de mer EOS80 (Fofonoff, 1985) en utilisant la température mesurée par les instruments et avec une salinité estimée à 33 pour la partie centrale de la baie des Chaleurs à partir des simulations numériques de Pêches et Océans Canada.

Pour le marégraphe de Paspébiac, l'altitude des capteurs de pression a été établie en comparant les mesures manuelles de niveau d'eau prises avec la sonde *Heron Little Dipper* en début et en fin de déploiement avec les enregistrements des instruments (voir exemple à la Figure 7). L'altitude $z_{rbr}$ utilisée pour le traitement des données est la moyenne de l'altitude déterminée en début et en fin de déploiement. Pour le marégraphe de Hope Town, l'altitude du capteur de pression a été déterminée directement par un relevé DGPS.

Il existe trois niveaux de référence pour les altitudes : le zéro des cartes marines (zéro marin, correspondant à la plus basse marée astronomique), le niveau marin moyen de 1928 (CGVD28, Canadian Geodetic Vertical Datum 1928) et le nouveau niveau marin moyen de 2013 (CGVD2013, Canadian Geodetic Vertical Datum 2013).

À Paspébiac, le zéro des cartes marines est 0,901 m en-dessous du zéro CGVD28, et le zéro CGVD2013 est 0,485 au-dessus du zéro CGVD28. À Hope Town, le zéro CGVD2013 est 0,462 m au-dessus du zéro CGVD28. Il est à noter que la différence entre le géoïde CGVD28 et le géoïde CGVD2013 varie spatialement, et qu'elle est 23 mm plus grande à Paspébiac qu'à la flèche littorale de Hope Town.

Pour le traitement des données, la référence verticale zéro des cartes marines a été utilisée pour le marégraphe de Paspébiac et la référence verticale CGVD2013 pour le marégraphe

de Hope Town. Toutefois, les niveaux d'eau des deux marégraphes ont été convertis à la référence verticale CGVD28 pour les données présentées dans ce rapport et les fichiers exportés.

Les données en début et fin de déploiement quand le marégraphe n'était pas encore en position durant toute la période moyennée pour une mesure (40 s ou 60 s) ont été retirées. De même, pour le marégraphe de Hope Town installé dans l'avant-plage, les périodes quand le marégraphe était hors de l'eau à cause de niveaux d'eau très bas ont été marqués comme invalides. Cela est arrivé lors d'une marée basse le 15 novembre 2018, huit heures après la plus forte décote enregistrée quand la décote était encore de 0,76 m.

Les enregistrements du marégraphe montrent des petites oscillations avec une période de 15-25 minutes et généralement une amplitude de 2-4 cm (pendant des tempêtes entre 10 et 25 cm). Pour lisser ces oscillations, un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 1/1800 Hz a été appliqué. Selon l'utilisation prévue, les données lissées ou non lissées peuvent être utilisées.

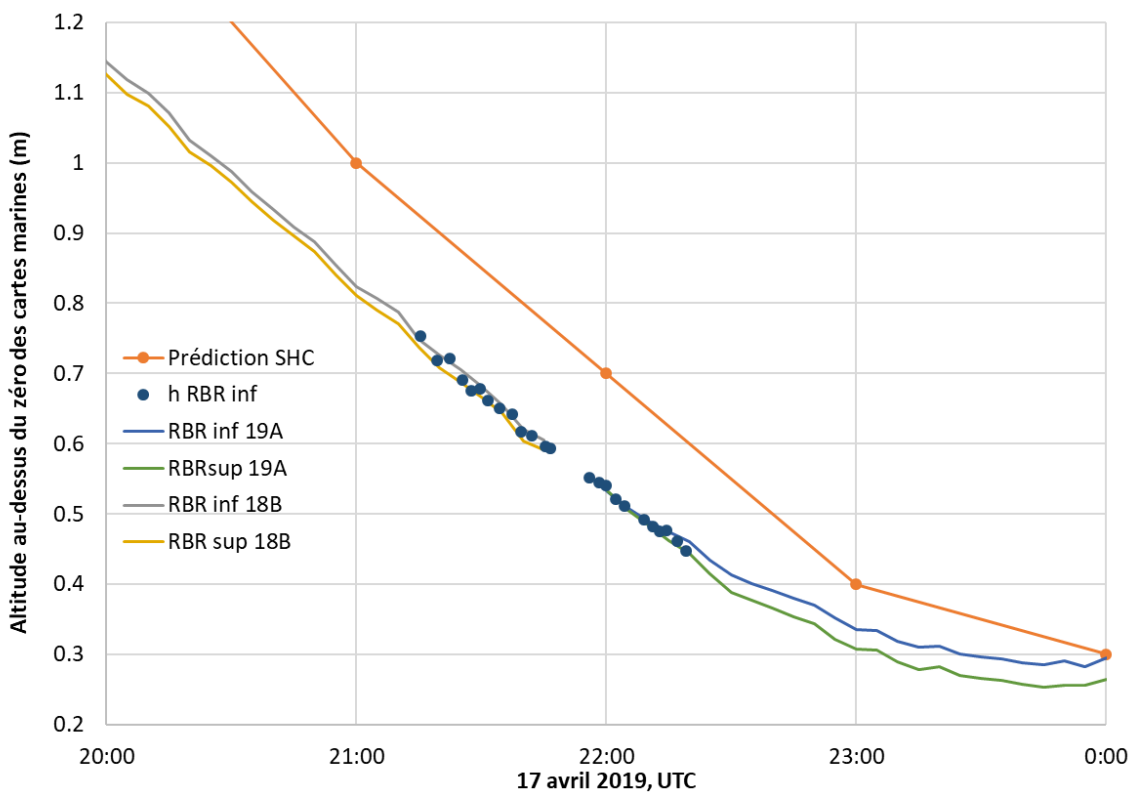



*Figure 7. Exemple de la détermination de l'altitude du marégraphe de Paspébiac avec les mesures manuelles effectuées le 17 avril 2019. Les données du déploiement 18B ont été ajustée avec une altitude de -1,414 m, celles du déploiement 19A avec une altitude de -1,426 m*

Deux instruments fonctionnaient en parallèle à Paspébiac. Ils ont mesuré des valeurs proches, mais avec des différences allant jusqu'à 6 cm. 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 8). Il n'est pas facile de savoir quel instrument est plus fiable, raison pour laquelle il est tout à fait raisonnable d'utiliser la moyenne des deux instruments. C'est cette série temporelle moyenne qui est présentée dans ce rapport et qui est transmise avec les autres données.

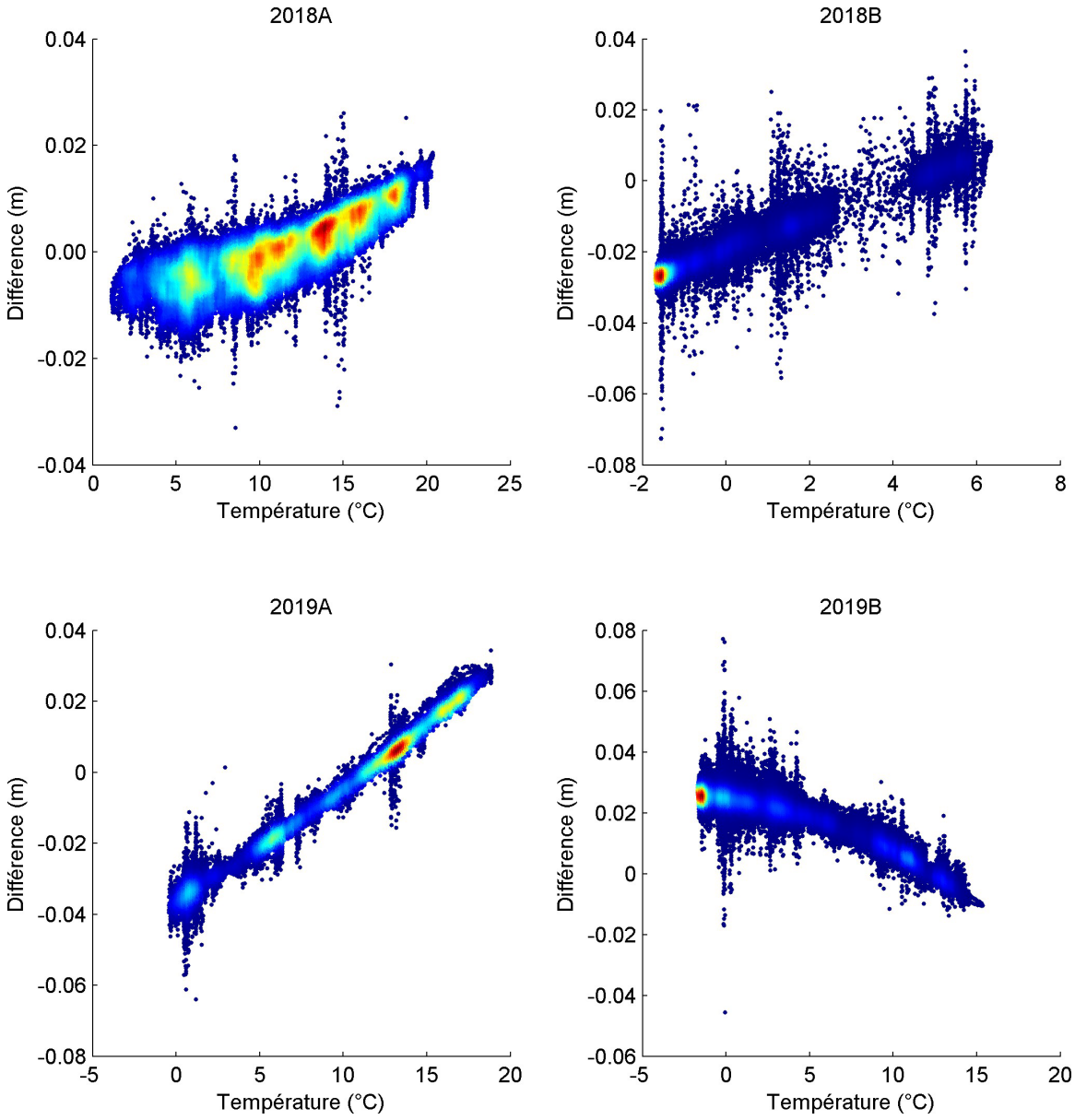



*Figure 8. Différence des niveaux d'eau mesurés entre les deux instruments pour le marégraphe de Paspébiac. Chaque période de déploiement semestrielle est représentée séparément. La couleur indique la densité des points.*

*Traitement des données de niveau d'eau des mouillages*

Les AWACs montés sur les plateformes de mouillage (voir section 2.3 ci-dessous) 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 même manière que pour les marégraphes (cf. ci-dessus). Toutefois, le niveau de référence n'était pas CGVD28 mais le niveau marin moyen, car l'altitude exacte des instruments n'est pas connue et elle pouvait varier légèrement d'un déploiement à l'autre au même site. À cet effet le niveau d'eau moyen observé durant chaque déploiement a été soustrait aux données de ce déploiement. Ce niveau d'eau moyen a été calculé entre le premier et dernier passage à mi-marée en montant. Cette opération a été effectuée séparément pour chaque déploiement, car l'altitude du mouillage peut varier d'un déploiement à l'autre.

La gravité aux sites F et HOE est respectivement 9,80866 $m/s^2$ et 9,80874 $m/s^2$ selon la base de données de la Commission géologique du Canada. La masse volumique de l'eau a été calculée avec la température mesurée par l'AWAC près du fond, une salinité estimée à 33 pour la partie centrale de la baie des Chaleurs à partir des simulations numériques de Pêches et Océans Canada, et une pression correspondant à la moitié de la profondeur mesurée.

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 °C et une salinité de 30, une variation de salinité d'une unité psu produit une variation de masse volumique de ~0,08 %, et une variation de température de 1 °C produit une variation de masse volumique de ~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.

3) Les mouillages ont parfois bougés lors d'un déploiement, soit en s'enfonçant simplement dans le sédiment sous leur poids, soit lors de tempêtes. C'est particulièrement le cas pour le mouillage de Saint-Godefroi, qui était à seulement 10 m de profondeur (Figure 34).

*Détermination des harmoniques des marée et estimations des surcotes/décotes*

Les séries temporelles de niveaux d'eau ont été analysées avec la boîte à outils T_TIDE dans Matlab (Pawlowicz et al., 2002) pour déterminer les harmoniques de marées, puis pour calculer les prédictions de marées basées sur ces harmoniques. Seulement les harmoniques standard de marée, pour lesquelles T_TIDE indiquait un faible rapport signal/bruit supérieur à 1, ont été utilisées pour ces 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.

## 2.3 Configuration et programmation des mouillages

Deux types différents de mouillages sont utilisés pour supporter les ADCP qui mesurent les vagues, soit une plateforme anti-chalutage pour les mouillages à 10 ou 30 m de profondeur qui restent immergés aussi en hiver, et un support de mouillage plus simple pour le mouillage à 4-10 m de profondeur. Un AWAC sur trépied (modèle SeaSpider) était prévu et installé initialement à l'automne 2017 au site HOE (10 m de profondeur devant St-Godefroi), mais ayant appris que le site était une zone de pêche active, un mouillage anti-chalutage a été utilisé à partir du printemps 2018. Enfin les instruments ont simplement été attachés à des tubes enfoncés solidement dans le sédiment aux sites HOB et HOC.

A) Pour les sites F (au large de Paspébiac) et HOE (devant St-Godefroi), le mouillage avec AWAC-AST 600 et un support antichalutage était constitué des éléments suivants (masse totale environ 180 kg, Figure 9) :
   - un support de mouillage antichalutage en fibre de verre (modèle MTRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×123×47 cm), incluant une bouée pour la récupération (diamètre 28 cm) attachée à une corde en Spectra de 75 m, et des lests de plomb;
   - un déclencheur acoustique, modèle 867-A de la firme Benthos;
   - un profileur de courant avec options vagues et glaces, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb; à l'automne 2018 un AWAC-AST 1 MHz mieux adapté pour les faibles profondeurs a été utilisé;
   - deux caissons de batteries avec au total quatre batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC (pour un mouillage avec un AWAC-AST 1 MHz, seulement 3 batteries étaient utilisées).

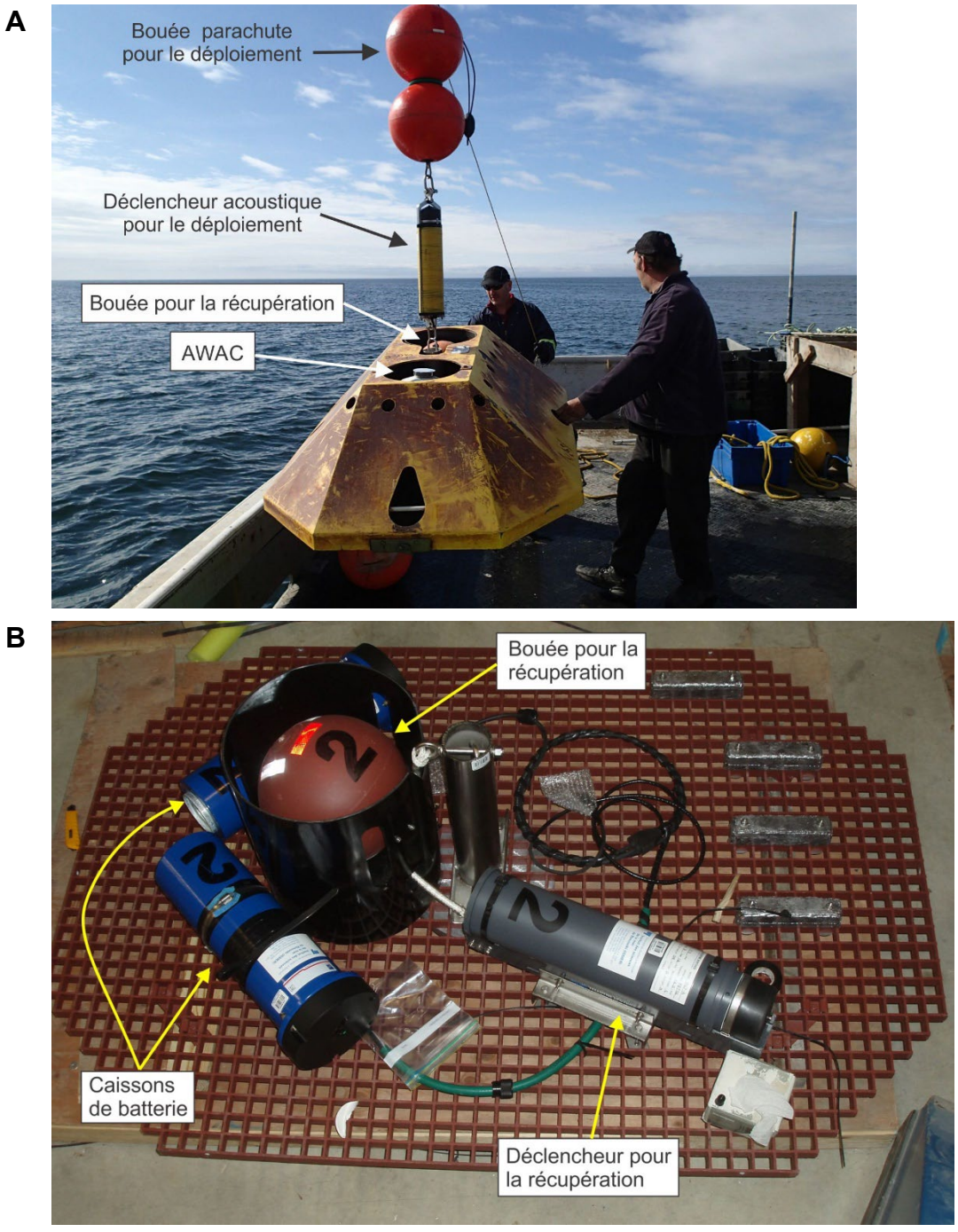



*Figure 9. Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée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

B) La configuration suivante a été utilisée au large de St-Godefroi (HOE) à l'automne 2017 et devant la flèche littorale (HOD) à l'été 2020 (Figure 10, masse totale environ 60 kg) :
- un trépied en fibre de verre (modèle SeaSpider de la firme Mooring Systems Inc., 147 × 174 × 50 cm) avec des lests de plomb;
- un profileur de courant avec options vagues et glaces, modèle AWAC-AST 1 MHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb;
- Un caisson de batteries avec au total deux batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC.

C) Pour le site HOD devant la flèche littorale de Hope Town, le mouillage avec Aquadopp Profiler 2 MHz est constitué des éléments suivants :
- un support de mouillage en aluminium construit à l'ISMER, avec une plaque de base, trois bras horizontaux lestés de plombs pour assurer la stabilité et un support en aluminium et PVC pour les instruments;
- un profileur de courants avec options vagues, modèle Aquadopp Profiler 2 MHz, tête « side-looking » de la firme Nortek, le sommet de la tête étant situé à 0,3 m au-dessus de la base du support;
- un caisson de batteries avec deux batteries de 540 Wh (13,5 V);
- une ligne de fond et une ancre pour pouvoir récupérer le mouillage au grappin.

*Figure 10. Trépied en fibre de verre SeaSpider avec l'AWAC-AST 1 MHz installé sur un cardan. Le caisson de batterie est installé entre deux jambes du trépied.*

A

B

*Figure 11. Aquadopp Profiler (cylindre horizontal supérieur) avec le caisson de batterie additionnel (cylindre horizontal inférieur). (A) Avant la mise à l'eau. (B) Après la récupération avec une forte colonisation de la structure par la vie aquatique (biofouling).*

D) Pour les sites HOB et HOC au bas de la plage de la flèche littorale de Hope Town, les instruments ont été fixés sur un tuyau enfoncé dans le sédiment sableux-graveleux (Figure 12).
- Au site HOB est fixé un houlographe RBRduet T.D|wave 16 (n° 85575) et un RBR TWR-2050 (n° 21542, pleine échelle de pression 10 dbar) utilisé comme marégraphe.
- Au site HOC est fixé un houlographe RBRduet T.D|wave 16 (n° 85576).

## 2.4 Programmation des mouillages

Les deux mouillages avec AWAC ont été programmés de manière similaire, avec des ajustements pour la fréquence de l'instrument et la profondeur. Ils ont enregistré un profil de courant toutes les 20 minutes et un burst (période d'enregistrement à haute fréquence) de vagues de 17 minutes toutes les heures. Le tableau 3 présente le détail de la programmation.

Le mouillage avec Aquadopp Profiler à 4-5 m de profondeur a aussi enregistré un profil de courant toutes les 20 minutes et un burst de vagues de 17 minutes toutes les heures, mais le profil de courant a une résolution verticale nettement plus fine (tableau 3).

Les RBR duet T.D|wave 16 installés aux sites HOB et HOC ont enregistré toutes les heures un burst de vagues à 4 Hz durant 8½ minutes. Leur horloge était mise à l'heure UTC.

*Figure 12. Instruments installés au site HOB (à gauche), à savoir un RBR duet T.D|wave 16 et un RBR TWR-2050, et au site HOC (à droite), à savoir un RBR duet T.D|wave 16.*

*Tableau 3. Synthèse de la programmation des AWAC et de l'Aquadopp Profiler. Une plage de valeur est indiquée pour les paramètres qui changeaient d'un déploiement à l'autre.*

| | Site F<br>Paspébiac | Site HOE<br>St-Godefroi | Site HOD 2018/2019<br>Devant plage Hope Town | Site HOD 2020<br>Devant plage Hope Town |
|---|---|---|---|---|
| Instrument | AWAC-AST<br>600 kHz | AWAC-AST<br>600 kHz / 1 MHz | Aquadopp Profiler 2 MHz | AWAC-AST<br>1 MHz |
| ***Profils de vitesse*** | | | | |
| Intervalle entre profils | 20 min. | 20 min. | 20 min. | 20 min. |
| Hauteur cellules | 2 m | 1 m | 0,25 m | 0,5 m |
| Nombre de cellules | 20 | 16 | 40 | 20 |
| Blanking distance | 0,5 m | 0,5 m | 0,1 m | 0,4 m |
| Période moyennée | 120 - 150 s | 120 - 150 s | 120 s | 120 s |
| Measurement load | 25 - 50 % | 50 % | 65 % | 65 % |
| Power level | high | high | high | high |
| Coordinate system | ENU | ENU | ENU | ENU |
| Salinité | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Précision vitesse horiz. | 1,4 - 2,2 cm/s | 1,2 - 3,2 cm/s | 1,4 - 1,8 cm/s | 2,4 cm/s |
| Précision vitesse vert. | 0,5 – 0,6 cm/s | 0,4 - 1,1 cm/s | 0,5 - 0,6 cm/s | 0,8 cm/s |
| ***Vagues*** | | | | |
| Intervalle entre bursts | 1 h | 1 h | 1 h | 1 h |
| Fréquence | 1 Hz / 2 Hz * | 1 Hz / 2 Hz * | 2 Hz | 1 Hz / 2 Hz * |
| Durée | 17 min. (1024 s) | 17 min. | 17 min. | 17 min. |

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

## 2.5 Traitement des données de vagues, de courants et de glace

### *Données des AWAC et Aquadopp Profiler*

Le traitement des données des profileurs de courants AWAC et Aquadopp Profiler suit la procédure développée pour les projets précédents *Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014 (*ministère de la Sécurité publique du Québec) et *Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière* (MTQ CC07.1). Cette procédure est décrite en détail dans l'Annexe 3. Dans la présente section sont indiquées les particularités du traitement des mouillages F, HOD et HOE.

Les données de pression ont été corrigées avec la station météorologique de New-Carlisle (cf. section 2.2). Les données de direction ont été corrigées pour la déclinaison magnétique : 18° ouest. Les niveaux d'eau ont été comparés avec les prédictions de marées de Paspébiac pour le contrôle de qualité.

### *Données des RBR duet*

Les RBR duet T.D|wave 16 enregistrent seulement la pression de la colonne d'eau et la température. Les données ont été téléchargées des instruments avec le logiciel Ruskin, puis importées dans Matlab pour la suite du traitement avec une série de fonctions programmées par Urs Neumeier. La pression atmosphérique a été corrigée avec celle mesurée à la station météorologique de New Carlisle. Les paramètres des vagues ont été calculés avec la fonction *wavesp.m*, qui corrige aussi l'atténuation des variations de pression avec la profondeur (Tucker et Pitt, 2001). Le contrôle de qualité a été effectué ensuite avec *qctest_wave.m* et *qcwave_gui.m*, comme pour les données des AWAC (Annexe 3).

## 2.6 Configuration du courantomètre dans le chenal de la lagune et traitement des données

### *Configuration et déploiement du mouillage*

Un courantomètre a été placé en été 2019 dans le chenal de la lagune de Hope Town pour mesurer pendant quelques mois le courant entrant et sortant de la lagune. L'instrument était placé dans la partie la plus étroite du chenal à environ 110 m du pont de la route 132 (48° 3,76' N, 65° 7,90' W, Figure 3). Un premier mouillage installé le 6 juin 2019 n'a pas résisté aux très forts courants à cet endroit et il a été emporté sur plus d'une centaine de mètres jusqu'à l'autre côté du pont de la route 132, où il a été récupéré 14 jours plus tard. Un autre mouillage avec moins d'emprise au courant a été installé par la suite. L'examen des données a révélé que ce mouillage avait aussi bougé plusieurs fois (rotations, mouvement vertical de 0,6 m) et que des débris (algues, plastiques) étaient empêtrés autour de la tête de l'instrument, dégradant la qualité des mesures. Le ralentissement de toutes les activités universitaires à cause de la Covid-19 et les difficultés à effectuer les travaux de terrain au printemps et à l'été 2020 n'ont pas permis de répéter le déploiement du courantomètre pendant l'été 2020.

Le courantomètre utilisé était de type ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), modèle Nortek Vector. Cet instrument mesure la distance de déplacement des particules en suspension dans l'eau entre deux pings acoustiques, et cela dans trois directions. Il enregistre aussi la pression pour déterminer la hauteur de la colonne d'eau et les vagues. Cet instrument existe en deux variantes, avec la tête de mesure soit attachée au boîtier avec une tige fixe, soit reliée au boîtier avec un câble souple de 2 m. Les trois composantes de la vitesse sont mesurées dans un volume de 2,5 $cm^3$ à 0,15 m de la tête. Le courantomètre a été programmé en heure UTC pour mesurer toutes les 10 minutes un burst de 45 secondes à 4 Hz (180 enregistrements) avec une plage de vitesse nominale (nominal velocity range) de 7 m/s (correspondant à une vitesse horizontale maximale de 8,75 m/s).

Initialement il était prévu d'installer le courantomètre Vector sur un trépied de mouillage, qui avait été utilisé pour d'autres expériences en milieu côtier, en milieu lagunaire et dans une passe de lagune. Un Vector avec tige fixe regardait vers le bas avec un point de mesure à 15-20 cm du fond.

Le mouillage a été installé le 6 juin 2019 avec un petit bateau de l'ISMER (Néréis), qui est capable de passer la barre d'embouchure du chenal à marée haute. Toutefois, les techniciens de l'ISMER remarquent le 20 juin en passant sur la route 132 que le mouillage s'est déplacé sur environ une centaine de mètres vers l'intérieur de la lagune jusqu'au pont de la route 132. Ils récupèrent le mouillage le même jour, et le ramènent à Rimouski. Les données de ce premier déploiement n'ont pas été utilisées car la position de l'instrument était variable.

Visiblement le trépied de mouillage utilisé pour le premier déploiement offrait trop d'emprise au courant. Ce trépied aurait pu être lesté nettement plus lourdement pour mieux le maintenir en place, mais dans ce cas il n'aurait plus été possible de l'installer avec le Néréis qui ne dispose d'aucun équipement de levage. C'est pourquoi un autre support de mouillage a été utilisé, constitué d'une plaque triangulaire avec trois bras horizontaux de 1 m lestés de plomb. Un Vector avec un câble souple a été utilisé. Le boîtier cylindrique du Vector et un caisson de batterie étaient fixé horizontalement sur la plaque. La tête de mesure au bout de 2 m de câble était fixée à l'extrémité d'un des bras, avec la tête regardant vers le haut et le point de mesure à 45-50 cm du fond. La tête du Vector était orientée avec l'axe X vers l'amont du chenal, et les données ont été enregistrées dans le référentiel XYZ de la tête de mesure, car le compas électronique du boîtier fonctionne seulement quand le boîtier est vertical.

Cette nouvelle version du mouillage a été installée le 27 juin 2019 à 9:45 HAE avec un petit bateau de l'ISMER dans la partie la plus étroite du chenal à 48° 3,758' N 65° 7,893 W. La stabilité du mouillage a été augmentée avec deux ancres installées de part et d'autre dans l'axe du chenal. Le mouillage a été récupéré le 16 septembre 2019 à 17:00 HAE. La méthode de récupération utilisée (grappinage) ne permet pas de connaître la position exacte en fin de déploiement, mais le mouillage était encore dans la partie étroite du chenal ou quelques mètres en amont.

### *Traitement des données du courantomètre*

Deux difficultés majeures ont compliqué le traitement des données : (1) l'absence de données d'orientation de l'instrument car le compas électronique du courantomètre ne fonctionnait pas avec le boîtier couché horizontalement sur le fond; (2) la dégradation des données à certaines périodes à cause d'algues et d'autres débris empêtrés autour de la tête de l'instrument, ce qui a nécessité un contrôle de qualité poussé afin de nettoyer les données.

L'orientation horizontale de la tête du Vector a été estimée lors de la mise à l'eau le 27 juin 2019. Toutefois, l'orientation des courants de marée enregistrés par l'instrument a changé plusieurs fois lors du déploiement. Quatre périodes peuvent être définies (Tableau 4). La limite entre les périodes est parfois brusque, notamment à 2019-08-19 15:51:20, l'instrument change de 36° d'orientation horizontale et le capteur de pression mesure un rapprochement de la surface de 0,59 m (l'instrument remonte) en 15-20 secondes. D'autres passages d'une orientation à l'autre sont plus progressifs sur quelques jours.

Ces changements de direction de courant enregistrés peuvent avoir deux causes. (1) Les courants dominants auraient pu pivoter à cause de changement dans la morphologie du chenal. Cela est peu probable, car les changements seraient plus progressifs, mais pas complètement impossible, considérant la présence du chantier pour la reconstruction du pont. (2) Le mouillage peut avoir bougé sous l'effet des courants, glissant sur les galets arrondis du fond du chenal. La deuxième cause est nettement plus probable et aussi corroborée par les changements de positions verticale (cf. ci-dessous, Figure 17). Par conséquent, les données ont été corrigées avec des rotations horizontales des vitesses pour que l'axe X soit toujours dans l'axe des courants dominants, avec X positif en direction de la lagune (Tableau 4).

De nombreux enregistrements présentent des vitesses irréalistes (très élevées et très changeantes), des rapports signal sur bruit (SNR) faibles et des corrélations faibles (indicateur de la qualité des mesures de vitesse). Ces enregistrements problématiques sont concentrés sur certaines périodes, alors que d'autres jours la qualité des mesures est bonne (Figure 13).

Il existe trois explications possibles pour une mauvaise qualité des données caractérisées par une trop forte turbulence, une faible corrélation et parfois un faible SNR :

1) Pas assez de particules dans l'eau pour générer suffisamment d'échos, mais cela est très peu probable en milieu côtier turbulent et n'expliquerait pas les longues périodes de bonnes mesures;
2) La mesure près d'une limite à la distance du « weak spot », mais pour la vitesse nominale sélectionnée (7 m/s) cela serait à 2 et 4 cm du point de mesure;
3) La présence d'objets empêchant le signal d'atteindre ou de revenir du point de mesure, comme des algues ou des débris plastiques empêtrés autour de la tête de mesure, c'est l'explication la plus probable dans ce cas-ci.

Pour écarter les mesures problématiques et pour obtenir un jeu de données utilisable de qualité acceptable, des bursts entiers (180 enregistrements, 45 s) ont été marqués comme mauvais. En premier ont été marqués tous les bursts avec le SNR moyen inférieur à 60 (6,0

*Tableau 4. Directions des courants de flot et de jusant mesurés par le Vector dans le chenal de la lagune, et rotation appliquée aux données lors du traitement. Les directions sont en degrés par rapport au référentiel XYZ du Vector (direction X = 90°).*

| Début période | Fin période | Direction flot | Direction jusant | moyenne flot-jusant | Rotation appliquée |
|---|---|---|---|---|---|
| début déploiement | 2019-07-18 10:00 | 96° | 283° | 99,5° | -9,5° |
| 2019-07-18 10:00 | 2019-08-03 08:00 | 109° | 293° | 111,0° | -21,0° |
| 2019-08-03 08:00 | 2019-08-19 15:51 | 101° | 284° | 102,5° | -12,5° |
| 2019-08-19 15:51 | fin déploiement | 68° | 245° | 66,5° | 23,5° |

dB) pour au moins un des 3 faisceaux. Ensuite, une inspection visuelle a été faite pour écarter 546 bursts additionnels (dans 83 groupes de bursts), en se basant principalement sur la variabilité des données de courants.

Ce « nettoyage » des données a réduit le nombre de bursts valides de 11698 à 6518, c'est-à-dire de 1950 heures à 1086 heures de mesure (Figure 14). Il faut toutefois signaler que ce nettoyage des données n'était pas trop poussé. Ces résultats sont sans doute fiables pour la vitesse moyenne du courant mais il faudrait peut-être filtrer les données plus strictement pour pouvoir calculer des paramètres de turbulence très fiables.

Pour chaque burst de 45 secondes a ensuite été calculée une vitesse moyenne ainsi que l'énergie cinétique turbulente TKE ($J/m^3$) et la contrainte de Reynold $\tau_{xz}$ (Pa) selon les équations suivantes.

$$TKE = 0{,}5\,\rho\left(\overline{u_t^2} + \overline{v_t^2} + \overline{w_t^2}\right) \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = -\rho\overline{u_t w_t} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_t &= u - U \\ v_t &= v - V \\ w_t &= w - W \end{aligned} \quad (4)$$

avec u, v et w les vitesses instantanées dans la direction du courant moyen du burst, transverses et verticales (m/s), U, V et W les vitesses moyennes pour le burst (m/s), $u_t$, $v_t$ et $w_t$ les vitesses turbulentes (m/s) et ρ la masse volumique de l'eau ($kg/m^3$). Le trait horizontal dénote la moyenne d'une série temporelle.

Afin de déterminer quelle taille de grain de sédiment le courant dans le chenal était capable de transporter, le modèle de transport sédimentaire *Sedtrans05* (Neumeier et al., 2008) a été utilisé avec la méthode de calcul selon Van Rijn (1993). Pour chaque burst du courantomètre, *Sedtrans05* a été exécuté avec 193 différentes granulométries espacées logarithmiquement entre 0,0625 et 256 mm (c'est-à-dire des classes granulométriques de 4 φ à -8 φ espacées de 1/16 φ). Puis la granulométrie la plus grossière avec transport sédimentaire a été déterminée pour chaque burst.

Les paramètres de vagues ont aussi été calculés à partir des données de pression de chaque burst en suivant la même procédure que les instruments RBRduet installés au site HOB et HOC (section 2.5).

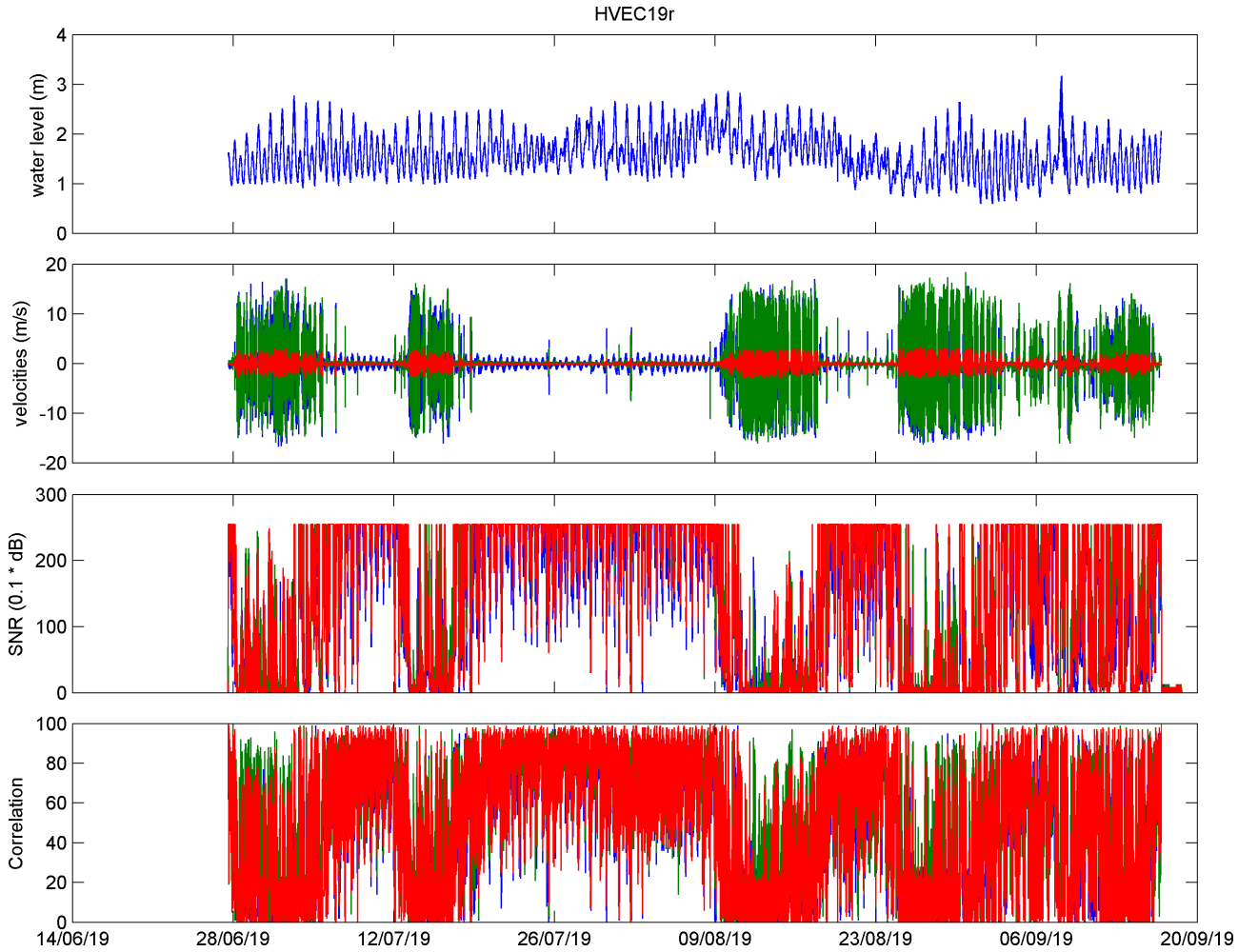



*Figure 13. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune, avant le nettoyage et le contrôle de qualité. Sont représentés la hauteur de l'eau, les vitesses (axe du chenal, transverse, vertical), le rapport signal sur bruit (SNR) et l'indice de corrélation (qualité de la qualité des mesures). Les couleurs bleu, vert et rouge représentent les trois composantes de vitesse ou les données des trois faisceaux de l'ADCP.*

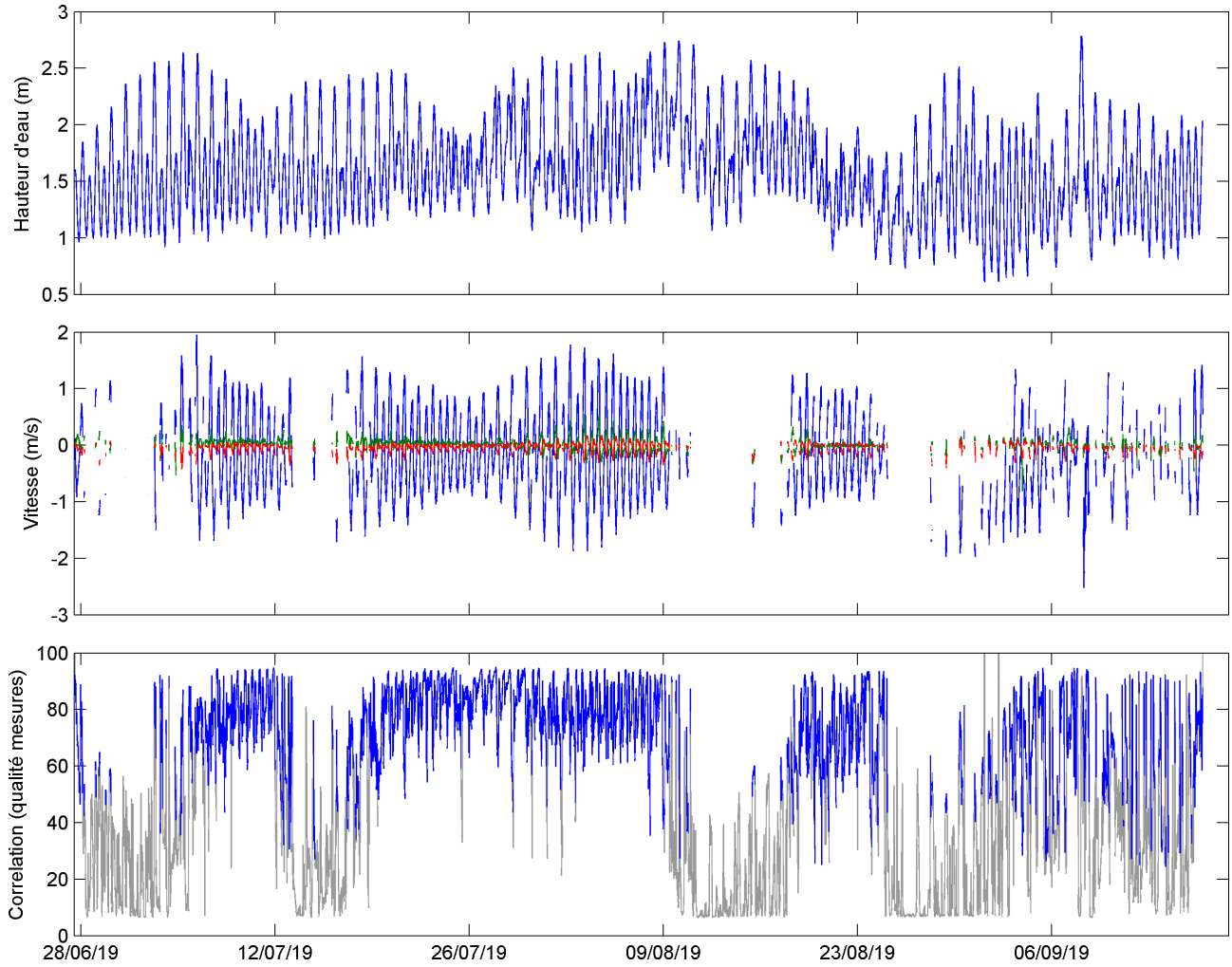



*Figure 14. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune, après le nettoyage et le contrôle de qualité des données de vitesse. Les données ont été moyennées pour chaque burst de 45 s. Les couleurs bleu, vert et rouge représentent les trois composantes de vitesse (axe du chenal, transversal, vertical). La corrélation des bursts considérés comme valides est en bleu, celle des bursts considérés comme mauvais est en gris.*

### *Calcul du débit du chenal*

Pour calculer le débit dans un chenal, la vitesse est généralement mesurée en plusieurs points, idéalement en effectuant plusieurs profils de vitesse à travers une section du chenal. Toutefois, le ralentissement de toutes les activités universitaires à cause de la Covid-19 et les difficultés à effectuer les travaux à l'été 2020 n'ont pas permis de répéter le déploiement du courantomètre au cours de l'été 2020, période pendant laquelle étaient prévues aussi plusieurs mesures de courant à travers la section du chenal avec un profileur de vitesse.

C'est pourquoi une méthode simplifiée est utilisée ici basée sur les mesures de courant et de niveau d'eau par le Vector. Cette méthode assume que la contrainte de cisaillement du fond (ainsi que la vitesse de cisaillement) est constante sur toute le lit de la section et que

partout le profil de vitesse est de forme semi-logarithmique selon l'équation de Kármán-Prandtl :

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

avec z la distance au-dessus du fond (m), $u_z$ la vitesse à la distance z au-dessus le fond (m/s), $z_0$ l'échelle de rugosité qui est typiquement 1/12 de la granulométrie médiane ($D_{50}$, m), κ la constant de Kármán (0,4) et $u_*$ la vitesse de cisaillent (m/s) qui dépend de la contrainte de cisaillement du fond ($\tau_0$, Pa) et la masse volumique du l'eau (ρ, kg/m$^3$) par $\tau_0 = \rho\, u_*^2$. Une taille de galets de 50 à 100 mm avait été observée dans le chenal lors des travaux de terrain, raison pour laquelle une granulométrie médiane de 100 mm est utilisée pour le calcul du débit (les sédiments de la partie la plus profonde du chenal pourraient être plus grossiers que ceux visibles près du bord).

Pour chaque pas de temps, $u_*$ est déterminé à partir du courant mesuré par le Vector, puis pour chaque segment de 0,25 m de la section du chenal le courant moyen du profil semi-logarithmique de vitesse est calculé ainsi que le débit à travers ce segment, finalement le débit de tous les segments sont additionnés. La vitesse moyenne du profil-logarithmique peut être résolue par intégration, si bien que le débit à travers une section du chenal se résume à la sommation suivante :

$$Q = \sum \frac{u_* dx}{\kappa} [D_x(\ln(D_x) - 1 - \ln(z_0)) + z_0] \quad (6)$$

avec $u_*$ la vitesse de cisaillent (m/s), dx la largeur d'un segment du profil (m), κ la constant de Kármán (0,4), $D_x$ la profondeur moyenne de chaque segment du profil (m) et $z_0$ l'échelle de rugosité (m).

Cette méthode simplifiée assume que le courant à travers la section varie seulement en fonction de la profondeur. Cette méthode n'est donc pas adaptée si le courant varie significativement dans les différentes parties de la section, comme lors de courbures du chenal, ou s'il y a des grandes zones peu profondes. Toutefois, le Vector était placé dans la partie étroite et relativement rectiligne du chenal de la lagune de Hope Town et la pente au bord du chenal est plutôt prononcée.

Le profil topographique de la section transversale du chenal est nécessaire pour le calcul du débit. La position du Vector lors de l'installation le 27 juin 2019 est connue, mais les enregistrements du compas magnétique et du capteur de pression indiquent au moins trois mouvements de l'instrument pendant le déploiement (voir ci-dessus). Comme la position exacte du Vector n'est donc pas connue pour tout le déploiement, le débit du chenal a été calculé pour onze positions possibles du Vector (jusqu'à 12 m vers la baie des Chaleurs et jusqu'à 28 m vers la lagune de Hope Town par rapport au point d'installation, Figure 15). Pour chacune de ces positions, un profil transversal du chenal a été interpolé à partir des données topographiques acquise par BPR par deux méthodes : (1) par photogrammétrie à partir d'image de drone prises le 25 mai 2018 (modèle numérique de terrain avec une résolution de 0,25 m); (2) la bathymétrie levée au printemps pour les zones les plus profondes du chenal qui ne sont pas couvert par les données de photogrammétries.

L'interpolation a été effectuée dans ArcMap à une résolution de 0,25 m (Figure 16). À noter que les profils topographiques sont basés sur des levés de 2018 et que les courants ont été mesurés en 2019. Aucun changement n'a été remarqué dans la morphologie de la partie étroite de chenal lors des visites de terrain répétées, mais il peut quand même y avoir eu des fines variations.

Il a aussi fallu convertir les niveaux d'eau mesurés par le capteur de pression du Vector au référentiel vertical de ces profils topographiques (CGVD2013). Comme l'altitude exacte du Vector n'était pas connu, les niveaux d'eaux mesuré par l'instrument (par rapport au capteur de pression Vector, $h_{Vector_PT}$) lors des pleines mers supérieures (la plus haute des marées hautes d'une période de 24 heures) ont été comparées au niveau d'eau mesuré par le marégraphe HOB situé devant l'épi 5 (par rapport à CGVD2013, $h_{HOB_CGVD2013}$. La différence entre $h_{HOB_CGVD2013}$ et $h_{Vector_PT}$ correspond à l'altitude du boîtier du Vector par rapport à CGVD2013, si le niveau d'eau est le même à HOB et au site du Vector, ce qui devrait être le cas à marée haute. Des petites différences de quelques centimètres peuvent être causées par l'effet du vent, des vagues, ou d'oscillations de 2-10 minutes de période. Toutefois, la comparaison entre les deux niveaux montre des variations plus importantes, de l'ordre de plusieurs décimètres, qui sont très probablement dus à des déplacements du mouillage (Figure 17). Pour la cette raison, ce n'est pas une valeur unique d'altitude du Vector qui a été utilisée pour convertir les niveaux d'eau enregistrés à CGVD2013, mais plusieurs valeurs oscillant entre -2,25 m et -1,6 m (Figure 17, ligne rouge).

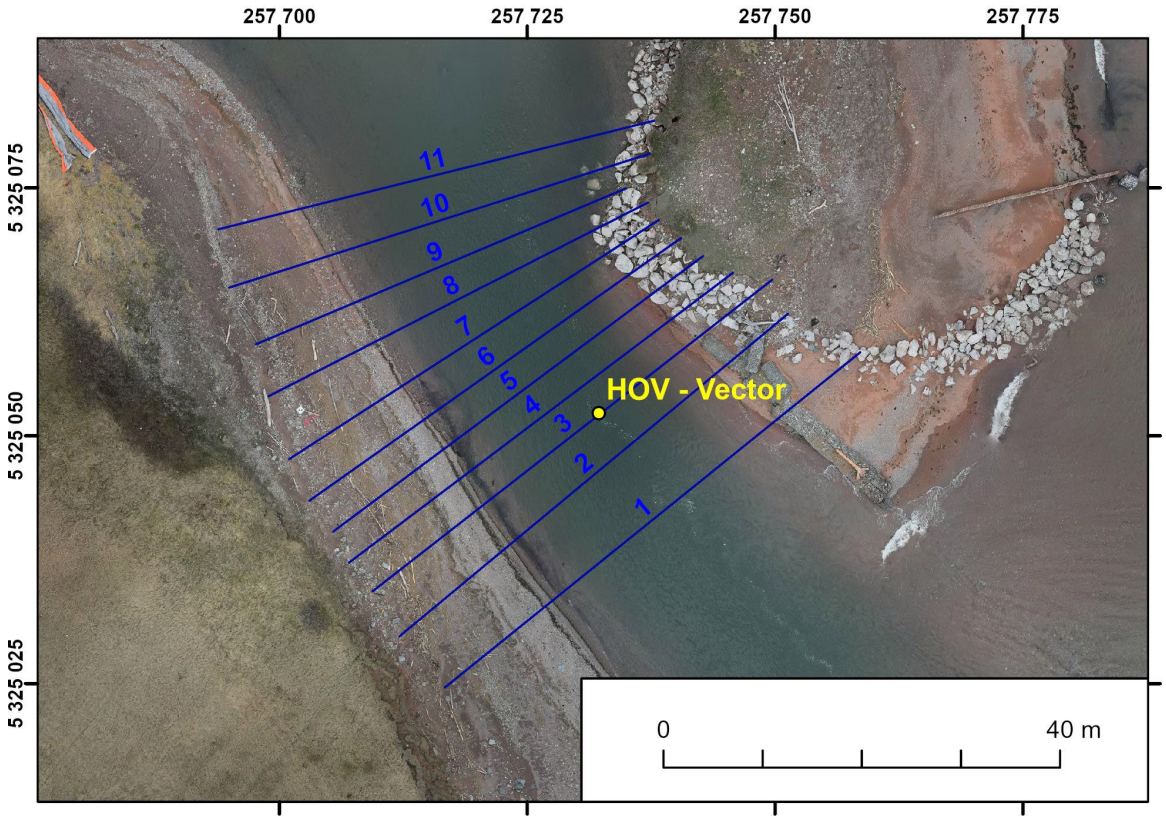



*Figure 15. Positions des sections transversales 1 à 11, qui ont été utilisées pour le calcul du débit du chenal.*

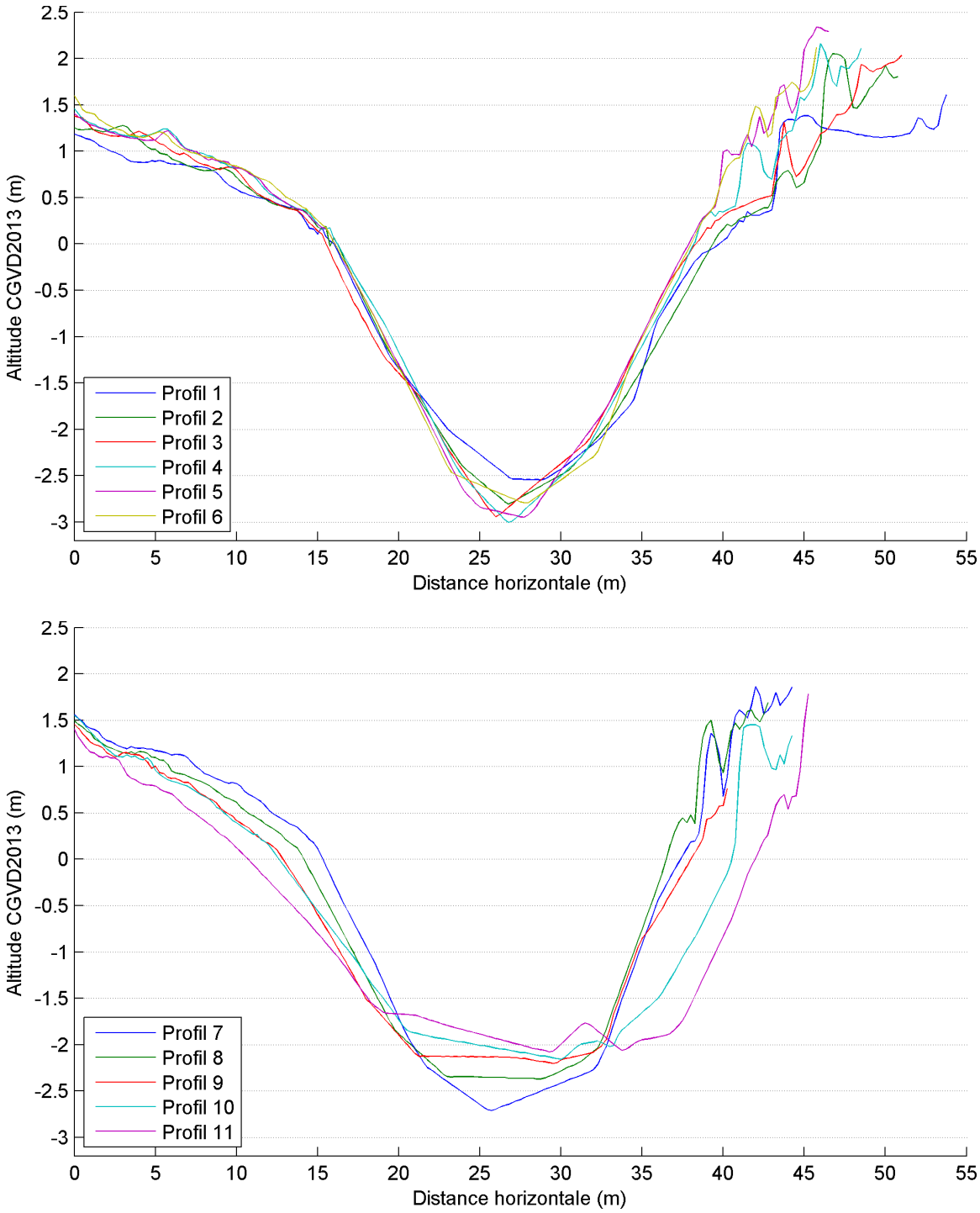



*Figure 16. Profils topographiques des sections transversales du chenal 1 à 11, qui ont été utilisées pour le calcul du débit du chenal. La position géographique des sections transversales est indiquée à la Figure 15.*

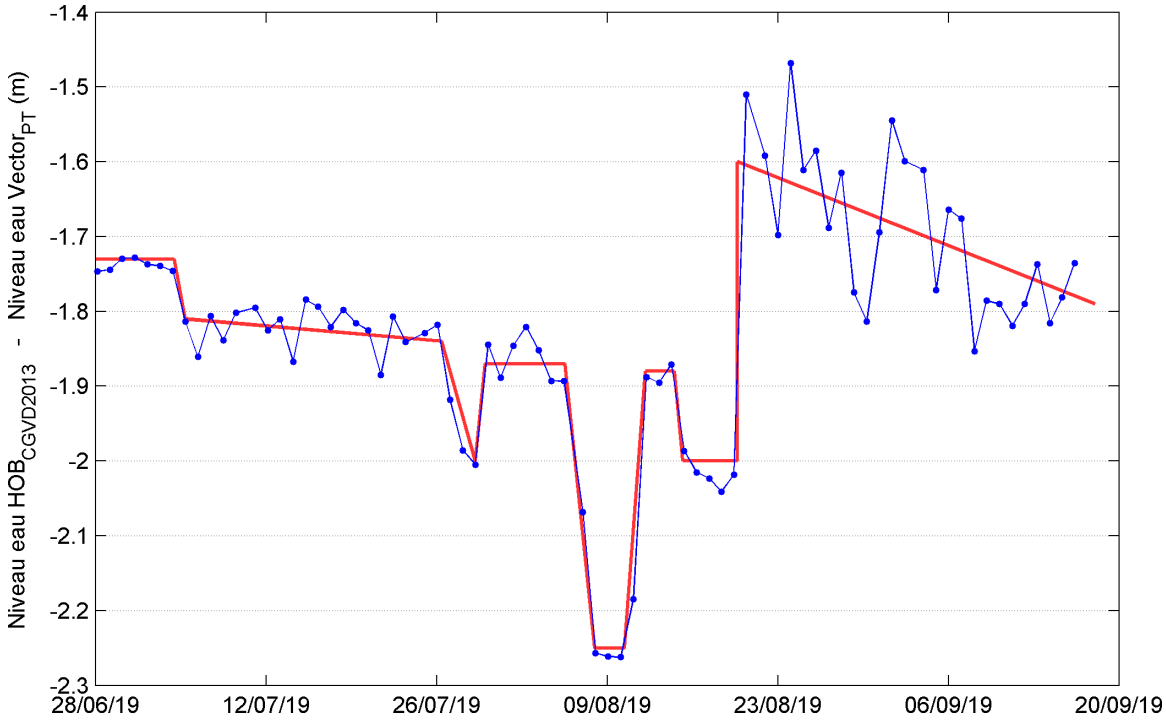



*Figure 17. Différence entre les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe HOB (par rapport à CGVD2013) et par le Vector (par rapport au capteur de pression) en bleu. Les valeurs utilisées pour ramener les niveaux d'eau mesurés par le Vector à CGVD2013 sont représentés en rouge.*

## 2.7 Géoréférencement des photographies aériennes et traçage du trait de côte

L'évolution passée de la plage de Hope-Town a été étudiée à partir de photographies aériennes historiques de 1963 à 2018. Les photographies aériennes sont des outils de levé aéroporté utiles pour suivre dans le temps les mouvements de la côte. Le suivi du trait de côte, limite géomorphologique entre la zone d'influence des processus côtiers et l'arrière-côte, permet de retracer les déplacements historiques de la côte et de quantifier les avancées ou les reculs.

Quinze photographies aériennes ont été utilisées, à savoir celles de 1963, 1964, 1965, 1972, 1975, 1980, 1986, 1992, 2001, 2005, 2007, 2009, 2016, 2017 et 2018. Elles ont été obtenues du Ministère des Ressources naturelles du Québec, du Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canda, du Ministère Pêches et Océans Canada et du Laboratoire de Gestion intégrée des Zones côtières (LGIZC) de l'UQAR. Les spécifications techniques des images sont indiquées à l'Annexe 4.

Les photographies aériennes ont été importées dans ArcMap 10.6 et géoréférencées à partir de la mosaïque de 2001 (échelle 1 : 40 000). Les photos aériennes ont été projetées en utilisant la projection Transerve Mercator zone MTM fuseau 5. Le système de coordonnées géographiques utilisé est le North American Datum 1983.

Le géoréférencement consiste à sélectionner des points de contrôle source dont les coordonnées sont connues sur une photographie aérienne et de les reporter sur une autre couverture aérienne sans référence spatiale afin de les aligner et de les superposer. Le nombre de points de contrôle dépend du degré de déformation du raster qui lie les jeux de données *cible* aux jeux de données *source* : 3 points pour les transformations de premier ordre, 6 pour celles de second ordre et 10 pour celles de troisième ordre. Thieler et Danforth (1994) recommandent d'identifier entre 6 et 9 points de contrôle également répartis sur l'ensemble de la couverture aérienne et la plupart localisés près de la côte sans toutefois être alignés. Ainsi, au moins 5 points de contrôle ont été identifiés sur chaque photographie. Les points les plus fiables sont des intersections de routes, des bâtiments, les extrémités de jetées, de terrains ou de lots, des canaux d'irrigation, etc. (Thieler et Danforth, 1994; Moore, 2000). Une fois géoréférencées, les images ont été archivées dans une base de données.

Toutefois il existe une certaine marge d'erreur liée à ce géoréférencement. Celle-ci repose sur la qualité des photographies aériennes (résolution spatiale), qui servent de données primaires à l'analyse historique subséquente. Ainsi la première source d'erreur repose sur le géoréférencement basé, faute de mieux, sur une mosaïque de 2001 au 1 : 40 000, échelle pas adaptée pour un géoréférencement très précis. De plus, la qualité du géoréférencement et de l'analyse historique s'appuient sur la fiabilité des points de contrôle, or il s'avère difficile de trouver des points présents en 2001, sur des photographies historiques de 1963 : la route 132 a été repavée depuis et certaines constructions ont été rénovées, relocalisées ou détruites. La racine de l'erreur quadratique moyenne (*root mean square,* RMS) mesure alors l'erreur résiduelle mesurée pour chaque point de contrôle et représente la différence entre les positions finale et originale du même point. La somme des RMS représente l'erreur résiduelle qui sert de proxy à la robustesse du géoréférencement, bien qu'elle ne soit pas absolue. Généralement, la transformation polynomiale de second ordre est la mieux adaptée pour réduire cette erreur.

Les opérations d'extraction du trait de côte ont par la suite été menées par l'interprétation visuelle des photographies aériennes. Sur les images, le trait de côte peut être indiqué par des marqueurs hydrodynamiques (laisses de tempêtes ou de marées), géomorphologiques (sommet du talus d'érosion ou de la micro falaise, rupture de pente, sommet d'ouvrages de protection...) ou biologiques (limite de végétation continue). Or, le marqueur utilisé pour suivre l'évolution historique du système côtier dépend du type de côte (falaise rocheuse, falaise meuble basse, flèche littorale et côte artificialisée).

Pour les côtes à falaise meuble ou rocheuse, le trait de côte a été défini comme le sommet du talus (parfois végétalisé) ou de la micro-falaise d'érosion (Mallet et Michot, 2012). Pour la flèche littorale, la limite inférieure de végétation continue a été utilisée comme marqueur du trait de côte (Fraser et al., 2012). La présence de laisses de marées a aussi servi de repère pour le traçage quand il n'y avait pas de végétation sur l'arrière-côte. Enfin, pour les côtes artificialisées, le trait de côte a été tracé au niveau du sommet de la structure de protection (enrochement).

Les diverses infrastructures de protection et installations anthropiques (jetée, enrochement, gabion, mur bétonné…), qui étaient présentes pour chaque année de photographie

historique disponible, ont également été identifiées et géoréférencées sous forme de polygones. La limite eau-terre a aussi été tracée par photo-interprétation; toutefois il s'agit d'un indicateur géomorphologique marée-dépendant, puisqu'il dépend fortement du niveau instantané de la marée lorsque la photo a été prise.

Finalement, les *shapefiles* du trait de côte, de la limite eau-terre et des infrastructures de protection ont été importés dans la base de données. La Figure 18 résume l'information disponible pour une année de couverture aérienne en prenant l'exemple de 2018. La Figure 19 montre en exemple plusieurs tracés du trait de côte sur la plage sud-ouest, utilisés dans le calcul ultérieur du déplacement de la côte.

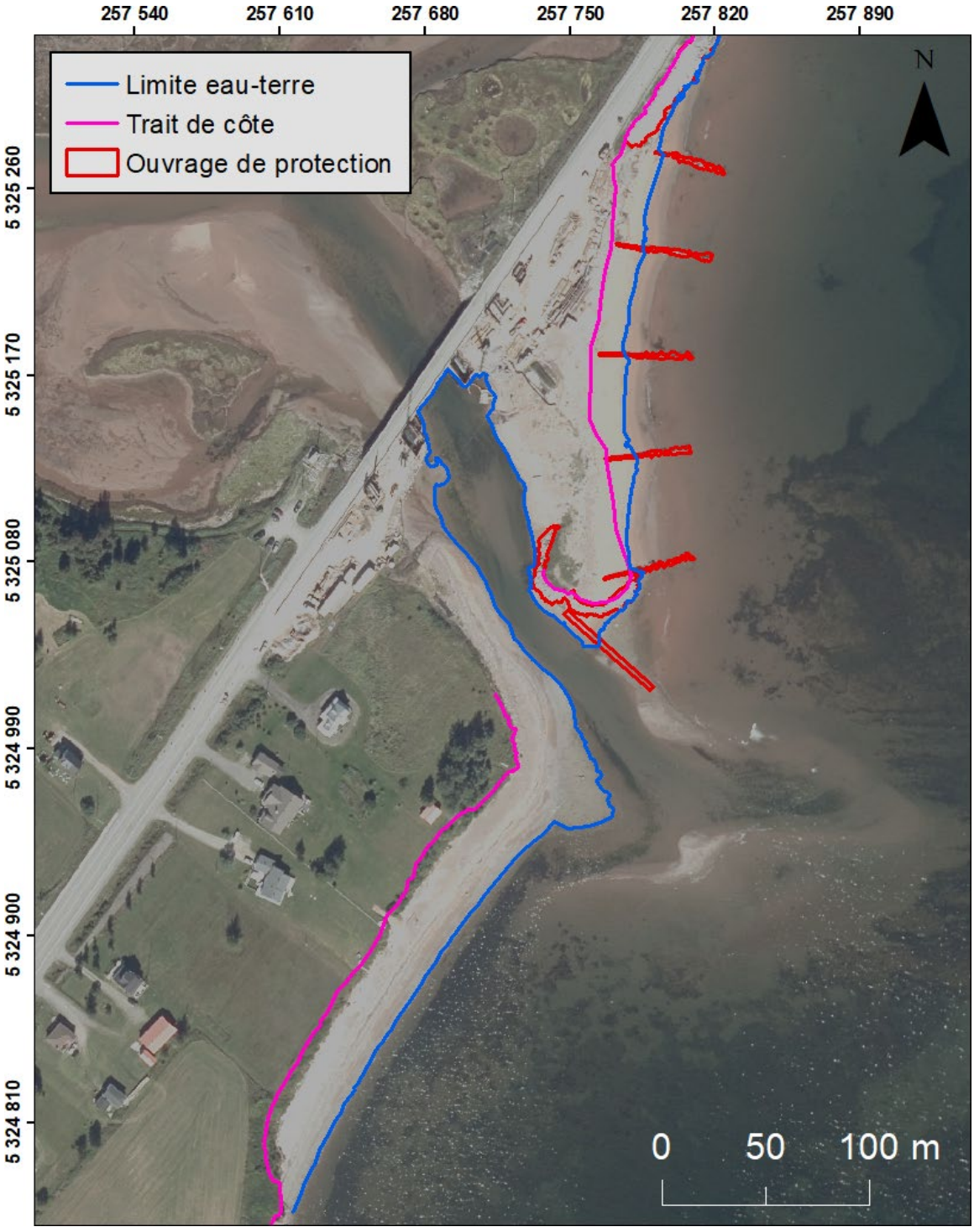



*Figure 18. Trait de côte, limite eau-terre et ouvrages de protection tels qu'identifiés sur la photographie aérienne de 2018 du Ministère Pêches et Océans.*

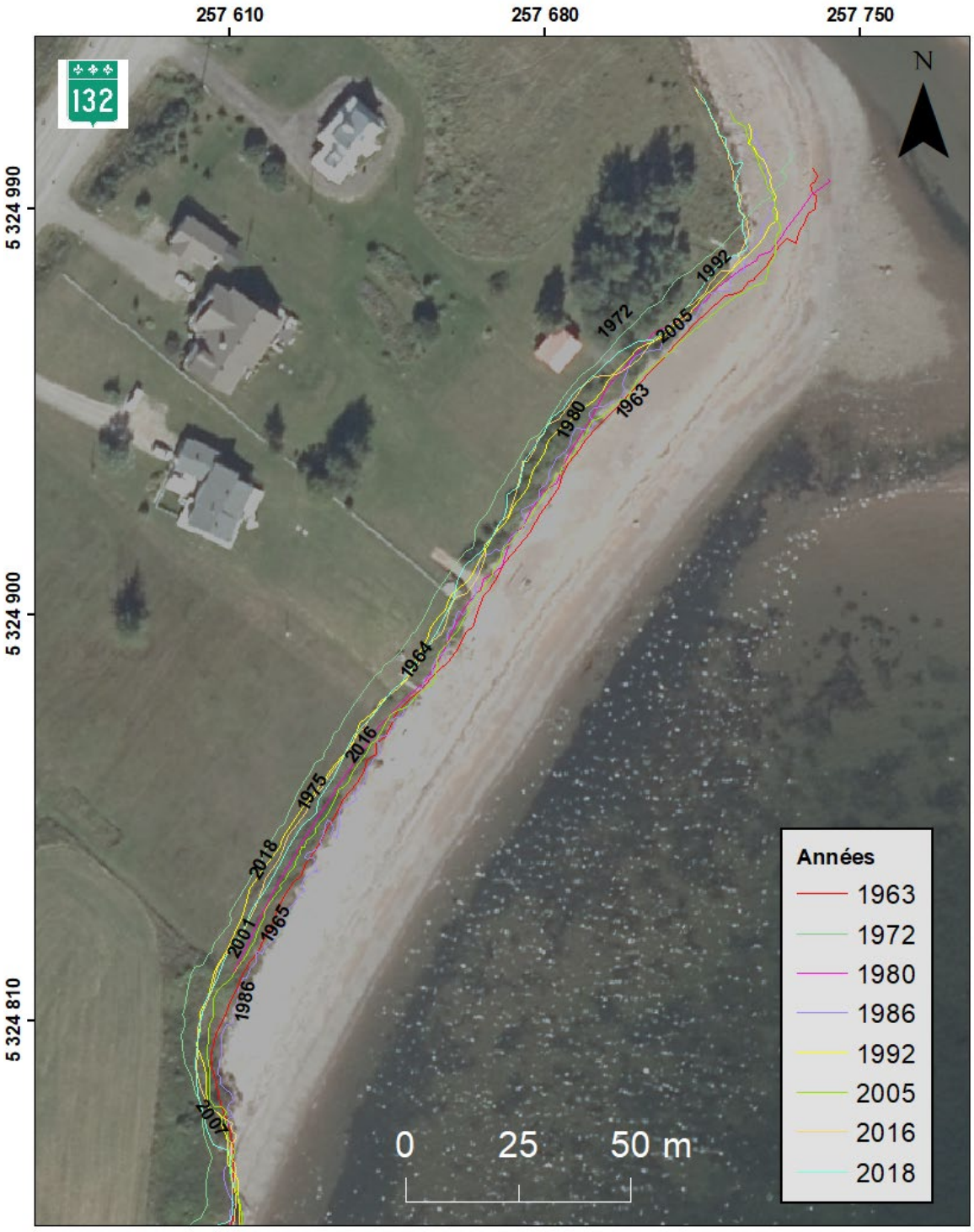



*Figure 19. Exemples de tracés historiques du trait de côte sur la plage sud-ouest. Sur cette portion de côte meuble basse, l'indicateur géomorphologique du trait de côte utilisé est le sommet du talus végétalisé.*

## 2.8 Calcul du déplacement du trait de côte

Le taux de déplacement de la côte a été mesuré sur une période de 55 ans (1963-2018) à partir des positions historiques du trait de côte, à l'aide de l'extension *Digital Shoreline Analysis System* (Himmelstoss et al., 2018) dans ArcMap 10.6. La côte a été analysée séparément de part et d'autre du chenal de marée : l'analyse historique a été menée sur 1 810 m de côte dans le secteur nord-est du site d'étude et sur 544 m du côté sud-ouest du chenal de marée. L'objectif de cette analyse historique est de mettre en parallèle les taux de déplacement de la côte avec les processus physiques qui l'influencent et sa nature morphosédimentaire.

L'outil DSAS génère des transects perpendiculaires à une ligne de base (*baseline*) préalablement spécifiée par l'utilisateur (Kuleli et al., 2011; Mahapatra et al., 2014). Cette ligne de base a été digitalisée à 25 m du rivage, parallèlement à l'alignement général de la ligne de côte (Figure 20). Le logiciel détermine ensuite le long de chaque transect les distances depuis la ligne de base aux intersections avec les différents traits de cote.

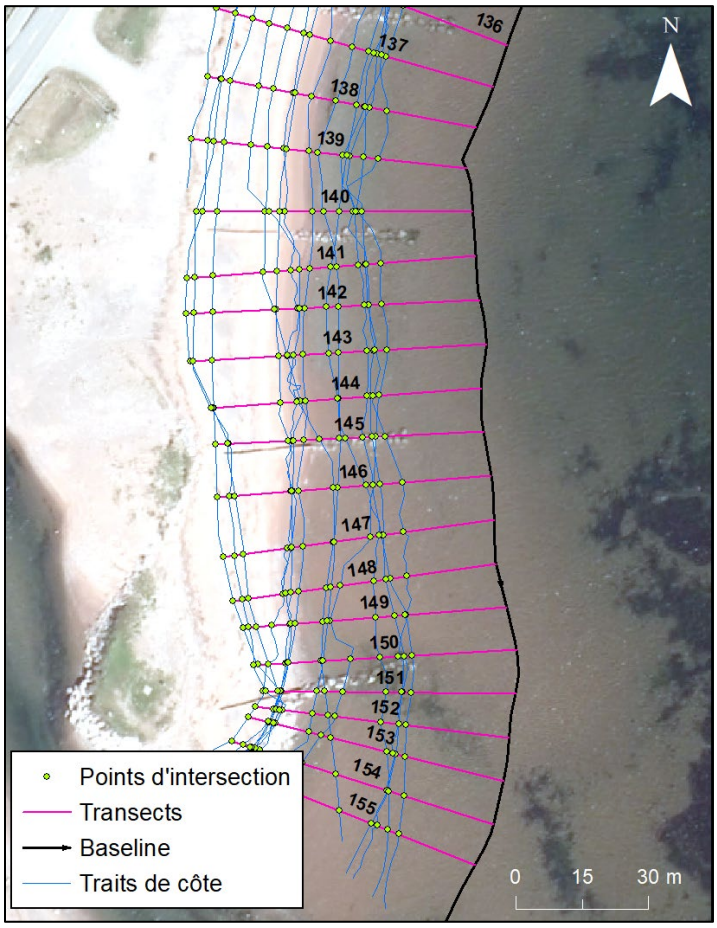



*Figure 20. Position des traits de côte historiques, des transects générés par DSAS et espacés de 10 m et des points d'intersection.*

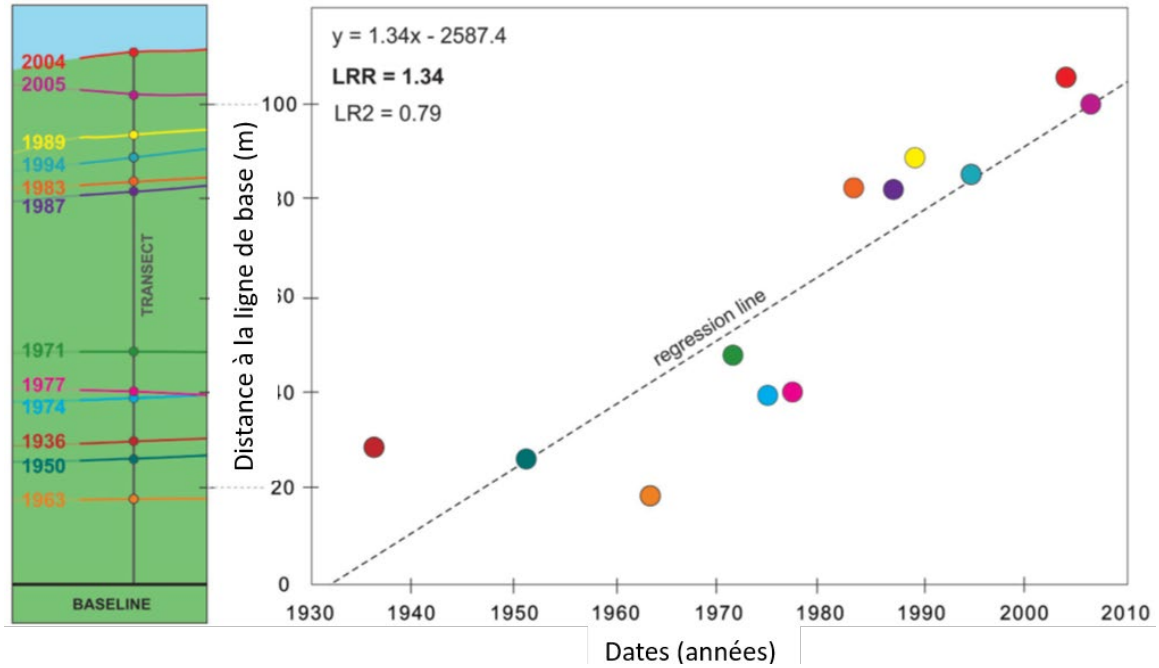



*Figure 21. Exemple de régression linéaire générée par DSAS afin d'extraire, sur chaque transect, le taux de déplacement de la côte (m/an). La pente de la régression linéaire représente ce taux (1,34 m/an). Adapté de Himmelstoss et al. (2018).*

Ces distances sont finalement reportées dans le temps pour quantifier les mouvements du trait de côte. Des différences ou taux positifs indiquent une avancée de la côte, des différences ou taux négatifs indiquent un recul de la côte (érosion). Le taux moyen d'avancée ou de recul sur une période est obtenue à partir les données de toutes les années avec une régression linéaire (méthode *linear regression rate*, LRR). La pente de la régression linéaire est l'estimation du taux de déplacement de la côte à chaque transect (Figure 21). De tels graphiques distance-temps représentant le mouvement de la côte ainsi que les taux de déplacement associés (m/an) ont été générés dans Matlab avec la fonction *plot_DSAS_XY* pour nos données.

## 2.9 Relevés topographiques et traitement de ces données

Les profils topographiques ont été levés sur la plage de la flèche littorale de Hope Town et sur la plage adjacente au sud-ouest lors des marées basses de vive-eau au cours de douze campagnes d'échantillonnage entre novembre 2017 et novembre 2020. Au moins trois campagnes topographiques par an ont été menées : la première au printemps en mai, une autre en été au mois d'août et enfin la dernière à l'automne au mois de novembre. Le Tableau 5 reprend le numéro et la date de chaque campagne topographique ainsi que les profils relevés lors de chacune d'elle. L'ensemble des données topo sont contenues dans le fichier Excel *HopeTown_DGPS_2017-2020.xls*.

La position des profils levés est indiquée sur la Figure 22. Pour faciliter la comparaison des profils, l'origine de l'axe horizontal des profils a été ajusté sur ces figures de manière à ce que le zéro soit à la limite haut-estran/haute-plage pour les profils 1 à 16, à la base de

l'enrochement pour les profils 17 à 21 et au début de la végétation pour les profils 31 à 36 (Figure 22). À noter que la présence du chantier de reconstruction du pont de la route 132 a limité l'étendue du côté terre de certains profils sur la haute-plage (notamment les profils 10, 11 et 13). De plus, lors de ce chantier, l'enrochement de la route 132 a été prolongé vers le sud-ouest, modifiant le sommet des profils 14 et 15.

Une première campagne a été menée en novembre 2017, puis trois campagnes saisonnières en mai, août et novembre 2018, trois campagnes saisonnières en mai, août et novembre 2019, et trois campagnes saisonnières en mai, août et novembre 2020 (Tableau 5). Tous les profils ont pu être levés durant ces campagnes saisonnières, sauf en novembre 2017, en novembre 2019 et novembre 2020 les profils 19-21 devant l'enrochement à cause d'une mer trop agitée. En effet, les profils 19-21 sont toujours sous l'eau, même à marée basse de vive eau, et le fond marin au pied de l'enrochement est irrégulier avec quelques blocs de pierres dispersés. En mai 2020, le profil 0 situé dans la partie étroite du chenal de la lagune, qui n'avait encore jamais été levé notamment en raison de la profondeur, des courants et des travaux sur le pont, l'a été pour la première (et seule) fois. De plus, la position de certaines entités géomorphologiques et spatiales a également été levée en août 2019 et en mai 2020 (laisses de mer, mur de protection en béton, gabions, trait de côte, crête de berme de haute-plage)

Deux autres campagnes additionnelles et partielles ont été effectuées. Lors d'une campagne en octobre 2019, seuls les profils médians entre les épis (profils 5, 8, 11 et 14) ont été relevés car la campagne visait principalement l'échantillonnage granulométrique de l'automne avant que le sédiment ne soit gelé. La campagne de janvier 2020 ne comprenait que l'avant-plage des profils 1-18 à cause de l'englacement de la majeure partie de la plage.

*Tableau 5. Liste des différentes campagnes topographiques et des travaux effectués lors de chacune d'elle.*

| Campagne | Mois | Dates | Travaux effectués |
|---|---|---|---|
| 1 | 2017-11 | 28-29 nov. 2017 | Tous les profils sauf 19-21 (enrochement) |
| 2 | 2018-05 | 15-16 mai 2018 | Tous les profils |
| 3 | 2018-08 | 8-9 août 2018 | Tous les profils |
| 4 | 2018-11 | 23-24 nov. 2018 | Tous les profils |
| 5 | 2019-05 | 7-8 mai 2019 | Tous les profils |
| 6 | 2019-08 | 2-4 août 2019 | Tous les profils |
| 7 | 2019-10 | 28 oct. 2019 | Seulement profils médians (5, 8, 11 et 14) |
| 8 | 2019-11 | 27-28 nov. 2019 | Tous les profils sauf 19-21 (enrochement) |
| 9 | 2020-01 | 26 janv. 2020 | Seulement avant-plage des profils 1-18 |
| 10 | 2020-05 | 7-8 mai 2020 | Tous les profils |
| 11 | 2020-08 | 19-20 août 2020 | Tous les profils |
| 12 | 2020-11 | 16-17 nov. 2020 | Tous les profils sauf 19-21 (enrochement) |

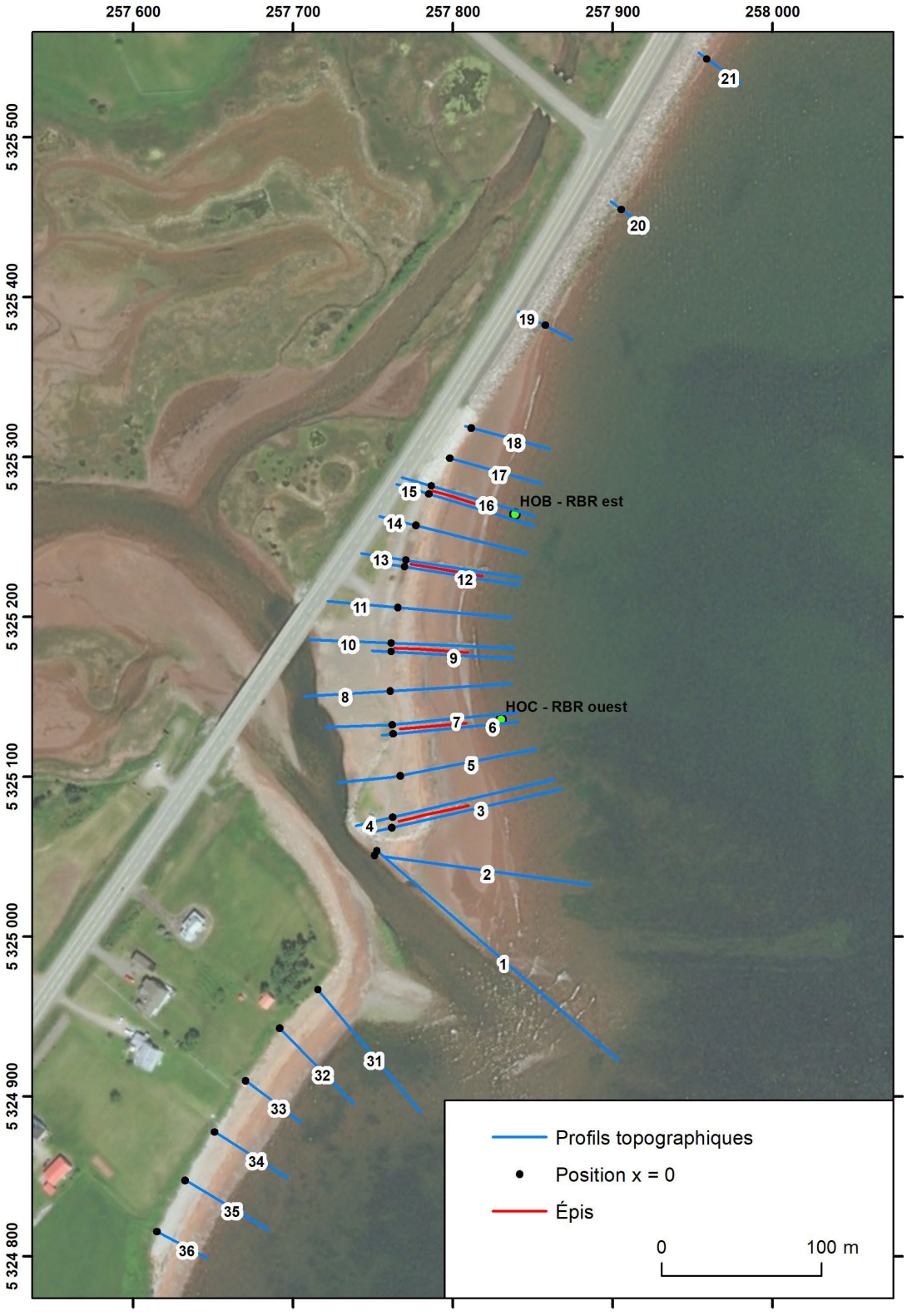



*Figure 22. Positions des profils topographiques levés (et de la position x=0) ainsi que des houlographes aux sites HOB et HOC. Les coordonnées sont en MTM 5. Le fond de carte est une image satellite fournie par ESRI (World Image Satellite).*

Les levés ont été effectués avec un équipement GPS GNSS Spectra SP80 en mode RTK (cinématique en temps réel), avec une antenne de base placée sur le point de référence local qu'est le dernier pieu de la terminaison côté terre du quatrième épi. Ce point de référence a une altitude CGVD2013 de 1,385 m, qui a été déterminée en traitant les données GNSS enregistrée par l'antenne de base sur une dizaine d'heure avec le *Positionnement ponctuel précis* du *Système canadien de référence spatiale* (SCRS-PPP). Les altitudes sont exprimées par rapport à la référence altimétrique CGVD2013 (Canadian Geodetic Vertical Datum 2013). À Hope Town, le zéro CGVD2013 est 0,462 m au-dessus du zéro CGVD28.

Les profils topographiques ont été traités dans Matlab à l'aide de plusieurs fonctions écrites par Urs Neumeier. Dans un premier temps, les points levés au DGPS de chaque profil ont été projetés sur une ligne perpendiculaire à la côte correspondant à la position théorique du profil (fonction *project_profile.m*). Ensuite, l'altitude a été interpolée tous les 1 cm le long du profil (fonction *profile_process.m*). Enfin, des modèles numériques de terrain (MNT) ont été construits pour chaque campagne par interpolation linéaire entre les profils (fonction *profile2raster.m* qui utilise la fonction Matlab *TriScatteredInterp.m* pour interpoler sur une triangulation de Delaunay). Les différentiels d'altitude sont produits par soustraction d'un MNT à un autre afin de générer des cartes illustrant l'érosion (en rouge) ou l'accrétion sédimentaire (en bleu). Cela permet d'observer les variations saisonnières et annuelles : par exemple, le MNT de mai a été soustrait à celui d'août pour obtenir le MNT de l'été, celui d'août a été soustrait à celui de novembre pour obtenir le MNT de l'automne. La fonction *profile2raster.m* formate également les données matricielles des MNT pour importation simple dans ArcMap 10.6.

Cette série de MNT différentiels a finalement servi de base aux calculs des variations du volume de sédiments sur les 4 secteurs de plage délimités par des polygones (Figure 23). La *haute-plage* est au-dessus de la pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM, 0,87 m CGVD2013). Le *haut-estran* est entre PMSGM et le niveau moyen de la mer (NMM, -0,312 m). Le *bas-estran* est entre NMM et ligne tracée entre l'extrémité mer de chaque épi. L'*avant-plage* est au large de cette ligne. Les altitudes PMSGM et NMM ont été déterminées à partir des prédictions de Xtide 2001-2019 pour St-Godefroi. Elles ont été ensuite digitalisées sur un MNT moyen représentant l'ensemble des 10 campagnes complètes entre Novembre 2017 et Novembre 2020. Quatre polygones ont été produits sur la plage à épis (avant-plage, bas-estran, haut-estran, haute-plage) et seulement trois sur la plage sud-ouest, car l'avant-plage y est raide et rarement levée sur une longue distance. Un second découpage a été réalisé sur la plage à épis afin de distinguer la partie nord de la partie sud, délimitées par le 3$^{ème}$ épi (Figure 24), afin de renseigner d'éventuels déséquilibres sédimentaires nord-sud de cette plage.

Enfin, des statistiques comme l'altitude moyenne, l'aire du raster, les variations du volume de sédiment de plage et la fraction de l'aire en érosion, ont été calculés sur la base des 10 MNT saisonniers (fonction *raster_stat.m*). Ces données figurent à l'Annexe 6. Elles sont présentées graphiquement à la section 7.1.

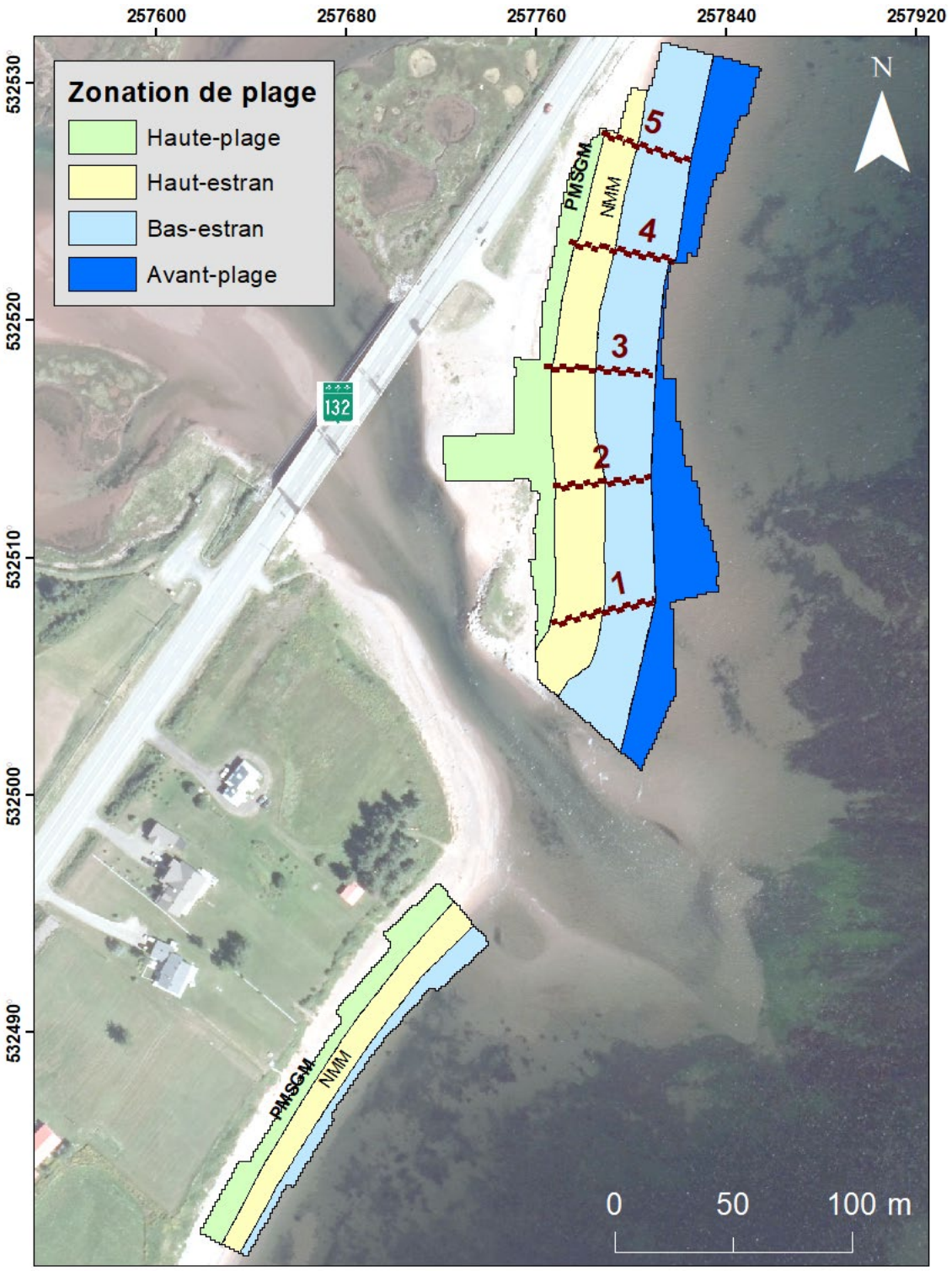



*Figure 23. Zonation de la plage à épis et de la plage sud-ouest en différents secteurs de plage. Les épis sont représentés en brun. La position de la PMSGM et du NMM est indiquée. L'étendue globale des polygones correspond à la couverture commune des MNT des 10 campagnes de terrain.*

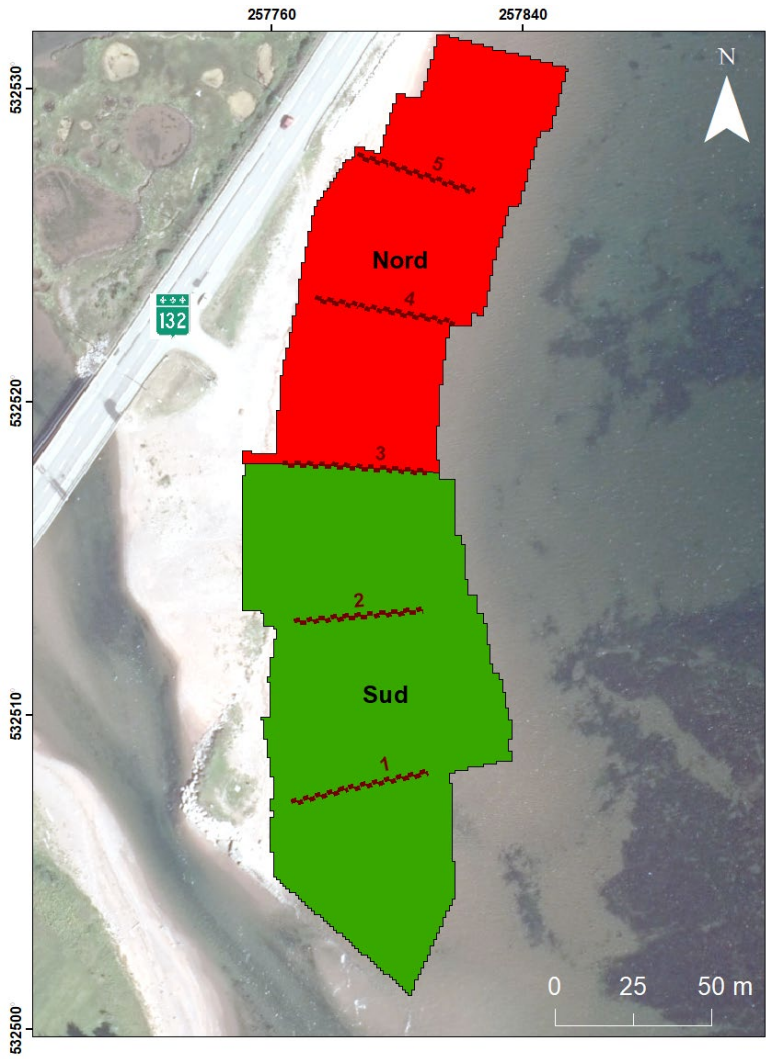



*Figure 24. Zonation de la plage à épis en deux secteurs (Nord/Sud). Les épis sont représentés en brun. L'étendue globale des polygones correspond à la couverture commune des MNT des 10 campagnes de terrain.*

## 2.10 Granulométrie et minéralogie

Il était prévu d'échantillonner les sédiments de la plage à épis lors de chaque relevé saisonnier de topographie, c'est-à-dire en mai, en août et en novembre. Cela a bien fonctionné pour les campagnes de mai et d'août, mais en novembre les sédiments de plage étaient déjà gelés, ce qui rendait l'échantillonnage impossible. Un premier échantillonnage très partiel a été fait en novembre 2017, puis l'échantillonnage a échoué en novembre 2018. Pour cette raison l'échantillonnage automnal des sédiments a été avancé à octobre en 2019 et en 2020. La plage adjacente au sud-ouest a été échantillonnée une seule fois le 20 avril 2018. Le Tableau 6 résume les travaux effectués lors de chaque campagne d'échantillonnage granulométrique.

*Tableau 6. Tableau récapitulatif des travaux effectués lors de chaque campagne d'échantillonnage granulométrique (nombre d'échantillons prélevés et secteur de plage échantillonné).*

| Campagne | Mois | Date | Travaux effectués |
|---|---|---|---|
| 1 | Nov. 2017 | 2017-11-30 | 7 échantillons, plage à épis |
| 2 | Avril 2018 | 2018-04-20 | 18 échantillons, plage sud-ouest |
| 2 | Mai 2018 | 2018-05-16 | 22 échantillons, plage à épis |
| 3 | Août 2018 | 2018-08-08 | 22 échantillons, plage à épis |
| 4 | Mai 2019 | 2019-05-08 | 26 échantillons, plage à épis |
| 5 | Août 2019 | 2019-08-04 | 29 échantillons, plage à épis |
| 6 | Oct. 2019 | 2019-10-28 | 25 échantillons, plage à épis |
| 7 | Mai 2020 | 2020-05-08 | 28 échantillons, plage à épis |
| 8 | Août 2020 | 2020-08-19 | 23 échantillons, plage à épis |
| 9 | Oct. 2020 | 2020-10-30 | 20 échantillons, plage à épis |

A chaque campagne, cinq à sept échantillons ont été récoltés sur chacun des quatre profils médians entre les épis, à savoir les profils 5, 8, 11 et 14 (Figure 22). Les positions des échantillons ont été sélectionnées sur le terrain pour être le plus représentatif possible de la variabilité spatiale de la distribution des sédiments.

Une fois en laboratoire, les sédiments ont été rincés pour enlever le sel puis séchés à l'étuve. Les échantillons du sable très fin au gravier grossier (0,063 à 27 mm) ont été tamisés au ¼ de phi à l'aide d'un tamiseur de particules. Les particules supérieures à 27 mm ont été mesurées individuellement et la mesure de l'axe intermédiaire a été utilisée pour déterminer sa classe granulométrique. Les données de tamisage ont été importées dans le logiciel Gradistat (Blott et Pye, 2001) pour extraire les paramètres statistiques des grains (moyenne, classement et asymétrie, selon la méthode des moments géométrique, ainsi que mode et diamètre médian $D_{50}$). Pour comparer les $D_{50}$ des différentes campagnes, la moyenne géométrique des $D_{50}$ de chaque campagne a été utilisée pour tenir compte de la forme log-normale des distributions granulométriques. La classification de Wentworth (1922) a été utilisée.

Enfin, cinq échantillons de sédiments ont été récoltés à même les falaises au nord-est de la plage à épis jusqu'au port de St-Godefroi lors de l'échantillonnage de mai 2020 (Figure 25). Des analyses minéralogiques quantitatives par diffraction des rayons X (DRX) ont été effectuées sur ces échantillons, de même que sur cinq échantillons de la plage à épis et deux de la plage adjacente (Figure 25), selon la méthode d'Eberl (2003) et Butler & Hillier (2021) reprise dans le protocole de Montero-Serrano (2021) décrit ci-après. L'objectif est de comparer la composition minéralogique des échantillons de la plage étudiée de ceux récoltés sur les falaises en amont dans le sens de la dérive littorale. Cette comparaison permet de valider l'hypothèse selon laquelle les falaises du nord-est constituent la principale source sédimentaire de la flèche de Hope Town.

Tout d'abord, les échantillons ont été préparés de sorte que ~1 g d'échantillon sec soit dopé avec 0,25 g de corindon (standard interne) puis broyé pendant 10 minutes dans un broyeur à micronisation McCrone en utilisant 5-10 ml d'éthanol pour obtenir un mélange homogène. L'éthanol a par la suite été évaporé sous une hotte pendant 24h. Le mélange a ensuite été légèrement homogénéisé puis 0,5 ml de vertrel a été ajouté au mélange pour empêcher l'agglomération éventuelle des argiles. L'échantillon a été tamisé (<500 µm) et passé au diffractomètre PANalytical X'Pert Powder afin d'obtenir les diagrammes de DRX. L'instrument est adapté avec un tube de cuivre (Cu K-alpha = 1,54178 Å) qui opère à 45 kV et 40 mA et un monochromateur en graphite post-diffraction. L'échantillon a été scanné de 5° à 65° 2-θ par pas de 0,02° 2-θ, avec un temps de comptage de 2 secondes par pas.

Pour la quantification des principaux composants minéralogiques, les diffractogrammes obtenus ont été convertis en pourcentage de poids de minéraux (% en poids) en utilisant le programme powdR (Butler & Hillier, 2021). Ce programme utilise une bibliothèque de diffractogrammes de phases pures préalablement mesurés (Eberl, 2003) ainsi que leurs rapports d'intensité de référence (Hillier, 2000), pour modéliser le spectre mesuré comme la somme de ces phases pures. Cette méthode d'ajustement permet de quantifier la minéralogie dans un échantillon avec un biais absolu moyen de 0,6% pour les minéraux non argileux, de 2% pour les minéraux argileux et de 5% pour les phases amorphes (Eberl, 2003; Omotoso et al., 2006; Butler & Hillier, 2021). Le % en poids de minéraux totaux calculés est normalisé au 100 %. La qualité de la procédure d'ajustement dans powdR a été évaluée pour l'indice « R-weighted profile » (rwp; meilleur ajustement des moindres carrés entre le modèle observé et calculé). Dans powdR, l'indice rwp pour les échantillons analysés varie entre 0,18 et 0,22 pour les échantillons de St-Godefroi et entre 0,22 et 0,26 pour ceux de Hope Town. Young (1993) estime qu'un rwp compris entre 0,1 et 0,3 indique un bon ajustement en ce qui concerne des échantillons géologiques. Les minéraux présentant une concentration < 1 % sont considérés comme traces et ceux < 0,1 % comme non-détectés.

Une composition minéralogique ajustée a été calculée en excluant les phyllosilicates afin de mieux caractériser les minéraux pouvant servir de traceurs.

*Figure 25. Localisation des échantillons de sédiment prélevés pour les analyses minéralogiques sur la plage à épis, la plage sud-ouest et les falaises de St-Godefroi.*

## 2.11 Caméra automatique observant la zone de déferlement et géorectification des images obliques

### *Configuration et installation de la caméra*

Une caméra automatique (Reconyx Hyperfire 2 Professional) observant la zone de déferlement des vagues a été installée le 17 septembre 2019 sur le poteau Hydro-Québec au sommet de l'enrochement en bordure de la route 132 (coordonnées MTM-5 : 257 809 /

5 325 330; altitude CGVD2013 ~5,75 m; Figure 27). La caméra a été placée dans un boîtier de sécurité en acier, qui était vissé dans le poteau Hydro-Québec et qui est parfaitement ajusté à la caméra. Cette caméra prend des images de 1440 × 2048 pixels, avec deux bandes au sommet et à la base de l'image (hauteur 32 pixels) avec les méta-informations (date, heure, température et projet/lieu). La taille de l'image utile est de 1376 × 2048 pixels. L'angle de champ de la caméra est de 40° selon le fabricant. La caméra a été retirée définitivement le 31 juillet 2021.

La caméra a été programmée pour prendre des rafales de 90 images à 2 Hz toutes les heures. Pour économiser les batteries et l'espace mémoire, deux programmations différentes ont été utilisées en fonction de la durée d'ensoleillement journalier des saisons. Ainsi, la programmation d'été enregistrait de 5:00 à 21:00, alors que celle d'hiver enregistrait uniquement de 7:00 à 16:00.

Une maintenance a été effectuée tous les un à trois mois pour remplacer les batteries et la carte mémoire SD. Huit déploiements ont été effectués avec la programmation standard (Tableau 7). La carte SD #7, qui a commencé à enregistrer le 7 juin 2020, a malheureusement arrêté d'enregistrer le 27 juillet 2020 à cause de manque d'espace. Le dernier déploiement avec une programmation allégée (seulement 10 images à 2 Hz toutes les heures) a duré du 16 novembre 2020 au 31 juillet 2021.

*Tableau 7. Listes déploiements de la caméra automatique Reconyx observant la zone de déferlement.*

| Carte SD | Date_début | Date_fin | Nombre d'images |
|---|---|---|---|
| 1 | 2019-09-17 | 2019-10-06 | 30 690 |
| 2 | 2019-10-06 | 2019-10-28 | 28 440 |
| 3 | 2019-10-28 | 2019-11-28 | 44 460 |
| 4 | 2019-11-28 | 2020-01-26 | 47 790 |
| 5 | 2020-02-26 | 2020-03-25 | 48 060 |
| 6 | 2020-03-25 | 2020-06-07 | 59 670 |
| 7 | 2020-06-07 | 2020-07-27 | 72 027 |
| 8 | 2020-08-20 | 2020-11-16 | 126 810 |
| 9 | 2020-11-16 | 2021-07-31 | 41 130 |

### *Géorectification des images obliques*

Les images ont été renommées automatiquement avec une routine Matlab selon le schéma suivant HopeTowe_aaaa-mm-jj_HH-ID, ou aaaa est l'année, mm est le mois, jj est le jour, HH est l'heure entière et ID est le numéro de l'image dans la rafale de 90 images.

La géorectification, c'est-à-dire la conversion des images obliques prises avec la caméra à des images en vue d'oiseau avec pour chaque pixel des coordonnées connues, a été effectuée avec la dernière version de la boîte à outils Matlab *g_rect* de Bourgeault et al. (2020), dont les principes ont été décrits dans Bourgault (2008). Certaines fonctions de

cette boîte à outils *g_rect* ont été légèrement modifiées par Urs Neumeier pour accélérer le travail avec différents niveaux de marée et de nombreuses images, sans toutefois toucher aux algorithmes de géorectification.

En premier, les paramètres de géorectification (angle de champ, angle de plongée, angle d'inclinaison, élévation de la caméra par rapport au niveau de la mer, orientation de la caméra par rapport au nord) ont été calculés par itérations successives sur une image sur laquelle douze points de contrôle correspondent à des points dont les coordonnées exactes avaient été levées par DGPS. Ces paramètres de géorectification ont été calculés séparément pour 26 niveaux marins entre -1,0 m et +1,5 m CGVD2013. Les paramètres de géorectification ont été calculés séparément pour chacun des déploiements utilisés sur une image avec un bon éclairage et une marée basse découvrant tous les blocs des épis.

Ensuite ces paramètres de géorectification ont été appliqués sur toutes les images des rafales de 90 images à 2 Hz pour lesquelles la position de la zone de déferlement a été mesurée à l'automne 2019. Les résultats sont des images noir et blanc géotiff avec une résolution de 0,2 m.

***Détermination de la position de la zone de déferlement***

La zone de déferment est la zone d'action des vagues allant du point le plus externe des brisants jusqu'à la ligne de rivage pour ce niveau d'eau (Figure 26). La limite externe de la zone de déferlement a été déterminée visuellement sur les images géorectifiées.

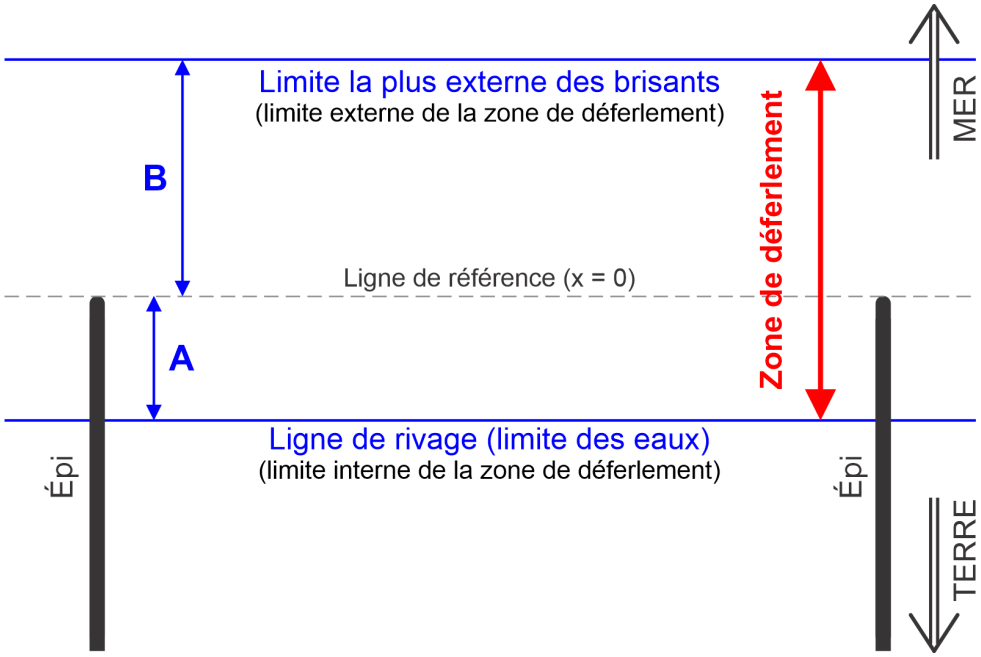



*Figure 26. Schéma illustrant l'étendue de la zone de déferlement. La distance **A** indique la position de la limite interne de la zone de déferlement. La distance **B** indique la position de la limite externe de la zone de déferlement. Les distances **A** et **B** sont exprimées positives en direction de la mer.*

Une interface graphique a été programmée sous Matlab pour faire défiler les 90 images géorectifiées d'une rafale et pouvoir sélectionner avec des clics de souris la limite externe des brisants, qui correspond à la limite externe de la zone de déferlement (Figure 28). Cette interface graphique permet de faire défiler les images une à une, ou de les jouer automatiquement à différentes vitesses. Le contraste peut être maximisé automatiquement pour mieux distinguer les brisants. Il est possible d'agrandir seulement la moitié nord de l'image, ou la zone des brisants est mesurées. Les images obliques originales peuvent être affichées en parallèle au besoin.

La limite externe des brisants a été déterminée à proximité des profils topographiques 14 et 11 (Figure 22), c'est-à-dire sur la ligne médiane entre les deux épis les plus au nord et entre le deuxième épi et le troisième épi depuis le nord. Plus près de la caméra la présence de l'enrochement de la route 132 pourrait influencer la morphologie de la plage et de l'avant-plage. Plus loin de la caméra vers le sud, la précision de l'image géorectifiée est moins bonne. Pour chaque rafale, les images ont été rejouées plusieurs fois pour déterminer les brisants les plus externes pour les 8 à 12 vagues observées durant ces 45 secondes.

La limite interne de la zone de déferlement est la ligne de limite des eaux. Comme celle-ci n'est pas dans le champ de la caméra sauf pour les très bas niveaux d'eau (l'orientation de la caméra a été optimisée pour la zone des brisants), la position de limite des eaux a été

*Figure 27. Photographie de la caméra Reconyx observant la zone de déferlement des vagues, installée le 17 septembre 2019 sur le poteau Hydro-Québec au sommet de l'enrochement en bordure de la route 132.*

calculée à partir du niveau d'eau enregistré par le marégraphe HOB (située devant l'épi le plus au nord) et les profils topographiques levés le 28 octobre 2019.

Ces limites externes et internes de la zone de déferlement sont indiquées par rapport à une ligne joignant la terminaison aval des épis, avec les valeurs positives vers le large (Figure 26). Par rapport au point x = 0 utilisé pour la présentation des profils topographiques, cette ligne est respectivement à 48,8 m et 52,1 m pour les profils 11 et 14.

La position de la zone de déferlement a été déterminée pour toutes heures entre le 17 septembre et le 28 octobre 2019 satisfaisant les conditions suivantes : (1) une hauteur de vague $H_{m0}$ d'au moins 0,5 m au site HOC juste devant la plage; (2) une luminosité des images suffisante pour distinguer les vagues (donc seulement durant le jour). Cela correspond à 65 rafales d'image pour lesquelles la position de la zone de déferlement a été déterminée.

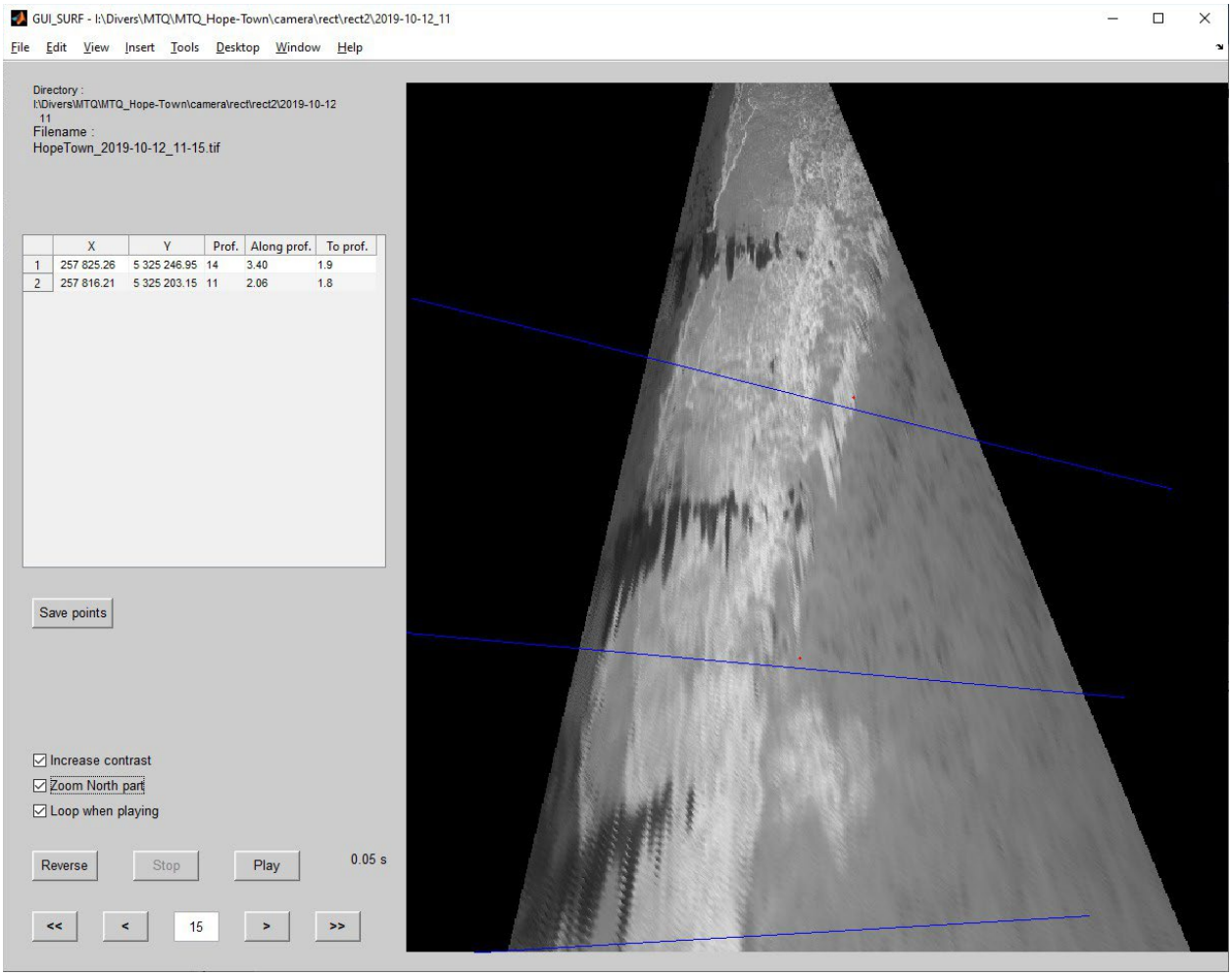



*Figure 28. Interface graphique programmée sous Matlab pour faire défiler les images géorectifiées d'une rafale de la caméra observant la zone de déferlement. Les trais bleus indiquent la position des profils topographiques 14, 11 et 8. Les petits points rouges sont les limites externes sélectionnées pour la zone de déferlement pour cette rafale d'images.*

# 3 NIVEAUX D'EAU

Les deux marégraphes de Paspébiac et de Hope Town ont enregistré des valeurs fiables et précises des niveaux d'eau, avec seulement de faibles variations à long terme durant les saisons liées à la température de l'eau (Figure 29). Par contre, l'AWAC de Saint-Godefroi (site HOE) a subi des mouvements verticaux lors de tempêtes allant jusqu'à 20 cm et l'AWAC de Paspébiac (site F) est plus fortement influencé par les variations de température et de salinité (Figure 29). C'est pourquoi nous présenterons surtout les marégraphes.

Les marées dans la partie centrale de la baie des Chaleurs sont mixtes surtout semi-diurnes comme illustrées par les niveaux d'eau mesurés par les marégraphes de Paspébiac et de Hope Town (Figure 30) : il y a deux marées hautes et deux marées basses chaque jour, mais pendant une partie du cycle lunaire il y a une inégalité marquée entre la hauteur des deux marées hautes quotidiennes.

Les niveaux d'eau mesurés à Paspébiac et Hope Town sont très similaires avec toutefois des marnages 10 à 20 cm plus importants à Paspébiac qu'à Hope Town (Figure 30). Cela n'est pas étonnant, car le marnage augmente de l'entrée vers la partie intérieure de la baie des Chaleurs. Cette différence se retrouve aussi dans les niveaux de hautes mers et basses mers (Tableau 8). Les niveaux d'eau entre les deux sites sont très bien corrélés (Figure 31, $R^2 = 0{,}9967$). La régression linéaire est

$$z_{Hope} = 0{,}9360\ z_{Pasp} + 0{,}0107 \qquad (7)$$

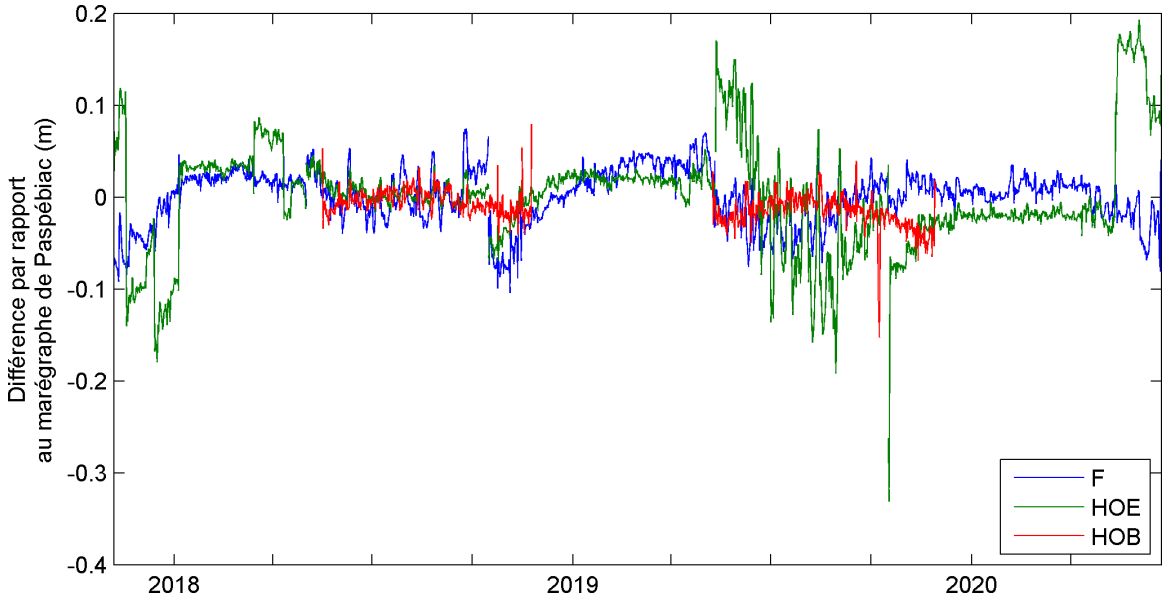



*Figure 29. Comparaison des niveaux mesurés par l'AWAC de Paspébiac (F), l'AWAC de Saint-Godefroi (HOE) et le marégraphe de Hope Town (HOB) par rapport au marégraphe de Paspébiac, avec un filtre passe-bas de 24 heures. Tous les niveaux ont été exprimés par rapport au niveau marin moyen mesuré.*

avec $z_{Hope}$ et $z_{Pasp}$ les niveaux d'eau à Hope Town et Paspébiac (m CGVD28).

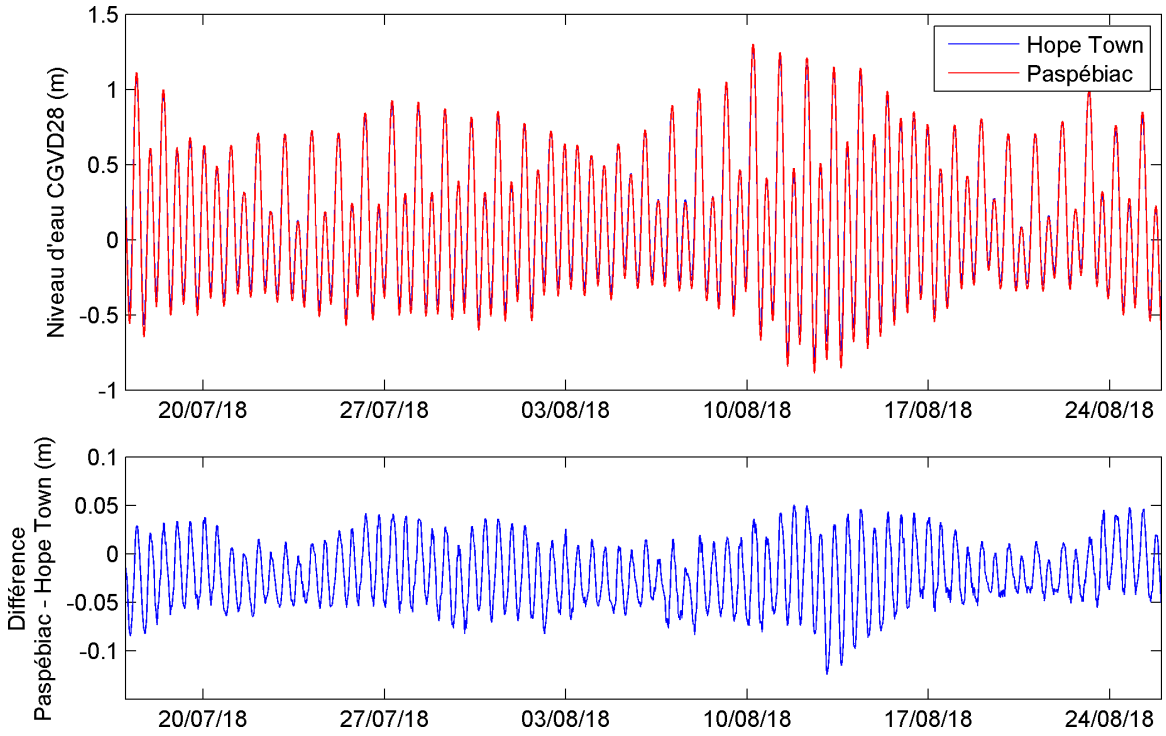



*Figure 30. Exemple des marées mixtes surtout semi-diurnes mesurées par les marégraphes de Paspébiac et Hope Town, ainsi que la différence entre ces deux sites. La série temporelle des différences maximales est en phase avec celle de niveaux d'eau.*

*Tableau 8. Caractéristique des marées à Paspébiac et Hope Town calculées à partir prédictions de marées de T_TIDE basées sur les données des marégraphes de Paspébiac (juillet 2015 à juin 2020) et de Hope Town.*

| | Paspébiac | Hope Town |
|---|---|---|
| Niveau moyen de l'eau | 0,128 m | 0,170 m |
| Pleine mer supérieure, grande marée | 1,383 m | 1,351 m |
| Pleine mer supérieure, marée moyenne | 0,898 m | 0,911 m |
| Basse mer inférieure, grande marée | -0,864 m | -0,834 m |
| Basse mer inférieure, marée moyenne | -0,500 m | -0,439 m |
| Marnage moyen | 1,120 m | 1,039 m |
| Marnage maximal | 2,192 m | 2,014 m |

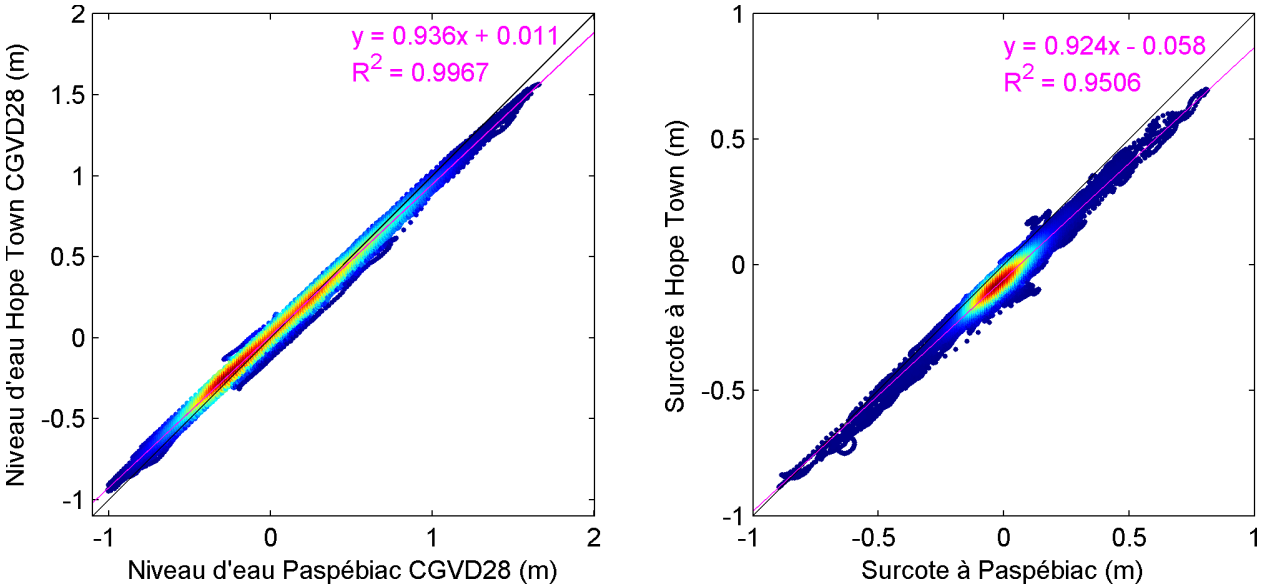



*Figure 31. Comparaison des données des marégraphes de Paspébiac et de Hope pendant la période de fonctionnement commune, à gauche les niveaux d'eau enregistrés, à droite les surcotes et décotes calculées. La fonction identité est tracée en noir et la régression linéaire en magenta.*

Le signal de marée est légèrement déphasé entre les deux sites; en moyenne les heures de marée haute et de marée basse sont 3,6 minutes plus tard à Paspébiac qu'à Hope Town (la différence de temps varie entre -3 et +13 minutes). Cela correspond à la progression de l'onde de marée pénétrant dans la baie des Chaleurs à partir du golfe du Saint-Laurent. La distance entre les deux sites est d'environ 12 km.

Par conséquence, la corrélation entre les deux signaux de niveaux d'eau a été légèrement optimisée en décalant dans le temps les deux séries de données. La meilleure corrélation est avec un décalage de 3,33 minutes ($R^2$ = 0,9974). La régression linéaire est alors :

$$z_{Ht0} = 0{,}9364\ z_{Pt3.33} + 0{,}0107 \qquad (8)$$

avec $z_{Ht0}$ le niveau d'eau à Hope Town (m CGVD28) et $z_{Pt3.33}$ le niveau d'eau à Paspébiac 3,33 minutes plus tard (m CGVD28).

La Figure 32 et le Tableau 9 présentent les niveaux d'eau mesurés et les surcotes calculées par le marégraphe de Paspébiac durant le projet. La Figure 33 et le Tableau 10 présentent les mêmes informations pour le marégraphe de Hope Town. Le marégraphe de Paspébiac a enregistré les trois plus hauts niveaux d'eau le 20 janvier 2019 (1,661 m CGVD28), le 17 octobre 2019 (1,660 m) et le 23 mars 2019 (1,654 m) avec des surcotes respectives de 0,410 m, 0,693 m et 0,665 m (Tableau 9). Le marégraphe de Hope Town n'était pas installé en janvier et mars, mais le 17 novembre 2019 il a aussi enregistré le plus haut niveau (1,566 m) avec une surcote de 0,592 m (Tableau 10).

Les trois plus fortes surcotes à Paspébiac étaient le 5 janvier 2018 (1,098 m), le 28 février 2020 (0,841 m) et le 8 septembre 2019 (0,811 m). Le marégraphe de Hope Town

fonctionnait pendant ce troisième événement et il a enregistré à ce moment-là sa plus forte surcote (0,700 m). Les périodes et les durées de déploiement sont différentes pour les deux marégraphes, avec une série temporelle nettement plus longue pour le marégraphe de Paspébiac. Cela influence la précision des harmoniques de marées obtenues avec T_TIDE, et par là aussi les prédictions de marée et les surcotes calculées.

Les surcotes et les décotes sont donc très similaires à Paspébiac et à Hope Town ($R^2$ = 0,9506; Figure 31). Il y a toutefois un léger déphasage qui correspond à la progression des ondes de surcotes ou décotes progressant comme la marée du golfe du Saint-Laurent vers la baie des Chaleurs. La corrélation peut être légèrement optimisée en décalant dans le temps les deux séries temporelles de 4,18 minutes ($R^2$ = 0,9509). La régression linéaire correspondante est :

$$S_{Ht0} = 0{,}9242\ S_{Pt4.18} - 0{,}0582 \quad (9)$$

avec $S_{Ht0}$ la surcote à Hope Town (m) et $S_{Pt4.18}$ la surcote à Paspébiac 4,18 minutes plus tard (m).

La corrélation entre Paspébiac et Hope Town est toutefois plus faible pour les surcotes ($R^2$ = 0,9509) que pour les niveaux d'eau ($R^2$ = 0,9974). Cette corrélation plus faible peut être due aux prédictions de marées moins précises à Hope Town, car basées seulement sur 395 jours de déploiement au total, ou à des variations locales des surcotes selon l'exposition aux vents et aux vagues.

Il est donc possible d'utiliser les mesures de Paspébiac comme première approximation pour Hope Town quand il n'y a pas de mesures locales disponibles. Dans ce cas il est recommandé d'ajuster le niveau mesuré à Paspébiac selon l'équation (8). Le résultat sera meilleur (erreur quadratique moyenne 0,0222 m pour les données disponibles) que si en premier une régression linéaire est utilisée pour prédire la surcote à Hope Town par rapport à la surcote à Paspébiac (équation 3), puis cette valeur est ajoutée à la prédiction de marée pour Hope Town (erreur quadratique moyenne 0,0273 m).

Le Tableau 11 présente le résultat de l'analyse harmonique des enregistrements du marégraphe de Paspébiac du 4 juillet 2015 au 22 juin 2020. Ces composantes harmoniques peuvent être utilisées pour des prédictions de marées. Le résultat de l'analyse harmonique pour le marégraphe de Hope Town n'est pas présenté, car les enregistrements sont nettement plus courts et ne couvrent pas une année complète (le marégraphe était retiré en hiver).

Les données de l'AWAC de Saint-Godefroi sont très bien corrélées avec celles du marégraphe de Hope Town (Figure 34). La distance entre ces deux sites est seulement de 2,2 km. Les données de l'AWAC de Paspébiac suivent aussi celle du marégraphe de Paspébiac, avec toutefois un marnage plus important de 5 à 10 cm car l'AWAC est 7 km plus à l'ouest que le marégraphe (Figure 34). Les surcotes enregistrées par les quatre instruments sont aussi très similaires (Figure 34).

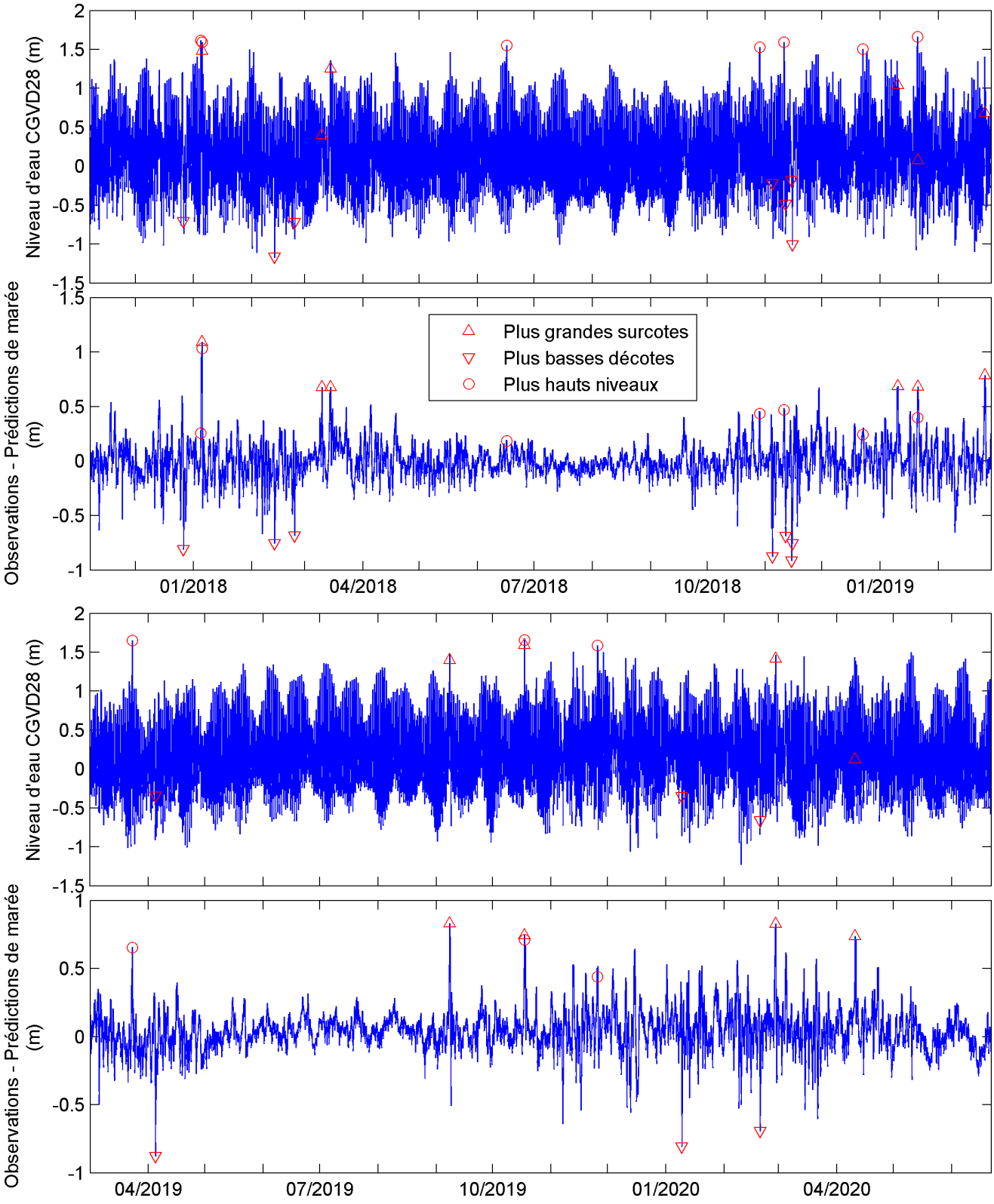



*Figure 32. Niveaux d'eau mesurés à Paspébiac et surcotes d'après l'analyse avec la boîte à outil Matlab T_TIDE pour la durée du projet (novembre 2017 à juin 2020).*

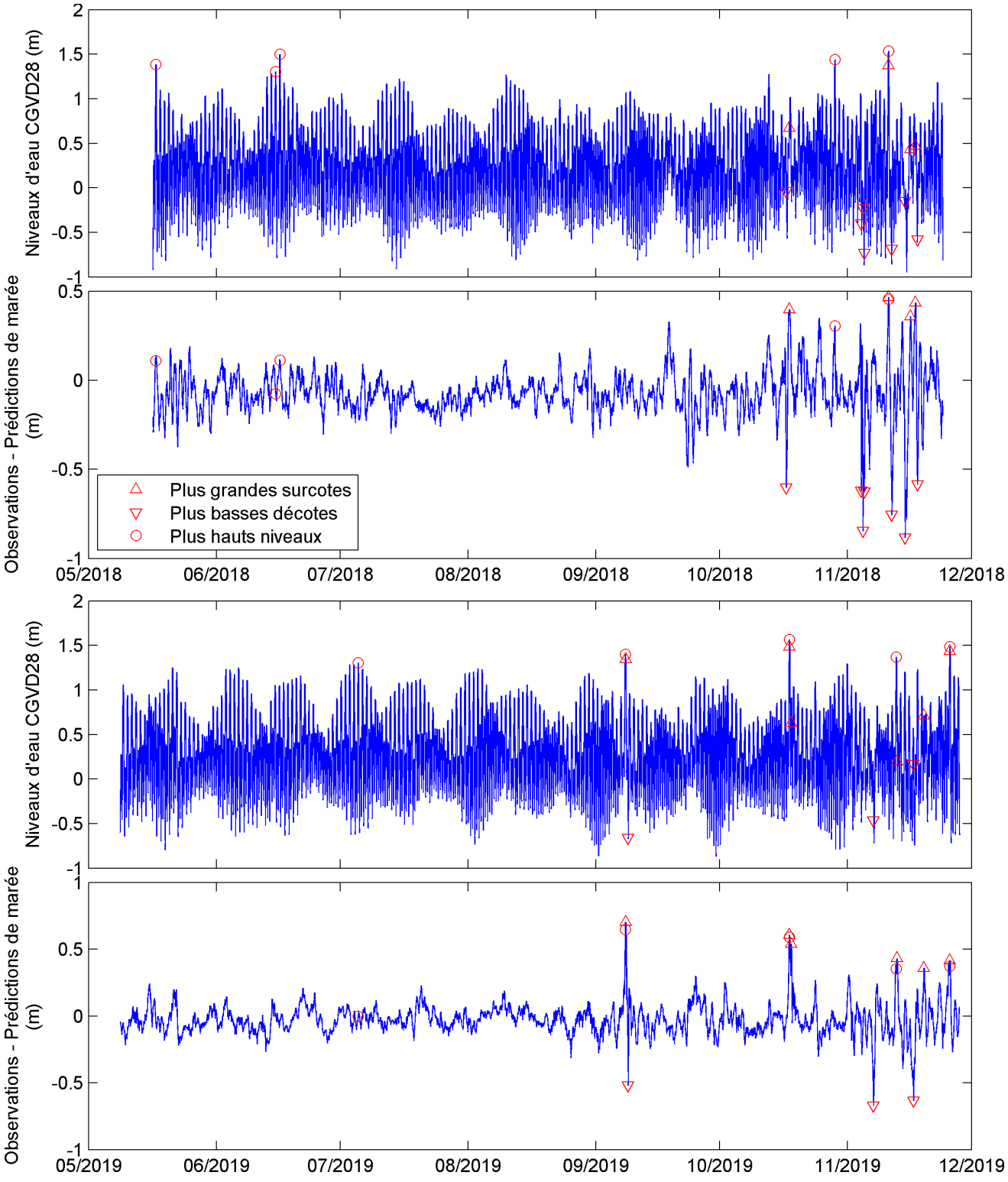



*Figure 33. Niveaux d'eau mesurés à Hope Town (site HOB) et surcotes d'après l'analyse avec la boîte à outil Matlab T_TIDE pour les déploiements mai-novembre en 2018 et 2019.*

*Tableau 9. Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrés à Paspébiac entre le 6 novembre 2017 et le 22 juin 2020.*

| | Rang | Date (UTC) | Niveau d'eau CGVD28 (m) | Surcote/Décote (m) |
|---|---|---|---|---|
| **Les plus hauts niveaux** | 1 | 2019-01-20 18:25 | 1,661 | 0,410 |
| | 2 | 2019-10-17 21:15 | 1,660 | 0,693 |
| | 3 | 2019-03-23 09:00 | 1,654 | 0,665 |
| | 4 | 2018-01-04 21:05 | 1,619 | 0,267 |
| | 5 | 2018-11-10 21:20 | 1,593 | 0,483 |
| | 6 | 2018-01-05 09:55 | 1,593 | 1,037 |
| | 7 | 2019-11-25 18:15 | 1,589 | 0,450 |
| | 8 | 2018-06-16 08:50 | 1,554 | 0,190 |
| | 9 | 2018-10-28 21:15 | 1,530 | 0,415 |
| | 10 | 2018-12-22 18:20 | 1,508 | 0,252 |
| **Les plus fortes surcotes** | 1 | 2018-01-05 11:15 | 1,482 | 1,098 |
| | 2 | 2020-02-28 09:00 | 1,415 | 0,841 |
| | 3 | 2019-09-08 04:20 | 1,398 | 0,811 |
| | 4 | 2019-02-25 15:35 | 0,707 | 0,776 |
| | 5 | 2020-04-10 17:00 | 0,148 | 0,748 |
| | 6 | 2019-10-17 20:05 | 1,591 | 0,728 |
| | 7 | 2019-01-10 09:00 | 1,042 | 0,695 |
| | 8 | 2018-03-10 06:05 | 0,400 | 0,691 |
| | 9 | 2019-01-21 00:20 | 0,077 | 0,682 |
| | 10 | 2019-03-23 09:15 | 1,645 | 0,669 |
| **Les plus fortes décotes** | 1 | 2018-11-14 22:40 | -0,189 | -0,896 |
| | 2 | 2019-04-04 17:40 | -0,360 | -0,894 |
| | 3 | 2018-11-04 16:55 | -0,221 | -0,886 |
| | 4 | 2020-01-09 15:10 | -0,347 | -0,803 |
| | 5 | 2017-12-26 16:05 | -0,709 | -0,792 |
| | 6 | 2018-02-13 01:10 | -1,161 | -0,775 |
| | 7 | 2018-11-15 07:40 | -1,005 | -0,739 |
| | 8 | 2020-02-20 03:15 | -0,661 | -0,704 |
| | 9 | 2018-02-23 16:35 | -0,721 | -0,690 |
| | 10 | 2018-11-11 17:40 | -0,484 | -0,679 |

*Tableau 10. Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Hope Town (site HOB) durant les deux déploiements, à savoir du 16 mai au 24 novembre 2018 et entre le 8 mai et le 28 novembre 2019,*

| | Rang | Date (UTC) | Niveau d'eau CGVD28 (m) | Surcote/Décote (m) |
|---|---|---|---|---|
| **Les plus hauts niveaux** | 1 | 2019-10-17 21:20 | 1,566 | 0,592 |
| | 2 | 2018-11-10 21:15 | 1,536 | 0,455 |
| | 3 | 2018-06-16 08:45 | 1,500 | 0,108 |
| | 4 | 2019-11-25 18:30 | 1,484 | 0,379 |
| | 5 | 2018-10-28 21:20 | 1,443 | 0,304 |
| | 6 | 2019-09-08 03:30 | 1,401 | 0,644 |
| | 7 | 2018-05-17 08:20 | 1,386 | 0,110 |
| | 8 | 2019-11-12 18:55 | 1,369 | 0,359 |
| | 9 | 2018-06-15 07:55 | 1,306 | -0,080 |
| | 10 | 2019-07-05 08:50 | 1,303 | -0,002 |
| **Les plus fortes surcotes** | 1 | 2019-09-08 04:15 | 1,344 | 0,700 |
| | 2 | 2019-10-17 20:00 | 1,485 | 0,611 |
| | 3 | 2019-10-18 06:55 | 0,626 | 0,536 |
| | 4 | 2018-11-10 22:25 | 1,378 | 0,465 |
| | 5 | 2018-11-17 11:00 | 0,474 | 0,434 |
| | 6 | 2019-11-12 23:50 | 0,199 | 0,433 |
| | 7 | 2019-11-25 19:10 | 1,435 | 0,423 |
| | 8 | 2018-10-17 21:35 | 0,671 | 0,393 |
| | 9 | 2018-11-16 05:25 | 0,435 | 0,363 |
| | 10 | 2019-11-19 12:25 | 0,713 | 0,359 |
| **Les plus fortes décotes** | 1 | 2018-11-14 22:45 | -0,15 | -0,886 |
| | 2 | 2018-11-04 17:35 | -0,229 | -0,849 |
| | 3 | 2018-11-11 16:55 | -0,688 | -0,751 |
| | 4 | 2019-11-07 06:40 | -0,464 | -0,666 |
| | 5 | 2019-11-16 23:30 | 0,166 | -0,638 |
| | 6 | 2018-11-05 00:45 | -0,733 | -0,619 |
| | 7 | 2018-11-04 07:20 | -0,400 | -0,617 |
| | 8 | 2018-10-17 02:35 | -0,038 | -0,606 |
| | 9 | 2018-11-17 21:25 | -0,591 | -0,582 |
| | 10 | 2019-09-08 19:20 | -0,668 | -0,517 |

*Tableau 11. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le marégraphe de Paspébiac de juillet 2015 à juin 2020, les composantes les plus importantes sont marquées en gras. Erreur estimée de l'amplitude et de la phase avec un intervalle de confiance de 95%. Rapport signal sur bruit (SNR).*

| Composante harmonique | Période (h) | Amplitude (m) | Erreur Amplitude | Phase (°) | erreur Phase | SNR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **SA** | **8766,231** | **0,02728** | **0,01353** | **241,511** | **23,972** | **4,07** |
| **SSA** | **4382,906** | **0,02573** | **0,01299** | **172,412** | **27,332** | **3,93** |
| MSF | 354,367 | 0,01499 | 0,01226 | 110,562 | 49,939 | 1,49 |
| **Q1** | **26,868** | **0,03071** | **0,00590** | **215,298** | **12,669** | **27,12** |
| **O1** | **25,819** | **0,19416** | **0,00663** | **261,251** | **1,879** | **856,73** |
| TAU1 | 25,668 | 0,00782 | 0,00485 | 191,840 | 42,701 | 2,60 |
| **NO1** | **24,833** | **0,03038** | **0,01622** | **252,096** | **31,255** | **3,51** |
| PI1 | 24,132 | 0,00689 | 0,00485 | 292,346 | 45,733 | 2,02 |
| **P1** | **24,066** | **0,06531** | **0,00606** | **282,623** | **4,614** | **116,27** |
| S1 | 24,000 | 0,01389 | 0,00828 | 197,145 | 28,780 | 2,81 |
| **K1** | **23,934** | **0,20379** | **0,00668** | **282,355** | **2,038** | **930,25** |
| J1 | 23,098 | 0,00996 | 0,00627 | 288,493 | 34,280 | 2,52 |
| OQ2 | 13,162 | 0,00181 | 0,00115 | 139,286 | 39,267 | 2,47 |
| EPS2 | 13,127 | 0,00815 | 0,00107 | 161,692 | 8,693 | 58,14 |
| 2N2 | 12,905 | 0,01691 | 0,00117 | 162,657 | 4,461 | 207,18 |
| **MU2** | **12,872** | **0,02550** | **0,00141** | **193,229** | **2,749** | **328,15** |
| **N2** | **12,658** | **0,12017** | **0,00159** | **181,562** | **0,683** | **5715,96** |
| **NU2** | **12,626** | **0,02332** | **0,00121** | **179,872** | **3,170** | **369,33** |
| GAM2 | 12,452 | 0,00139 | 0,00119 | 176,081 | 54,727 | 1,36 |
| H1 | 12,438 | 0,00388 | 0,00141 | 183,678 | 18,862 | 7,52 |
| **M2** | **12,421** | **0,51787** | **0,00143** | **203,544** | **0,167** | **131332,91** |
| H2 | 12,403 | 0,00333 | 0,00154 | 214,040 | 22,559 | 4,66 |
| LDA2 | 12,222 | 0,00566 | 0,00147 | 147,741 | 15,173 | 14,85 |
| L2 | 12,192 | 0,01306 | 0,00116 | 187,752 | 5,227 | 126,16 |
| T2 | 12,016 | 0,00913 | 0,00151 | 236,133 | 9,807 | 36,39 |
| **S2** | **12,000** | **0,14123** | **0,00139** | **249,636** | **0,544** | **10255,66** |
| R2 | 11,984 | 0,00115 | 0,00107 | 155,475 | 56,490 | 1,15 |
| **K2** | **11,967** | **0,04200** | **0,00178** | **247,081** | **2,572** | **559,06** |
| MSN2 | 11,786 | 0,00244 | 0,00131 | 354,949 | 29,768 | 3,47 |
| MO3 | 8,386 | 0,01630 | 0,00203 | 260,164 | 7,750 | 64,38 |
| M3 | 8,280 | 0,00749 | 0,00175 | 131,028 | 12,698 | 18,32 |
| SO3 | 8,192 | 0,00739 | 0,00219 | 15,522 | 15,565 | 11,40 |
| MK3 | 8,177 | 0,00415 | 0,00183 | 329,408 | 29,594 | 5,15 |
| SK3 | 7,993 | 0,00636 | 0,00197 | 210,331 | 17,207 | 10,40 |
| MN4 | 6,269 | 0,00249 | 0,00028 | 308,274 | 6,349 | 77,07 |
| M4 | 6,210 | 0,00576 | 0,00028 | 7,466 | 2,403 | 434,57 |
| MS4 | 6,103 | 0,00148 | 0,00030 | 127,414 | 11,606 | 24,68 |
| MK4 | 6,095 | 0,00036 | 0,00032 | 121,811 | 54,713 | 1,26 |
| S4 | 6,000 | 0,00077 | 0,00026 | 9,133 | 20,793 | 8,56 |
| SK4 | 5,992 | 0,00036 | 0,00028 | 56,455 | 65,409 | 1,57 |
| 2MK5 | 4,931 | 0,00035 | 0,00014 | 283,467 | 24,747 | 6,56 |
| 2MN6 | 4,166 | 0,00146 | 0,00015 | 93,623 | 5,104 | 96,69 |
| M6 | 4,140 | 0,00262 | 0,00015 | 129,508 | 3,287 | 295,33 |
| 2MS6 | 4,092 | 0,00235 | 0,00016 | 184,644 | 3,498 | 225,39 |
| 2MK6 | 4,089 | 0,00086 | 0,00018 | 174,132 | 11,553 | 23,83 |
| 2SM6 | 4,046 | 0,00063 | 0,00014 | 241,868 | 13,145 | 19,75 |
| MSK6 | 4,042 | 0,00051 | 0,00019 | 245,376 | 21,112 | 7,21 |
| 3MK7 | 3,530 | 0,00037 | 0,00012 | 68,456 | 21,943 | 9,95 |
| M8 | 3,105 | 0,00066 | 0,00010 | 219,784 | 9,305 | 45,52 |

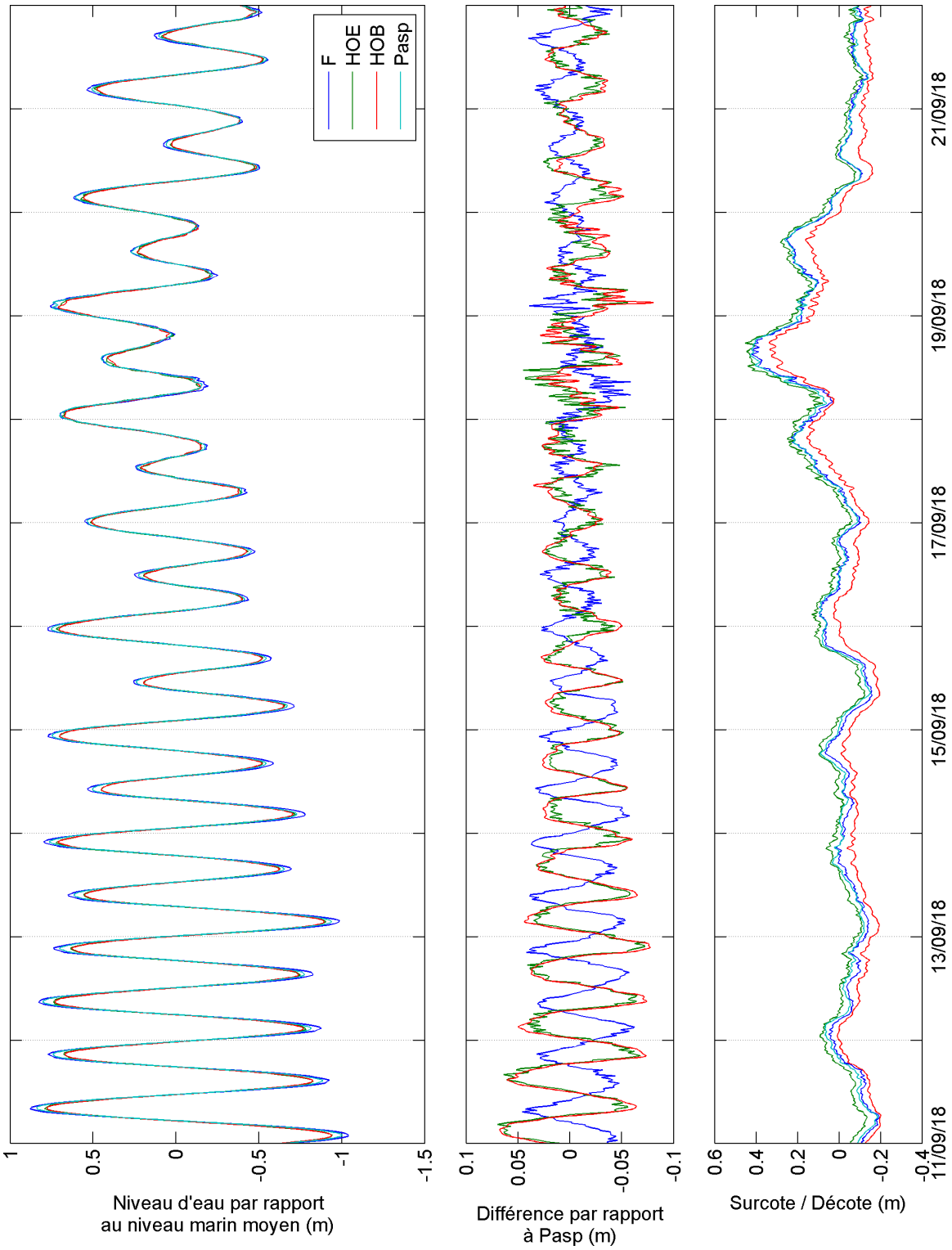



*Figure 34. Comparaison des niveaux mesurés et des surcotes pour l'AWAC de Paspébiac (F), l'AWAC de Saint-Godefroi (HOE), le marégraphe de Hope Town (HOB) et le marégraphe de Paspébiac. Tous les niveaux sont exprimés par rapport au niveau marin moyen mesuré.*

# 4 VAGUES

Les vagues et les courants ont été mesurés à l'aide plusieurs types d'instrument :

(A) Deux mouillages avec AWAC sont installés depuis l'automne 2017, l'un au large de Paspébiac (site F ~ 30 m de profondeur) et le second au large de St-Godefroi (site HOE ~10 m de profondeur). Ces mouillages ont enregistré les conditions de vagues et courants en continu pour toute la durée du projet et ont été renouvelés deux fois par année.

(B) Un houlographe (modèle Aquadopp Profiler) a été placé devant la flèche littorale (site HOD ~5 m de prof.) lors des périodes estivales en 2018 et 2019. À noter que lors du dernier été en 2020, un mouillage de type AWAC monté sur une plateforme SeaSpider a été utilisé au site HOD à cause de la non-disponibilité de l'Aquadopp Profiler.

(C) Deux houlographes non-directionnels (modèle RBR) installés au bas de la plage de la flèche littorale (site HOB et HOC) lors des périodes estivales en 2018 et 2019 (l'instrument HOB n'a pas fonctionné en 2019).

## 4.1 Positions des mouillages et périodes de déploiement

La position des mouillages installés au cours du projet est indiquée au Tableau 12 et illustrée sur la Figure 35. La position exacte des mouillages pluriannuels F, HOD et HOE est illustrée à la Figure 36.

Cependant, au cours de la période d'étude nous avons rencontré quelques soucis :

- À l'hiver 2017-2018, au site de St-Godefroi (HOE), la tête de l'instrument était bloquée sur le côté du 5 au 17 novembre 2017; les données sur cette période sont donc basées sur le capteur de pression plutôt que par les faisceaux acoustiques de l'AWAC, et il n'y a pas de données directionnelles.

- À l'été 2019, sur la plage de Hope-Town (HOB), l'instrument (RBR duet) installé n'a pas fonctionné et donc aucune donnée n'est disponible pour ce site; toutefois l'instrument similaire installé en HOC a bien fonctionné.

- À l'hiver 2019-2020, au site de St-Godefroi (HOE), l'instrument s'est retourné sur le côté du 11 mai au 4 juillet 2020, les données sur cette période sont donc basées sur le capteur de pression et il n'y a pas de données directionnelles.

- À l'été 2020, au site de Hope-Town (HOD), un AWAC monté sur SeaSpider a été utilisé à la place d'un AquaDopp monté sur trépied, et malheureusement l'instrument s'est retourné lors de l'installation. Seules les données basées sur le capteur de pression sont donc utilisables et il n'y a pas de données directionnelles.

*Tableau 12. Position et période d'enregistrement des mouillages installés.*

| | Site | Début | Fin | Latitude / Longitude | Coordonnées MTM-5 Est / Nord | Prof.* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hiver 2017-18 | F, Paspébiac | 2017-11-05 | 2018-04-10 | 47° 58,897' N / 65° 20,211' W | 242334 / 5316191 | 33,0 m |
| | HOE, St-Godefroi | 2017-11-05 | 2018-04-10 | 48° 04,050' N / 65° 06,070' W | 260001 / 5325575 | 9,4 m |
| Été 2018 | F, Paspébiac | 2018-04-10 | 2018-10-15 | 47° 58,892' N / 65° 20,215' W | 242329 / 5316182 | 33,0 m |
| | HOE, St-Godefroi | 2018-04-10 | 2018-10-15 | 48° 04,030' N / 65° 06,040' W | 260038 / 5325538 | 9,4 m |
| | HOD, Hope Town | 2018-05-01 | 2018-10-23 | 48° 04,012' N / 65° 07,330' W | 258435 / 5325517 | 3,5 m |
| | HOB, Hope Town | 2018-05-18 | 2018-11-24 | 48° 03,873' N / 65° 07,809' W | 257839 / 5325264 | 0,2 m |
| | HOC, Hope Town | 2018-05-18 | 2018-11-24 | 48° 03,803' N / 65° 07,815' W | 257830 / 5325136 | 0,1 m |
| Hiver 2018-19 | F, Paspébiac | 2018-10-15 | 2019-05-10 | 47° 58,898' N / 65° 20,185' W | 242366 / 5316192 | 33,0 m |
| | HOE, St-Godefroi | 2018-10-15 | 2019-05-11 | 48° 04,033' N / 65° 06,041' W | 260037 / 5325543 | 9,6 m |
| Été 2019 | F, Paspébiac | 2019-05-10 | 2019-10-16 | 47° 58,917' N / 65° 20,295' W | 242230 / 5316229 | 32,3 m |
| | HOE, St-Godefroi | 2019-05-11 | 2019-10-16 | 48° 04,019' N / 65° 06,045' W | 260031 / 5325518 | 9,8 m |
| | HOD, Hope Town | 2019-05-07 | 2019-10-09 | 48° 04,009' N / 65° 07,335' W | 258429 / 5325512 | 4,1 m |
| | HOC, Hope Town | 2019-05-08 | 2019-11-28 | 48° 03,803' N / 65° 07,815' W | 257830 / 5325136 | 0,1 m |
| Hiver 2019-20 | F, Paspébiac | 2019-10-16 | 2020-06-21 | 47° 58,889' N / 65° 20,211' W | 242334 / 5316176 | 33,4 m |
| | HOE, St-Godefroi | 2019-10-16 | 2020-07-03 | 48° 04,034' N / 65° 06,007' W | 260079 / 5325545 | 9,2 m |
| Été 2020 | HOD, Hope Town | 2020-06-21 | 2020-10-22 | 48° 04,002' N / 65° 07,370' W | 258386 / 5325499 | 4,0 m |

* Profondeur sous le zéro des cartes marines d'après les relevés bathymétriques du SHC (pour les sites F, HOD et HOE) ou les relevés au DGPS (sites HOB et HOC).

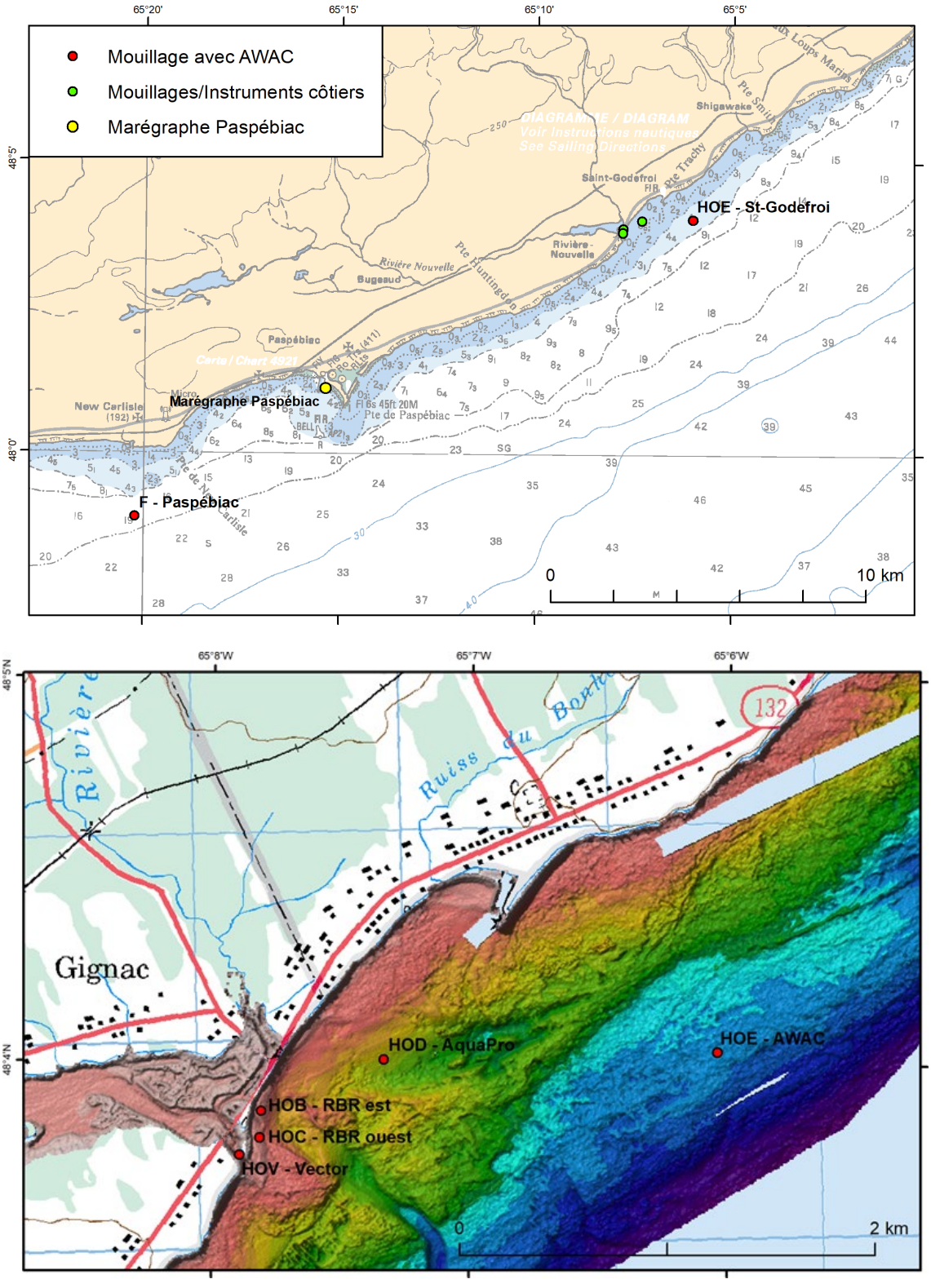



*Figure 35. Position des mouillages et instruments installés. (Haut) Carte général avec la bathymétrie en brasse. (Bas) Vue détaillée devant St-Godefroi et la lagune de Hope Town, avec la bathymétrie par Lidar et multifaisceau.*

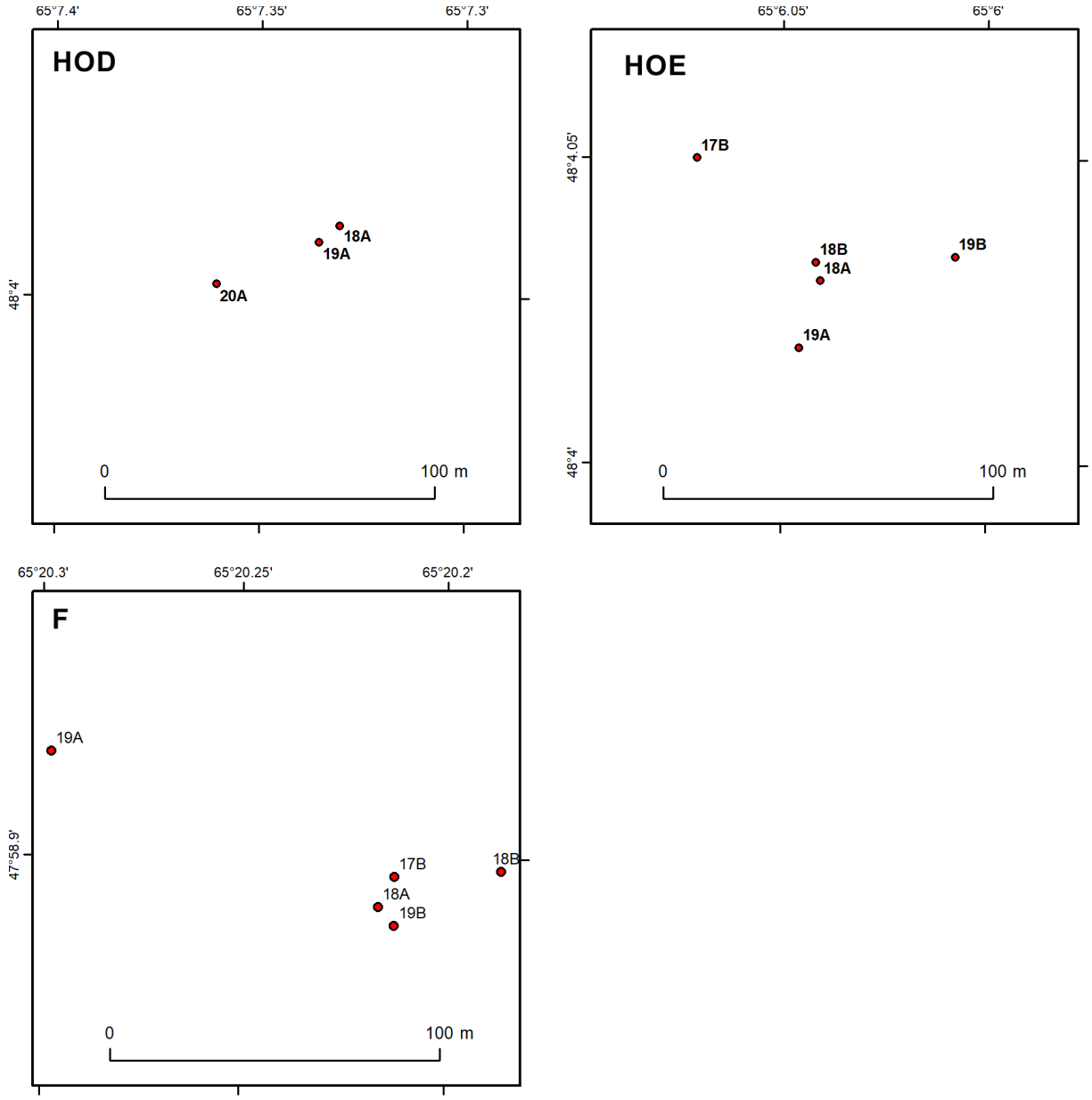



*Figure 36. Cartes des positions exactes des différents déploiements des mouillages pluriannuels F, HOD et HOE durant le projet.*

## 4.2 Vagues mesurées

Les vagues ont été mesurées en continu pendant 32 mois (~ 2½ ans) aux sites de Paspébiac (F) et de St-Godefroi (HOE) de novembre 2017 au mois de juillet 2020, et pendant 15 mois répartis sur 3 étés (2018, 2019 et 2020) au site de Hope-Town devant la plage à épis (HOD, Figure 35). En parallèle sur cette plage sont immergés deux petits houlographes (HOB et HOC) à quelques décimètres de profondeur et qui ont enregistré les vagues du mois de mai au mois de novembre ces trois mêmes années.

Le site de Paspébiac (F) est soumis autant aux tempêtes en provenance du golfe du St-Laurent (est) que de celles de l'intérieur de la baie des Chaleurs (ouest), alors que le site de St-Godefroi (HOE) est protégé par la pointe de New-Carlisle pour les tempêtes de l'ouest (Figure 37), tout comme le site plus côtier devant la plage à épis de Hope-Town (HOD; Figure 1 et Figure 35).

L'hydrodynamisme spécifique à chacun de ces 3 sites est illustré notamment par les courbes de probabilités de dépassement des hauteurs de vagues $H_{m0}$ (Figure 37). Ce genre de représentation met l'emphase sur les événements extrêmes. Les sites de Paspébiac et St-Godefroi sont exposés à des vagues de plusieurs mètres (~3 m), toutefois les vagues atteignant le site de St-Godefroi (HOE), sont plus faibles que les vagues mesurées au large de Paspébiac (F). Au site côtier de Hope-Town (HOD) devant la plage à épis, les hauteurs de vagues s'atténuent à cause de la bathymétrie et perdent de l'énergie. Toutefois, la faible profondeur du site ne permettait pas de laisser en place l'instrument l'hiver à cause de la glace de mer et les données couvrent seulement le semestre estival mai-octobre, donc sans les mois les plus tempêtueux. Ainsi, l'été, la plage de Hope-Town reçoit 90 % du temps des vagues inférieures à 0,4 m. Les rares vagues supérieures à 1,5 m qui ont atteint la plage, ont été mesurées au début de l'automne en septembre et octobre (Tableau 13).

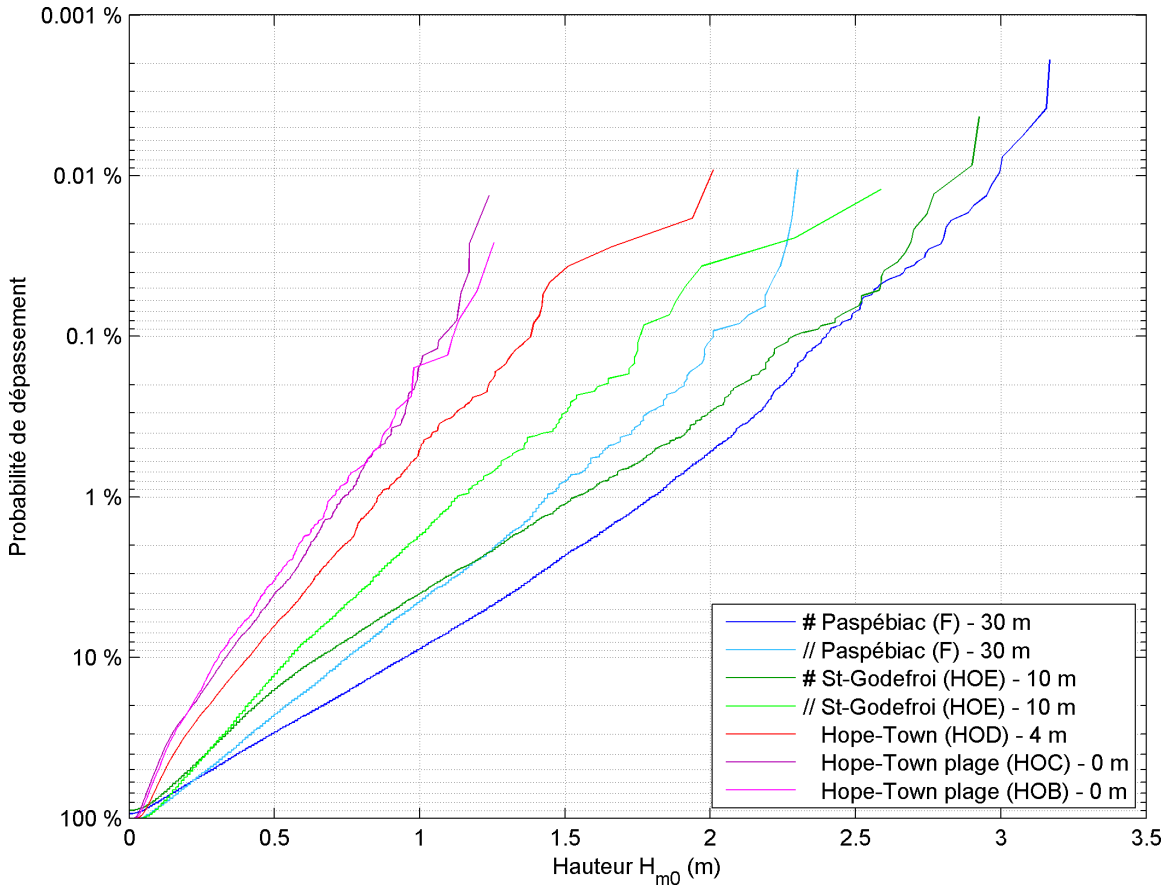



*Figure 37. Probabilité de dépassement des hauteurs de vagues $H_{m0}$ aux sites de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et devant la plage à épis de Hope-Town (HOD) et en bas de cette plage (HOC et HOB). Pour les sites F et HOE sont représentées toutes les données disponible (#) et seulement la période commune avec le déploiement à HOD (//).*

Les roses de vagues permettent de visualiser les directions de provenance des vagues, en particulier les vagues les plus fortes, à fort potentiel énergétique. Ces roses sont présentées à la Figure 38. Les roses de vagues pour les sites de Paspébiac et St-Godefroi sont construites à partir des 32 mois de données, alors que pour le site Hope-Town (HOD), seules les données récoltées à l'été 2018 et 2019 sont utilisées, car en 2020 les données de vagues ont été enregistrées à l'aide du capteur de pression uniquement (instrument retourné) et malheureusement aucune direction n'est disponible pour cet été.

Au site de Paspébiac (F), les données montrent une distribution bimodale de la provenance des vagues de tempêtes, et celles-ci proviennent plus fréquemment de l'ouest que du secteur est. Au site de St-Godefroi (HOE) les vagues les plus élevées proviennent du secteur est, donc des tempêtes issues du golfe du St-Laurent, mais il arrive que certaines vagues de tempêtes en provenance du sud-sud-ouest, donc parallèles au littoral, atteignent le site de St-Godefroi. Par contre, devant la plage à épis, au site côtier de Hope-Town (HOD), seules les vagues en provenance de l'est jusqu'au sud atteignent la plage, à cause des hauts-fonds devant l'embouchure de la lagune (Figure 35). Sans surprise les vagues les plus élevées à HOD proviennent de l'est (114°). Ces vagues de plus de 1 m de hauteur significative ont été mesurées au début de l'automne.

Le Tableau 13 présente la liste des quinze tempêtes les plus fortes survenues pour toute la durée du projet, aux sites de Paspébiac, St-Godefroi et devant la plage de Hope-Town. La tempête qui a généré les vagues les élevées au site F a eu lieu le 4 novembre 2018 avec des vagues de 3,16 m de hauteur significative. Des vagues de plus de 3 m ont encore été mesurées sur ce site, seulement dix jours plus tard lors de la tempête du 14 novembre 2018, la deuxième en importance. Sur ces quinze événements répertoriés, onze sont originaires du secteur ouest.

Au site de St-Godefroi, les vagues les plus élevées (2,92 m) ont été mesurées le 17 octobre 2019, suivi de près par la tempête du 4 janvier 2018 qui a généré des vagues de 2,90 m de hauteur significative.

Enfin, pour le site de Hope-Town (HOD), les vagues les plus élevées (2,01 m) ont été mesurées le 8 septembre 2019. Cette même tempête avait généré des vagues de 2,59 m au site de St-Godefroi. Le deuxième événement a eu lieu le 18 septembre 2018 avec des vagues de 1,51 m pour HOD, alors que les vagues atteignaient 1,91 m au site HOE. Sur ces deux événements de tempête synchrones, il y a environ une diminution de 25% de la hauteur significative des vagues entre les deux sites. Ainsi il serait possible d'extrapoler des hauteurs de vagues pour le site HOD en fonction de celles mesurées un peu plus au large au site HOE quand l'instrument devant la plage n'était pas présent, tout en considérant une période d'eau libre pour les deux sites.

Afin de visualiser les périodes de l'année durant lesquelles les tempêtes sont les plus fréquentes, les données de vagues sont présentées sous forme de série temporelle des hauteurs significatives $H_{m0}$. La Figure 39 illustre ces séries temporelles comparées pour les sites de Paspébiac et St-Godefroi. Les quinze tempêtes majeures répertoriées pour chacun de ces 2 sites sont également illustrées sur ce même graphique. Alors que les vagues

mesurées sont en général plus élevées au site de Paspébiac qu'au site de St-Godefroi d'après les courbes de probabilité de dépassement (Figure 37), certaines tempêtes à St-Godefroi (losange rouge sur le graphique) génèrent des vagues moins hautes au site de Paspébiac.

La grande majorité des tempêtes interviennent à l'automne, du mois d'octobre au début de janvier, période à partir de laquelle l'englacement de la baie des Chaleurs débute. Lors du premier hiver (2018), la glace a réduit le développement des vagues durant les mois de janvier et février, alors que pour les deux hivers suivants (2019 et 2020), les vagues sont beaucoup plus présentes pendant ces mêmes deux mois, révélant une saison de glace discontinue dans la baie des Chaleurs.

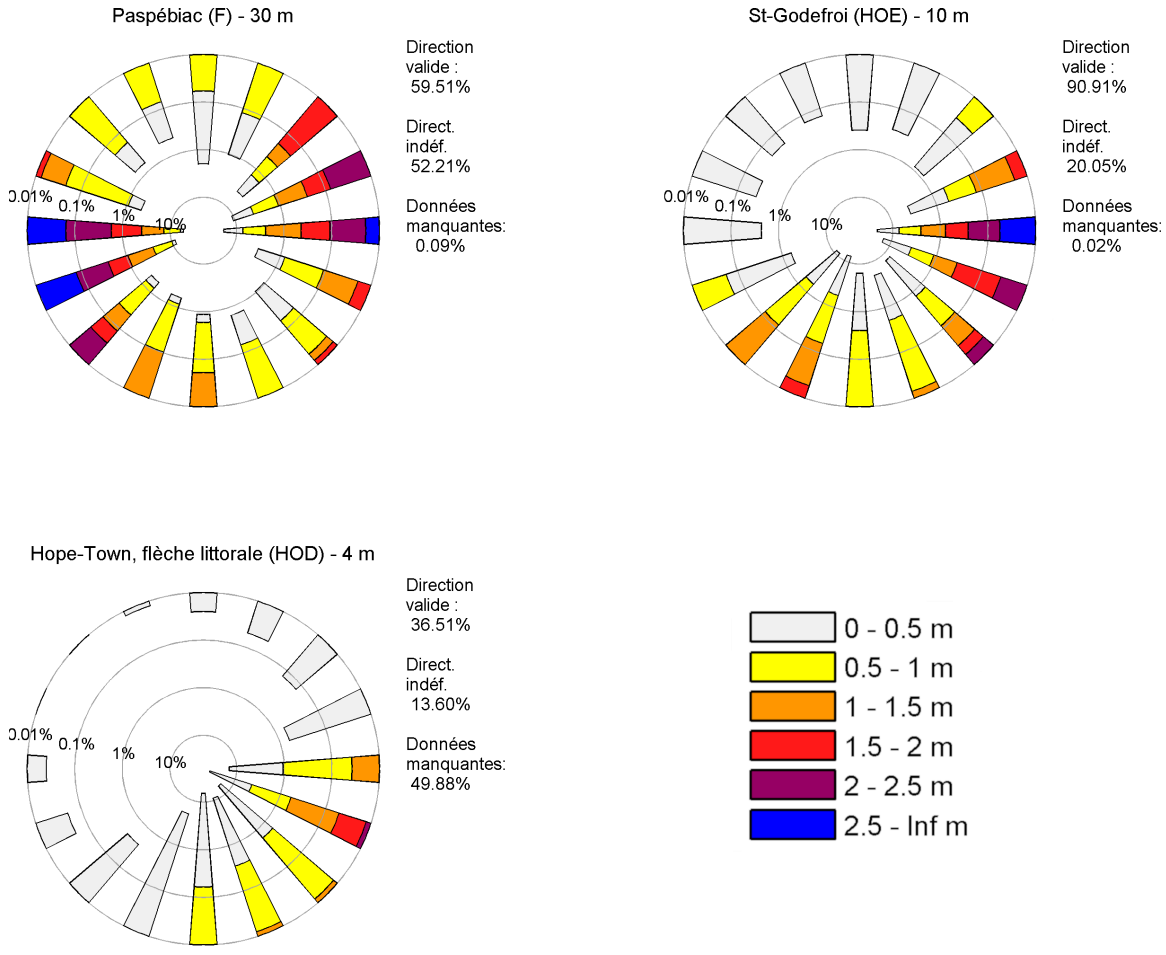



*Figure 38. Roses de vagues pour les sites de Paspébiac (F), St-Godefroi (HOE) et Hope-Town (HOD). Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.*

*Tableau 13. Liste des 15 plus fortes tempêtes mesurées entre novembre 2017 et juillet 2020 aux sites F, HOE et jusqu'en octobre 2020 pour le site HOD. À noter que le site HOD n'est disponible qu'en période estivale.*

| Site F (Paspébiac) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rang | Date/Heure (HNE) | $H_{m0}$ (m) | $T_{02}$ (s) | Dir (°) |
| 1 | 04/11/2018 00:00 | 3,16 | 5,23 | 240 |
| 2 | 14/11/2018 10:00 | 3,07 | 5,34 | 274 |
| 3 | 04/01/2018 21:00 | 2,81 | 6,60 | 85 |
| 4 | 16/12/2019 03:00 | 2,81 | 5,28 | 246 |
| 5 | 05/01/2018 12:00 | 2,80 | 5,04 | 261 |
| 6 | 11/11/2018 00:00 | 2,67 | 5,30 | 254 |
| 7 | 04/04/2019 11:00 | 2,56 | 5,21 | 268 |
| 8 | 11/11/2017 04:00 | 2,47 | 5,12 | 259 |
| 9 | 16/11/2019 05:00 | 2,41 | 4,95 | 246 |
| 10 | 14/03/2018 10:00 | 2,38 | 4,93 | 86 |
| 11 | 17/10/2019 15:00 | 2,33 | 4,44 | 61 |
| 12 | 27/12/2017 05:00 | 2,32 | 4,85 | 263 |
| 13 | 28/10/2018 10:00 | 2,32 | 4,95 | 79 |
| 14 | 20/04/2020 10:00 | 2,29 | 5,18 | 243 |
| 15 | 01/11/2019 17:00 | 2,28 | 4,72 | 224 |

| Site HOE (St-Godefroi) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rang | Date/Heure (HNE) | $H_{m0}$ (m) | $T_{02}$ (s) | Dir (°) |
| 1 | 17/10/2019 16:00 | 2,92 | 5,42 | 95 |
| 2 | 04/01/2018 22:00 | 2,90 | 5,90 | 67 |
| 3 | 14/03/2018 13:00 | 2,77 | 6,15 | 93 |
| 4 | 08/09/2019 04:00 | 2,59 | 8,61 | 84 |
| 5 | 28/11/2018 06:00 | 2,37 | 5,27 | 99 |
| 6 | 10/04/2020 12:00 | 2,27 | 5,82 | 106 |
| 7 | 09/01/2019 19:00 | 2,23 | 5,74 | 95 |
| 8 | 10/03/2018 03:00 | 2,19 | 5,94 | 88 |
| 9 | 28/10/2018 13:00 | 2,19 | 5,54 | 101 |
| 10 | 12/11/2019 09:00 | 2,17 | 4,84 | 94 |
| 11 | 13/12/2017 00:00 | 2,07 | 4,85 | 95 |
| 12 | 06/12/2017 06:00 | 2,05 | 4,69 | 136 |
| 13 | 17/11/2017 12:00 | 1,92 | 5,34 | 102 |
| 14 | 18/09/2018 20:00 | 1,91 | 5,28 | 106 |
| 15 | 01/11/2019 17:00 | 1,90 | 4,60 | 215 |

| Site HOD (Hope-Town) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rang | Date/Heure (HNE) | $H_{m0}$ (m) | $T_{02}$ (s) | Dir (°) |
| 1 | 08/09/2019 05:00 | 2,01 | 6,00 | 114 |
| 2 | 18/09/2018 20:00 | 1,51 | 5,07 | 105 |
| 3 | 14/06/2019 08:00 | 1,17 | 4,03 | 117 |
| 4 | 25/09/2019 00:00 | 1,13 | 4,85 | 102 |
| 5 | 12/07/2019 20:00 | 1,04 | 3,97 | 139 |
| 6 | 02/06/2019 23:00 | 1,04 | 4,53 | 104 |
| 7 | 28/07/2020 19:00 | 1,04 | 4,99 | n.d. |
| 8 | 16/10/2018 00:00 | 1,01 | 3,91 | 156 |
| 9 | 30/08/2020 06:00 | 1,00 | 4,24 | n.d. |
| 10 | 15/05/2019 09:00 | 1,00 | 3,82 | 104 |
| 11 | 16/09/2020 13:00 | 1,00 | 3,97 | n.d. |
| 12 | 03/10/2018 08:00 | 0,96 | 3,61 | 115 |
| 13 | 30/09/2020 13:00 | 0,94 | 4,04 | n.d. |
| 14 | 29/06/2020 08:00 | 0,91 | 4,19 | n.d. |
| 15 | 21/05/2019 07:00 | 0,90 | 3,85 | 97 |

En comparant l'activité des tempêtes au cours des 3 automnes, la fréquence des événements majeurs semble diminuer au regard des données pour les deux sites. Très peu de grosses vagues ont été mesurées au cours des mois de décembre 2018 et 2019 en comparaison du mois de décembre 2017. Toutefois ces trois années de données ne sont pas suffisantes pour dégager une tendance significative, et pourraient refléter uniquement une variabilité interannuelle. Malgré une saison des glaces réduites lors des deux derniers hivers, il n'y a pas eu d'événement majeur de tempête en plein hiver.

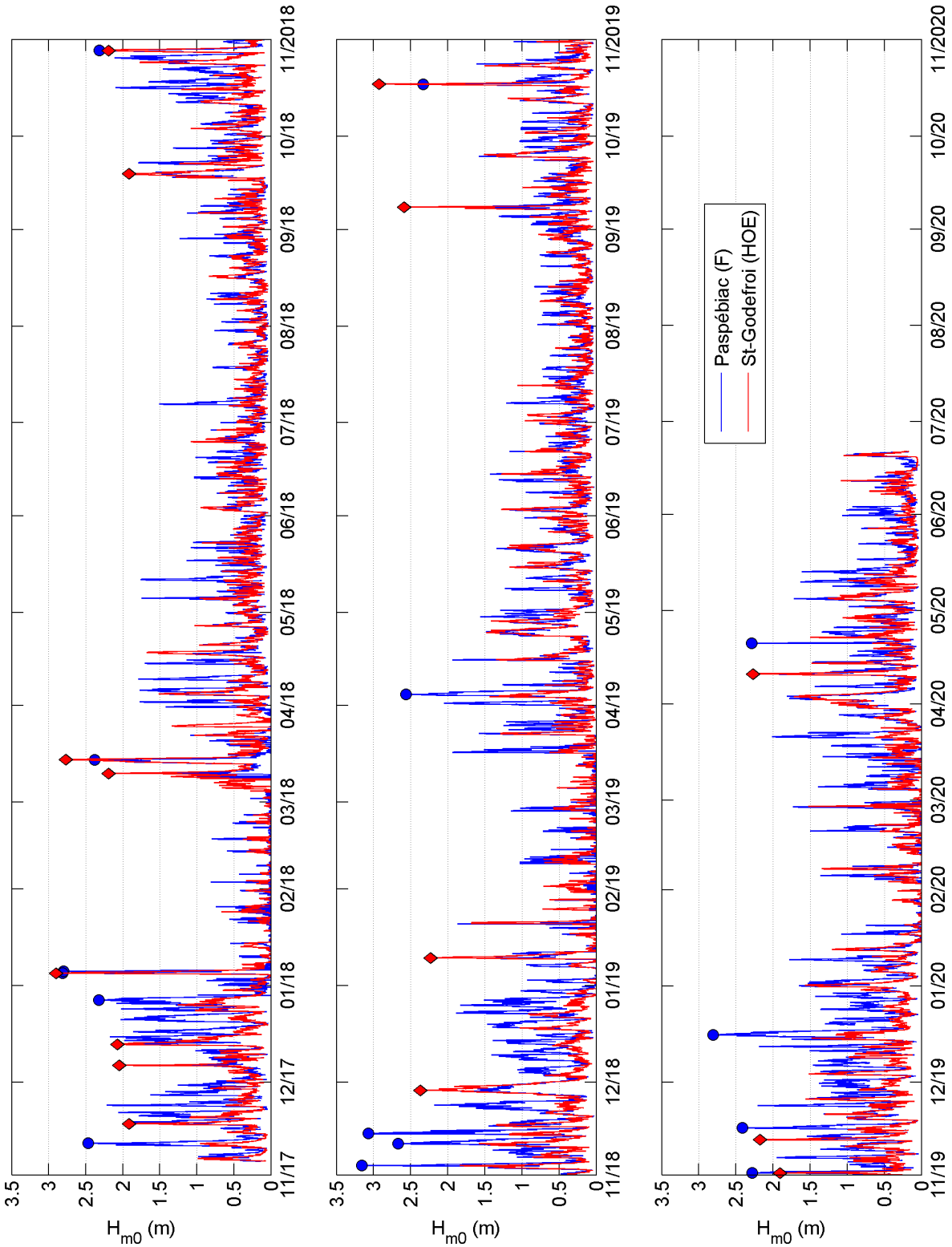



*Figure 39. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées aux sites de Paspébiac (bleu) et de St-Godefroi (rouge). Les 15 plus fortes tempêtes durant les 32 mois du projet sont indiquées avec des cercles (F) et des losanges (HOE).*

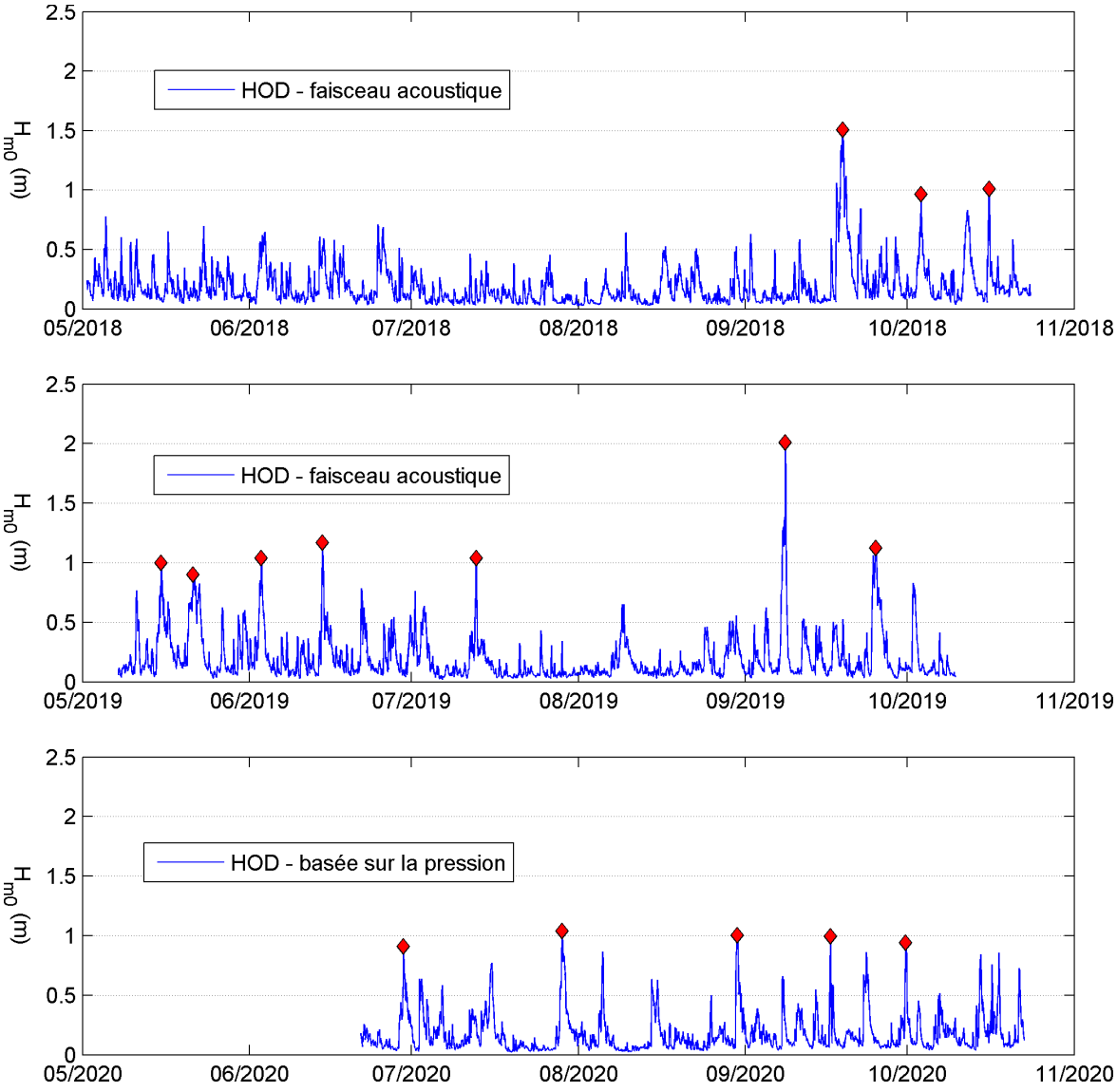



*Figure 40. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées chaque été devant la plage de Hope Town (HOD). Les 15 plus forts événements sont indiqués avec des losanges rouges.*

La série temporelle des hauteurs de vagues mesurées au site de Hope Town (HOD) et les 15 principales tempêtes sont présentées à la Figure 40. L'été 2020, les données ont été calculées à partir du capteur de pression de l'instrument et ont été réajustées avec un facteur de correction. Sans surprise, au cours de l'été les vagues ne dépassent que très rarement le mètre devant la plage de Hope Town, et c'est seulement à partir de septembre que les vagues peuvent atteindre 2 m environ. La tempête du 8 septembre 2019 a généré des vagues très élevées qui dépassent d'un facteur 2 les vagues généralement observées l'été. Malheureusement la plupart des tempêtes automnales n'ont pu être enregistrées à ce site, mais en utilisant les données du site HOE, il est possible de considérer que des vagues de la même importance que lors de cette tempête du 8 septembre 2019 ont déferlé sur la plage de Hope-Town au cours des mois d'octobre/novembre 2018 et 2019 notamment.

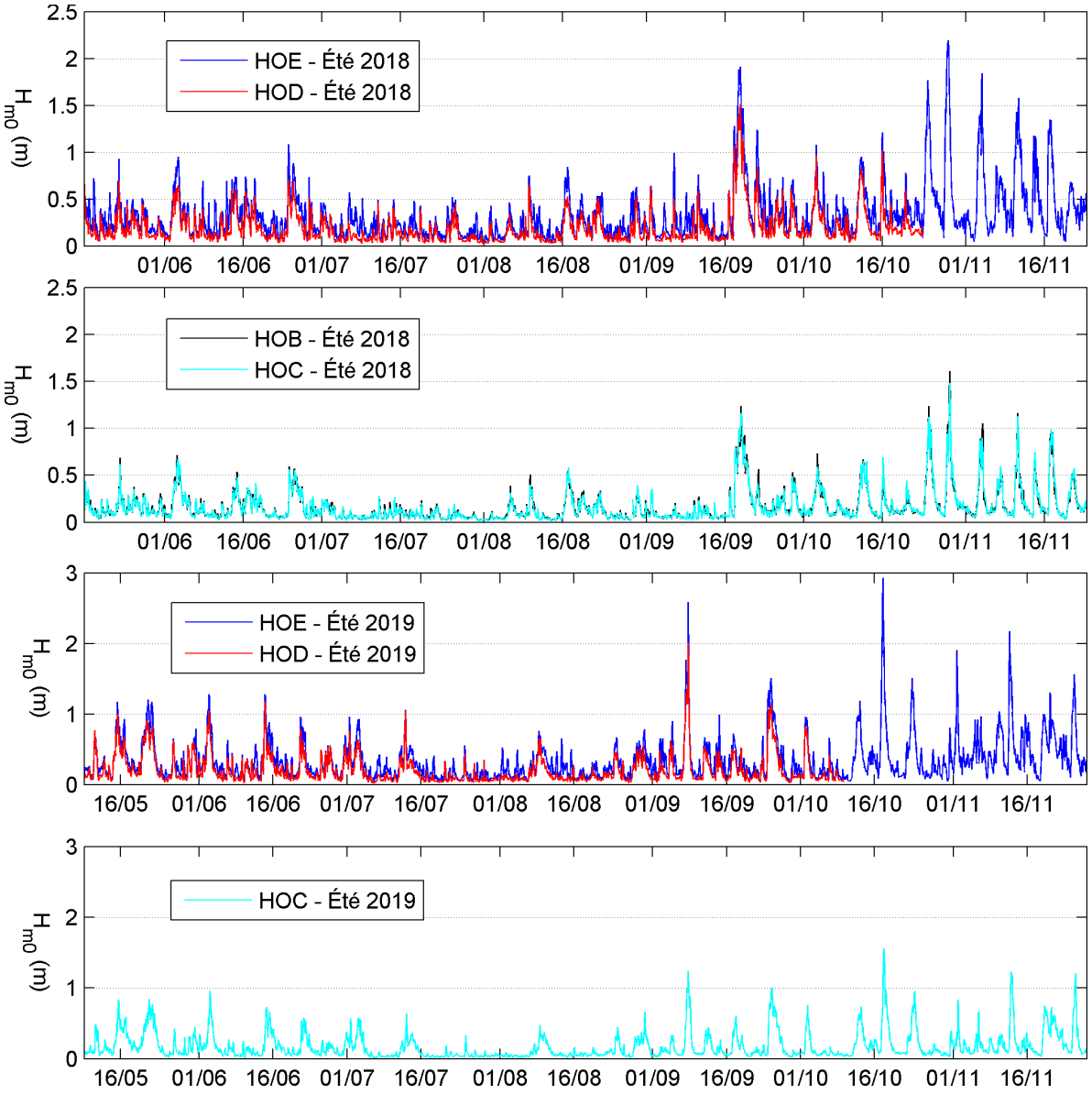



*Figure 41. Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées lors des étés 2018 et 2019 aux sites de de St-Godefroi (HOE), de Hope Town HOD) et directement sur la plage à épis (HOB et HOC). À noter que l'été 2019, seulement l'instrument HOC a fonctionné.*

Enfin, les séries temporelles des hauteurs de vagues enregistrées l'été au niveau de la plage de Hope Town (HOB et HOC) sont présentées à la Figure 41. Pour chacun des étés, ces données sont comparées avec celles obtenues un peu plus au large, aux sites HOD et HOE. L'atténuation des vagues du large vers la côte est bien visible sur ces graphiques. Les données obtenues en HOB sont similaires à celles de HOC, bien que les plus fortes tempêtes les vagues sont un peu moins hautes à en HOC qu'en HOB (Figure 42). Cela a l'avantage de nous fournir des données en cas de bris ou perte d'un des deux instruments (voir ci-dessous). L'automne 2018 a connu de nombreuses tempêtes qui se sont succédées rapidement générant des vagues supérieures à 1 m directement au pied de la plage de Hope Town. Lors de l'été 2019, un des instruments (HOB) n'a pas fonctionné et seules les

données de HOC sont disponibles. Au cours de cet été, les vagues n'ont jamais dépassé 1 m de hauteur, c'est seulement à l'automne 2019 que des vagues supérieures à 1 m ont déferlé, notamment lors de la tempête du 17 octobre 2019, où les vagues mesuraient 2,92 m en HOE et 1,55 m en HOC. Dans l'ensemble, la taille des vagues mesurées sur la plage semble être réduite d'un facteur 2 par rapport à ce qui est mesuré au large (HOE) lors d'événements de tempêtes.

Les caractéristiques des cinq sites sont résumées par la Figure 43, qui illustre les vagues enregistrées aux cinq différents sites durant la tempête d'est du 19 septembre 2018 et la tempête d'ouest du 23 septembre 2018. La tempête d'est est fortement ressentie aux cinq sites avec les vagues les plus fortes à St-Godefroi (HOE). Par contre, la tempête d'ouest est nettement moins ressentie à Hope Town et St-Godefroi qu'à Paspébiac (F). La différence est particulièrement marquée entre le site F et les sites en bas de la plage (HOB et HOC), ces derniers ayant 80% des hauteurs de vagues mesurées au site F lors de la tempête d'est, mais seulement 30 % lors de la tempête d'ouest.

Lors de la tempête d'est les sites en bas de la plage (HOB et HOC) ont jusqu'à 65 % des hauteurs des vagues du site au large HOE, alors que lors de la tempête d'ouest ce n'est plus que 30 % à cause des hauts fonds devant l'embouchure du chenal de la lagune (Figure 43). Les vagues à HOB et HOC sont aussi modulées par la marée avec une diminution à chaque marée basse, notamment lors du pic de la tempête d'est. Cela illustre l'importance des niveaux d'eau pour l'énergie des vagues atteignant la côte. On peut aussi remarquer sur cette Figure 43 les données intermittentes de direction au site F (trait magenta du 3$^{e}$ panneau) à cause de la difficulté de mesurer à 34 m de profondeur les directions des vagues courtes (< 3 s) ou très petites.

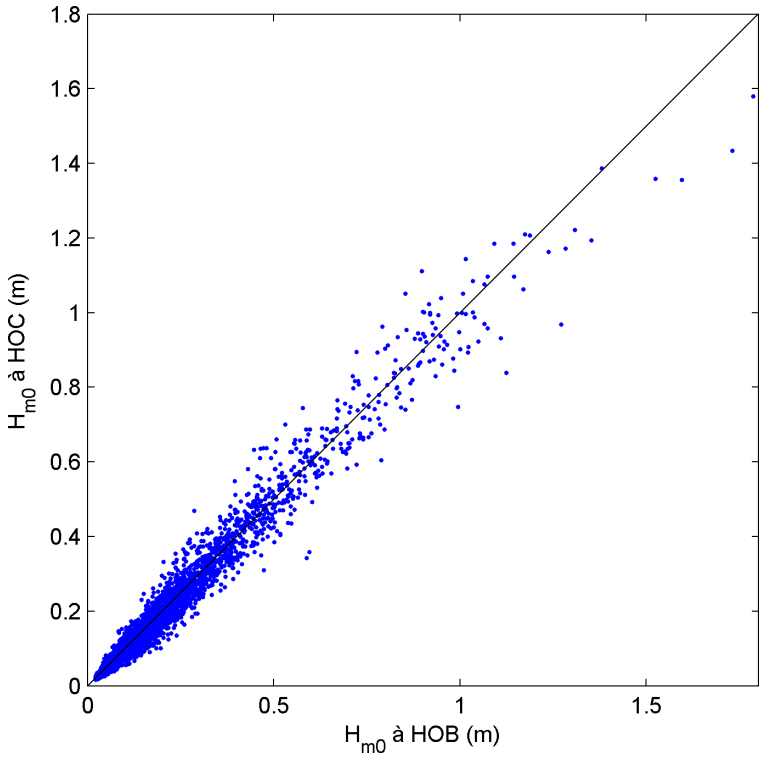



*Figure 42. Comparaison des hauteurs de vagues mesurées au sites HOB et HOC sur la plage de la flèche littorale de Hope Town entre mai et novembre 2018.*

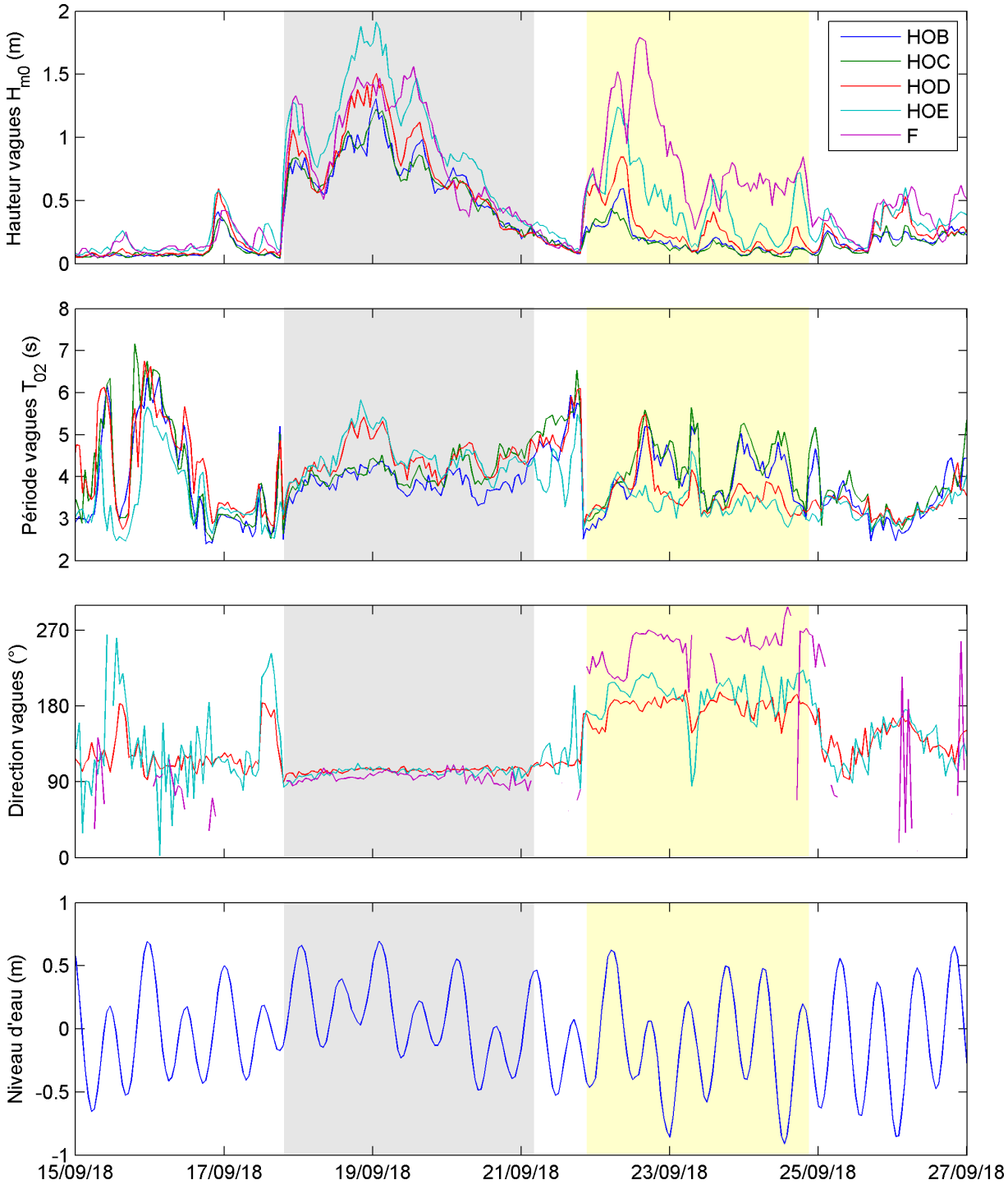



*Figure 43. Séries temporelles comparant les vagues enregistrées aux cinq sites durant deux événements de tempêtes en septembre 2018. La tempête d'est est mise en évidence en gris clair et la tempête d'ouest est mise en évidence en jaune pâle.*

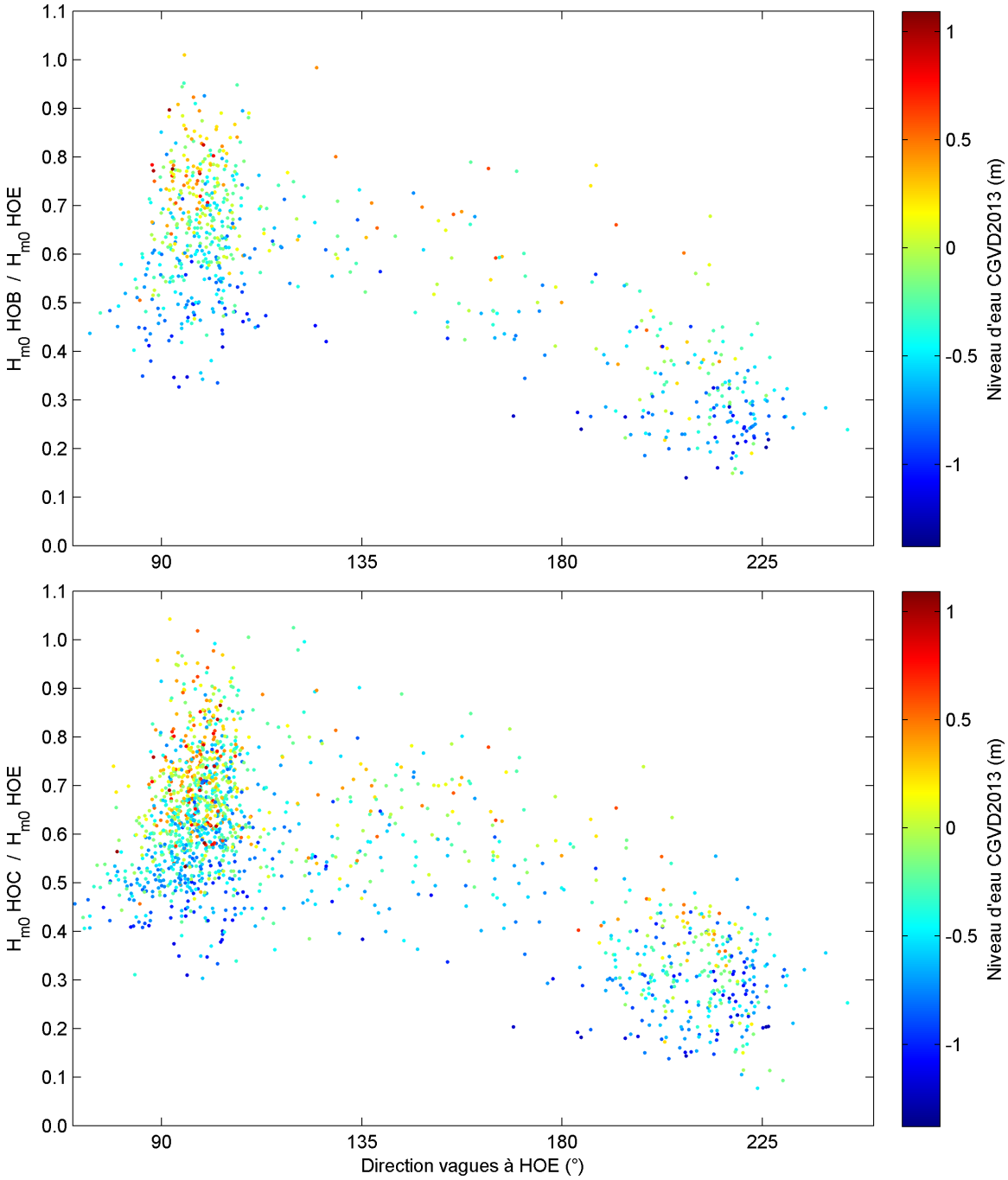



*Figure 44. Relation entre le rapport des hauteurs de vagues en bas de plage (HOB ou HOC) et au large (HOE) selon la direction des vagues au large (HOE) et le niveau d'eau (représenté par la couleur). Seules les données avec les vagues supérieurs à 0,5 m au large (HOE) sont représentées.*

La Figure 44 présente le rapport des hauteurs de vagues entre le bas de plage (HOB et HOC) et le large (HOE) selon la direction des vagues et le niveau d'eau (CGVD2013). Le rapport entre les hauteurs de vagues à HOB et les vagues au large à HOE (*HratioB*) et le rapport entre les hauteurs de vagues à HOC et les vagues au large à HOE (*HratioC*) sont

*Tableau 14. Régressions linéaires multiples pour prédire les rapports $H_{m0_HOB}$ / $H_{m0_HOE}$ (HratioB) et $H_{m0_HOC}$ / $H_{m0_HOE}$ (HratioC) à partir de la direction des vagues au large ($Dir_{HOE}$), le niveau d'eau et la période des vagues au large ($T_{02_HOE}$). Seulement les données avec les vagues supérieurs à 0,5 m au large (HOE) sont utilisées.*

| Variable prédite | Variables | Coefficient | Coefficient standardisé | p | $R^2$ ajusté |
|---|---|---|---|---|---|
| HratioB | constante | 0,9361 ±0,0111 | | 0 | 0,685 |
| | $Niveau_{CGVD2013}$ (m) | 0,1579 ±0,0091 | 0,3808 | 1,58e-56 | |
| | $Dir_{HOE}$ (°) | -0,002465 ±0,000080 | -0,6200 | 1,81e-132 | |
| HratioC | constante | 0,9138 ±0,0085 | | 0 | 0,570 |
| | $Niveau_{CGVD2013}$ (m) | 0,1228 ±0,0067 | 0,3077 | 4,05e-68 | |
| | $Dir_{HOE}$ (°) | -0,002437 ±0,000064 | -0,6345 | 5,90e-224 | |
| HratioC | constante | 0,7345 ±0,0181 | | 0 | 0,601 |
| | $Niveau_{CGVD2013}$ (m) | 0,1148 ±0,0065 | 0,2866 | 6,97e-64 | |
| | $Dir_{HOE}$ (°) | -0,002195 ±0,000066 | -0,5715 | 1,06e-185 | |
| | $T_{02_HOE}$ (s) | 0,03504 ±0,00314 | 0,1896 | 7,35e-28 | |

maximaux pour les vagues venant de l'est (direction 90° à 110°) et diminue progressivement quand la provenance des vagues tourne vers le sud et le sud-ouest, suggérant une atténuation plus importante de la hauteur des vagues dans cette direction. Les rapports *HratioB* et *HratioC* dépendent aussi du niveau d'eau : les vagues sont moins atténuées lors des niveaux d'eau plus élevés (gradation de la couleur pour une même direction).

Des modèles de régression linéaires multiples ont été calculés pour explorer l'influence combinée de la direction des vagues et du niveau d'eau sur *HratioB* et *HratioC* (Tableau 14). Le modèle de régression pour *HratioB* explique 68,5 % de la variance totale, alors que le modèle de régression pour *HratioC* explique 57,0 % de la variance totale. Le paramètre dominant est la direction des vagues dont l'influence est environ le double de celle du niveau d'eau (voir les coefficients standardisés, Tableau 14). Toutefois, la direction des vagues arrive seulement à expliquer 55,1 % de la variance de *HratioB* et 48,0 % de la variance de *HratioC*. Les coefficients sont similaires pour les deux modèles, surtout le coefficient pour la direction.

En théorie, la période des vagues est un des paramètres déterminant l'interaction des vagues avec le fond (dissipation, réfraction et déferlement). L'ajout de la période des vagues au large (site HOE) n'améliore pas significativement le modèle pour *HratioB* ($R^2$ ajusté passe de 0,685 à 0,690, pas inclus dans le Tableau 14). Le modèle pour *HratioC* est plus amélioré par l'ajout de la période, avec un coefficient de régression $R^2$ ajusté passant de 0,570 à

0,601 (Tableau 14). Cela peut s'expliquer par la présence d'un peu plus de hauts-fonds devant HOC que devant HOB.

Les relations du Tableau 14 peuvent être utilisées comme première approximation pour estimer les vagues atteignant la plage à partir des vagues du larges. Toutefois, un bon modèle spectral des vagues devrait donner des meilleurs résultats.

# 5 COURANTS ET GLACE DE MER

## 5.1 Courants mesurés au large

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 roses des courants présentées aux Figure 45 et Figure 46 font ressortir les directions dominantes en surface et au fond. Contrairement aux roses des vagues qui indiquaient la provenance des vagues, les roses de courants illustrent les directions vers lesquelles les courants sont dirigés.

Au site de Paspébiac, les courants sont orientés selon l'axe est-ouest, en fonction de la propagation de l'onde de marée. Ces courants de marée sont élevés à Paspébiac, avec une plus forte intensité et fréquence à marée montante. Cette anisotropie dans l'intensité et la fréquence des courants à marées montante et descendante, notamment observable au fond de la colonne d'eau, est due à la propagation de l'onde de marée M2 à l'intérieur de la baie des Chaleurs. Le relèvement de la bathymétrie proche de la côte produit de forts courants à marée montante. À noter qu'au site F, les courants et les vagues sont orientés dans les mêmes directions.

Au site de St-Godefroi (HOE), les courants en surface sont orientés selon le trait de côte et sont représentatifs également des courants de marée. Ces courants sont orientés sur l'axe ENE – OSO. Leur intensité est inférieure à celle des courants mesurés en surface à Paspébiac, peut-être à cause de la plus faible profondeur (10 m au lieu de 33 m) et la proximité de la côte. Les courants dirigés vers l'ENE sont un peu plus fréquents que ceux dirigés vers l'OSO. Au fond de la colonne d'eau, les courants de marée descendante sont un peu plus orientés vers le nord-est. Les courants mesurés au fond ne dépassent guère les 30 cm/s.

Devant la plage de Hope Town (HOD), les courants de surface à marée descendante sont dirigés vers le nord-est alors qu'à marée montante, ils sont dirigés vers l'ouest-sud-ouest, soit directement vers la plage à épis. Au fond, les courants dirigés vers le nord-est sont très peu fréquents, seule la direction ouest-sud-ouest prédomine, avec des courants inférieurs à 15 cm/s. Cette asymétrie des courants près du fond peut contribuer à la dérive littorale des sédiments observée sur la côte en direction sud-ouest; les faibles vitesses mesurées près du fond ne suffisent pas à déplacer du sable, mais cela pourrait changer en cas de remise en suspension par les vagues de tempêtes.

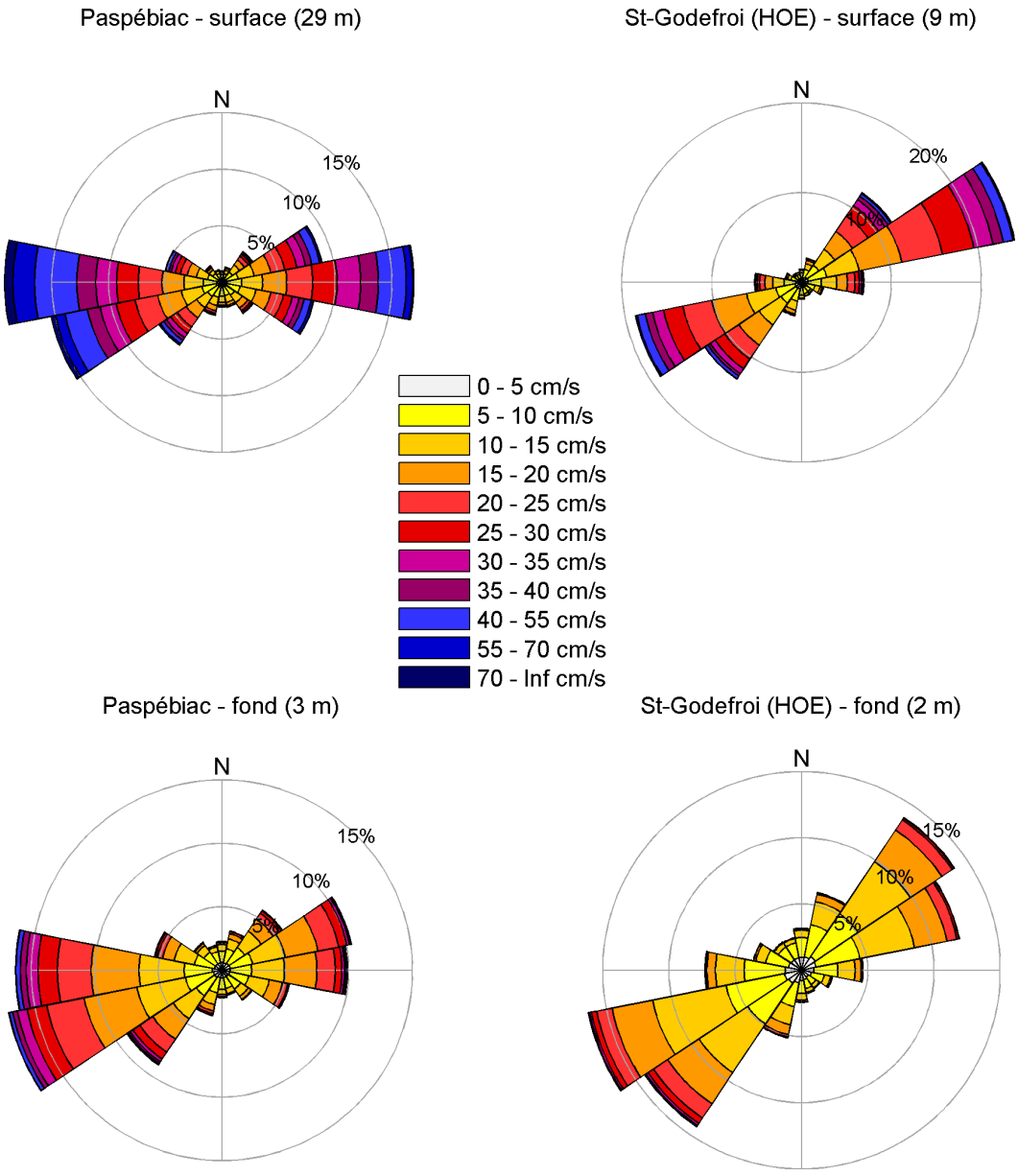



*Figure 45. Roses des courants (destination des courants) enregistrés au site de Paspébiac (F) et St-Godefroi (HOE). Les données en surface et en profondeur sont présentées.*

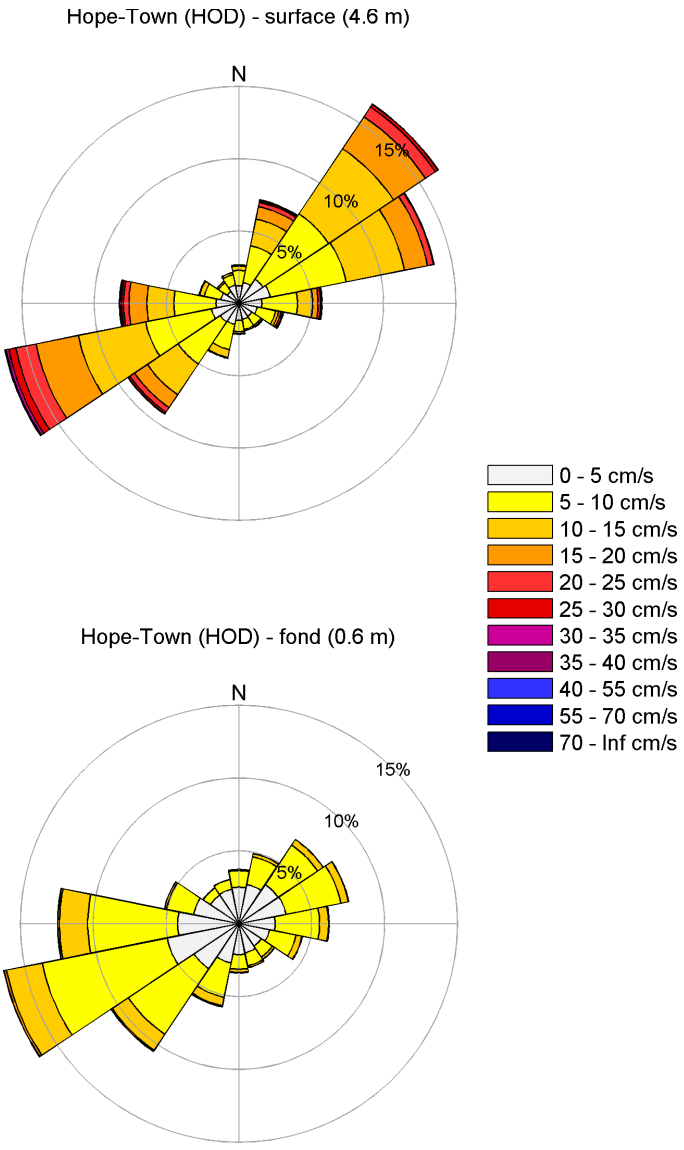



*Figure 46. Roses des courants (destination des courants) enregistrés devant la plage de Hope-Town (HOD). Les données en surface et en profondeur sont présentées.*

## 5.2 Courants mesurés dans le chenal

### *Qualité des données*

Le courantomètre installé dans la partie la plus étroite de chenal de la lagune a enregistré les courants et la turbulence à environ 45-50 cm du fond du 27 juin au 16 septembre 2019. Toutefois, des algues ou d'autres débris se sont souvent entortillés autour de la tête de mesure du courantomètre, si bien que 44% des enregistrements ne sont pas utilisables. La durée des périodes affectées va de 10 minutes à 4½ jours (Figure 47). Néanmoins il est possible d'examiner un cycle lunaire peu affecté presque complet du 18 juillet au 9 août 2019. Le contrôle de qualité a nettoyé les données pour avoir des vitesses moyennes bien

fiables, mais il faut considérer avec prudence certains pics extrêmes pour les paramètres de turbulence TKE (énergie cinétique turbulente) et $\tau_{xz}$ (contrainte de Reynolds).

***Caractéristiques des courants***

Le courantomètre a mesuré des vitesses jusqu'à 2,0 m/s vers la lagune de Hope Town et des vitesses jusqu'à 1,9 m/s vers la baie des Chaleurs (Figure 47). Les courants suivent bien le cycle tidal mixte surtout semi-diurne de la baie (Figure 48). Le courant de jusant en direction de la baie a une durée plus longue que le courant de flot, à cause du lent drainage des zones très peu profondes de la lagune à marée descendante. De plus, la lagune reçoit un apport net par les rivières Paspébiac et St-Godefroi, qui doit être évacué par le chenal de la lagune. Cela est confirmé par le courant résiduel de 0,00027 m/s vers la baie.

Les niveaux d'eau mesurés durant un cycle tidal par le courantomètre sont plus irréguliers que les courants, ne suivant pas directement les niveaux mesurés au cours d'un cycle de marée, par le marégraphe de Hope Town au site HOB devant la plage à épis (Figure 48). Le niveau d'eau atteint souvent un premier maximum lors de la marée montante, avant de chuter brutalement de 0,3-0,4 m, puis de remonter pour atteindre le maximum de marée haute. Cette chute brutale se produit lors de l'inversion des courants, c'est-à-dire quand l'eau commence à entrer dans la lagune. Jusqu'à cette inversion, la lagune continue à se vider lentement, même si la marée dans la baie remonte déjà. Le delta de jusant et la barre d'embouchure ralentissent l'écoulement en sortie du chenal, si bien que l'eau s'accumule et le niveau d'eau remonte dans le chenal même si le courant dans le chenal est encore dirigé vers la baie. C'est seulement quand les courants de marée deviennent supérieurs au flux de sortie du chenal que le courant s'inverse et que les masses d'eau accumulées s'étalent rapidement dans la lagune.

L'énergie cinétique turbulence TKE près du fond est un proxy pour la contrainte de cisaillement du fond (Stapleton et Huntley, 1995), c'est-à-dire la force qu'exerce le courant pour entrainer des particules sédimentaires. La TKE atteint des valeurs de 50 $J/m^3$, lors des plus fortes marées de vive eau, mais est seulement de 15 $J/m^3$ lors des marées de morte eau, ces valeurs correspondent à une contrainte de cisaillement du fond de 8,5 $N/m^2$ et de 2,9 $N/m^2$ respectivement. La contrainte de cisaillement du fond est 5 à 10 % plus faible lors du courant de jusant comparé au courant de flot, car ce dernier est plus court mais aussi plus intense. Cela explique que le premier mouillage installé le 6 juin 2019 ait été trainé plus de 100 m vers la lagune (cf. section 2.6). Cela suggère aussi que le déplacement du deuxième mouillage, dont les résultats sont présentés ici, ait aussi été de quelques mètres vers l'intérieur de la lagune (cf. section 2.6). Lors de la crue printanière le courant sortant sera nettement plus important que le courant entrant.

La modélisation du transport sédimentaire au site de l'AWAC avec Sedtrans05 indique que lors des marées de morte eau les plus grandes particules transportées sont entre 0,5 et 2 mm (sable grossier), alors que lors des marées de vive eau des particules jusqu'à 9 mm (gravier fin) peuvent être transportées (Figure 48). Le sable et le gravier fin ne peuvent donc pas s'accumuler dans la partie étroite du chenal, mais sont emportés lors des marées de vive eau. Par contre, les galets qui tapissent le fond du chenal doivent être déplacés seulement lors de la crue du printemps quand le débit des rivières s'ajoute au courant de jusant sortant de la lagune.

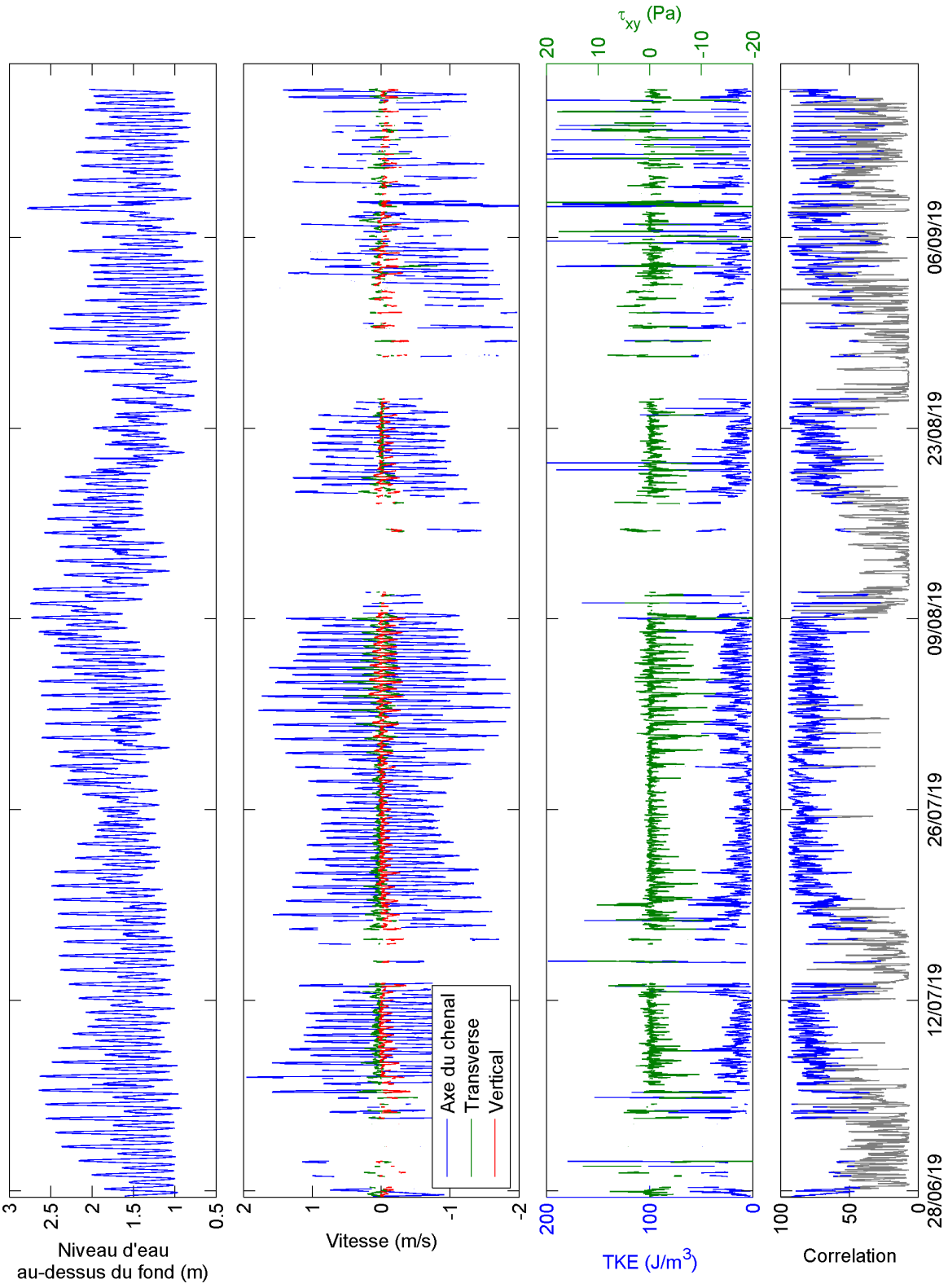



*Figure 47. Données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) en été 2019. La vitesse est positive en direction de la lagune. La corrélation des bursts considérés comme valides est en bleu, celle des bursts considérés comme mauvais est en gris.*

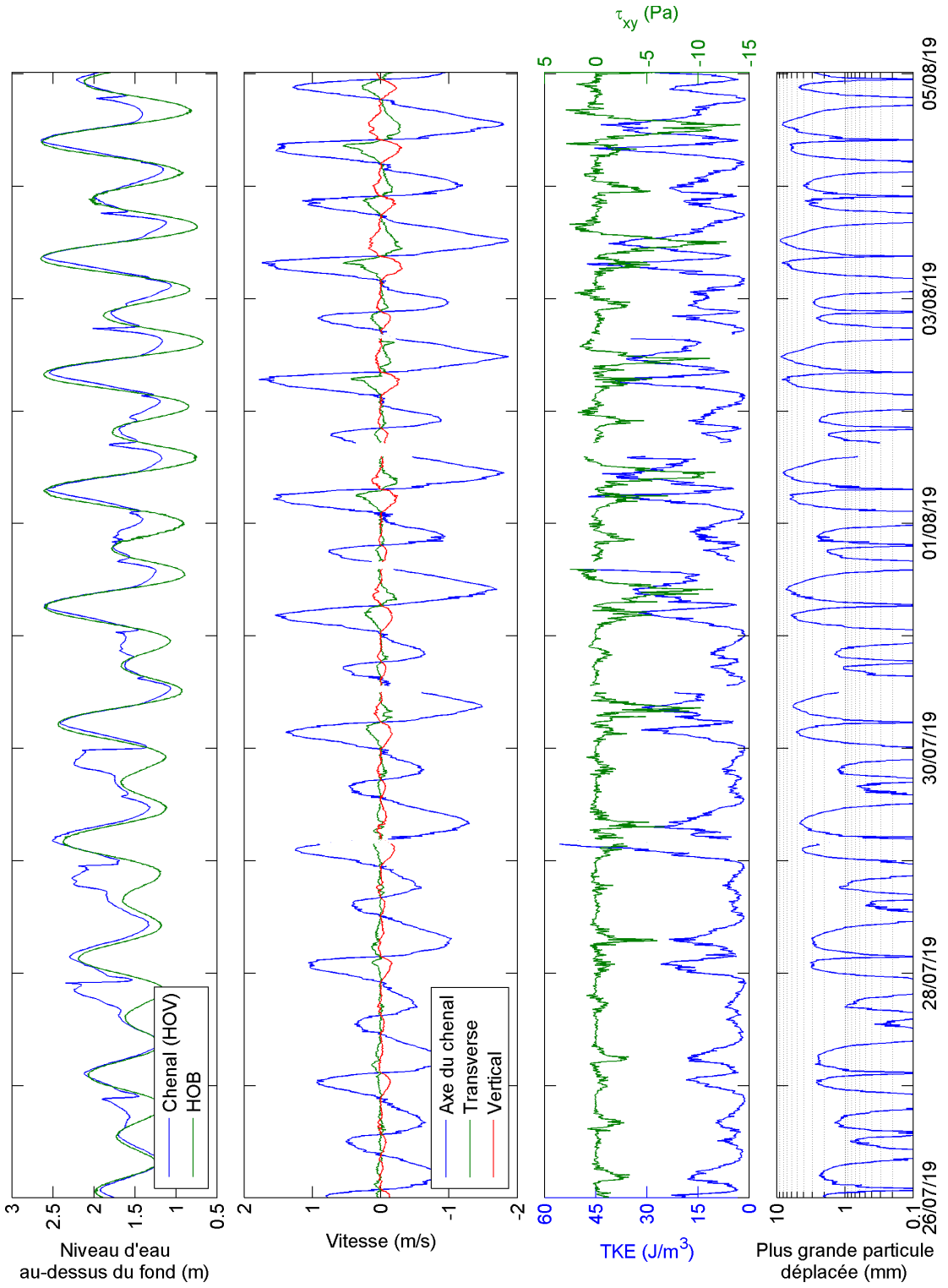



*Figure 48. Zoom dans les données du courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) en été 2019. La référence verticale du niveau d'eau devant la plage (HOB) a été ajustée pour suivre visuellement le niveau d'eau dans le chenal. La vitesse est positive en direction de la lagune. La taille de la plus grande particule de sédiment déplacée a été calculée avec Sedtrans05.*

### *Débit du chenal*

Les vitesses mesurées par le courantomètre à 45-50 cm du fond dans la partie la plus étroite du chenal ont été utilisées pour calculer le débit du chenal. Les résultats doivent être considérés avec prudence, car des erreurs dans différents paramètres (niveau d'eau par rapport à la référence vertical des profils topographiques, position du courantomètre, rugosité du lit du chenal) combinés ensemble, peuvent influencer le résultat de 10 % à 30 %. Une étude de sensibilité pour différents paramètres est d'ailleurs présentée ci-dessous après les résultats du débit du chenal.

Le débit maximal en direction de la lagune atteint 87 $m^3/s$ lors des marées de vive eau, alors qu'il atteint seulement 30 $m^3/s$ lors de marées de morte eau et 15 $m^3/s$ pour des petites marées lors des périodes de vive eau (il existe une différence importante entre deux marées successives sauf en période de morte eau, Figures 49 et 50). Dans l'autre direction vers la baie des Chaleurs, le débit maximal atteint 65 $m^3/s$ lors des marées de vive eau, 26 $m^3/s$ lors des marées de mortes eau et pour des petites marées lors des périodes de vive eau.

Le débit cumulé a été calculé pour trois périodes avec des données valides relativement continues. Néanmoins, des intervalles jusqu'à 6 heures de données invalides dans la série temporelle de débit ont été interpolés. Les trois périodes utilisées pour le calcul du débit cumulé ont été sélectionnées de façon à ce que les maximums et les miniums soient bien représentés et que l'interpolation ait seulement compléter des intervalles de données manquantes où la pente de la variation du débit était relativement constante.

Le débit cumulé informe d'une part du volume d'eau qui entre et sort de la lagune de Hope Town à chaque marée. Lors des marées de vive eau, ce volume peut atteindre 900 000 à 950 000 $m^3$, alors que lors des marées de morte eau cela peut être aussi peu que 350 000 $m^3$. Enfin lors des petites marées ce volume peut s'abaisser jusqu'à 200 000 $m^3$.

D'autre part le débit cumulé révèle bien le débit résiduel, c'est-à-dire le débit net sans l'effet de la marée. Pour la période du 6 au 11 juillet 2019, le débit net moyen était de 4,4 $m^3/s$ vers la baie des Chaleurs. Pour la période du 18 juillet au 9 août 2019, le débit net moyen était de 3,8 $m^3/s$ vers la baie des Chaleurs. Pour la période du 18 au 24 août 2019, le débit net moyen était de 2,1 $m^3/s$ vers la baie des Chaleurs. Ce débit net sortant correspond en fait au débit total du bassin versant de la lagune de Hope Town, soit principalement les rivières Paspébiac et Saint-Godefroi.

Il n'y a pas de données de stations hydrométriques pour ces deux rivières. Néanmoins, leurs débits mensuels moyens ont été estimé pour un autre projet (Neumeier et Joly, 2019). Les débits moyens de la rivières Paspébiac et Saint-Godefroi seraient respectivement 3,40 $m^3/s$ et 1,76 $m^3/s$ en juin, 1,87 $m^3/s$ et 0,97 $m^3/s$ en juillet, et 1,17 $m^3/s$ et 0,61 $m^3/s$ en août. Le débit mensuel moyen du bassin versant de la lagune de Hope Town seraient donc de 5,16 $m^3/s$ en juin, 2,84 $m^3/s$ en juillet et 1,78 $m^3/s$ en août.

Les valeurs de débit moyen net calculées à partir des données du courantomètre sont 20% à 50 % plus élevées que l'estimation des débits mensuels moyens de Neumeier et Joly

(2019). Il peut y avoir plusieurs explications à cet écart : (1) Peut-être que la méthode simplifiée utilisée ici ne représente pas aussi bien le débit dans les deux directions, car le courant au site du courantomètre est légèrement plus faible que la moyenne de la section lors du flot et légèrement plus élevé que la moyenne de la section lors du jusant. (2) Peut-être que l'estimation des débits mensuels moyens de Neumeier et Joly (2019) est sous-estimée (l'estimation était basée sur le débit de la Grande-Rivière et le rapport des aires des bassins versant). (3) Peut-être l'année 2019 était plus pluvieuse que la moyenne, mais cela ne semble pas être le cas pour les 7 premiers mois de l'année selon les données du modèle de réanalyse ERA5.

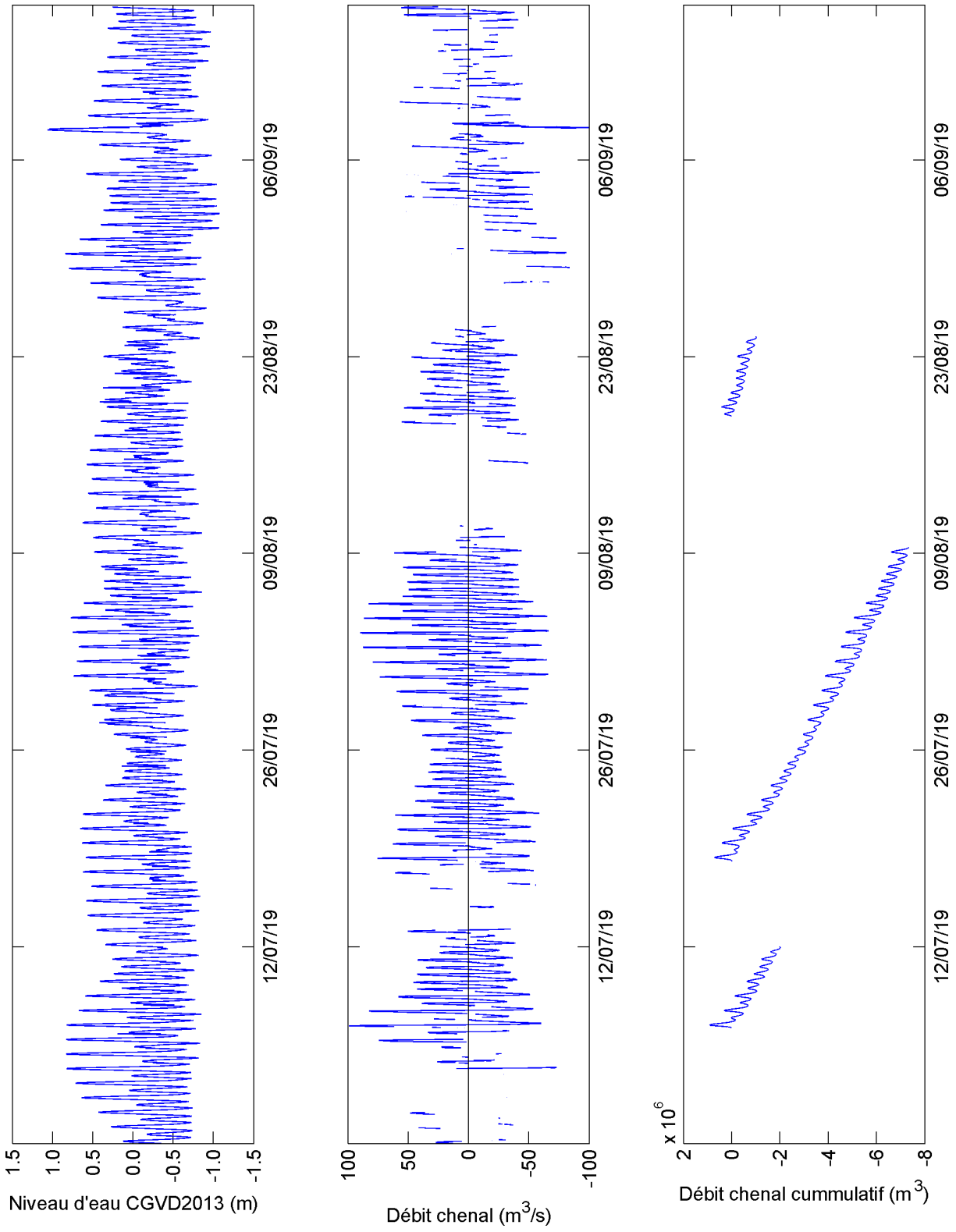



*Figure 49. Débit du chenal calculé pour la section transversale 3 et une granulométrie médiane du lit du chenal de 100 mm (débit positif vers la lagune). Le débit cumulatif a seulement été calculé pour trois périodes avec peu de données invalides.*

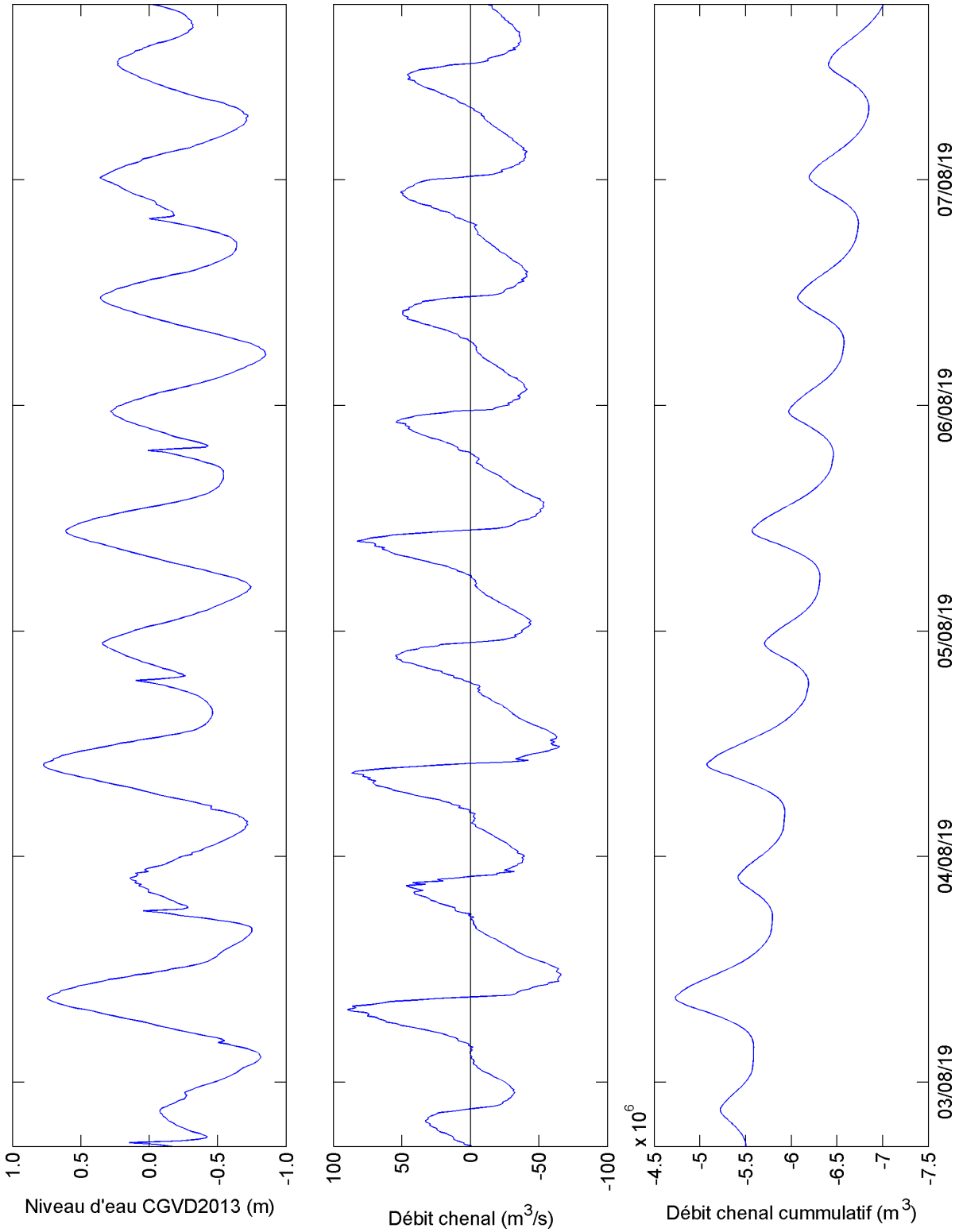



*Figure 50. Détail du débit du chenal calculé pour la section transversale 3 et une granulométrie médiane du lit du chenal de 100 mm (débit positif vers la lagune) lors des marées de vive eau au début du mois d'août 2019. Le débit cumulatif a seulement été calculé pour trois périodes avec peu de données invalides.*

Une étude de sensibilité a été effectuée pour déterminer l'influence de quatre paramètres sur le calcul du débit du chenal (Q) avec l'équation (6), à savoir la position du transect (ce qui modifie le profil de la section), la granulométrie, le niveau d'eau et la hauteur du courantomètre au-dessus du fond.

Comme le mouillage s'est déplacé plusieurs fois lors du déploiement (cf. section 2.6) et que la position exacte n'est pas connue, le débit du chenal a été calculé pour onze sections transversales du chenal autour du site d'installation du mouillage (Figure 15). Les profils topographiques de ces sections sont présentés à la Figure 16. La Figure 51 présente un détail des variations du débit Q pour ces onze sections, alors que la Figure 52 compare le débit Q des onze sections pour quatre moments (flot de vive eau, jusant de vie eau, flot moyen, jusant moyen). Les variations du débit entre les sections 1 à 9 sont relativement faibles, entre -4% et +5 % par rapport au débit de la section 3 (Figure 52). C'est seulement pour les sections 10 et 11 que le débit calculé augmente significativement (jusqu'à 20%), ce qui n'est pas étonnant car le chenal s'élargit au niveau de ces sections (Figure 15).

Les résultats ci-dessus présumaient une $D_{50}$ de 100 mm. Une augmentation de la granulométrie médiane du lit du chenal ($D_{50}$), qui détermine l'échelle de rugosité ($z_0$), fait aussi augmenter le débit. Cette augmentation du débit est plus marquée lorsque que le niveau d'eau est élevé. Toutefois, une augmentation du $D_{50}$ de 20 mm à 100 mm fait augmenter le débit seulement de 1% à 4%, et une augmentation du $D_{50}$ de 100 mm à 200 mm fait augmenter le débit seulement de 1% à 3%.

Une imprécision dans le niveau d'eau ($\Delta\zeta$) modifie naturellement le débit. Si le niveau d'eau par rapport au lit du chenal était plus bas ou plus haut que considéré dans nos calculs, le débit serait respectivement aussi moindre ou plus élevé. La différence est maximale à marée basse lorsque le niveau d'eau est très bas. La Figure 53 présente les erreurs relatives du débit en fonction des erreurs dans le niveau d'eau ($\Delta\zeta$) de -0,5 à +0,5 m. Pour une même erreur de niveau d'eau, l'erreur relative du débit sera la plus faible à marée haute et la plus grande à marée basse. Lors du maximum du flot, l'erreur relative est proche de la courbe bleu de la Figure 53. Lors du maximum du jusant, l'erreur relative est environ au premier tiers entre la courbe bleu et la courbe rouge de la Figure 53.

Une erreur dans la hauteur du courantomètre au-dessus du fond (z) influence le calcul de la vitesse de cisaillement ($u_*$) selon l'équation (5). La variation du débit est ensuite directement proportionnelle à la variation de $u_*$ (équation (6)). La hauteur du courantomètre sur la structure du mouillage est connue, mais on ne sait pas comment le mouillage reposait sur le fond (sachant que le mouillage a bougé plusieurs fois), et la hauteur au-dessus du fond (z) n'est pas connu. Pour une granulométrie médiane du lit du chenal de 100 mm, une diminution de z de 25 ou 50 mm ferait augmenter $u_*$ de 1,4 % et 2,8 %; une augmentation de z de 25 ou 50 mm ferait diminuer $u_*$ de 1,3 % et 2,4 %.

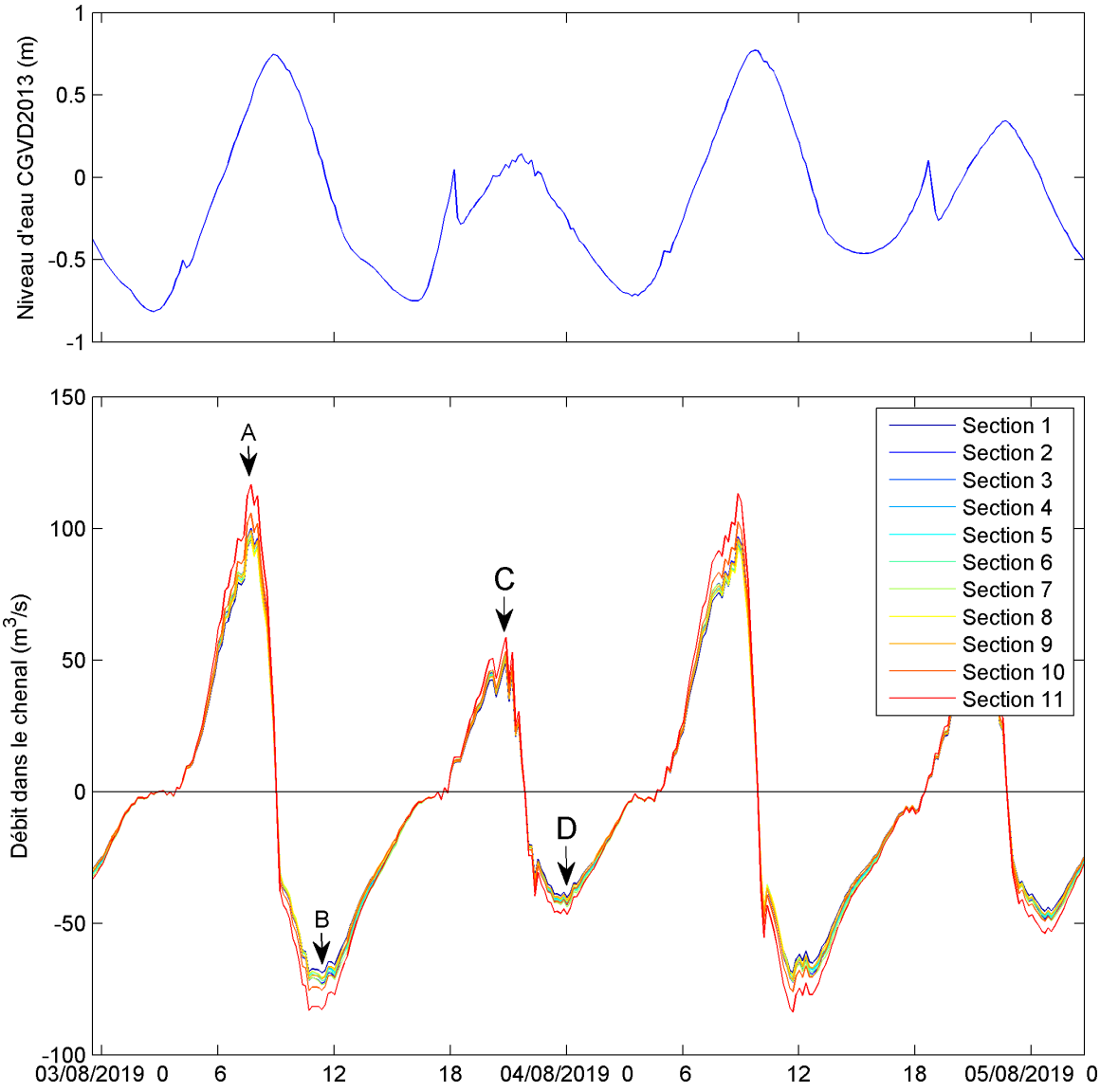



*Figure 51. Comparaison du débit Q calculé pour les onze sections présentées à la Figure 15 lors des marées de vive eau du début août 2019. Les flèches indiquent les quatre moments choisis pour illustrer à la Figure 52 la sensibilité les débits selon la section considérée.*

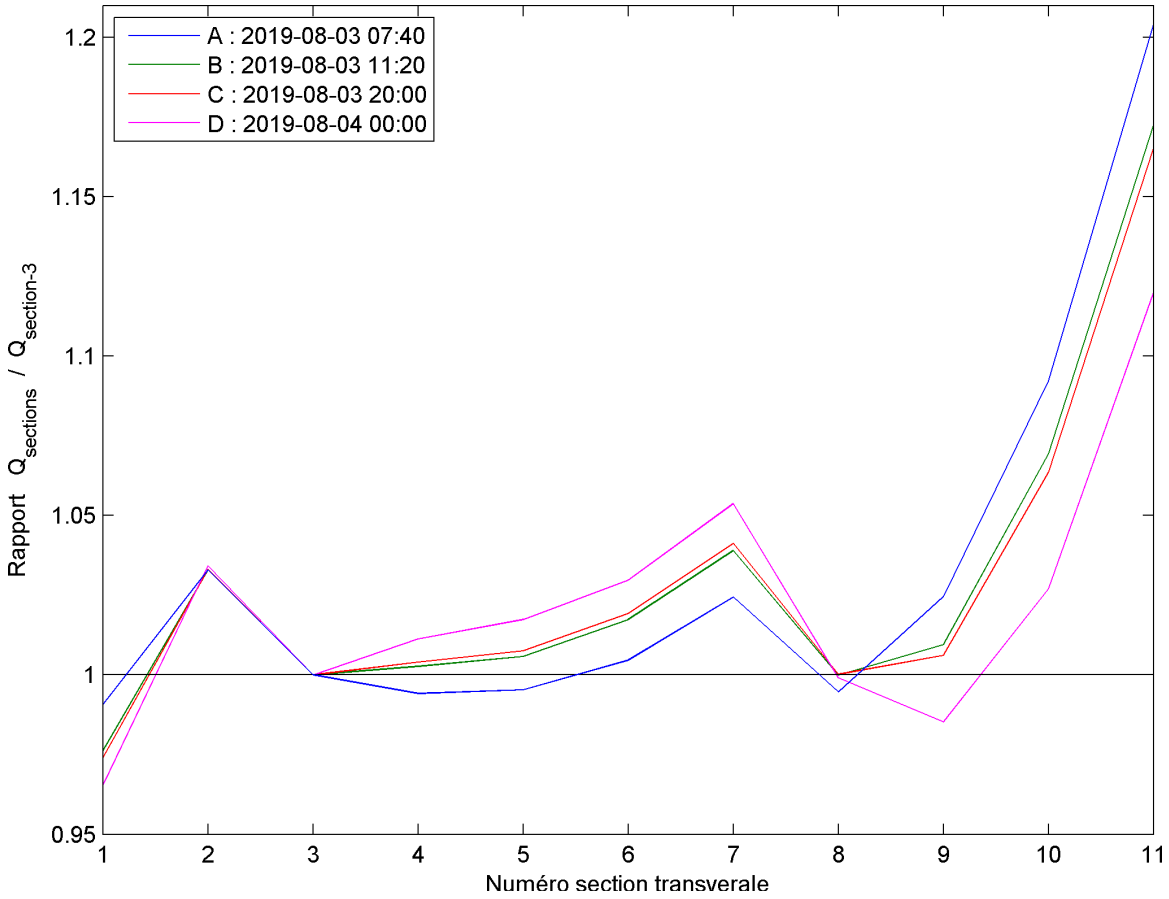



*Figure 52. Comparaison du débit (Q) calculé pour les différentes sections transversales par rapport au débit Q calculé pour la section 3 lors des quatre moments : A (flot de vive eau), B (jusant de vive eau), C (flot moyen) et D (jusant moyen). La localisation des sections est présentée à la Figure 15. La position des quatre moments A-D par rapport au cycle des marées est présentée à la Figure 51.*

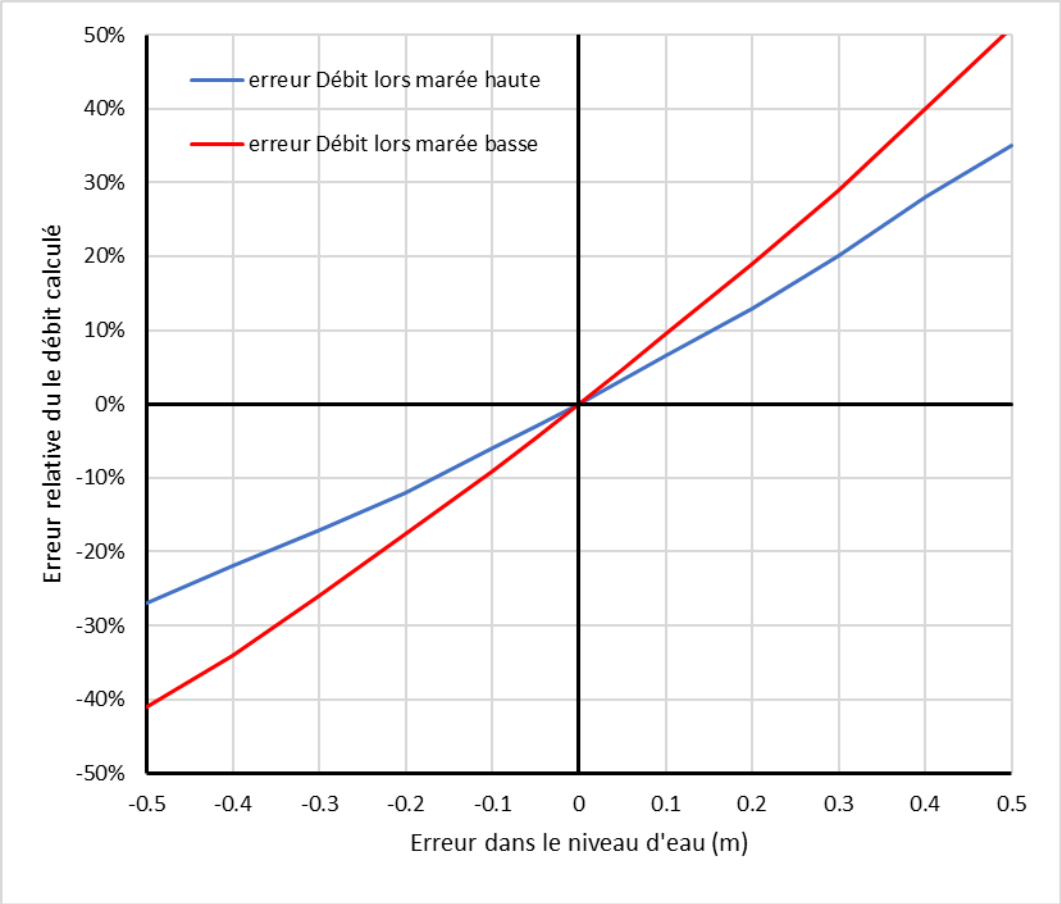



*Figure 53. Relation entre une erreur dans l'estimation du niveau d'eau et l'erreur relative induite dans le débit Q calculé pour la section transversale du chenal où le mouillage a été mis à l'eau. L'erreur relative varie en fonction du niveau d'eau, étant maximale lors de la marée basse.*

### *Vagues dans le chenal*

Le courantomètre a aussi enregistré des données de pression à partir desquelles les paramètres de vagues ont été calculés (Figure 54). Les vagues sont la plupart du temps inférieures à 0,1 m, car le site est protégé des vagues venant du large par les deux levées subaquatiques prolongeant vers le sud-est les rives du chenal et par la barre d'embouchure (banc de sable au large de l'embouchure). Néanmoins, les vagues ont pénétré dans le chenal lors de quelques événements, les plus importants étant le 8 septembre 2019 ($H_{m0}$ de 0,57 m), le 30 août 2019 (0,42 m) et le 3 juillet 2019 (0,40 m). Lors de ces événements, les hauteurs de vagues au large à HOE étaient respectivement 2,6 m, 0,8 et 0,9 m. Les données numériques de ces résultats de vagues ne sont pas transmises avec le rapport, car d'une part ces résultats de vagues sont seulement valables pour la position exacte du mouillage et d'autre part un burst de 45 secondes est trop court pour bien caractériser les vagues.

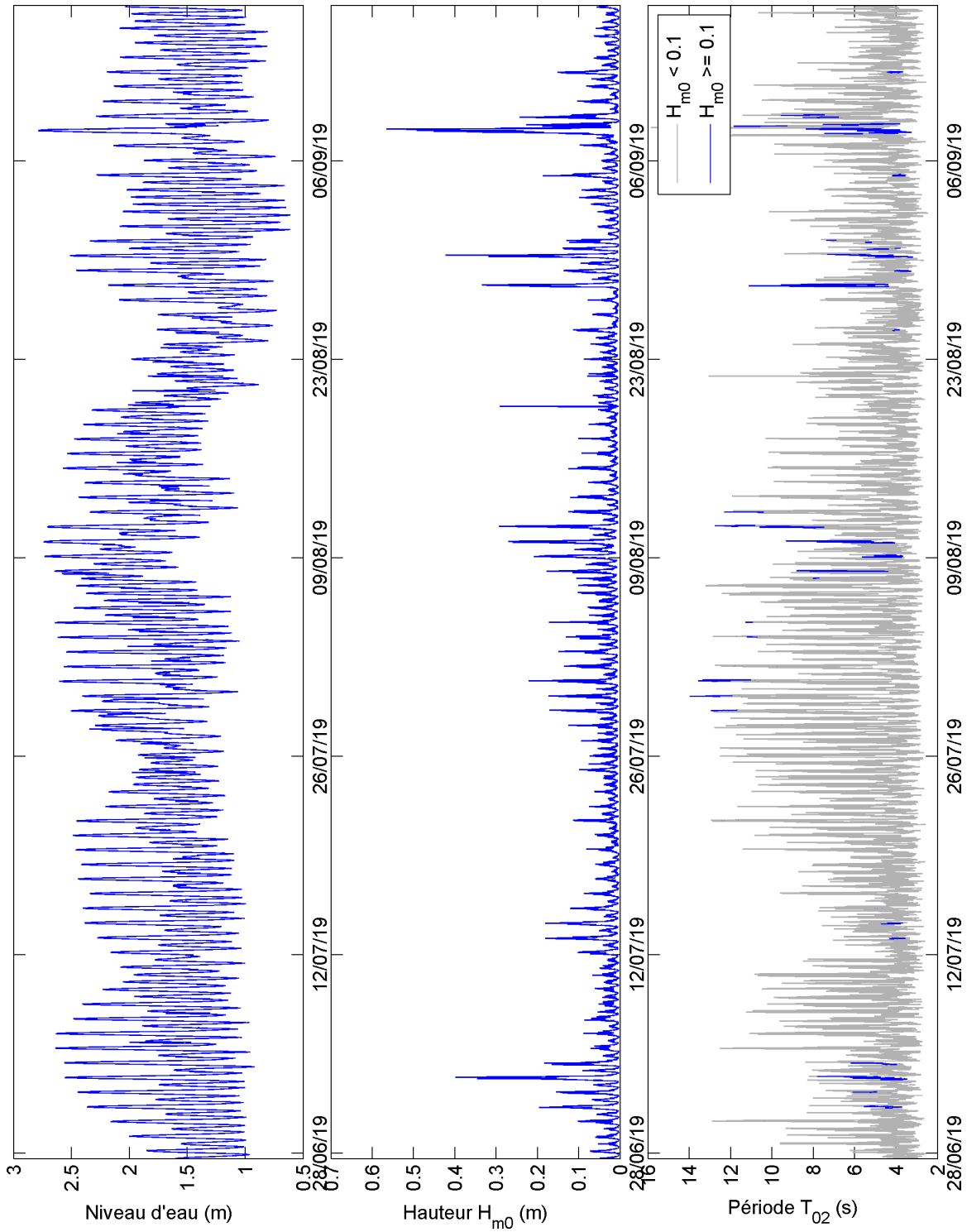



*Figure 54. Hauteurs et périodes des vagues enregistrées par le courantomètre placé dans le chenal de la lagune (HOV) à l'été 2019. Le niveau d'eau est par rapport à la position de l'instrument, qui est installé 10 cm au-dessus du fond.*

## 5.3 Glace de mer

Outre les vagues, les instruments (AWAC) installés au large aux sites de Paspébiac (F) et de St-Godefroi (HOE) peuvent détecter le passage de la glace, et ainsi quantifier dans le temps la présence des floes de glace en surface. Nous présentons ici des séries temporelles de couverture de glace, en pourcentage du temps occupé par la glace sur l'ensemble du burst (Figure 55 et Figure 56). La détermination de l'épaisseur précise de la glace de mer par les AWAC est moins fiable; ces données ne sont présentées ici mais sont incluses dans les fichiers numériques (cf. section 0).

Les deux informations les plus pertinentes à tirer de ces graphiques sont la durée de la saison de glace, ainsi que la « sévérité », à savoir si la couverture au cours de l'hiver a connu des discontinuités plus ou moins longues, c'est-à-dire par la présence d'eau libre. Au site de Paspébiac (Figure 55), la tendance temporelle est un raccourcissement de la saison hivernale des glaces au regard de l'ensemble des données. Le dernier hiver 2020, la saison des glaces a débuté plus tardivement et s'est finie plus tôt au printemps. Les périodes d'eau libre ont été plus fréquentes également par rapport aux deux hivers précédents. Toutefois cette tendance observée est biaisée par le peu de recul vis-à-vis de la courte période d'observation. En effet les données de glace disponibles sur ce même site de Paspébiac ont montré deux hivers (2016 et 2017) très réduits dans la durée de la présence de glace (Projet CC07-1).

Au site de St-Godefroi (Figure 56), la présence de la glace est en général plus faible qu'au site de Paspébiac car il y a de très nombreuses périodes d'eau libre quel que soit l'hiver considéré. À l'identique, le dernier hiver a connu une saison des glaces amputée de plusieurs semaines. Malgré cette saison des glaces très réduite lors de l'hiver 2020, et donc la présence d'eau libre permettant le développement des vagues, les données de vagues n'indiquent pas d'événement majeur (Figure 39), seulement des vagues d'environ 1,5 m (HOE). Cela est probablement dû à une couverture partielle de glace dans le golfe du Saint-Laurent, même quand l'est de la baie des Chaleurs est dégagée, qui diminue le fetch effectif. Ainsi, la temporalité de la saison des tempêtes et des glaces offre une fenêtre à fort potentiel de transport sédimentaire accru du mois de septembre au mois de janvier inclusivement.

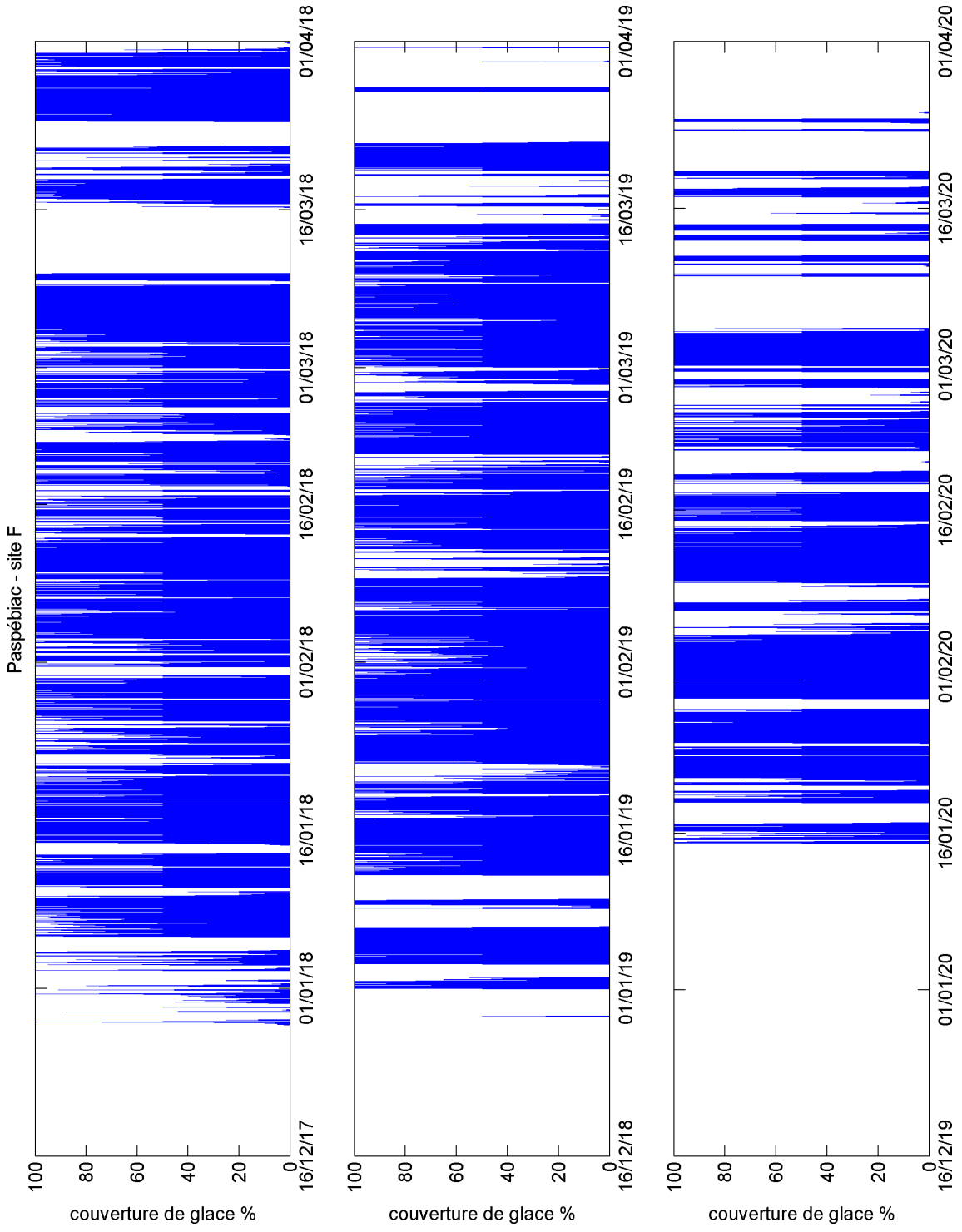



*Figure 55. Couverture de glace au Site de Paspébiac (F) durant les 32 mois du projet.*

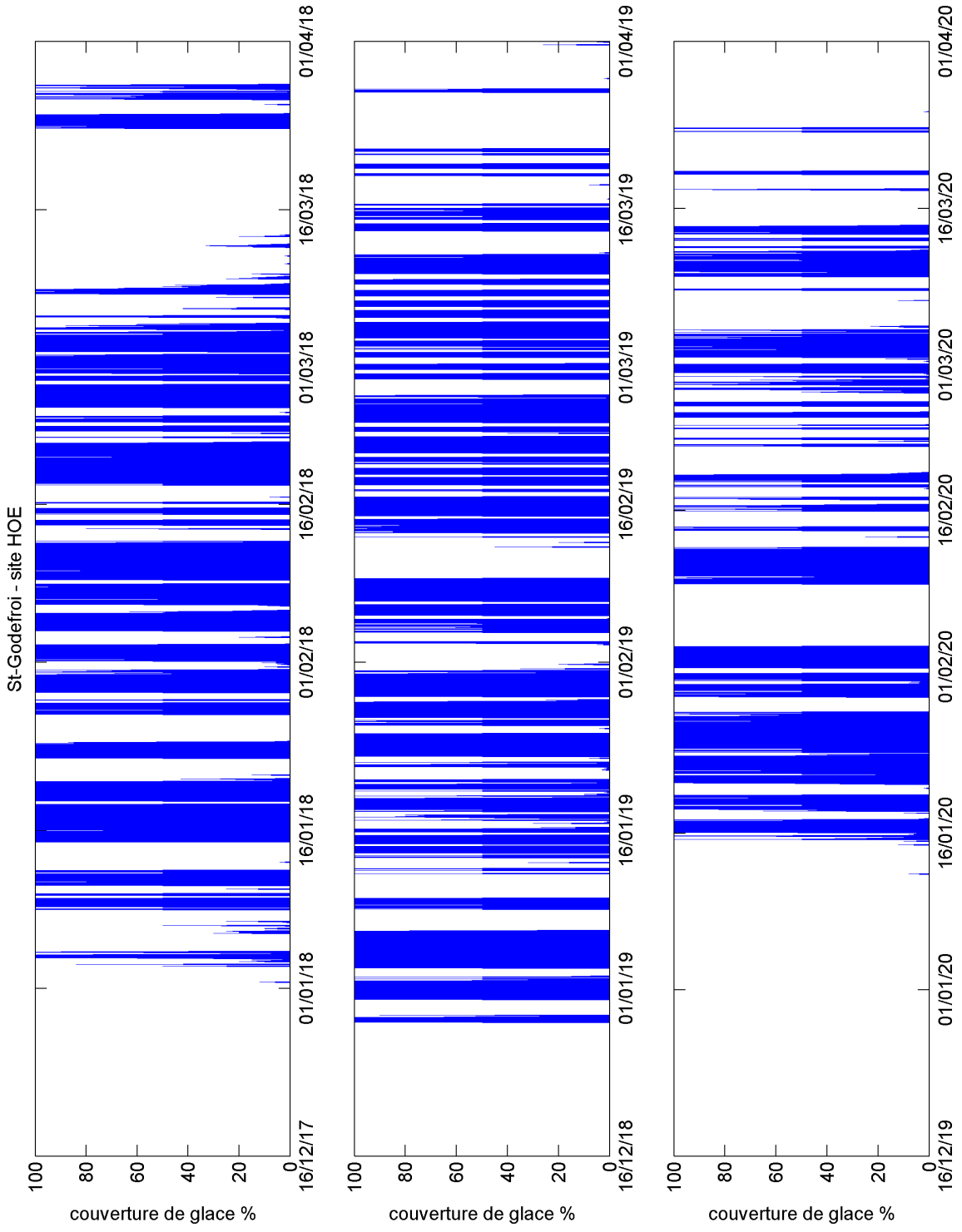



*Figure 56. Couverture de glace au Site de St-Godefroi (HOE) durant les 32 mois du projet*

# 6 VARIATIONS DU TRAIT DE CÔTE DE 1963 À 2018

L'interprétation visuelle des images aériennes et les observations de terrain ont permis de distinguer les différents types de côte du site à l'étude. Ainsi, cinq zones ont été délimitées (Figure 57, Tableau 15).

Les traits de côte historiques de 1963 à 2018 ont d'abord été tracés dans ArcGIS à partir des photographies aériennes géoréférencées, puis l'outil DSAS a permis de quantifier à long terme les mouvements du trait de côte des cinq zones à l'étude (Figure 58 et Figure 59, Tableau 15). Pour ce faire, un taux de régression linéaire (TRL) moyen a été utilisé; il est exprimé en m/an et calculé sur chaque transect de chaque zone (Figure 57 et Figure 58). Sur la Figure 59 est aussi indiquée la précision estimée des vitesses de mouvement du trait de côte, précision qui a été calculée en assumant une précision de 1 m pour la position du trait de côte tracé sur chaque photographie aérienne.

*Tableau 15. Taux de régression linéaire (TRL) moyen ± intervalle de confiance à 95% (LCI95) pour les cinq zones côtières. L'indicateur géomorphologique du trait de côte utilisé pour chaque zone et le nombre de transects en érosion (Er.) ou en accrétion (Ac.) selon le TRL sont également indiqués.*

| Zone | Indicateur géomorphologique du trait de côte | TRL moyen (m/an) | Er. | Ac. |
|---|---|---|---|---|
| 1 – Falaise rocheuse SO | Sommet du talus | -0,01 ±0,15 | 13 | 11 |
| 2 – Basse falaise meuble SO | Sommet du talus | -0,07 ±0,11 | 25 | 2 |
| 3 – Flèche littorale | Limite de végétation continue, laisses de marée ou de tempête | -0,65 ±0,18 | 28 | 0 |
| 4 – Côte aménagée | Sommet de la structure de protection | -0,08 ±0,08 | 58 | 13 |
| 5 – Falaise rocheuse NE | Sommet du talus | -0,33 ±0,09 | 50 | 0 |

Au total, DSAS a donc généré 200 transects perpendiculaires à la côte, de part et d'autre du chenal de marée (Figure 57 et Figure 58). 24 transects ont été générés dans la *Zone 1*, 27 dans la *Zone 2*, 28 dans la *Zone 3*, 71 dans la *Zone 4* et 50 dans la *Zone 5* (Figure 57, Tableau 15).

L'objectif de l'analyse DSAS est d'étudier les patrons historiques du déplacement de la côte et de les relier aux processus physiques influençant les cinq zones côtières et leurs propriétés morphosédimentologiques.

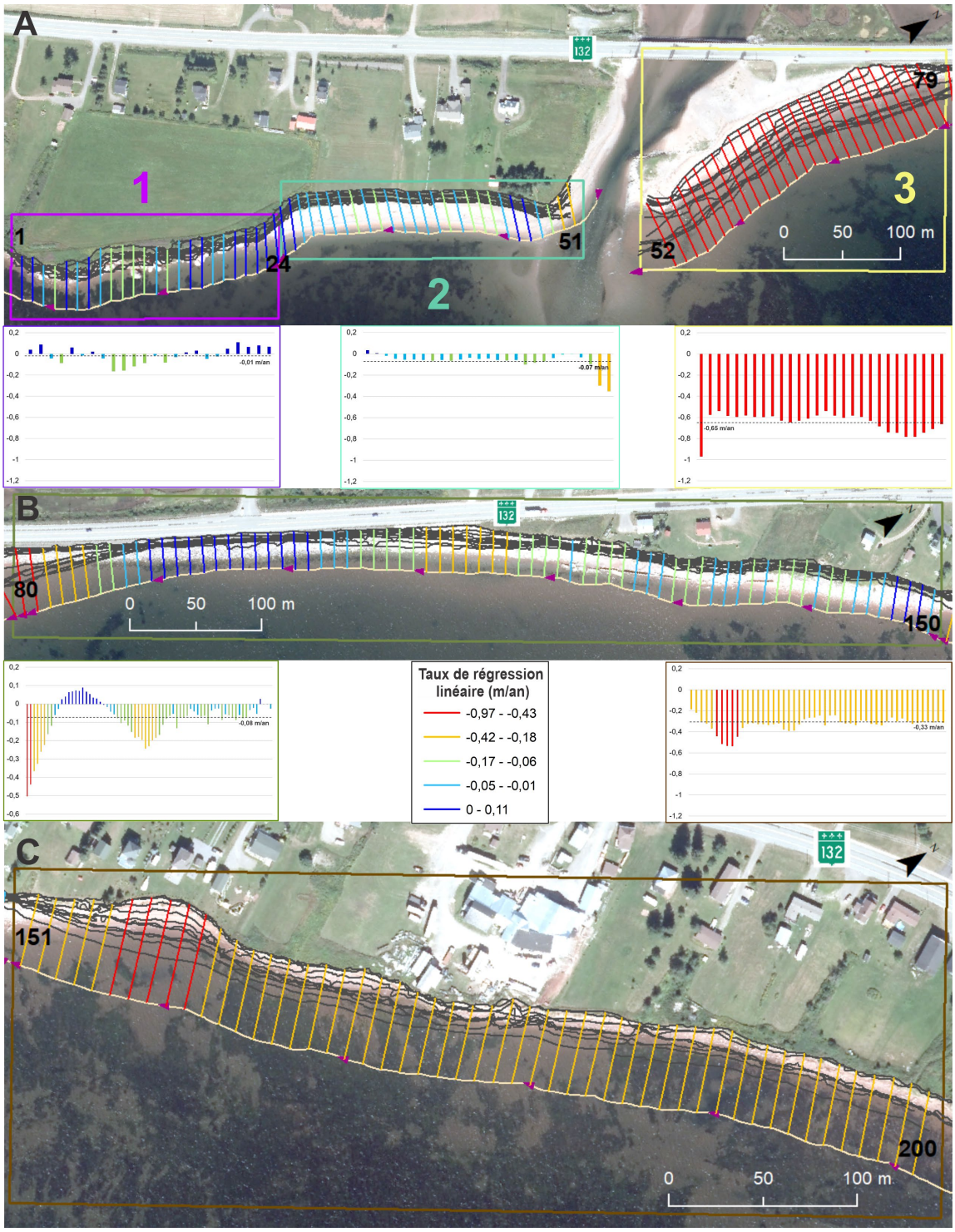



*Figure 57. Transects générés par DSAS tous les 10 m sur (A) les zones 1-3, (B) la zone 4 et (C) la zone 5. Les taux de déplacement de la côte, estimés grâce au taux de régression linéaire (TRL), sont également indiqués pour chaque transect (en m/an).*

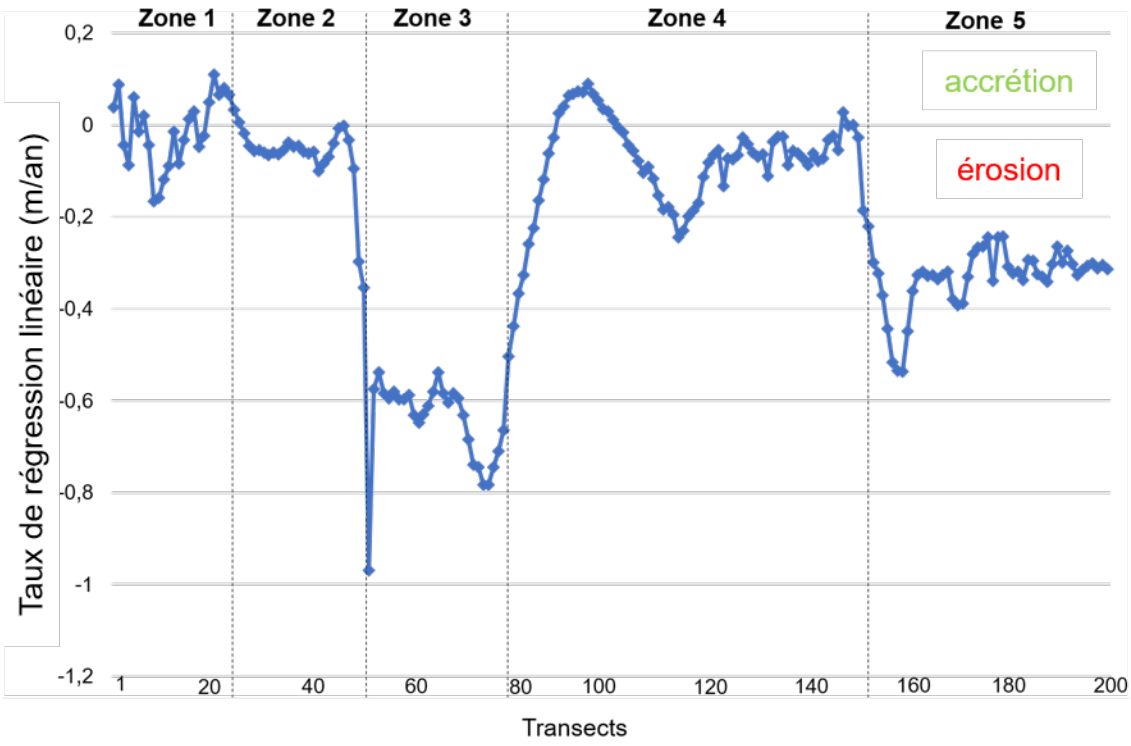



*Figure 58. Taux de déplacement de la côte entre 1963 et 2018 estimés sur chaque transect en utilisant le taux de régression linéaire (en m/an). Les cinq zones côtières sont délimitées sur le graphique entre les traitillés. Des taux de déplacement positifs indiquent une avancée alors que des taux négatifs témoignent d'un recul de la côte.*

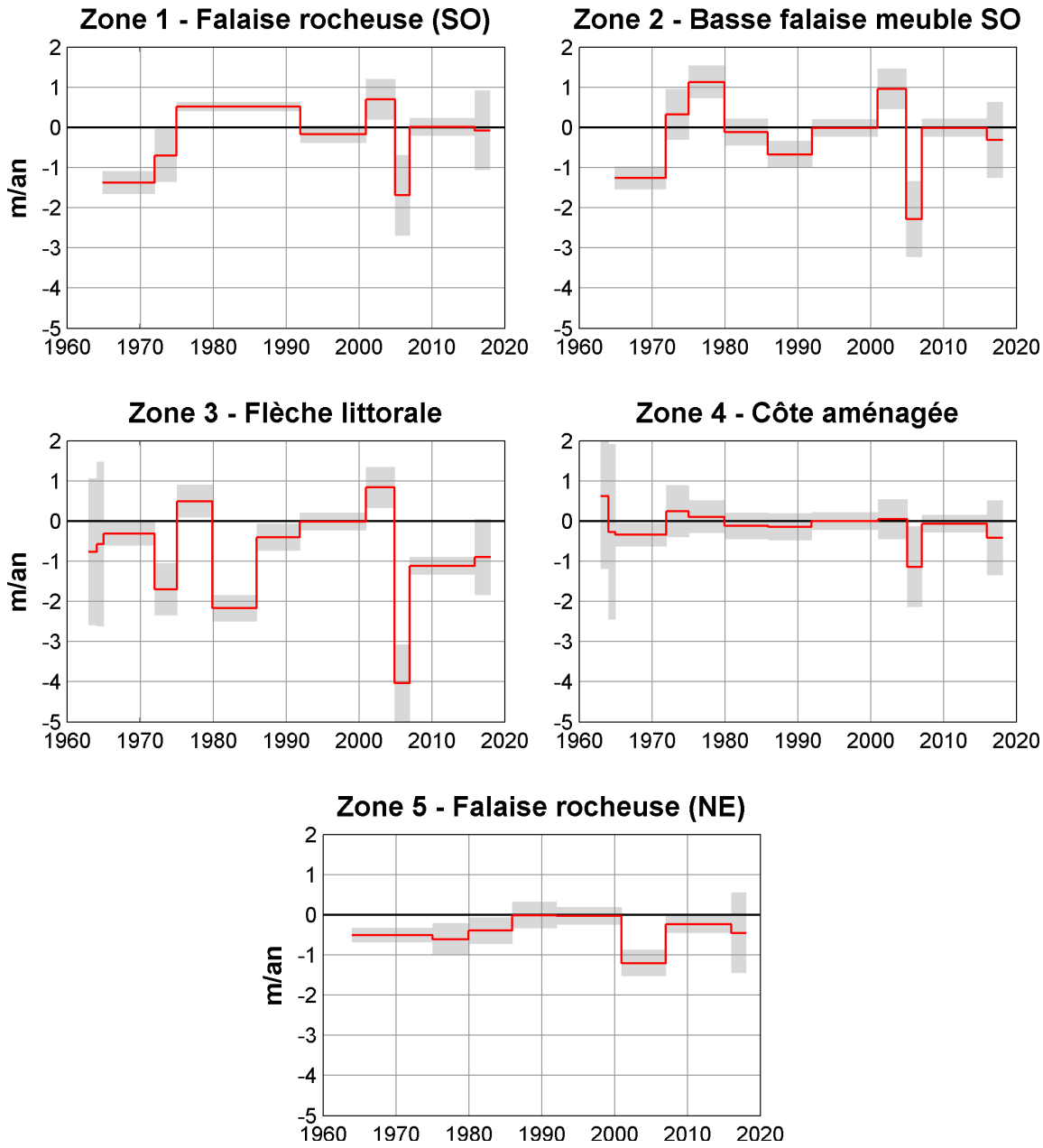



*Figure 59. Taux de déplacement moyen calculé sur les cinq zones côtières déterminé pour chaque intervalle entre photographies aériennes disponibles couvrant la période de 1963 à 2018. La précision estimée est indiquée en grisé. Les taux de recul calculés à très court terme (ex : 1963-1964, 1964-1965, 2005-2007) doivent être interprétés avec précaution car ils ont une précision moindre.*

## 6.1 Zone 1 : Falaise rocheuse SO

La falaise rocheuse du sud-ouest (*Zone 1*, Transects 1-24) se prolonge sur environ 280 m (Figure 60).

*Figure 60. Photographie de la falaise rocheuse du sud-ouest (Zone 1).*

Elle s'avère relativement stable sur la période étudiée puisque le taux de régression linéaire moyen est de -0,01±0,15 m/an entre 1963 et 2018 (Tableau 15). Les résultats générés par DSAS montrent toutefois que 54 % des transects sont en érosion (Figure 57 et Figure 58). La Figure 59 souligne que la période 1965-1972 a enregistré un recul moyen de -1,4 m/an (~ -9,8 m en 7 ans) et la période 2005-2007 accuse un retrait encore plus important (-1,7 m/an), alors que des taux positifs ont été relevés entre 1986 et 1992 (+0,5 m/an) et entre 2001 et 2005 (+0,7 m/an). Toutefois, les taux de déplacement calculés sur un très court terme doivent être considérés avec précaution dans la mesure où ils sont davantage influencés par les différentes sources d'erreur associées au géoréférencement, à l'imagerie aérienne ainsi qu'aux interprétations visuelles du trait de côte et à son traçage. Depuis 2007, le taux de recul est très faible, plafonnant à -0,006 m/an.

## 6.2 Zone 2 : Basse falaise meuble SO

La basse falaise meuble au sud-ouest (*Zone 2*, Transects 25-51) s'étend sur 250 m et possède un talus végétalisé (Figure 61). Cette portion de côte est influencée par la présence passée de la jetée ainsi que par le chenal de marée.

*Figure 61. Photographie de la falaise meuble basse du sud-ouest (Zone 2), au talus végétalisé.*

Bien que le taux de déplacement sur les 27 transects soit négatif (-0,07±11 m/an) sur la période étudiée, il reste quand même très faible, indiquant une côte plutôt stable. 93 % des transects sont toutefois en érosion (Figure 58). La période 1965-1972 a d'ailleurs enregistré un retrait moyen de -1,3 m/an (~ -8,4 m en 7 ans), alors qu'une avancée nette de 6,3 m en 14 ans a suivi cette période (Figure 59). Tout comme la Zone 1, 2005-2007 a été identifiée comme la période la plus érosive avec un taux de recul de -2,3 m/an (avec toutefois une incertitude de ±1 m/an à cause de la courte période de 2 ans). Depuis 2007, le taux de recul atteint -0,06 m/an.

Le chenal interrompt le transport littoral des sédiments et affecte l'approvisionnement sédimentaire aux plages situées en aval, ce qui explique probablement les taux de recul élevés des transects 49-51 situés le plus près de l'embouchure du chenal de marée, oscillant entre -0,42 et -0,18 m/an (Figure 57). Ces transects sont effectivement représentatifs d'une zone fortement influencée par les courants de marée (flot et jusant), les mouvements dynamiques du delta de jusant et les formes qui en résultent comme les bancs d'accumulation (Del Rio et al., 2013). Ces corps sédimentaires sont formés périodiquement par les conditions temporaires de faible énergie et les courants de marée et sont ultérieurement remodelés à la fois par les vagues et les courants (Davis et Fitzgerald, 2004). Auparavant situés au sud-ouest du chenal de marée, ils sont désormais localisés le long de la barre d'embouchure du chenal, étant donné que ce dernier s'est élargi et a migré légèrement au sud-ouest après le démantèlement de la jetée. Le chenal principal a été maintenu par les courants de marée, qui remplissent et drainent la lagune côtière, ainsi que par la jetée jusqu'à la fin des années 1960. La durée du jusant est par ailleurs plus longue à cause de la présence de bancs d'accumulation situés à l'embouchure du chenal et du

temps nécessaire pour drainer la lagune très peu profonde (Jacquaz, 1990), encourageant la déposition de sédiments et la formation temporaire de bancs de sable. Les plus hauts débits engagés à l'occasion des crues printanières et des marées de vive-eau, ainsi que des fortes vagues de tempêtes, risquent de détruire ou de remodeler ces bancs d'accumulation et ces barres de sable latérales (Davis et Fitzgerald, 2004). Il s'avère donc difficile de détecter et d'expliquer les changements morphologiques à partir des photographies aériennes prises tous les 2-5 ans sur de tels environnements dynamiques où les corps sédimentaires peuvent varier d'un mois à l'autre.

Il est par ailleurs intéressant de remarquer dans les zones 1 et 2 la position du trait de côte avant et après le démantèlement de la jetée à la fin des années 1960 : alors que la côte enregistrait des taux de déplacement négatifs entre 1965 et 1972, des valeurs positives oscillant entre 0,3 et 1,2 m/an ont été enregistrées de 1972 à 1980, c'est-à-dire une fois que les sédiments, accumulés en amont de la jetée, ont été redistribués en aval dans le sens de la dérive littorale principale. Ceci met en évidence les impacts morphosédimentaires de la jetée dans la reconfiguration côtière : comme une jetée interrompt la dérive littorale, la plage en amont est engraissée alors que celle en aval accuse un déficit sédimentaire en raison d'un apport de sable insuffisant (Davis et Fitzgerald, 2004). Après le démantèlement de la jetée, en revanche, le transport littoral n'étant plus entravé, les sédiments ont pu migrer progressivement vers la plage en aval et ont ainsi conduit à sa restauration.

### 6.3 Zone 3 : Flèche littorale

La flèche littorale (*Zone 3*, Transects 52-79) représente 13 % de la côte analysée et s'étend sur 240 m (Figure 62). Le climat local de vagues dirigeant la dérive littorale vers le sud-ouest, la flèche est ainsi normalement nourrie par l'érosion des falaises rocheuses en amont.

La Zone 3 a révélé les variations les plus importantes entre 1963 et 2018 (Figure 59); le sédiment sableux de la flèche est nettement plus mobile et les flèches littorales sont des environnements effectivement très dynamiques, puisqu'ils sont à la fois influencés par les courants de marée, les conditions de vague et les processus fluviaux. La flèche de Hope-Town a enregistré les taux de recul moyens les plus élevés sur la période étudiée (Figure 57 et Figure 58, Tableau 15), avec un TRL de - 0,65±0,18 m/an (35,8 m au total). Tous les transects de la Zone 3 ont d'ailleurs été classés en érosion, enregistrant un recul entre -0,97 et -0,43 m/an (Figure 57).

Jusqu'à la fin des années 60 environ, la jetée qui était installée dans le prolongement du chenal de marée, garantissait l'accès au quai et interrompait la dérive littorale, piégeant le sédiment sur la plage en amont. La dynamique érosive est apparue a posteriori, suite au démantèlement de cette jetée estimé à la fin des années 60. Ceci a provoqué d'importantes perturbations morphosédimentaires, le sédiment étant dès lors transporté le long de la côte

*Figure 62. Vue aérienne de la flèche littorale (Zone 3) fermant le barachois de Hope-Town (crédit photo : Bernard Audet).*

vers le sud-ouest ou vers le large. Effectivement, la Figure 59 révèle l'érosion accrue des années 1970-1980 suivant le démantèlement de la jetée, qui présentent des taux de recul parfois supérieurs à 2 m/an. Or, le taux de recul était relativement faible entre 1963 et 1972, n'excédant pas -0,39 m/an. Entre 1972 et 1986, le taux de recul moyen atteignait -1,13 m/an. Cela a pris un certain temps (quelques années) avant que les effets du démantèlement puissent être mesurés; par la suite, le taux est monté à -1,07 m/an entre 2007 et 2018.

La présence de l'enrochement de la route 132 entrave le transport littoral des sédiments depuis les falaises au nord-est (la source naturelle pour la flèche) et réduit la disponibilité sédimentaire pour la plage de la flèche littorale. La recharge de plage de 2012 et la construction coordonnée des épis étaient destinées à restaurer le budget sédimentaire de la plage, or ils ont surtout concouru à ralentir le taux de recul de la flèche sur le moyen-terme, puisque ce dernier est resté négatif sur la période 2007-2018 (Figure 59). En 2010, une jetée en gabions d'environ 70 m avait même été construite dans la position de l'ancienne jetée afin de servir d'épi terminal et de créer en amont un banc de sable artificiel. Toutefois, au fil du temps les gabions ont été défoncés à cause de l'énergie excessive des vagues à cet endroit (Figure 63). Depuis 2016, la flèche accuse un recul de -0,87 m/an.

*Figure 63. Photographie de l'état de la jetée en gabions sur la pointe sud de la flèche.*

## 6.4 Zone 4 : Côte aménagée

La portion de côte aménagée (*Zone 4,* Transects 80-150) s'étend sur plus de 700 m et représente 42 % de la côte analysée. Dans sa portion ouest, la Zone 4 comprend un enrochement massif qui fixe le trait de côte; à l'est, une falaise meuble constituée de matériel fin et vulnérable à la gélifraction (Fraser et al., 2014), est protégée par les reliques d'un mur de protection en béton d'environ 160 m de long, situé 10-15 m devant le pied actuel de la falaise (Genivar, 2009). Ce mur est aujourd'hui partiellement effondré sur la zone intertidale à cause du sapement constant par les vagues et de processus d'affouillement (Figure 64 et Figure 65).

*Figure 64. Photographies de la côte aménagée (Zone 4) montrant l'enrochement de la route 132 et le mur de protection en béton aujourd'hui partiellement effondré au pied de la falaise.*

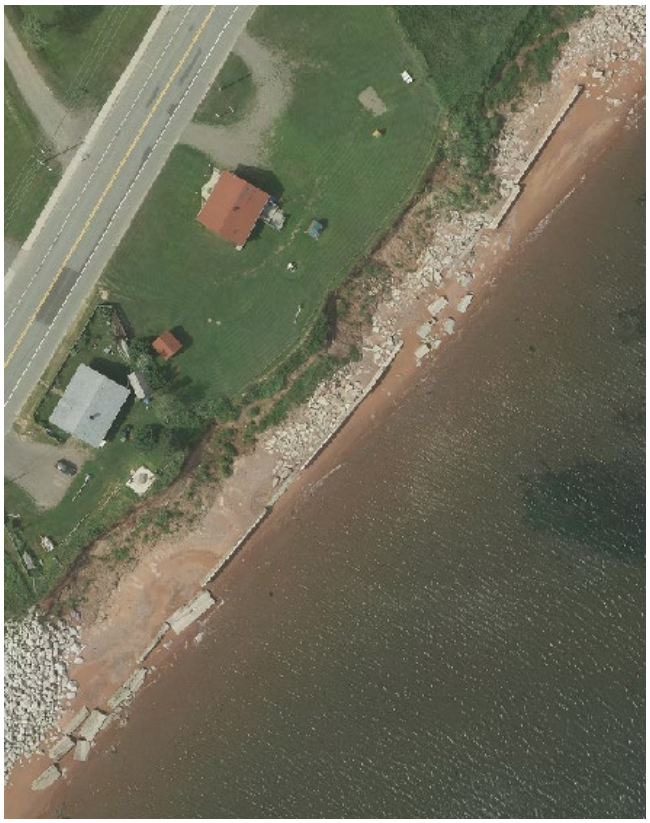


*Figure 65. Vue aérienne de la fin de l'enrochement prolongé à l'est par le mur de protection en béton, partiellement effondré sur la zone intertidale (image aérienne de 2017, largeur de l'image = 115 m).*

Les résultats de l'analyse DSAS montrent que la côte aménagée est relativement stable sur le long terme, affichant un taux de recul moyen de -0,08±0,08 m/an entre 1963 et 2018, bien que 82 % des transects accusent des valeurs négatives (Figure 57 et Figure 58). Les transects 80-85 situés à l'est de la flèche littorale (Figure 57) indiquent les taux de recul les plus élevés, oscillant entre -0,97 et -0,18 m/an; cette érosion accrue s'est produite quand l'enrochement était moins étendu, puisque cette section de côte n'était pas protégée dans les premières années couvertes par cette étude. En effet, l'enrochement n'a été étendu à cette portion de côte que lorsque l'érosion côtière a commencé à exposer la route 132. De plus, cette érosion très localisée témoigne probablement d'un effet de bout typique de l'extrémité des aménagements côtiers rigides comme les enrochements : un déficit de sédiment déplacé par la dérive littorale entraîne une érosion exacerbée sur le segment de côte situé immédiatement en aval dans le sens de la dérive littorale.

Bien que l'enrochement maintienne le trait de côte dans une position statique, ce qui explique les taux de déplacement relativement faibles qui ont été estimés par DSAS, les opérations de maintenance répétées environ tous les dix ans sont néanmoins susceptibles d'influencer la linéarité du sommet de la structure de protection telle que digitalisée sur les photographies aériennes; ce biais peut expliquer les variations quelque peu aberrantes observées sur la Figure 59 pour la Zone 4. De l'érosion en arrière et au travers de la structure est aussi possible, notamment par une mauvaise imbrication des blocs qui laisse

des vides dans lesquels le sédiment peut se déposer. Roch Guevremont et Sébastien Bernier de CIMA+ avaient d'ailleurs relevé lors de leur inspection le 9 août 2018 des déficiences et des défauts de conception de la structure concernant le choix des pierres, une pente frontale trop raide ou un manque de pierres de carapaces sur le front.

L'enrochement génère une érosion passive à cause de la réflexion de l'énergie hydrodynamique. En effet, lors de tempêtes, la vélocité et la durée du retour de vague augmentent et le matériel fin est entraîné vers le large au lieu d'être remobilisé par la dérive littorale, réduisant ainsi la disponibilité sédimentaire pour les portions de côte situées en aval, dans ce cas la flèche sableuse (French, 2001; David et Fitzgerald, 2004); ceci induit un abaissement progressif de la plage en avant de la structure et une augmentation de la pente. En somme, le transport perpendiculaire à la côte domine sur ce segment de côte aménagée et la dynamique d'érosion risque de s'aggraver considérant la hausse anticipée du niveau de la mer et l'augmentation de la fréquence des événements tempétueux dans un contexte de changements climatiques (Fletcher et al., 1997; Davis et Fitzgerald, 2004; Ruest et al., 2016).

Enfin, la falaise meuble derrière le mur en béton qui s'est effondré sous l'effet constant des processus de sapement par les vagues et d'affouillement, recule probablement à un taux plus sévère que la moyenne calculée : Fraser et al. (2014) estimaient un taux de retrait entre -0,53 et -0,31 m/an.

### 6.5 Zone 5 : Falaise rocheuse NE

La falaise rocheuse située à l'extrême nord-est du site d'étude (*Zone 5*, Transects 151-200) s'étend sur 800 m. Il s'agit de falaises de grès rouge d'une hauteur de 8 à 10 m de haut (Figure 66), associées à la formation de Bonaventure et datant du Carbonifère, donc âgées de 360 à 300 millions d'années (Renaud, 2000; Genivar, 2009). De nombreuses encoches d'abrasion ainsi que des cicatrices d'érosion sont visibles le long de la côte. De plus, les plages relativement étroites en avant de ces falaises sont formées de blocs et de débris issus de l'effondrement et de l'érosion de ces falaises (Long et Xhardé, 2009).

Les transects ont révélé un taux de recul moyen de -0,33 ±0,09 m/an entre 1963 et 2018 et tous présentaient des valeurs négatives (Figure 57 et Figure 58). La falaise rocheuse de la Zone 5 a reculé à un taux atteignant -0,49 m/an entre 1964 et 1986, alors qu'elle a à peine bougé de 1986 à 2001 (-0,022 m/an, Figure 59). La période 2001-2007 a enregistré les taux de retrait les plus élevés sur la période considérée (-1,2 m/an). Depuis 2007, le taux de recul est plus faible, atteignant en moyenne -0,27 m/an.

Les falaises rocheuses sont caractérisées par des changements topographiques et morphologiques soudains, ce qui peut expliquer les fortes variations du trait de côte. En effet, la falaise rocheuse au nord-est présente plusieurs pics irréguliers dans la tendance générale de la position du trait de côte (Figure 59), probablement associés à une plus grande occurrence de fortes tempêtes occasionnant des glissements ou des effondrements. Alors que des taux de recul de l'ordre de -1,2 m/an ont été mesurés entre 2001 et 2007 par exemple, Long et Xhardé (2009) rapportaient effectivement dans ce secteur plusieurs événements survenus entre 2003 et 2006 liés à des effondrements. Ces événements

ponctuels contribuent d'une part au recul de la falaise mais représentent d'autre part des apports nets de sédiment à la dérive littorale, potentiellement disponibles pour engraisser les portions de côte en aval et notamment la flèche littorale.

*Figure 66. Photographie et vue aérienne de la falaise rocheuse NE (Zone 5) vers St-Godefroi (image aérienne de 2017, largeur de l'image = 160 m).*

# 7 MORPHODYNAMIQUE DE LA PLAGE ET VARIATIONS SAISONNIÈRES

Des relevés topographiques ont été effectués en mai, août et novembre durant trois ans avec un total de 261 profils topographiques levés (Tableau 5). Comme il serait fastidieux d'illustrer et de discuter tous ces profils, le rapport présente plutôt les modèles numériques de terrain (MNT) interpolés à partir de ces profils. Néanmoins, les données de tous les profils sont archivées dans un des fichiers numériques joints au rapport.

La Figure 67 présente la morphologie de la plage à épis et de la plage sud-ouest avec le MNT calculé à partir des données topographiques d'août 2020. La plage adjacente au sud-ouest (profils 31 à 36) est caractérisée par une pente plus raide. De plus, les profils 31 et 32 sont influencés par la dynamique du delta de jusant et la formation temporaire d'une barre de sable d'avant-côte; l'impact des épis y est probablement faible.

**Même s'il est difficile d'extraire une tendance générale claire, les résultats morphodynamiques s'accordent pour témoigner d'un ajustement saisonnier de la plage, typiquement lié aux variations saisonnières du régime hydrodynamique : une saison estivale clémente permet à l'engraissement de la plage alors que la fin de l'automne marque le début de la saison des tempêtes, de l'amaigrissement du volume de plage et de l'érosion. Il est possible d'établir une synthèse des observations sur les trois ans pour la plage à épis : en hiver, on observe surtout une érosion du bas-estran. Le pied de glace qui protège la partie supérieure de la plage en hiver pourrait jouer un rôle et expliquer les fortes variations interannuelles des volumes de sédiments de plage. Au printemps et à l'été se produit une recharge du haut-estran et de la haute-plage, au détriment d'un bas-de-plage (bas-estran et avant-plage) en érosion : les plus faibles conditions hydrodynamiques favorisent la migration de sédiment vers le haut de la plage pour former des bermes bien développés, tels que révélés par les MNT. Enfin, un rééquilibrage du profil se produit à l'automne, avec une recharge du bas-estran et de l'avant-plage, alors que le haut-estran et la haute-plage sont en érosion (tendance toutefois moins évidente en 2020) à cause de l'intensification des conditions hydrodynamiques et la multiplication des tempêtes.**

Les profils 1 et 2 sont situés le long de la levée naturelle du chenal de la lagune, qui avait été renforcée en 2010 par une jetée en gabions encore partiellement visible. C'était aussi la position de la jetée démantelée dans les années 1960. Ces deux profils sont influencés par la présence du delta de jusant et ne suivent pas forcément la dynamique de la plage à épis. Il existe une certaine variabilité entre les profils 1 à 18 couvrant la plage à épis, mais des tendances générales peuvent néanmoins être dégagées et sont décrites dans ce chapitre.

Les profils 19 à 21, qui sont situés plus au nord-est devant l'enrochement de la route 132, ne correspondent pas vraiment à des profils de plage, car le sable émerge juste aux marées basses de vive-eau extrêmes. Comme les données n'étaient pas très concluantes et l'accessibilité du site difficile, surtout par mer agitée, les profils 19 à 21 n'ont pas fait l'objet d'une attention particulière et ils ont été ignorés lors de certaines campagnes. De plus, la variabilité observée au pied de l'enrochement (Figure 68) est partiellement due à la présence de blocs de l'enrochement basculé dans la « plage » : le profil correspond au

niveau de sable entre les blocs, mais ceux-ci génèrent l'affouillement ou de l'accumulation très localement.

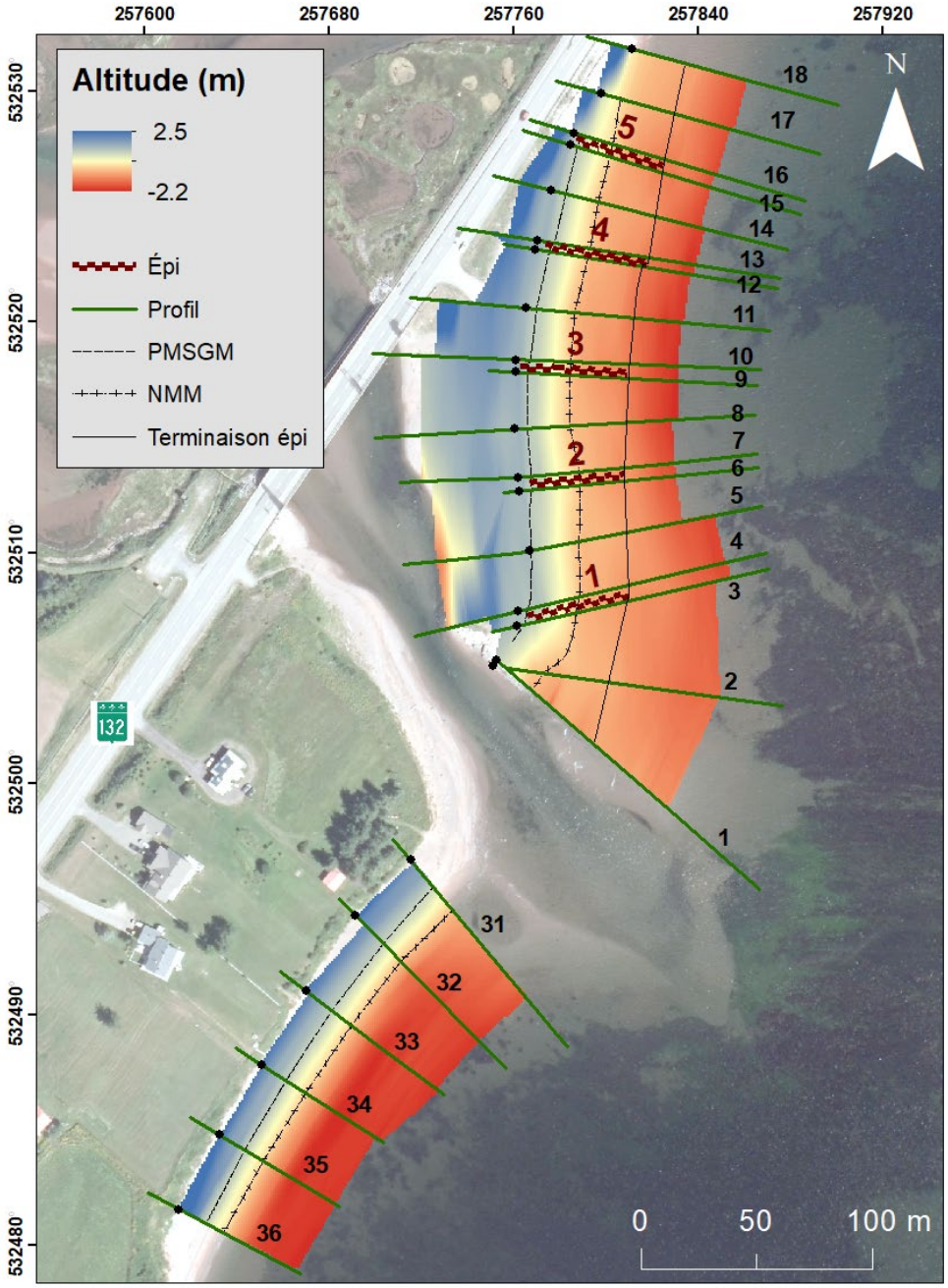



*Figure 67. Modèle numérique d'altitude de la plage à épis de Hope-Town et de la plage adjacente au sud-ouest en août 2020 (référence verticale CGVD2013). Les trois lignes Pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM), Niveau moyen de la mer (NMM) et Terminaison mer des épis délimitent la haute-plage, le haut-estran, le bas-estran et l'avant-plage. Coordonnées NAD83 MTM-5.*

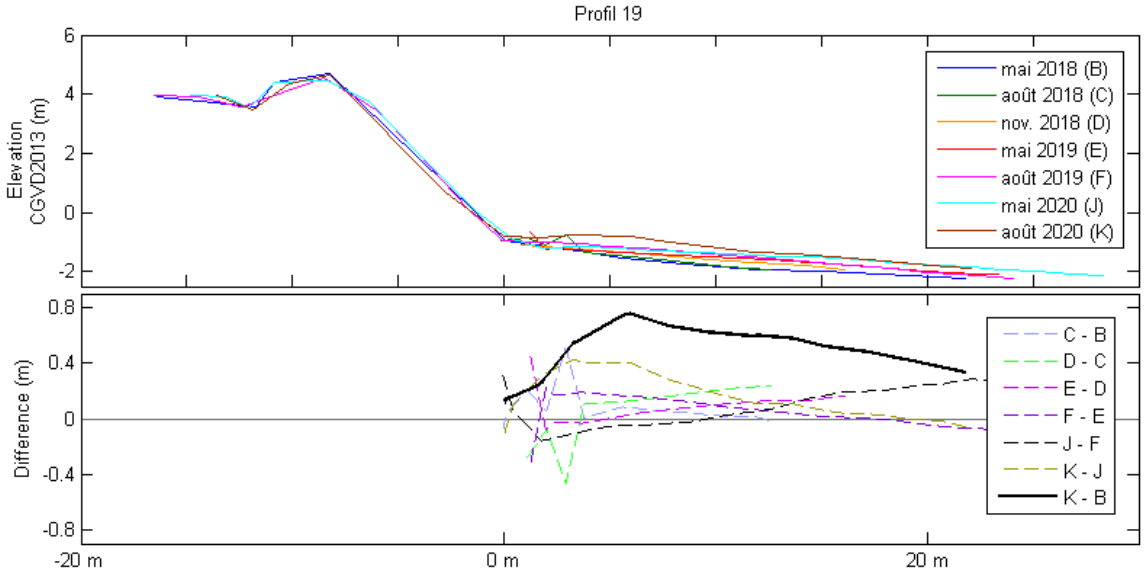



*Figure 68. Variations du profil de plage 19 levé devant l'enrochement de la route 132 sur la plage de la flèche littorale de Hope Town entre mai 2018 et août 2020. Le début du profil (-17 à 0 m) concerne l'enrochement en tant que tel.*

## 7.1 Modèles numériques de terrain et volumes de plage

Les campagnes topographiques répétées ont révélé d'importantes variations saisonnières sur la flèche littorale, qui sont illustrées par les différentiels d'altitude saisonniers obtenus grâce à la soustraction mathématique des MNT issus des campagnes topographiques successives (Figure 69). Les variations saisonnières du volume des sédiments pour les différents secteurs de plage ont été calculées sur la base de ces MNT (Figure 70).

Dans ce chapitre, les résultats principaux qui ressortent de l'étude seront décrits par saison, tant sur la plage à épis que sur la plage adjacente au sud-ouest. Les variations interannuelles seront dégagées de la tendance générale et les données topographiques seront enfin comparées aux séries temporelles établies sur la base des données de la firme BPR issues des rapports de suivi de 2013, 2014, 2017 et 2019, lesquelles servent de jeux de données de référence.

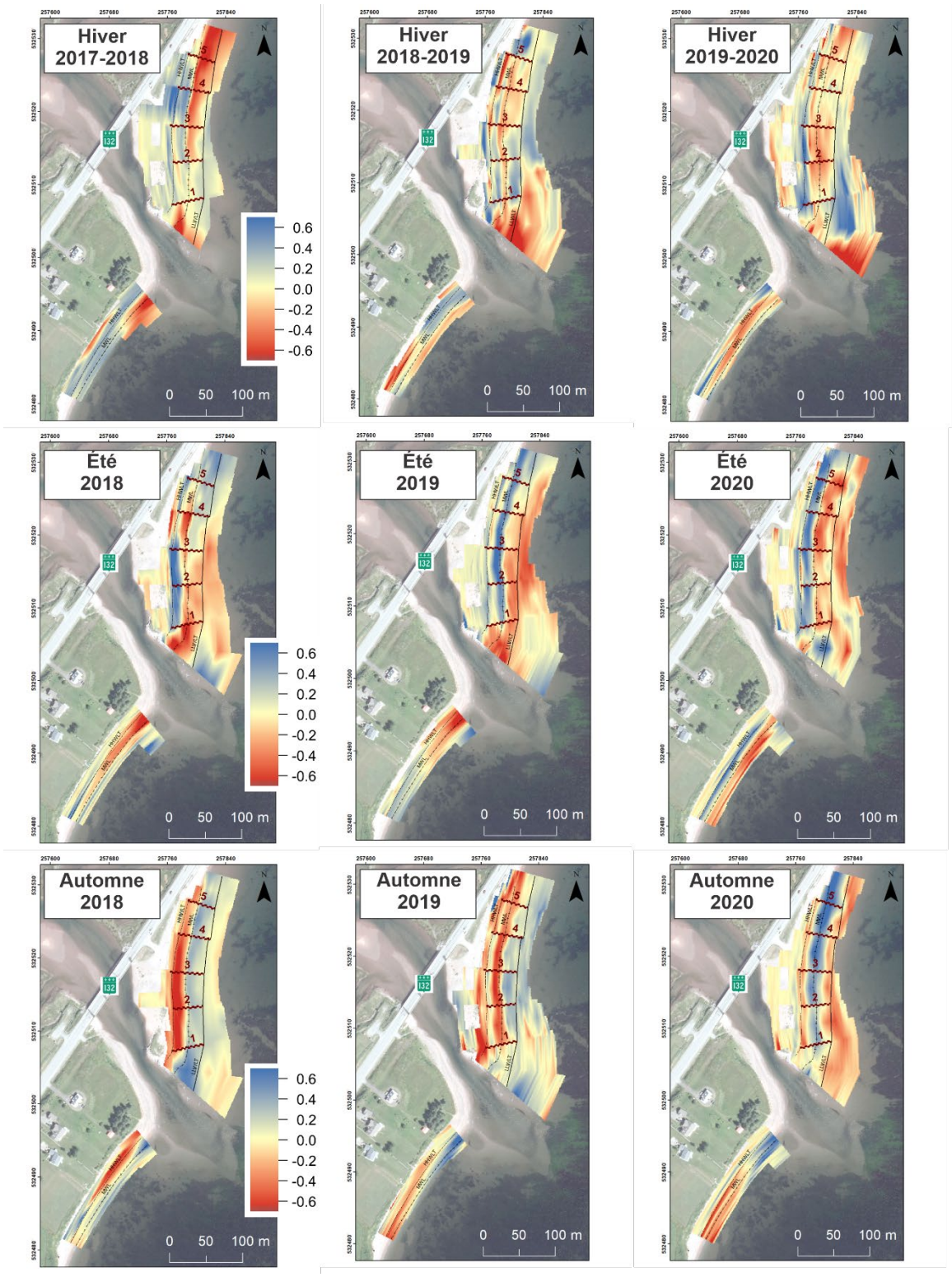



*Figure 69. MNT saisonniers obtenus par la soustraction des MNT des différentes campagnes topographiques (MNT hiver = MNT mai – MNT novembre; MNT été = MNT août – MNT mai; MNT automne = MNT novembre – MNT août).*

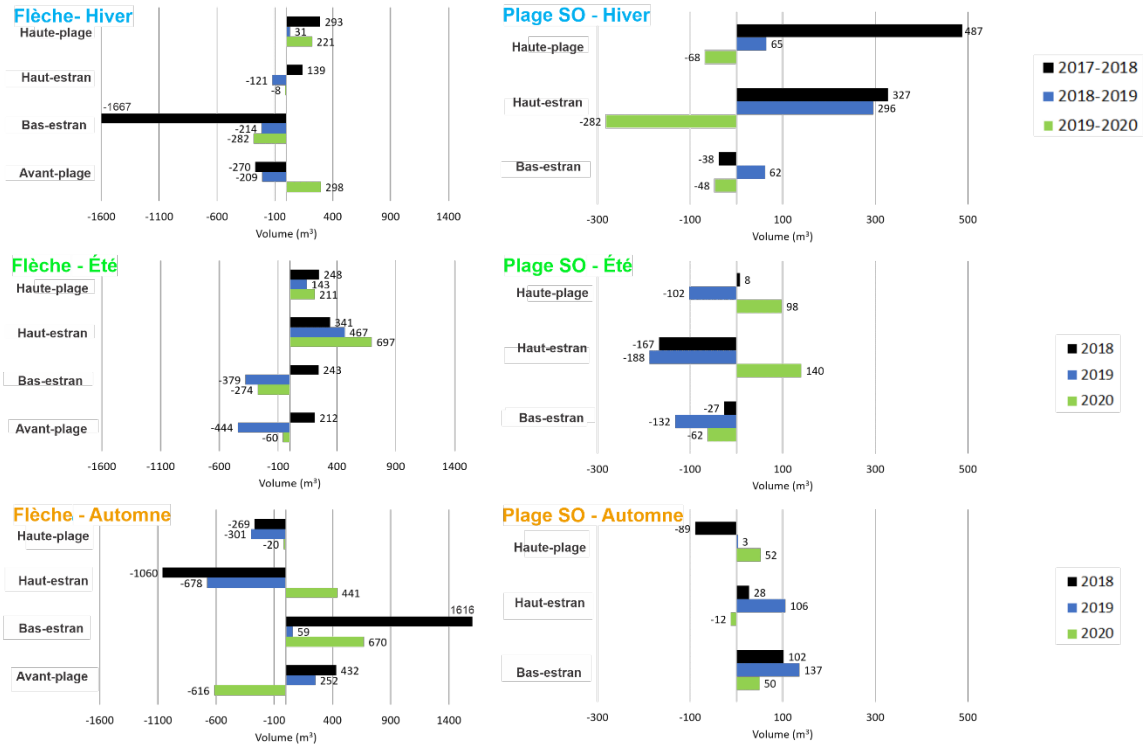



*Figure 70. Variations saisonnières des volumes de plage de 2017 à 2020 sur la plage de la flèche littorale et sur la plage sud-ouest. Hiver : novembre à mai; Été : mai à août; Automne : août à novembre.*

### *7.1.1 Plage à épis*

#### *7.1.1.1 Hiver*

Les volumes de plage et les différentiels d'altitude de l'hiver (novembre à mai) montrent typiquement une dynamique érosive où le sédiment de plage est transporté vers le large à cause de l'intensité du retour de vague ou déposé sur l'avant-plage pour former des barres d'avant-plage (Barnes et al., 1978; Davis and Fitzgerald, 2004; Wright et al., 1999); ces barres constituent toutefois des formes d'accumulation très saisonnières. Les résultats sont toutefois très variables d'une année à l'autre (Figure 69 et Figure 70).

Le premier hiver **(2017-2018)** enregistre les variations d'altitude et de volumes les plus importantes, de même que le nombre le plus élevé (9) d'événements de tempêtes pour lesquelles les vagues dépassent 1,5 m au site HOE (Tableau 13). Ces 9 tempêtes provenaient de l'est, or les vagues les plus fortes qui atteignent la côte de Hope-Town (HOD) viennent de l'est, étant protégée par les vagues d'ouest grâce à la pointe de New-Carlisle à proximité de Paspébiac. La plus forte tempête a été enregistrée le 5 janvier 2018 ($H_{m0}$=2,90 m) et la seconde le 14 mars 2018 ($H_{m0}$=2,77 m). De plus, deux tempêtes majeures ont été enregistrées au mois d'avril, la première le 4 avril ($H_{m0}$=1,52 m) et la suivante le 18 ($H_{m0}$=1,68 m), soit un mois avant les relevés topographiques du printemps, ce qui a pu modifier la morphologie de plage et peut expliquer les déficits exceptionnels observés sur l'avant-plage. Un important déficit sédimentaire a été ainsi été enregistré sur

le bas-estran (- 1667 $m^3$) où 85 % de la superficie est en érosion (Figure 70). La pointe sud de la flèche (profils 1 et 2) ainsi que l'extrémité nord-est de la plage à épis près de l'enrochement (profils 16 à 18), accusent aussi une érosion importante jusqu'à -0,7 m (Figure 69). Des périodes de glace libre ont été notées en mars 2018 au site HOE (Figure 56), par conséquent il est probable que les vagues aient atteint la côte et mobilisé les sédiments de l'estran. Le sommet de la plage est en revanche en accrétion.

Au cours de l'hiver suivant (**2018-2019)**, la tendance générale reste à l'érosion. Sept tempêtes majeures avec des vagues supérieures à 1,5 m ont été détectées (Tableau 13), la plus importante le 28 novembre 2018 ($H_{m0}$=2,37 m) et la suivante le 9 janvier 2019 ($H_{m0}$=2,23 m). Toutefois, l'érosion du bas-estran entre les profils 7 à 18 est nettement moins évidente qu'à l'hiver précédent (Figure 70). De plus, l'érosion de la pointe sud de la flèche sableuse (profils 1-2) semble plus étendue, couvrant une superficie de 6 400 $m^2$ contre 1 200 $m^2$ en 2017-2018; mais elle reste moins importante cette année, plafonnant à des différentiels d'altitude de -0,4 m.

Au cours du dernier hiver (**2019-2020**), l'érosion dans cette partie extrême sud de la plage est toujours visible quoique moins étendue (3 400 $m^2$). Seuls 4 événements de tempête ont été relevés au site HOE, 3 d'entre elles venant de l'est (Tableau 13). Alors que l'avant-plage rapporte un déficit sédimentaire au cours des deux premiers hivers, près de 300 $m^3$ de sédiments ont en revanche été gagnés cette année, avec des différentiels d'élévation de 0,4 m (Figure 69 et Figure 70); ceci pourrait s'expliquer par la formation localisée et temporaire des barres d'avant-plage. Malgré une saison des glaces réduite et la présence de discontinuités dans la couverture de glace, aucun événement de tempête significatif n'a été enregistré cet hiver entre décembre 2019 et mars 2020. Enfin, la haute-plage est en accrétion sur les trois hivers consécutifs bien que les gains aient été plus importants en 2018-2019 (Figure 70).

Les fortes variations interannuelles relevées l'hiver peuvent s'expliquer par la variabilité du régime hydrodynamique et par la présence de glace côtière, dont les conditions varient d'une année à l'autre, apportant une protection variable à la côte. En effet, on observe la présence d'un pied de glace de haut-estran et de glace de mer de janvier à mars, pouvant dissiper l'énergie des vagues et protéger la plage notamment durant les tempêtes (Corriveau et al., 2018; Senneville et al., 2014). Toutefois, quand il n'y a pas de banquise côtière, les vagues peuvent être réfléchies par le pied de glace comme sous l'effet d'un mur de protection, ce qui risque d'induire une remobilisation supplémentaire des sédiments au-devant du pied de glace.

#### *7.1.1.2 Été*

L'été représente typiquement la saison de construction de la plage : les modèles numériques de terrain ainsi que les volumes de plage montrent une accrétion sur le haut de la plage (haute-plage et haut-estran), alors que la partie inférieure de la plage (bas-estran et avant-plage) est en érosion (Figure 69Figure 70).

A l'été **2018**, les 4 sections de plage ont gagné du sédiment (Figure 70). En revanche, l'été **2019** semble être le plus érosif : 85 % de l'avant-plage et 64 % du bas-estran étaient en

érosion. Les données de vagues mesurées à la côte (HOD) cet été ont effectivement révélé cinq (5) événements entre mai et août pour lesquels la hauteur des vagues $H_{m0}$ atteignait voire dépassait 1 m, alors qu'il n'y en avait aucun en **2018** (Tableau 13). L'érosion sur les profils 1 à 3 est également plus étendue qu'en 2018 mais aussi plus importante, jusqu'à -0,5 m. La zone d'accumulation au nord de la plage allant du 4ème au 5ème épi et au-delà (Figure 69), est moins étendue qu'à l'été précédent (~2 115 $m^2$ en 2018 et 1 520 $m^2$ en 2019). Néanmoins, le haut de la plage (et particulièrement le haut-estran) est toujours en accrétion entre les profils 4 à 18 jusqu'à environ x = 30 m.

A l'été **2020**, la zone d'accumulation au nord est encore plus réduite (~1 125 $m^2$) mais les différentiels positifs sont les plus élevés (+0,58 m). Comparativement aux deux premiers étés, la pointe sud de la flèche semble cette année favorable à l'accrétion, présentant des différentiels positifs jusqu'à 0,3 m (Figure 69).

Enfin, en comparant les volumes de plage nord/sud (Figure 71) de l'été, les résultats indiquent des gains importants au nord sur les trois ans consécutifs et particulièrement en 2018 (+839 $m^3$), alors que le sud n'enregistre pas de gains aussi significatifs voire même des déficits en 2019 (-672 $m^3$). Ceci suggèrerait que les épis 3 à 5 interceptent efficacement les sédiments de la dérive littorale mais qu'il ne reste qu'un petit volume encore disponible pour engraisser la partie sud de la plage.

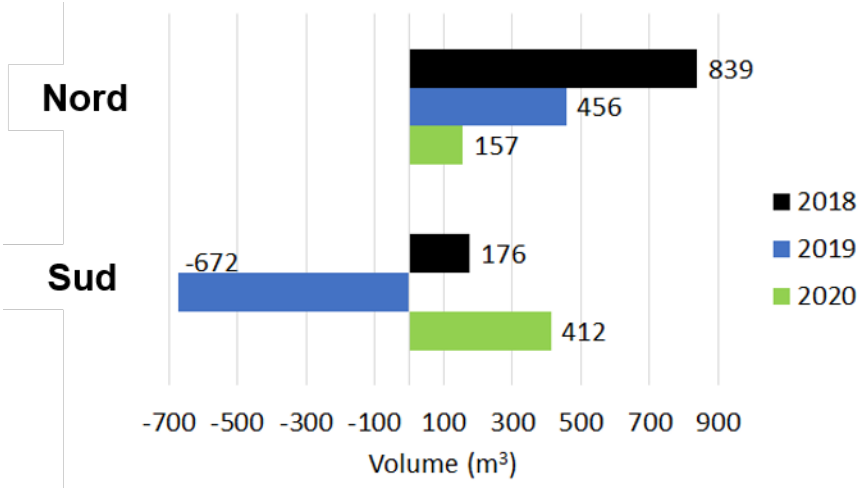



*Figure 71. Variations estivales des volumes de plage sur les parties nord et sud de la flèche littorale de Hope-Town. Les volumes sont calculés sur la base des MNT de l'été (août-mai).*

*7.1.1.3 Automne*

L'automne est caractérisé par un rééquilibrage du profil de plage en raison d'une hausse de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, avec des ondes de tempête aussi plus fortes, remobilisant les sédiments du haut-estran.

A l'automne **2018**, la tendance générale révélée par les modèles numériques de terrain indique effectivement une recharge du bas-estran et de l'avant-plage, au détriment du haut-

estran et de la haute-plage qui accusent des différentiels entre -0,2 et -0,6 m (Figure 69). Les volumes de plage sont compensés entre les haut et bas estrans (Figure 70); le bas-estran enregistre même un gain de 1 616 $m^3$. Même la pointe sud de la flèche sableuse est généralement en accrétion. Lors des tempêtes automnales, il est fréquent que les vagues franchissent la crête de la plage pour acheminer du sédiment vers la lagune, ce qui contribue à l'érosion du haut de la plage telle que révélée par les MNT. Des évidences de transferts sédimentaires sur la haute-plage (dépôts de débordement), orientés préférentiellement vers le chenal de marée, ont d'ailleurs été relevés lors de la campagne d'échantillonnage (Figure 72).

*Figure 72. Dépôts de débordement sur la haute-plage observés à l'automne 2019 et orientés préférentiellement vers le chenal de marée, évidences de transferts sédimentaires entre la mer et le barachois lors de tempêtes.*

On observe la même tendance au rééquilibrage du profil de plage au cours de l'automne suivant**,** mais l'érosion de la partie supérieure de la plage semble plus étendue cette année (le haut-estran enregistrant un déficit de – 1060 $m^3$) et elle est aussi localement plus importante, notamment sur la haute-plage (jusqu'à -0,4 m). L'automne **2019** a été particulièrement tempétueux : la tempête la plus importante a été mesurée le 17 octobre 2019 ($H_{m0}$=2,92 m) et une seconde tempête majeure avait été enregistrée plus tôt le 8 septembre 2019 ($H_{m0}$=2,6 m), ce qui peut expliquer cette érosion relativement plus importante sur la partie supérieure de la plage (Figure 70, Tableau 13). Cette année, lors de la campagne d'échantillonnage, certaines parcelles d'élyme des sables (*Elymus arenarius*) semblaient dégradées, probablement en raison de la fréquence et de l'intensité des tempêtes ayant occasionné des transferts sédimentaires entre la mer et le barachois. Une tempête majeure en provenance du golfe avec une hauteur des vagues $H_{m0}$ atteignant 2,17 m au site

HOE, est d'ailleurs survenue le l2 novembre 2019 soit quinze jours avant les relevés topographiques (Tableau 13).

L'automne **2020** ne suit pas la tendance générale des deux précédents : près de 97 % de l'avant-plage présente des différentiels négatifs alors que ce pourcentage n'atteignait que 2 % en 2018 et 12 % en 2019. De plus, la majeure partie de la zone intertidale (haut et bas estrans) est en accrétion jusqu'à 0,55 m (Figure 69).

*7.1.1.4 Variations interannuelles*

Le Tableau 16 présente les variations annuelles des volumes de plage entre les différentes campagnes estivales d'août à août, puisque l'été est la saison où les variations dépendent moins des tempêtes, donc la distribution exacte dans le temps est aléatoire. La Figure 73 et le Tableau 16 présentent aussi les variations topographiques sur deux ans entre la première campagne d'été en août 2018 et la dernière en août 2020; les différentiels d'altitude (en m) le long des profils médians 5, 8, 11 et 14 sont également présentés sur la Figure 73 afin de mieux visualiser les variations topographiques.

S'il est difficile de dégager une tendance à long terme sur seulement deux années de données, la Figure 73 et le Tableau 16 montrent néanmoins que l'avant-plage, le bas-estran et la haute-plage ont tous enregistré un budget sédimentaire positif entre août 2018 et août 2020, alors que le haut-estran accuse une perte de 703 $m^3$. En effet, le haut-estran affiche clairement de l'érosion avec des différentiels d'altitude jusqu'à -0,6 m. Le bas-estran est particulièrement en accrétion, encore une fois surtout au nord de la plage au-delà du $4^{ème}$ épi où les valeurs de différentiel atteignent 0,7 m. Les quatre profils médians mettent d'ailleurs en évidence cette zone d'accrétion située entre 25 et 40 m, pouvant atteindre jusqu'à 0,4 m (Figure 73). Bien que sur les deux années un gain de 526 $m^3$ ait été enregistré sur le bas-estran, d'importantes variations interannuelles ont été relevées : si un gain de 1 025 $m^3$ a été mesuré la première année, près de la moitié de ce volume a toutefois été perdu l'année suivante (Tableau 16). De leur côté, l'avant-plage, le haut-estran et la haute-plage ont enregistré des déficits sur la première année et des gains plus ou moins importants au cours de la seconde année (Tableau 16). La haute-plage s'avère relativement stable dans la mesure où le volume de sédiments perdu la première année a été regagné au cours de l'année suivante.

Bien que sur les deux ans le budget sédimentaire de l'avant-plage soit positif, l'érosion semble localisée sur la pointe sud de la flèche près de l'entrée du chenal de marée et entre les profils 5 et 14 (-0,4 m). Une hypothèse d'ailleurs déjà soulevée plus haut et mentionnée dans le rapport de suivi de Lamontagne et Xhardé (2020), propose que les épis 4 et 5 au nord-est de la plage piègent la grande majorité des sédiments de la dérive littorale, si bien que seul un petit volume résiduel soit encore disponible pour alimenter la pointe sud de la flèche. Néanmoins, il est possible que si le compartiment entre les épis 4 et 5 atteint sa capacité maximale, un volume plus important soit alors disponible pour progressivement alimenter l'extrémité sud de la flèche.

Enfin, on remarque la présence locale de certains hotspots d'érosion à l'endroit de la terminaison mer de l'épi 5 et en amont de l'épi 3, sur le bas-estran (Figure 73).

*Tableau 16. Variations des volumes de plage de la flèche littorale de Hope-Town entre les campagnes topographiques de l'été.*

| Polygone | ANNÉE 1 (août. 2019-août. 2018) | ANNÉE 2 (août. 2020-août. 2019) | Total 2 ANS (août. 2020-août. 2018) |
|---|---|---|---|
| *Avant-plage* | -222 | 490 | 268 |
| *Bas-estran* | 1025 | -499 | 526 |
| *Haut-estran* | -716 | 13 | -703 |
| *Haute-plage* | -113 | 129 | 16 |

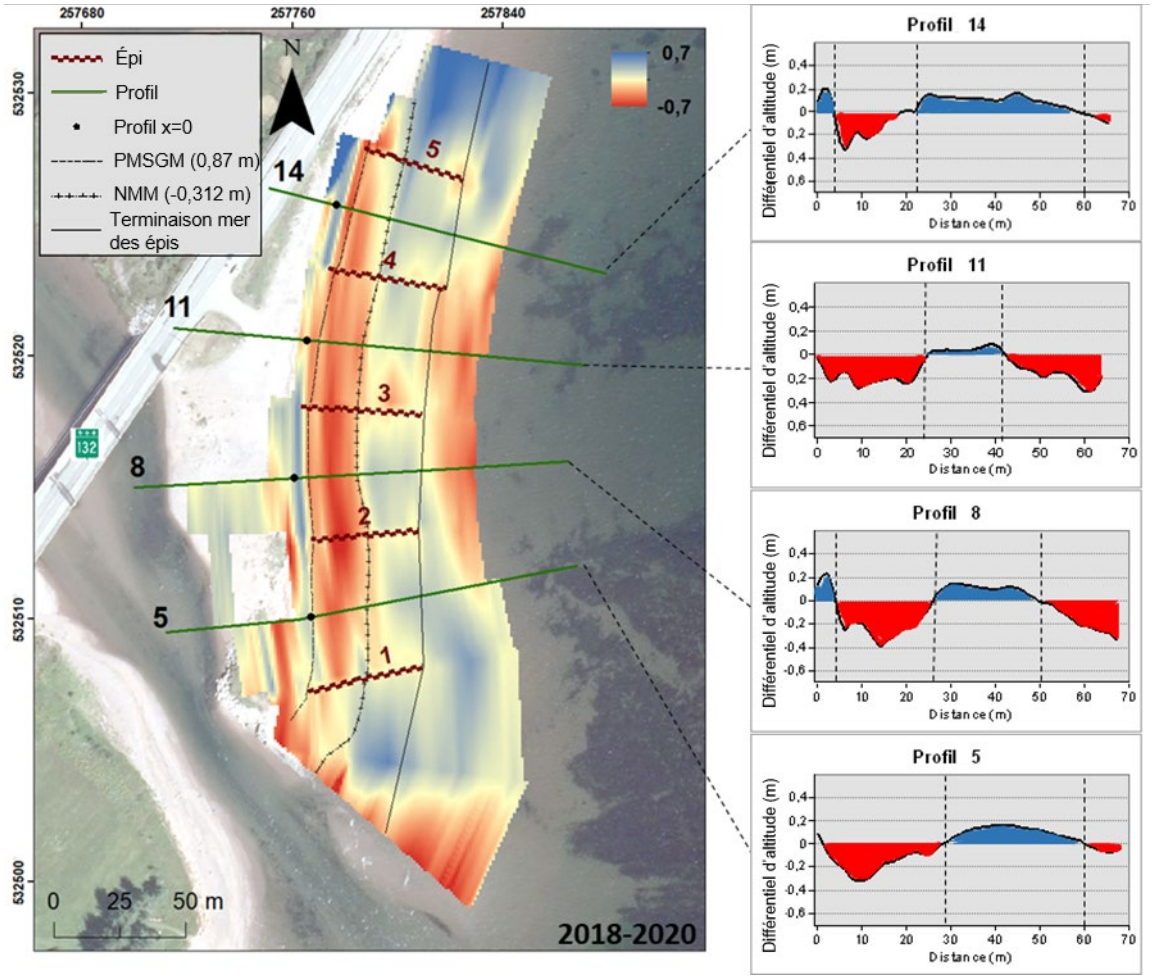



*Figure 73. MNT biannuel de la plage à épis entre les première et dernière campagnes estivales (août 2020-août 2018). Les variations du profil de plage sont également décrites sur les transects 5, 8, 11 et 14; l'érosion est identifiée en bleu et l'accrétion en rouge.*

Quant aux variations cumulatives des volumes de plage (Figure 74), on remarque que les déficits locaux saisonniers sont compensés par le dépôt de sédiments répartis sur d'autres portions de plage, par exemple lorsque sont comparés les volumes du bas-estran et de

l'avant-plage. La première année a enregistré d'importantes variations volumétriques sur la flèche à cause des déficits importants localisés sur le bas-estran et mesurés en mai 2018 au sortir de l'hiver. Cependant, des gains ont été enregistrés durant le reste de l'année. La deuxième année a enregistré des pertes cumulées significatives de plus de 1 000 $m^3$, justifiées par une saison de tempêtes plus intense; toutefois, ces pertes ont été compensées au cours de la dernière année, révélant d'évidents processus de réajustements de plage. Un volume insignifiant de 8 mm a effectivement été gagné à l'échelle de la plage en date de novembre 2020.

Ainsi, bien qu'il soit attendu que la plage s'adapte aux conditions saisonnières du régime hydrodynamique (Davis and Fitzgerald, 2004; Ivamy and Kench, 2006; Taaouati et al., 2011; Wright et al., 1999), les résultats de la Figure 74 décrivant l'évolution saisonnière ne révèlent pas de correspondance exacte entre les tempêtes enregistrées au large (vagues mesurées au site HOE) et la morphodynamique de plage. Ceci est probablement relié (1) au contrôle que les niveaux d'eau (marées et ondes de tempête) ont sur la dissipation des vagues en eau peu profonde et la zone de plage affectée par chaque tempête, modulant ainsi significativement l'action de la tempête; (2) à la protection de la banquise côtière et du pied de glace l'hiver (toutes les vagues mesurées en HOE l'hiver ne risquent pas de déplacer les sédiments de plage).

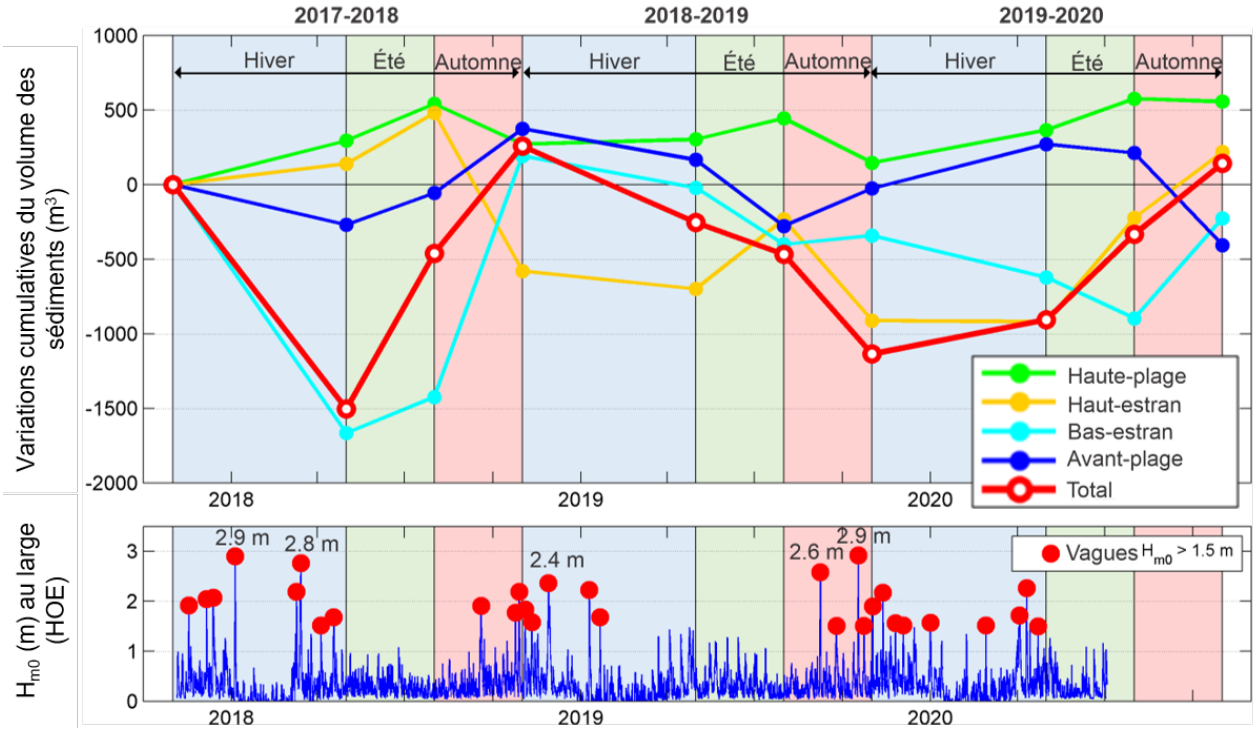



*Figure 74. Variations saisonnières et pluriannuelles du volume de sédiments de plage (2017-2020) et hauteur de vague significative ($H_{m0}$) enregistrée au large à 10 m de profondeur au site HOE.*

*7.1.1.5 Hauteur de pieux et déséquilibre sédimentaire amont/aval des épis*

Les données de hauteur de pieux ont permis de révéler une dynamique inégale dans l'accumulation de sédiments de part et d'autre des épis (amont/aval soit nord/sud). Une mesure entre le sommet du pieu de bois et le sédiment de plage a été relevée sur les cinq épis tous les 20 pieux. Ainsi, une petite valeur témoigne d'une accumulation plus importante de sédiments à la base des pieux.

Ces données montrent clairement un déficit de sédiments en aval des épis et précisément sur l'épi 1 situé en position terminale près du chenal de marée, alors qu'une accumulation de sédiments a été mesurée en amont des structures (Figure 75). En effet, tel qu'illustré par la Figure 75, une accrétion moyenne de 10,2 cm a été calculée sur les pieux échantillonnés en amont de l'épi 1 (côté Nord) par rapport à l'aval (côté Sud).

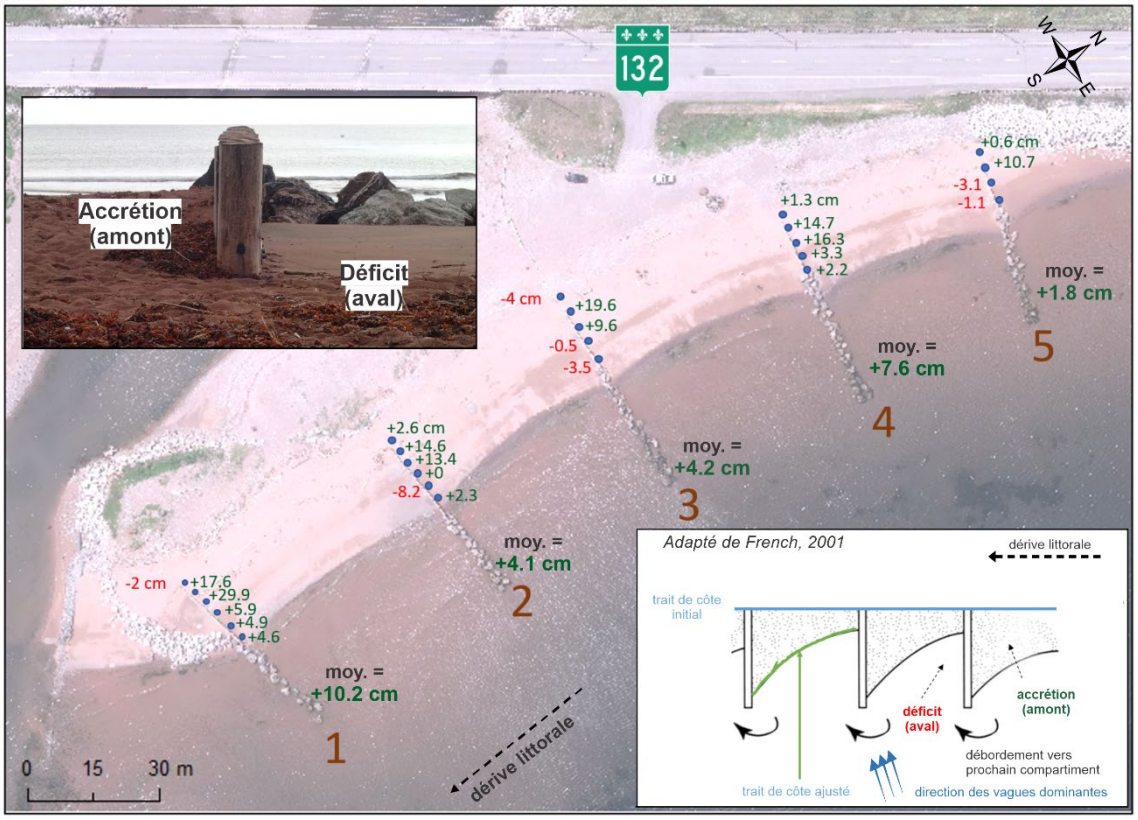



*Figure 75. Déséquilibre morphosédimentaire de part et d'autre (amont/aval) des épis par rapport à la direction de la dérive littorale principale représentée en traitillé noir. Les valeurs centimétriques expriment la moyenne, sur les 3 campagnes de mai, de la différence de hauteur des pieux de bois (en bleu) entre les côtés amont (nord) et aval (sud) des structures. Une mesure a été prise tous les 20 pieux sur chaque épi. Des valeurs positives (en vert) indiquent une accumulation du côté amont (nord) alors que des valeurs négatives (en rouge) indiquent une érosion.*

Ce déséquilibre morphosédimentaire concernant les structures d'épis a déjà été investigué et observé dans plusieurs études à travers le monde (Fletcher et al., 1997; Granja and

Carvalho, 1995; Hall and Pilkey, 1991; Kelletat, 1992; Mohanty et al., 2012; Neshai and Biria, 2013; US Army Corps of Engineers, 2008; van Rijn, 2013), si bien qu'il est à ce jour connu. Dans ces conditions, les conclusions majeures de ces études insistent sur l'importance de coordonner des recharges de plage successives lors de la construction d'épis afin de mitiger ces déficits en aval et d'encourager l'approvisionnement sédimentaire (Basco and Pope, 2004; Kelletat, 1992; Ganja and Carvalho, 1995; Kemp and Brampton, 2013; Neshai and Biria, 2013; US Army Corps of Engineers, 2008; van Rijn, 2013). Dans le cas précis de Hope-Town, pour stabiliser et maintenir la flèche, Lavallée (2011) avait recommandé la répétition des recharges de plage tous les 2 à 5 ans suivant la construction des épis.

### *7.1.2 Plage sud-ouest*

#### *7.1.2.1 Hiver*

Comme sur la plage à épis, d'importantes variations interannuelles ont été relevées l'hiver et les résultats sont assez hétérogènes. La haute-plage et le haut-estran sont en accumulation à l'hiver 2017-2018 et suivant, alors que d'importants déficits sédimentaires ont été calculés sur le haut-estran à l'hiver 2019-2020 (-282 m3, Figure 70). De plus, le dernier hiver semble avoir été le plus érosif puisque les trois secteurs de plage accusent des déficits dans les volumes de plage (Figure 70). Le bas-estran reste le secteur enregistrant les plus faibles variations de volumes.

#### *7.1.2.2 Été*

En 2018 et 2019, les trois secteurs de plage étaient en érosion alors qu'en 2020, on note une accumulation sur la partie supérieure de la plage sud-ouest, c'est-à-dire sur le haut-estran et la haute-plage (Figure 69Figure 70).

On remarque également la présence d'accumulations locales de sédiments sur le bas-estran des profils 31 et 32 probablement en lien avec la dynamique du delta de jusant et la formation de bancs d'accumulation temporaires.

#### *7.1.2.3 Automne*

L'estran de la plage sud-ouest semble être en accrétion l'automne, et précisément en 2019. A l'automne 2018 on observe toutefois de l'érosion sur la haute-plage (-89 $m^3$).

Les deux derniers automnes, la partie ouest de la plage du sud-ouest accuse une érosion à l'endroit des profils 34 à 36, alors que la pointe est près de l'embouchure du chenal de la lagune (profils 31 à 33) est en accrétion (Figure 69).

#### *7.1.2.4 Variations interannuelles*

Pour la plage adjacente au sud-ouest (Figure 76, Tableau 17), on remarque qu'entre 2018 et 2020, l'érosion est généralisée sur la haute-plage qui accuse une légère perte de 93 $m^3$ de sédiments. En effet, le Tableau 17 indique la première année a engagé un déficit de sédiments (-126 $m^3$) qui n'a que partiellement été rétabli l'année suivante (+33 $m^3$). La

dynamique est inversée sur le haut-estran qui enregistre d'ailleurs un volume cumulé de 100 $m^3$ sur les deux années. Le bas-estran enregistre de légers gains sur les deux années consécutives.

Ainsi, l'estran semble être en légère accrétion au sud-ouest alors que le haut-estran de la plage à épis enregistrait une érosion importante.

*Tableau 17. Variations des volumes de plage sur la plage sud-ouest entre les campagnes topographiques de l'été.*

| Polygone | ANNÉE 1 (Août 2019-Août 2018) | ANNÉE 2 (Août 2020-Août 2019) | Total 2 ANS (Août 2020-Août 2018) |
|---|---|---|---|
| *Bas-estran* | 31 | 27 | 59 |
| *Haut-estran* | 135 | -36 | 100 |
| *Haute-plage* | -126 | 33 | -93 |

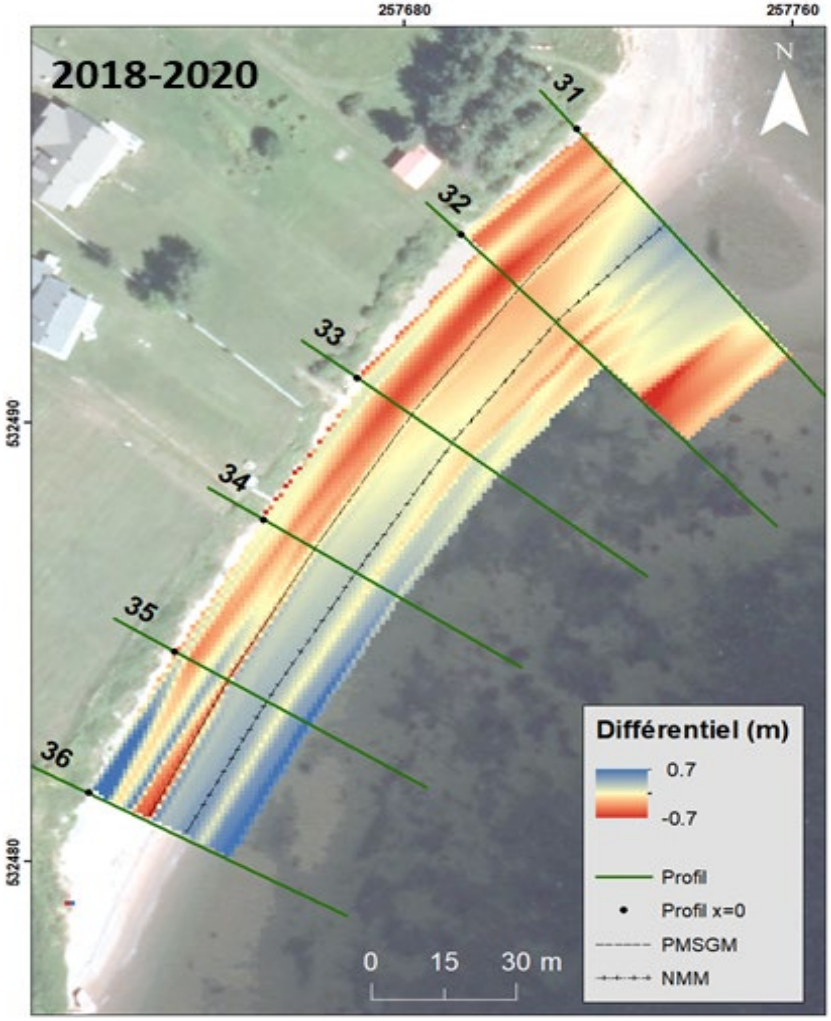



*Figure 76. MNT biannuel de la plage sud-ouest entre les première et dernière campagnes estivales (août 2020 à août 2018).*

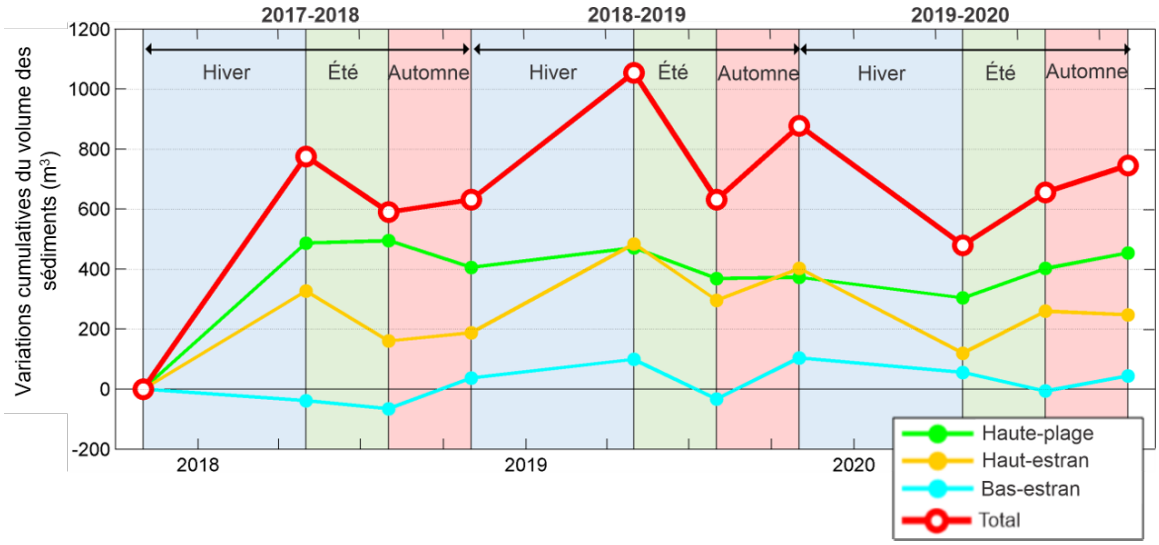



*Figure 77. Variations saisonnières et pluriannuelles du volume de sédiments de plage (2017-2020).*

Les variations dans les volumes de plage cumulés sur la plage adjacente ne suivent pas précisément celles de la flèche: la morphologie de plage est très différente, le bas-estran étant plus étroit et la pente du profil de plage aussi plus abrupte, sans compter que la plage sud-ouest est influencée par les apports fluviaux en provenance du chenal de marée. Ainsi, le bas-estran et la haute-plage affichent des volumes relativement stables sur les 3 ans de données et bien que le haut-estran révèle de plus amples variations, les volumes cumulés restent positifs à la fin de la troisième année de données (Figure 77).

### *7.1.3 Données des rapports annuels de suivi*

Les données des campagnes de relevés topographiques menées en mai 2013 (Lamontagne et Lefebvre, 2014), juin 2014 (Lamontagne, 2014) et 2017 (Lamontagne, 2017) ainsi que juillet 2019 (Lamontagne et Xhardé, 2020), ont été utilisées pour calculer des séries temporelles des variations des volumes de plage (Figure 78).

Les résultats montrent qu'après la recharge de 4 500 $m^3$ effectuée en novembre 2012, la flèche littorale a progressivement perdu 4 375 $m^3$ entre 2013 et 2019, ce qui représente presque le volume initial de recharge. Ces pertes ont été également distribuées sur l'avant-plage, le bas-estran et le haut-estran, alors que la haute-plage est restée relativement stable (Figure 78). A partir de 2013, soit un an suivant la recharge de plage, on remarque une diminution considérable dans le volume total cumulé, bien que le volume retranché à la plage depuis 2017 se soit stabilisé. En effet, ces données montrent que depuis la recharge de plage de 2012, près de 60 % du volume cumulé final avait déjà été retranché de la plage en 2016.

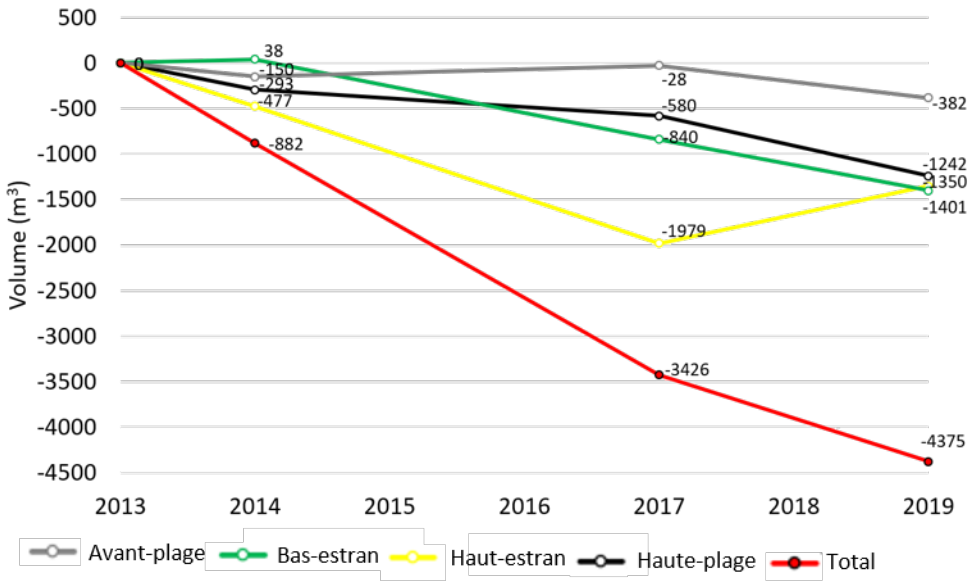



*Figure 78. Série temporelle des volumes de plage cumulés entre 2013 et 2019 et calculés pour les 4 zones de la plage à épis (haute-plage, haut-estran, bas-estran et avant-plage) sur la base des données topographiques de Lamontagne et Lefebvre (2014), Lamontagne (2014, 2017) et Lamontagne et Xhardé (2020). Les variations totales cumulées sont reportées en rouge.*

Ainsi, au cours des quelques années suivant la recharge et la construction des épis en 2012, la flèche littorale a visiblement enregistré des déficits sédimentaires. Cette situation est évidemment attendue puisque (1) les recharges de plage ont généralement des effets temporaires sur le budget sédimentaire et doivent donc être répétées dans le temps; et (2) les épis ne sont pas destinés à engraisser la plage mais bien à ralentir les pertes de sédiments vers le large ou via la dérive littorale.

Bien que nos données volumétriques ne révèlent pas précisément des variations cohérentes avec celles des rapports de suivis successifs, elles s'accordent néanmoins sur une perte de près de 500 $m^3$ entre 2017 et 2019 (Figure 74 et Figure 78). Si les données de la firme BPR sont moins précises considérant qu'une seule campagne a été menée chaque année (en été), la fenêtre temporelle couverte par ces données permet néanmoins de remonter plus loin dans le temps. En revanche, nos données permettent des mesures de haute précision répétées plusieurs fois par an, dans le but de déceler les variations saisonnières sur les trois années consécutives. Ainsi, le croisement de ces jeux de données a montré une diminution significative du volume de sédiments de plage à partir de 2013, soit un an après la recharge, alors que le volume perdu s'est stabilisé au cours des trois dernières années.

## 7.2 Variations granulométriques

Les données granulométriques témoignent de l'intensité du régime hydrodynamique et du type de sédiment susceptible de se déposer sur la plage sous ces conditions (Wright et al., 1999). En effet, une diminution dans la taille des grains suggère des processus favorables au dépôt tandis qu'une augmentation indique de l'érosion (Mohanty et al., 2012).

La variabilité spatiale et saisonnière de la granulométrie a été caractérisée avec le diamètre médian de chaque échantillon ($D_{50}$). Les variations saisonnières de la granulométrie est illustrée par la Figure 79 qui montre le pourcentage d'échantillons associé à chaque classe granulométrique (selon le $D_{50}$) par campagne d'échantillonnage. La variabilité spatiale de la granulométrie selon les saisons est également illustrée par les Figures 80 et 81. La Figure 80 montre que la taille des particules diminue du nord-est au sud-ouest, dans la direction de la dérive littorale principale. Les résultats indiquent aussi que les sédiments sont plus grossiers dans la partie supérieure de la plage: la haute-plage est essentiellement constituée de gravier moyen (8-16 mm) et le haut-estran de gravier très fin (2-4 mm), alors que le bas-estran alterne localement entre des parcelles de gravier très fin et de sable moyen à fin (0,125-0,5 mm). On retrouve également des parcelles plus grossières étendues de 2 à 5 m près de la ligne de mi-marée (élévation 0 m), approximativement à la frontière entre les haut et bas estrans (Figure 81). Enfin, tout comme l'ont montré les MNT et les volumes de plage d'été, on remarque aussi que les sédiments (et particulièrement des sédiments plus fins comme le sable) ont tendance à s'accumuler dans la partie nord de la plage, notamment entre les épis 4 et 5 et même au-delà (Figure 80). Ceci souligne l'efficacité des épis à piéger sur la plage les sédiments de la dérive littorale dans les conditions hydrodynamiques estivales. Rappelons que l'intérêt des épis est de permettre à chaque compartiment inter-épis de se remplir de sédiments issus de la dérive littorale tout en assurant le débordement d'un volume résiduel vers le prochain compartiment situé directement en aval (French, 2001).

L'échantillonnage saisonnier montre que les sédiments de la flèche sont généralement dominés par du sable grossier au cours de l'été (0,5-1 mm), tel qu'illustré sur les Figures 79 à 81. En moyenne, les plus faibles valeurs observées dans le diamètre médian des grains sont relevées au mois d'août, oscillant entre 0,52 mm en 2018 et 0,89 mm en 2020. De plus, du sable fin (0,125-0,5 mm) a tendance à s'accumuler l'été sur le bas-estran de la plage (Figure 80 et Figure 81) : comme les conditions hydrodynamiques sont calmes, le sédiment plus fin peut se déposer.

Bien que le sable soit dominant sur l'ensemble des campagnes (Figure 79), la proportion de sédiments plus grossiers est relativement plus importante à la fin de l'hiver lorsque l'intensité des conditions hydrodynamiques empêchent les dépôts sableux. En effet, les Figures 79 à 81 montrent qu'il y a davantage de sédiments plus grossiers oscillant entre 2-64 mm au mois de mai, mais aussi en octobre au cours de l'automne. Durant ces saisons, la haute-plage est constituée de gravier et de cailloux alors que la portion inférieure de la plage est dominée par du sable moyen à fin (Figure 81). Les sédiments de mai 2019 se sont par ailleurs révélés plus grossiers que l'année précédente, la fraction graveleuse des échantillons ayant presque doublé (27,3 % en 2018 contre 51,8 % en 2019), tout comme le $D_{50}$ moyen (0,9 mm en 2018 contre 2,1 mm en 2019).

La campagne d'octobre 2020 s'avère exceptionnelle puisque les sédiments sont particulièrement fins, affichant les plus faibles valeurs de $D_{50}$ de toutes les campagnes combinées (0,35 mm) alors que les valeurs les plus élevées étaient notées l'automne précédent (2,2 mm).

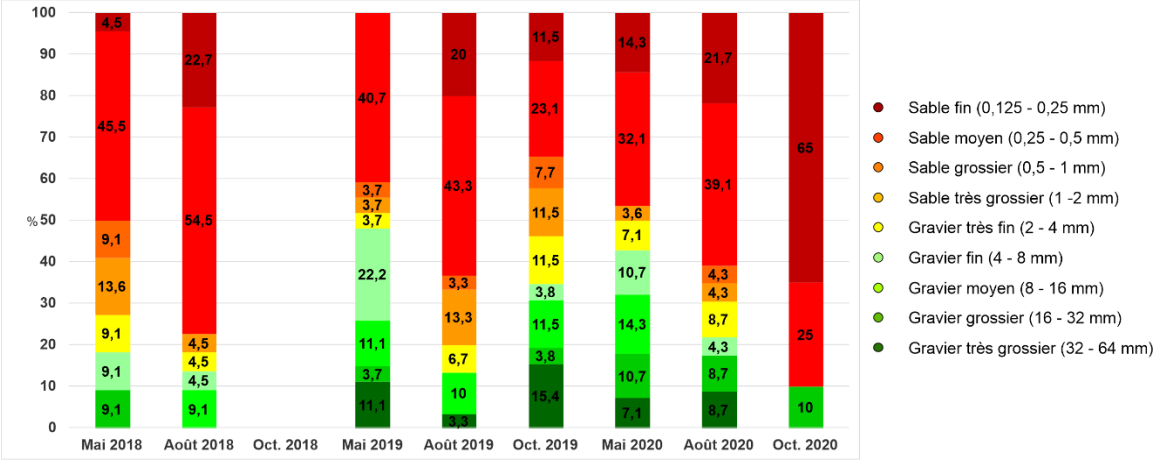



*Figure 79. Pour chaque campagne, pourcentage d'échantillons associés aux différentes classes granulométriques selon leur valeur de $D_{50}$.*

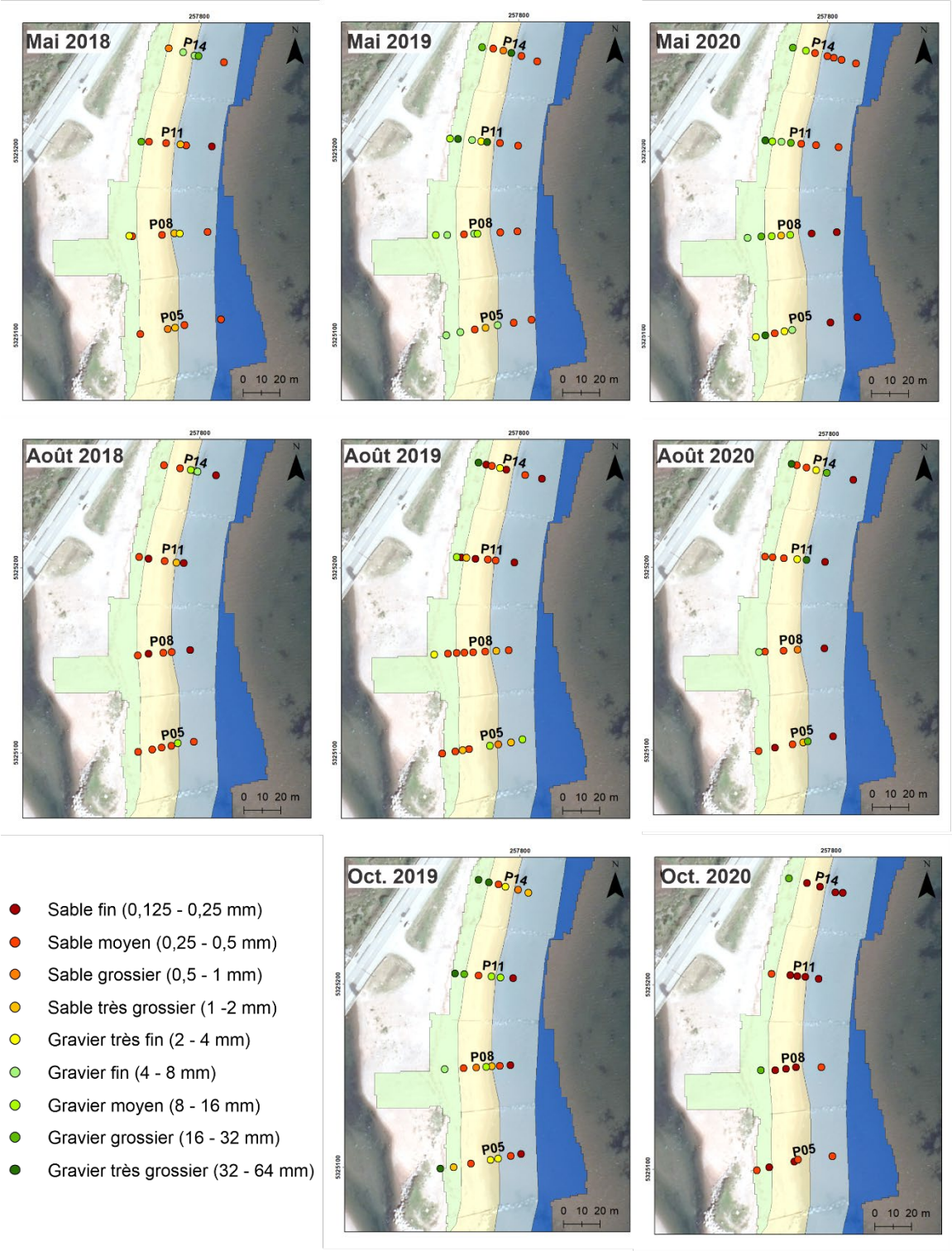



*Figure 80. Diamètre médian des grains ($D_{50}$) des sédiments récoltés en mai, août et octobre 2018, 2019 et 2020 sur la plage à épis de Hope-Town. Les 4 bandes de couleur représente la zonation de la plage, allant de la haute-plage en vert à l'avant plage en bleu foncé.*

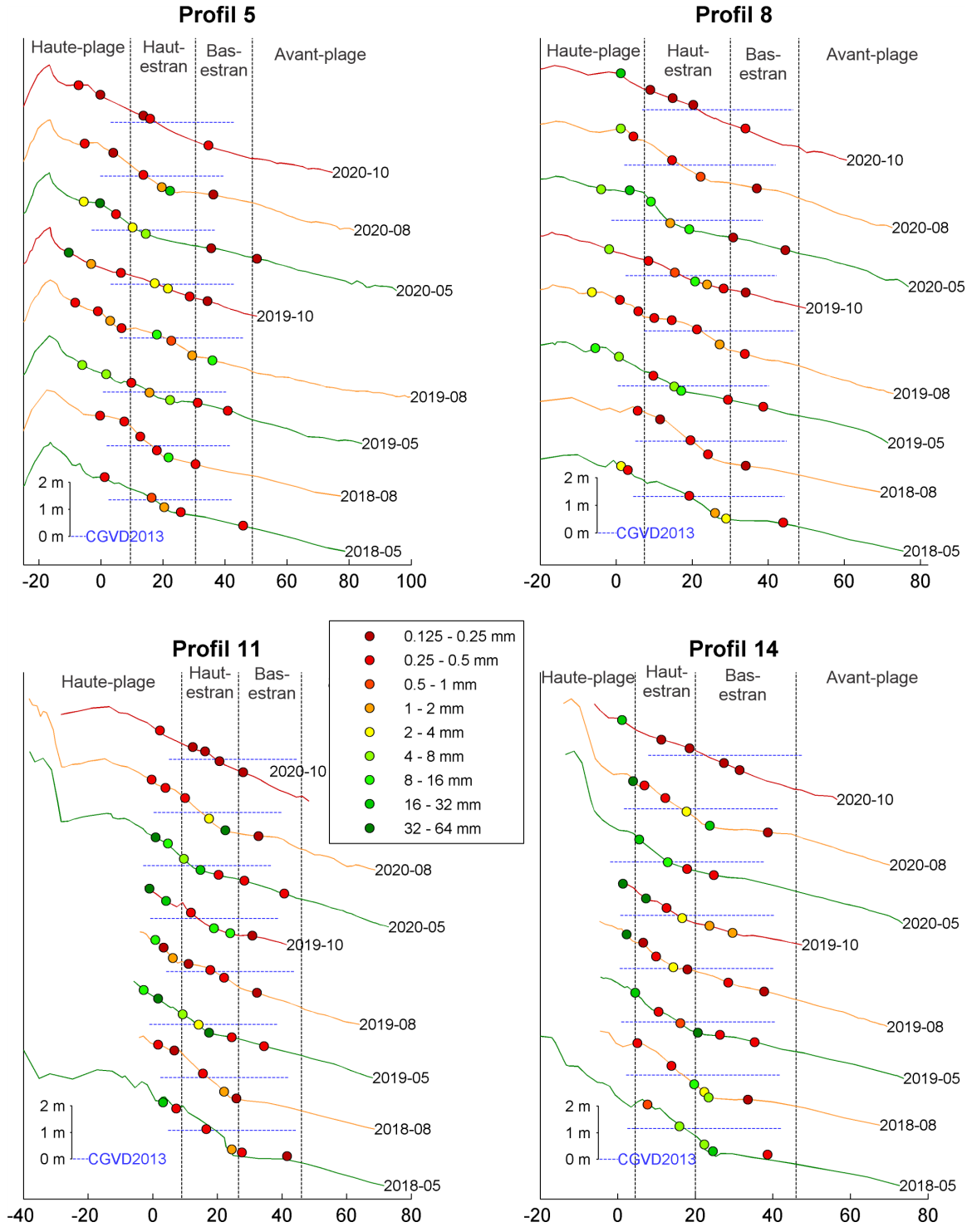



*Figure 81. Diamètre médian des grains (D50) des sédiments récoltés le long des profils 5, 8, 11 et 14 sur la plage à épis de Hope-Town au cours des 8 différentes campagnes d'échantillonnage. La zonation de plage est reportée sur la figure entre traitillés (haute-plage, haut-estran, bas-estran et avant-plage).*

Quant à la plage sud-ouest au-devant de la basse falaise meuble, la distribution granulométrique est favorable au gravier fin (4-8 mm). La partie supérieure de la plage est essentiellement dominée par du sable moyen à grossier (0,25-1 mm) alors que le sédiment du bas-estran est composé de gravier et de cailloux (Figure 82). On observe plus particulièrement la présence de gravier grossier et de cailloux sur la haute-plage dans la moitié sud-ouest de la plage à proximité de la falaise rocheuse, plus spécifiquement encore à l'endroit des profils 35-36 (Figure 82).

Enfin, la firme BPR a récolté des échantillons de sédiments sur six sites de la plage à épis (Figure 83) à l'occasion des 4 campagnes d'échantillonnage granulométrique suivant la recharge de plage de 2012 (mai 2013, juin 2014 et 2017, juillet 2019). Des analyses granulométriques sommaires ont été réalisées sur ces échantillons, permettant d'estimer l'évolution pluriannuelle des proportions de silt (< 0,08 mm dans les données de BPR), sable (0,08 à 5 mm) et gravier (> 5 mm) des sédiments. Ces données renseignent donc sur l'évolution de la taille des grains de la plage engraissée. La proportion de silt des échantillons restant toujours inférieure à 1 %, elle peut être ignorée de l'évolution pluriannuelle.

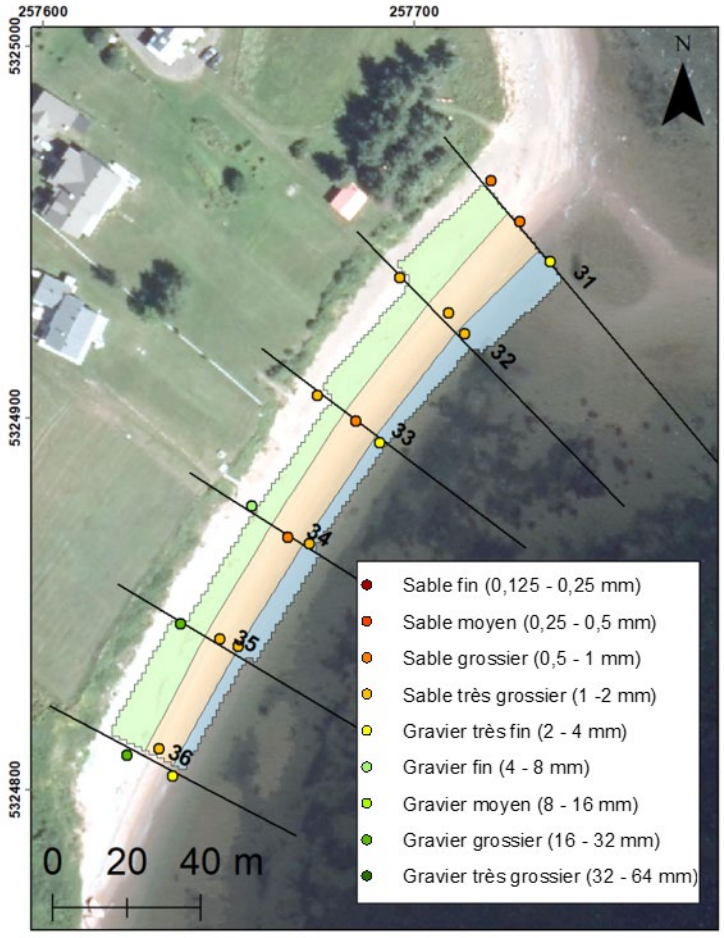



*Figure 82. Diamètre médian des grains (D50) des sédiments récoltés en avril 2018 sur la plage sud-ouest au-devant de la basse falaise meuble.*

Les résultats montrent que la proportion de gravier des échantillons récoltés sur le haut-estran (sites 241, 256 et 258) a diminué de manière significative entre 2013 et 2014, avant d'augmenter légèrement par la suite, sans toutefois rattraper le seuil atteint en 2013(Figure 83). La proportion de sable a eu l'évolution inverse. Cette situation suggère donc une réduction de la taille des grains sur le haut-estran. Quant au bas-estran (site 257) et à la haute-plage (site 243), les échantillons ont conservé une proportion relativement faible de gravier entre 2013 et 2017, alors qu'elle a nettement augmenté en 2019, révélant une augmentation de la taille des grains sur le bas-estran et la haute-plage (Figure 83). De plus, la fraction sableuse a considérablement diminué sur la haute-plage entre les épis 2 et 3 en 2019. Le site 239 sur la haute-plage présentait par ailleurs une très faible proportion de gravier (0-4 %). Ces analyses granulométriques à très faible résolution (trois classes granulométriques) ne permettent pas de déterminer une tendance quant à la réduction ou à l'accroissement de la taille des particules.

En somme, le haut-estran est devenu plus sableux depuis la recharge, précisément entre 2013 et 2014. Comme en témoigne le site 257, les dépôts graveleux ont été transférés sur le bas de la plage où le sable a aussi été localement emporté (Lamontagne et Xhardé, 2020). La situation sur la haute-plage est toutefois contrastée : alors que le sédiment de l'extrémité sud-ouest de la plage à épis est devenu plus graveleux (site 243), celui de la partie nord-est, entre les épis 4 et 5 (site 239), était composé à plus de 99 % de sable (Figure 83).

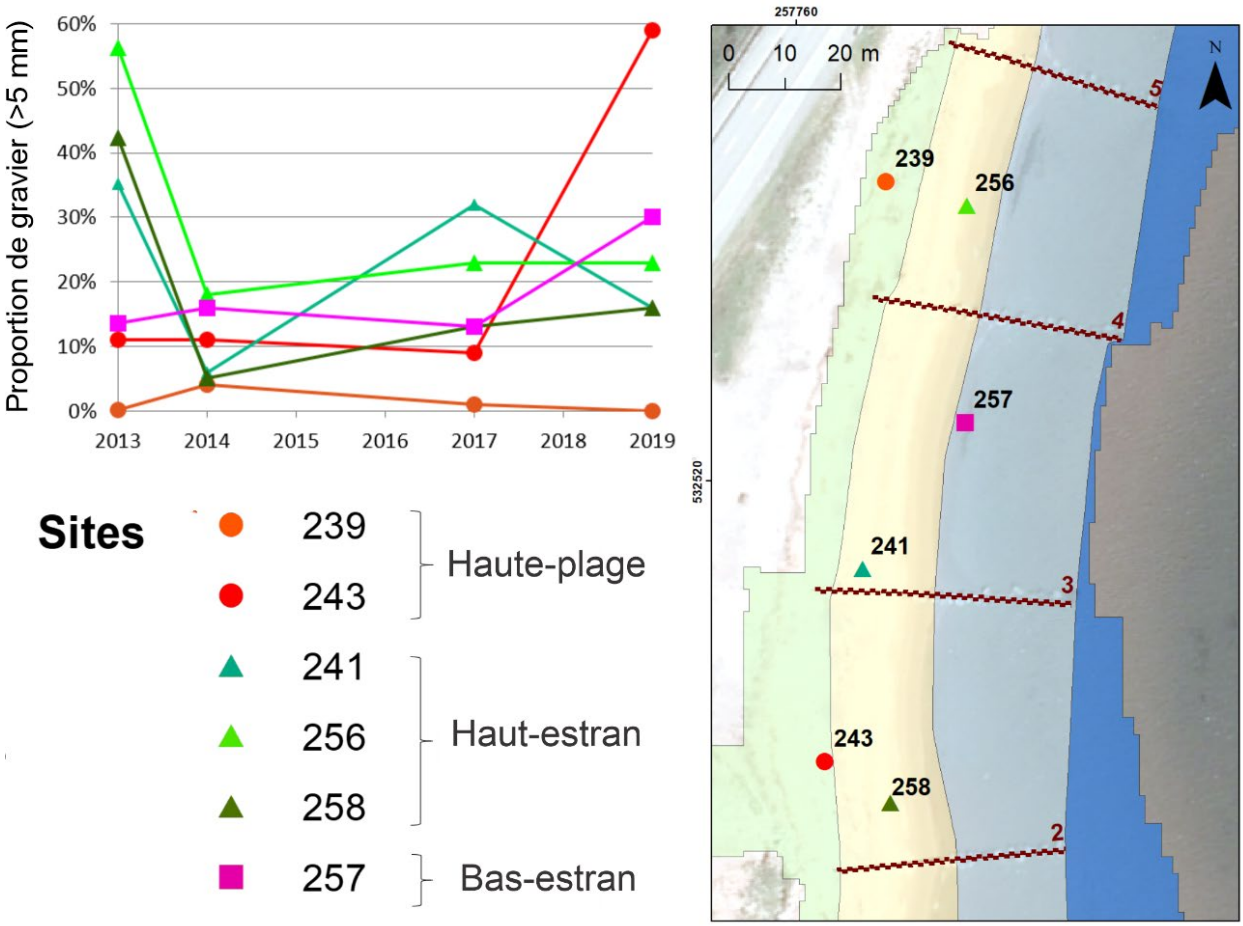



*Figure 83. Proportion de gravier (> 5 mm dans les données de BPR) des échantillons collectés par la firme BPR (Lamontagne et Lefebvre, 2014; Lamontagne, 2014; Lamontagne et Xhardé, 2020). En plus de gravier, les échantillons sont composés de sable (0,08-5 mm dans les données de BPR) et de moins de 1% de silt.*

# 8 ANALYSES MINÉRALOGIQUES

Les analyses par diffraction des rayons X ont été menées afin de comparer la minéralogie des sédiments de la flèche, ceux de la plage sud-ouest et ceux des falaises rocheuses de St-Godefroi situées 900 à 2 000 m au nord-est. L'objectif est d'estimer si ces falaises peuvent constituer la principale source de sédiments de la flèche littorale et de la plage sud-ouest localisées en aval dans le sens de la dérive littorale.

Les analyses XRD montrent que les sédiments des falaises de St-Godefroi sont principalement composés de quartz (46,5 %) mais aussi de calcite (8,7 %), ankérite (3,2 %), Feldspath potassique (Feldspath K, 3,2 %), hématite (1,6 %) et plagioclase (1,4 %) ainsi que d'autres minéraux en moindre proportion (Figure 84, Tableau 18). De plus, la composition minéralogique de ces sédiments de falaise révèle 33 % de minéraux argileux (principalement des illites) ainsi que de la biotite. Toutefois, il est peu probable que ces phyllosilicates soient transportés et déposés sur les plages en raison de leur fragilité et de leur faible granulométrie. Par conséquent, une composition minéralogique ajustée a été calculée (Tableau 18) en excluant les phyllosilicates afin de mieux caractériser les minéraux pouvant servir de traceurs (par exemple, la proportion de quartz ajustée s'élève à 70,5 %).

Les analyses XRD montrent également que les sédiments de la flèche sont dominés par le quartz à près de 88 % (Figure 84, Tableau 18). Cependant, tous les autres minéraux qui ont été relevés dans les sédiments de falaise de St-Godefroi, sont moins abondants (Tableau 18). Malgré tout, ces falaises restent une source probable pour les sédiments de la flèche considérant que le quartz est le minéral le plus stable et que les autres minéraux ont tendance à s'éroder, se dissoudre et à subir un tri au cours du transport sédimentaire (Ingersoll, 1978; Warrier et al., 2016).

Sur la plage adjacente au sud-ouest, la proportion ajustée de quartz s'élève à 77,0 % et s'avère plus faible que celle de la flèche (87,7 %), alors que la proportion ajustée de plagioclase (5,9 %) est clairement plus importante que celle de la flèche d'une part (1,3 %) et celle des falaises au nord-est d'autre part (2,2 %). Cela suggère donc qu'un volume considérable des sédiments de la plage sud-ouest provient des rivières Paspébiac et St-Godefroi qui se déversent dans la baie via le chenal de marée.

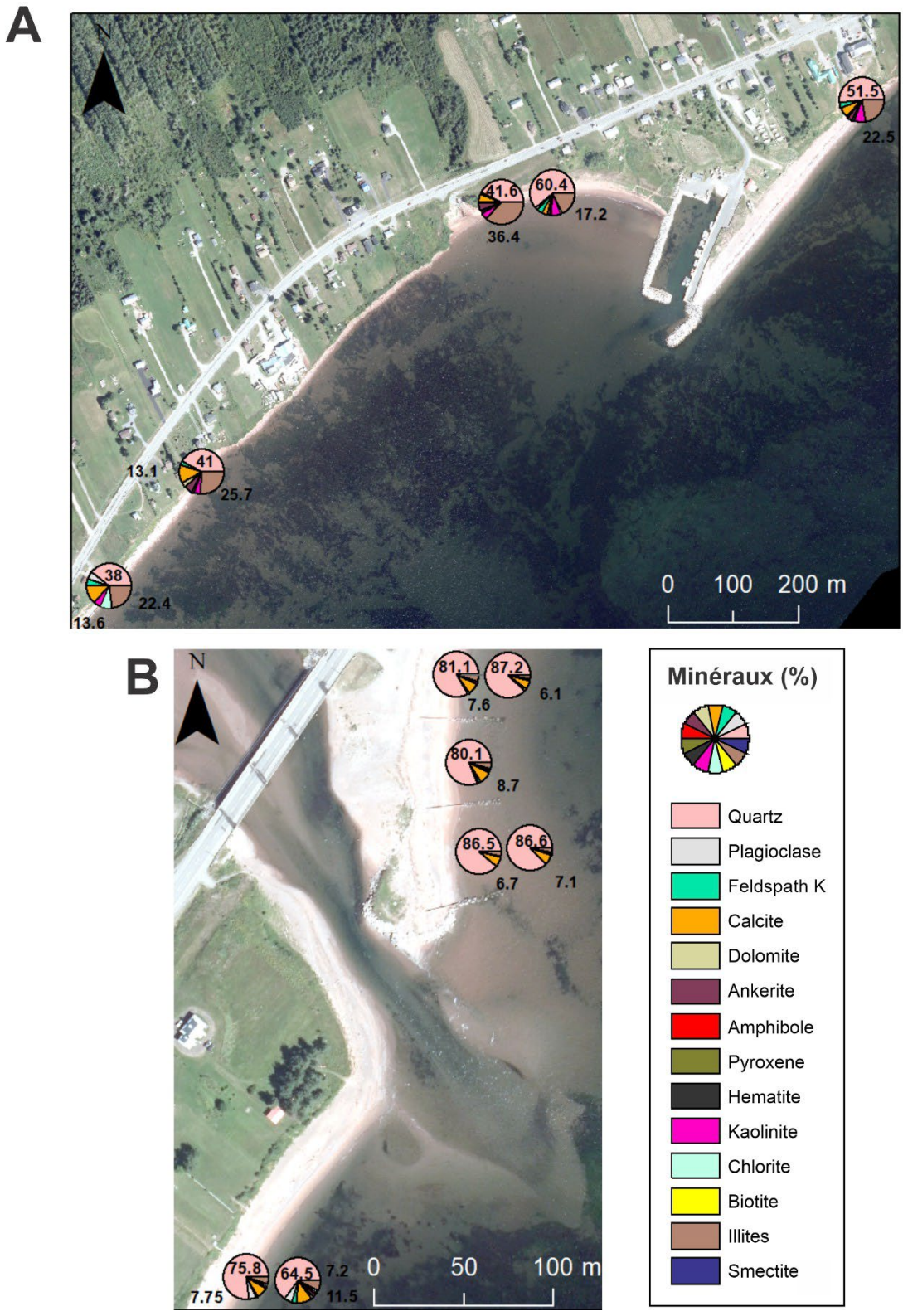



*Figure 84. Composition minéralogique des échantillons récoltés à même les falaises rocheuses de St-Godefroi (A) et sur les plages de Hope-Town (B).*

*Tableau 18. Composition minéralogique des échantillons de sédiments des falaises rocheuses de St-Godefroi, de la flèche littorale de Hope-Town et de la plage sud-ouest (composition en pourcentage comme moyenne ±écart-type. Pour les données ajustées (aj.), la composition minéralogique est calculée en ignorant les phyllosilicates qui ne sont pas des traceurs adéquats pour les plages sableuses.*

| | **Falaises NE** | **Flèche littorale** | **Plage SO** | **Falaises NE aj.** | **Flèche littorale aj.** | **Plage SO aj.** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nbr échantillons | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 2 |
| Quartz | 46,5 ±9,3 | 84,3 ±3,4 | 70,2 ±8,0 | 69,5 ±9,7 | 87,7 ±2,4 | 77,0 ±6,6 |
| Plagioclase | 1,4 ±2,2 | 1,2 ±0,6 | 5,4 ±0,8 | 2,2 ±3,4 | 1,3 ±0,6 | 5,9 ±1,1 |
| Feldspath K | 3,2 ±1,1 | 0,6 ±0,5 | 2,4 ±0,9 | 4,8 ±1,5 | 0,7 ±0,5 | 2,6 ±1,0 |
| Calcite | 8,7 ±4,4 | 7,2 ±1,0 | 9,6 ±2,7 | 13,1 ±6,8 | 7,5 ±1,2 | 10,6 ±3,2 |
| Dolomite | 1,5 ±1,4 | 0,9 ±0,1 | 0,9 ±0,6 | 2,2 ±2,1 | 0,9 ±0,1 | 1,0 ±0,7 |
| Ankérite | 3,2 ±2,2 | 1,5 ±0,6 | 2,1 ±0,5 | 4,9 ±3,6 | 1,6 ±0,6 | 2,3 ±0,6 |
| Amphibole | 0,3 ±0,2 | 0,0 ±0,0 | 0,0 ±0,0 | 0,4 ±0,3 | 0,0 ±0,0 | 0,0 ±0,0 |
| Pyroxène | 0,3 ±0,4 | 0,2 ±0,2 | 0,5 ±0,0 | 0,4 ±0,6 | 0,2 ±0,2 | 0,5 ±0,0 |
| Hématite | 1,6 ±0,5 | 0,1 ±0,2 | 0,0 ±0,0 | 2,4 ±1,0 | 0,1 ±0,2 | 0,0 ±0,0 |
| Kaolinite | 5,8 ±1,7 | 0,2 ±0,2 | 1,0 ±0,8 | | | |
| Chlorite | 1,9 ±3,3 | 0,2 ±0,2 | 1,8 ±0,2 | | | |
| Biotite | 0,6 ±0,4 | 0,0 ±0,0 | 0,0 ±0,0 | | | |
| Illites | 24,8 ±7,2 | 3,5 ±0,9 | 6,1 ±1,5 | | | |
| Smectite | 0,1 ±0,3 | 0,0 ±0,0 | 0,0 ±0,0 | | | |

# 9 CAMÉRA OBSERVANT LA ZONE DE DÉFERLEMENT

L'impact d'un épi sur le transport sédimentaire dépend, entre autres facteurs, de la position de la terminaison vers le large de l'épi par rapport à la zone de déferlement et de la longueur de l'épi par rapport à la largeur de la zone de déferlement (Basco, 2008). C'est pourquoi la zone de déferlement a été observée avec une caméra automatique (Reconyx PC800) installée sur un poteau en bordure de la route 132 au-dessus de l'enrochement (Figure 85). La position de la zone de déferlement a été caractérisées pour différents niveaux de marée et pour différentes catégories de vagues incidentes à partir des images géorectifiées de l'automne 2019 pour 65 rafales d'images avec des vagues $H_{m0}$ de plus de 0,5 m au site HOC devant la plage. Pour cela 5850 images ont été géorectifiées, puis examinées avec l'interface graphique Matlab développée pour cette tâche.

Les limites externe et interne de la zone de déferlement ont été déterminées (voir Figure 26 pour la définition de ces limites). Elles sont indiquées par rapport à la terminaison des épis (valeurs positives vers le large). La largeur de la zone de déferlement a ensuite été calculée comme la distance entre ces deux limites. Ces paramètres ont été déterminées pour la position du profil topographique 14 (ligne médiane entre les deux épis les plus au nord) et pour le profil topographique 11 (ligne médiane entre le deuxième épi et le troisième épi depuis le nord). Les résultats sont similaires pour les deux profils topographiques. À noter que les mesures pour le profil 14 sont plus fiables, car cette zone est mieux visible sur les images.

La limite externe de la zone de déferlement, c'est-à-dire les brisants les plus au large, varie entre -11 m et +50 m (Figure 86 et Tableau 27 à l'Annexe 7). La limite externe est parfois plus proche de la terre que la terminaison des épis (valeurs négatives), mais seulement pour de vagues inférieurs à 0,75 m et des niveaux d'eau entre -0,5 et +0,2 m CGVD2013. La limite externe est entre 0 m et 15 m au large de la terminaison des épis pour des vagues inférieures à 0,8 m, sauf pour certains niveaux d'eau très bas qui déplacent la limite externe plus au large. Enfin, pour des vagues de tempête de plus de 0,8 m, la limite externe est nettement plus au large, jusqu'à 50 m de la terminaison des épis.

La limite interne de la zone de déferlement, c'est-à-dire la ligne de limite des eaux à un moment donné, est directement relié au niveau d'eau (marée, surcote et setup dû aux vagues) mesuré près de la plage. Au-dessus de cette limite commence la zone du jet de rive. Cette limite interne varie entre -18 m et -50 m pour les événements avec $H_{m0} > 0,5$ m examinés ici (Figure 86 et Tableau 27). À noter que cette limite interne est parfois au niveau de la terminaison des épis lors de marées basses de vive eau avec une mer relativement calme.

La largeur de la zone de déferlement varie surtout avec la hauteur des vagues (Figure 87 et Tableau 27), avec une largeur de 25 m à 40 m pour des vagues inférieures à 0,6 m, et une largeur augmentant jusqu'à 100 m pour les vagues dépassant 1,4 m. Les corrélations sont nettement meilleures avec la hauteur des vagues ($r = 0,86$) qu'avec le niveau d'eau ($r = 0,59$) ou la période des vagues ($r = 0,03$).

C'est donc surtout le niveau d'eau et la hauteur des vagues, qui déterminent la position de la zone de déferlement. Le niveau d'eau déplace la zone de déferlement, la rapprochant de la côte lors de niveaux d'eau plus élevés, mais en influençant peu la largeur de la zone de déferlement. Une plus grande hauteur des vagues élargit la zone de déferlement, car les brisants sont situés en eau plus profonde. Une plus longue période des vagues devrait avoir le même effet, mais cela n'est pas visible dans les données présentées ici.

L'objectif des épis est de ralentir la dérive littorale retenant une partie du sédiment transporté le long de la côte dans les compartiments entre les épis. Pour un bon fonctionnement d'un champ d'épis, il est essentiel que du sédiment puisse passer d'un compartiment à l'autre. Des épis trop longs et imperméables engendreraient un transport unidirectionnel du sédiment vers le large par le courant de retour et donc une perte pour la plage. Le transport de sédiment le long de la côte se passe surtout dans la zone de déferlement et dans la zone du jet de rive. C'est pourquoi les épis sont généralement conçus pour se terminer avant la limite externe de la zone de déferlement, afin que le sédiment qui contournerait l'épi par le large soit ramené vers la plage et continue d'être transporté le long de la côte.

Les épis de Hope Town sont relativement courts, allant environ jusqu'à la ligne des basses-eaux de marée de vive eau, c'est-à-dire la limite entre le bas de plage et l'avant-plage. Nos résultats indiquent que la limite externe de la zone de déferlement est au large de la terminaison des épis pour la plupart des cas examinés ici et toujours lors des tempêtes. De plus, la partie vers le large des épis est semi-perméable à la dérive littorale (constituée de gros blocs de pierre), ce qui écarte également la perte de sédiment.

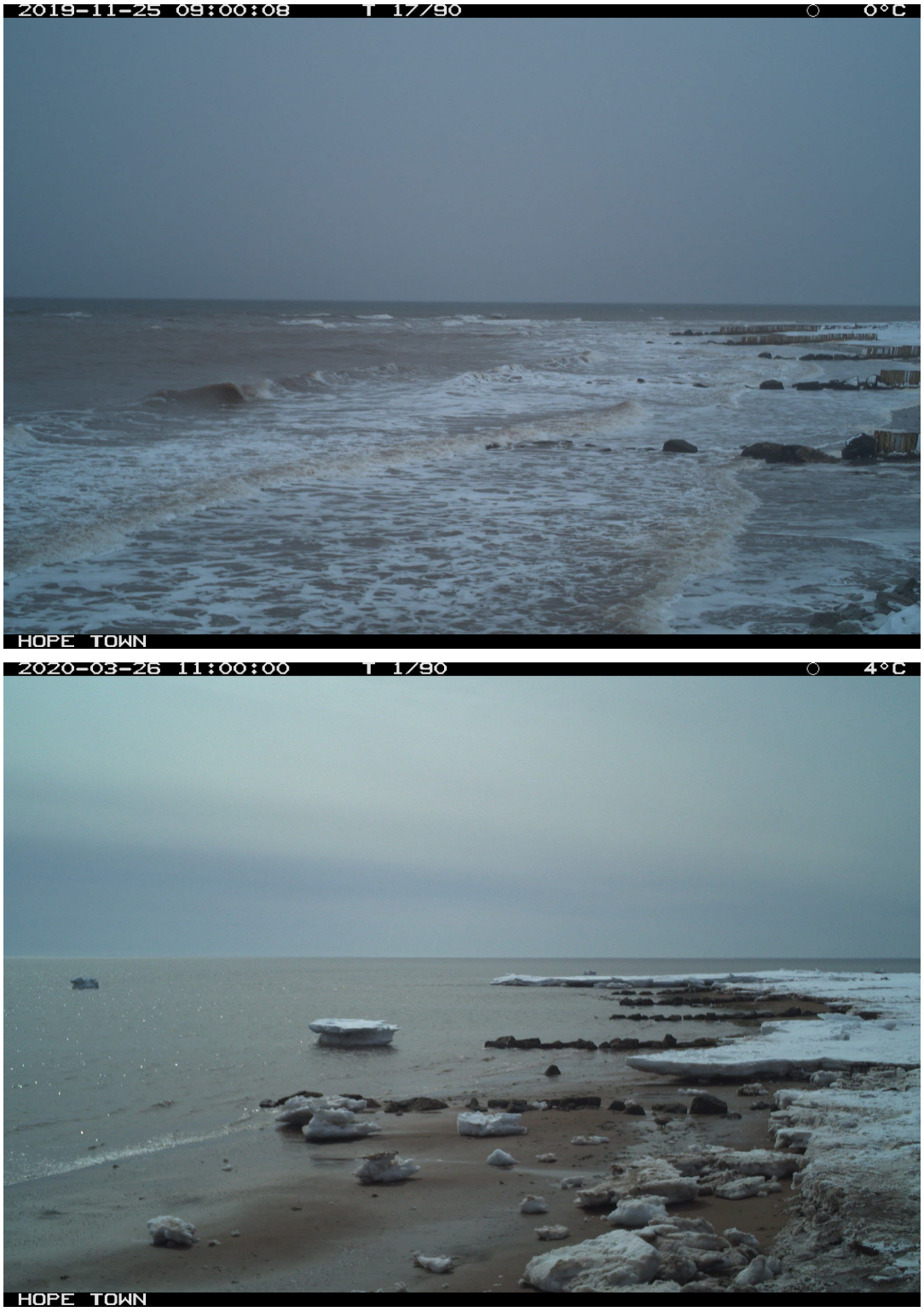



*Figure 85. Photographies enregistrées par la caméra Reconyx à Hope Town le 25 novembre 2019 à 09:00 (un niveau de marée de -0,28 m CGVD2013, une surcote de 0,43 m et des vagues de 0,77 m) et le 26 mars 2020.*

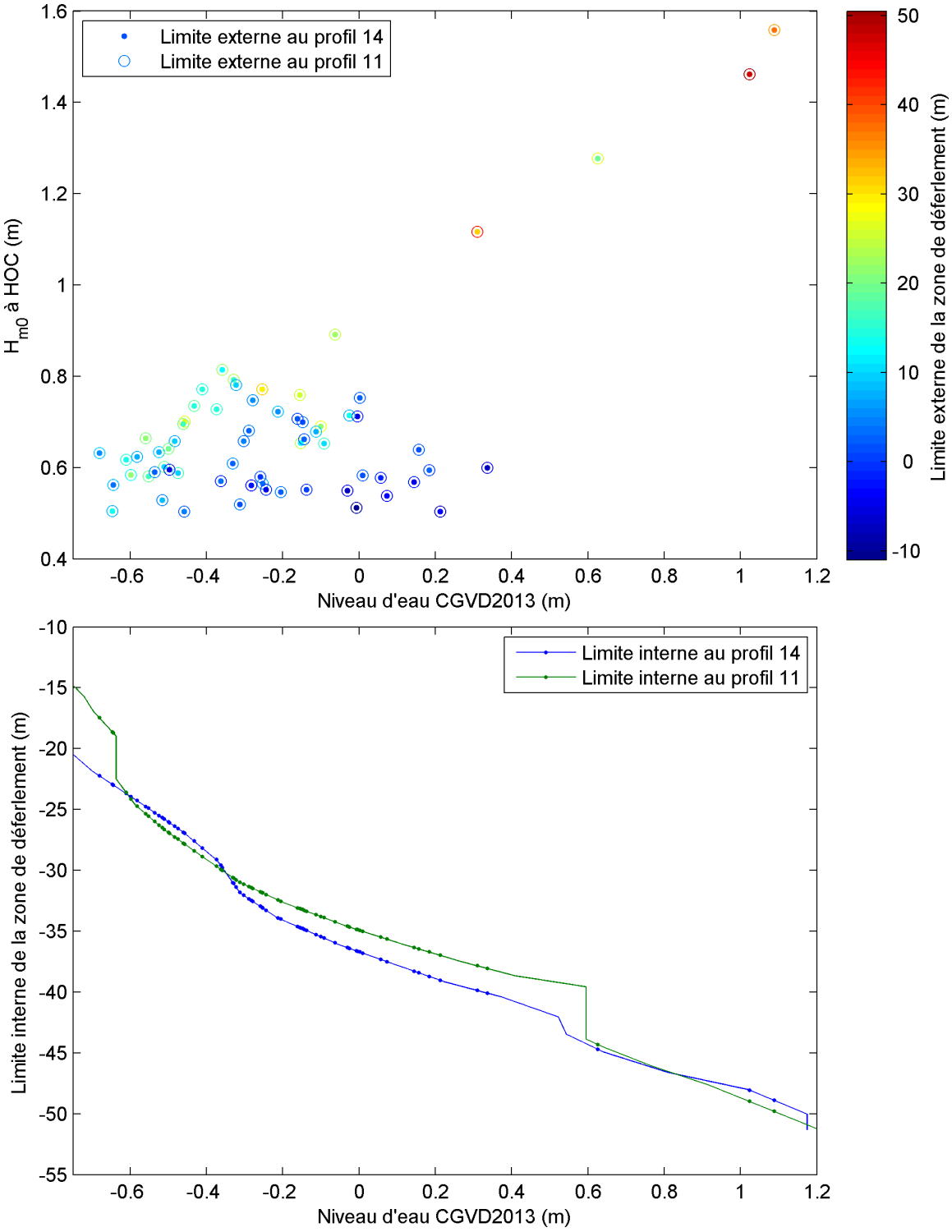



*Figure 86. Positions de la zone de déferlement (indiquée par rapport à une ligne reliant la terminaison avale des épis, avec des valeurs positives vers le large) pour les profils topographiques 11 et 14 en fonction du niveau d'eau et de la hauteur des vagues $H_{m0}$. (Haut) La limite externe est indiquée par un code de couleur. (Bas) La limite interne, qui dépend directement du niveau d'eau et du profil de plage.*

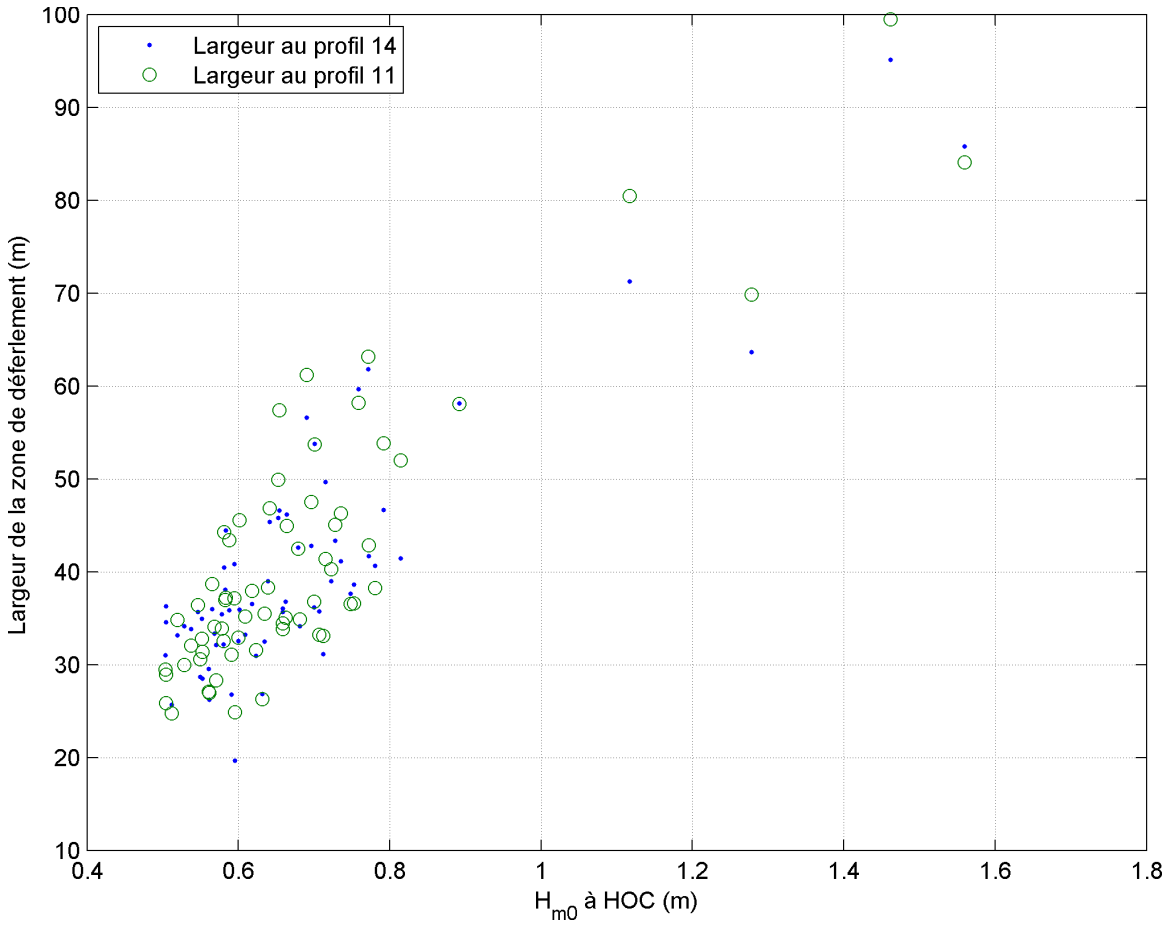



*Figure 87. Largeur de la zone de déferlement pour les profils topographiques 14 et 11 en fonction de la hauteur de vagues $H_{m0}$.*

# 10 MODÉLISATION

Un modèle numérique, qui reproduit les vagues, les courants et le transport sédimentaire a été implémenté pour le secteur de la flèche littorale de Hope Town. L'objectif est de pouvoir simuler la réaction de la plage à divers scénarios, comme la hausse du niveau marin ou des tempêtes extrêmes, afin d'évaluer l'évolution du site avec les futurs changements climatiques. Seules les périodes sans glace de mer seront étudiées par modélisation, car les conditions hivernales avec la présence du pied de glace et de glaçons (radeau de glace) échoués sur la plage ne peuvent pas être reproduit avec le modèle numérique.

**Lors de la dernière étape de la modélisation, à savoir la modélisation des courants et du transport sédimentaire sur la grille fine, des résultats irréalistes (niveau d'eau de plusieurs dizaines de mètres, accumulation de sédiments de plusieurs milliers de mètres) se sont produits lors de certain pas de temps, ce qui a forcé l'arrêt des calculs. Ces problèmes se sont produits pour la simulation des conditions de 2018 et pour la simulation d'autres scénarios. Il n'a pas été possible de comprendre les causes et de résoudre ces problèmes avant le délai imparti pour la remise du rapport, si bien que la modélisation est incomplète. Néanmoins, les différentes étapes réalisées sont décrites ci-dessous.**

## 10.1 Description du modèle

*Modèle utilisé*

La modélisation a été effectuée avec le modèle Delft3D (Lesser et al., 2004; Booij et al., 1999; Van Rijn, 2000; Deltares, 2018) en utilisant les modules suivant FLOW (courants et marées), WAVE (vagues, identique au modèle de vague SWAN) et MORPHOLOGY (transport sédimentaire et changement de la bathymétrie). C'est un modèle couvrant-découvrant, c'est-à-dire que certaines cellules de la grille peuvent s'assécher temporairement selon le niveau de la marée. Bien que les eaux de la baie des Chaleurs soient stratifiées, le module FLOW a été opéré avec une seule couche, car les 10 m de surface sont généralement assez bien mélangés dans la baie des Chaleurs et la majeure partie du domaine modélisé a moins de 12 m de profondeur.

Le module WAVE représente les interactions de quadruplets, le moutonnement (formulation de Komen et al. (1984)), le déferlement des vagues, la diffraction et la réfraction. La formulation utilisée pour la génération des vagues est celle de Janssen avec une formulation linéaire de la croissance des vagues de vent (Cavaleri et Malanotte-Rizzoli, 1981). Le module WAVE intègre également l'action des niveaux d'eau sur la transformation des vagues. En eau peu profonde, les formulations décrivant les interactions entre les vagues ont été supplémentées avec un terme source prenant en compte les interactions non-linéaires entre trois vagues (triads). La dissipation de l'énergie des vagues par friction sur le fond est représentée par la formulation dites JONSWAP (Hasselmann et al., 1973).

*Domaines et grilles*

Deux grilles curvilinéaires imbriquées ont été utilisées pour la modélisation des courants. La grille grossière G4 s'étend sur 3,2 km le long de la côte (de la pointe Trachy près du port de Saint-Godefroy) à 1,3 km au sud-ouest du chenal de la lagune) et de 1,6 km vers le large (Figure 88). Elle couvre aussi toute la lagune de Hope Town. La grille est composée de 778 cellules, dont la taille varie de 130 m au large à 40 m près de la plage et dans certaines parties de la lagune. À noter que le projet n'a pas l'ambition de modéliser avec précision les courants et les niveaux d'eau dans la lagune de Hope Town. Celle-ci est incluse dans la grille G4 seulement pour obtenir un débit réaliste dans le chenal de la lagune près de la plage du champ d'épis. Ce débit est utilisé pour la modélisation sur la grille G5.

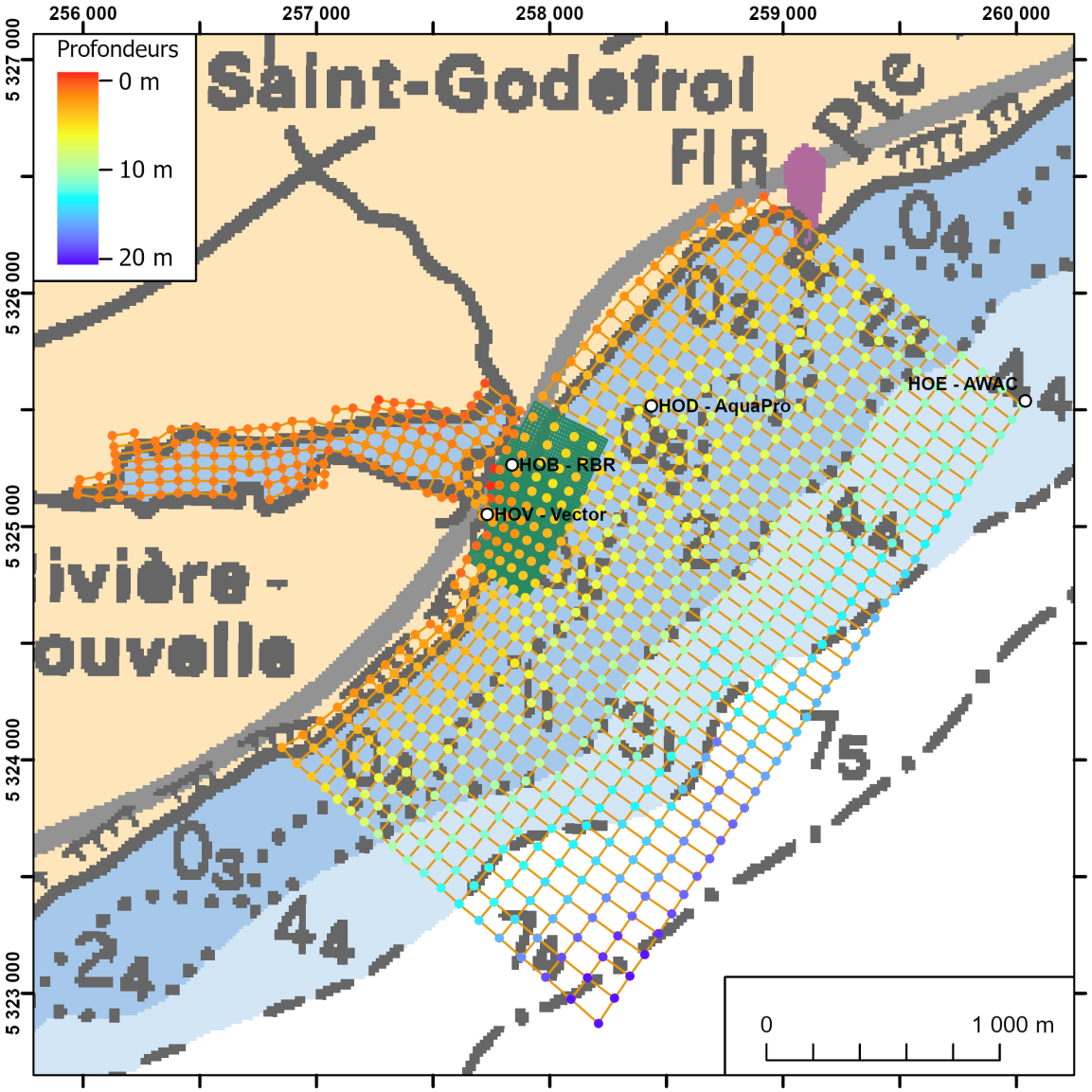



*Figure 88. Grille de modélisation grossière G4 avec la bathymétrie de la grille et la position des mouillages ayant mesurés les courants et le niveau d'eau. L'étendue de la grille fine est indiquée en vert. Les profondeurs de la carte marine sont en brasses/pieds.*

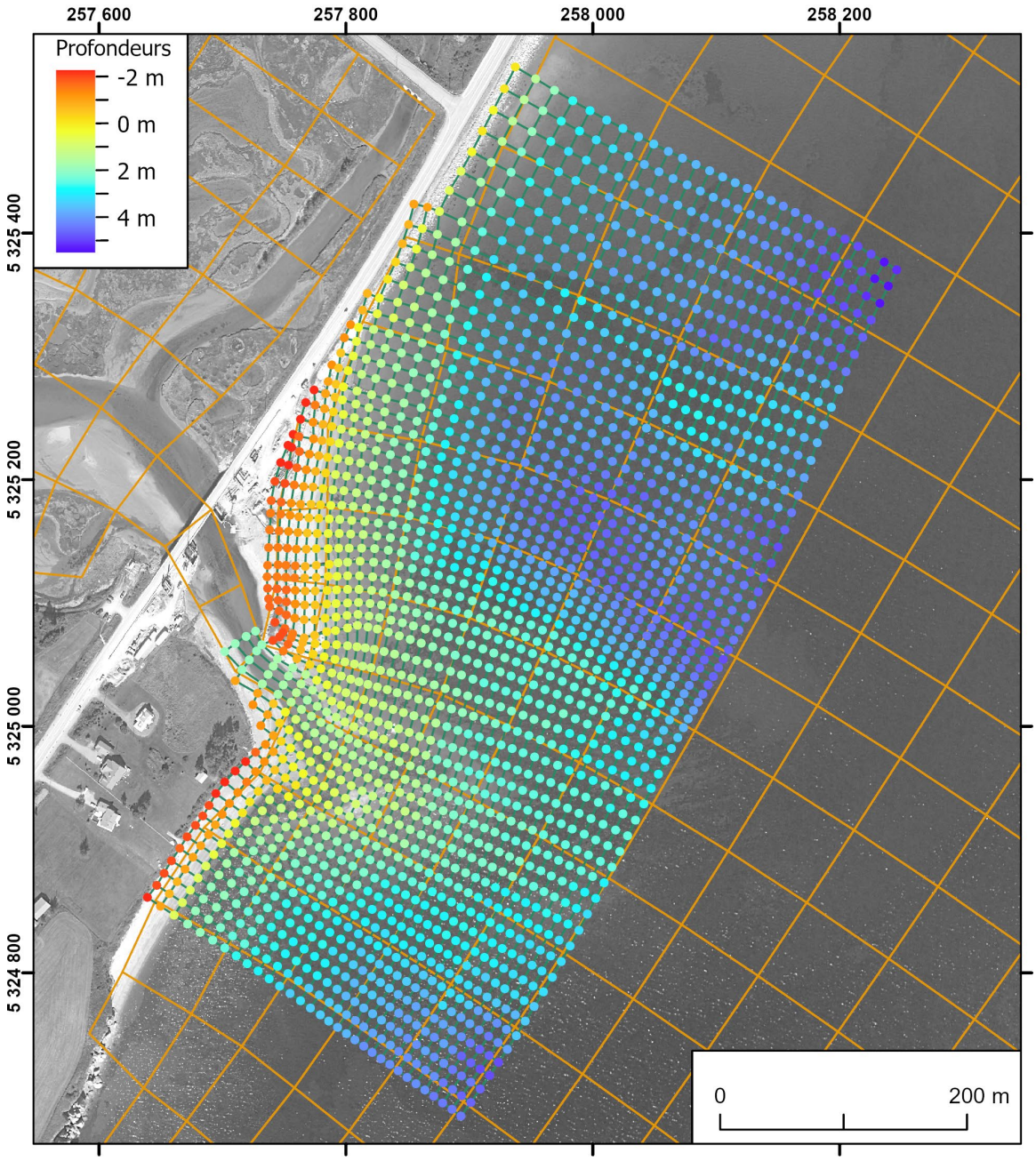



*Figure 89. Grille de modélisation fine G5 avec la bathymétrie de la grille. La grille grossière G4 est indiquée en orange.*

La grille fine G5 est centrée sur la plage de la flèche sableuse de Hope Town. Cette grille s'étend sur 740 m le long de la côte et 400 m vers le large. Elle ne couvre pas la lagune de de Hope Town, mais seulement le début du chenal jusqu'à sa section la plus étroite (Figure 89). Cette grille est composée de 1923 cellules, dont la taille varie entre 8 m et 20 m. Aux limites de la grille G5, le rapport entre la taille des cellules G5 par rapport aux cellules G4 est d'environ 6. Sur la plage du champ d'épis, les limites de cellules de cette grille curvilinéaire sont orientées parallèlement aux épis, avec quatre ou cinq cellules entre les épis adjacents. Des « *thin dams* » (équivalent de digues étroites bloquant courants et

transport sédimentaire) sont placés sur la position des épis en bois et la partie amont des épis en blocs.

Plusieurs sources de données ont été utilisées pour établir les grilles bathymétriques G4 et G5. Pour la plage de la flèche sableuse et pour la plage adjacente au sud-ouest de chenal de la lagune, nous avons utilisé les modèles numériques de terrain préparés avec le relevé topographique de mai 2018 (voir section 7.1). Le reste de la zone côtière a été complété avec le jeu de données 3108049 du Service hydrographique du Canada (SHC), qui a été levé vers 2005 par Lidar bathymétrique. Enfin, les anciens points de sonde du SHC espacés d'environ 200 m ont été utilisés pour la zone avec une profondeur supérieure à 12 m. Toutes les profondeurs ont été converties au référentiel CGVD2013, qui est la référence verticale utilisée pour la modélisation. Les grilles bathymétriques du modèle ont été établies avec l'utilitaire Quickin de Delft3D. Les profondeurs, qui sont définies aux coins des cellules, sont présentées sur les figures 88 et 89.

Pour représenter adéquatement les courants, une grille de rugosité spatialement variable est utilisée pour chacun des deux domaine G4 et G5. La rugosité est représentée avec la formulation de White-Colebrook. La rugosité de Nikuradse ($k_s$) a été estimée selon la granulométrie probable pour les différents secteurs. Elle est généralement 0,012 m dans la baie des Chaleurs. Elle est de 0,250 m dans la partie étroite du chenal de la lagune, avec une augmentation graduelle de $k_s$ à l'approche est du chenal. Dans la lagune de Hope Town, $k_s$ est de 0,150 m dans les zones de marais littoral (présence de végétation aquatique) et de 0,090 m dans les chenaux principaux et pour assurer la stabilité numérique du modèle (sinon des vitesses trop rapides se produisent lors de la marée montante, ce qui crée des oscillations et des instabilités numériques). Enfin, $k_s$ augmente à 0,090 m au haut de la plage de Hope Town pour la grille G5.

Les vagues ont été modélisées sur le domaine de la grille grossière G4 sans la lagune de Hope Town, mais avec la grille curvilinéaire G4w ayant une meilleure de résolution (Figure 90). La grille G4w est composée de 16127 cellules, dont la taille varie entre 40 m et 10 m (7 m dans la direction terre-mer sur la plage du champ d'épis). Les épis en bois sont représentés par des obstacles type « murs fins verticaux » qui peuvent être submergés lors des très hauts niveaux d'eau.

Les grilles G4w et G5 ont une résolution similaire. Elles sont aussi identiques sur une grande partie du domaine G5, différant seulement sur la plage car la grille G5 a été mieux ajustée à l'orientation des épis.

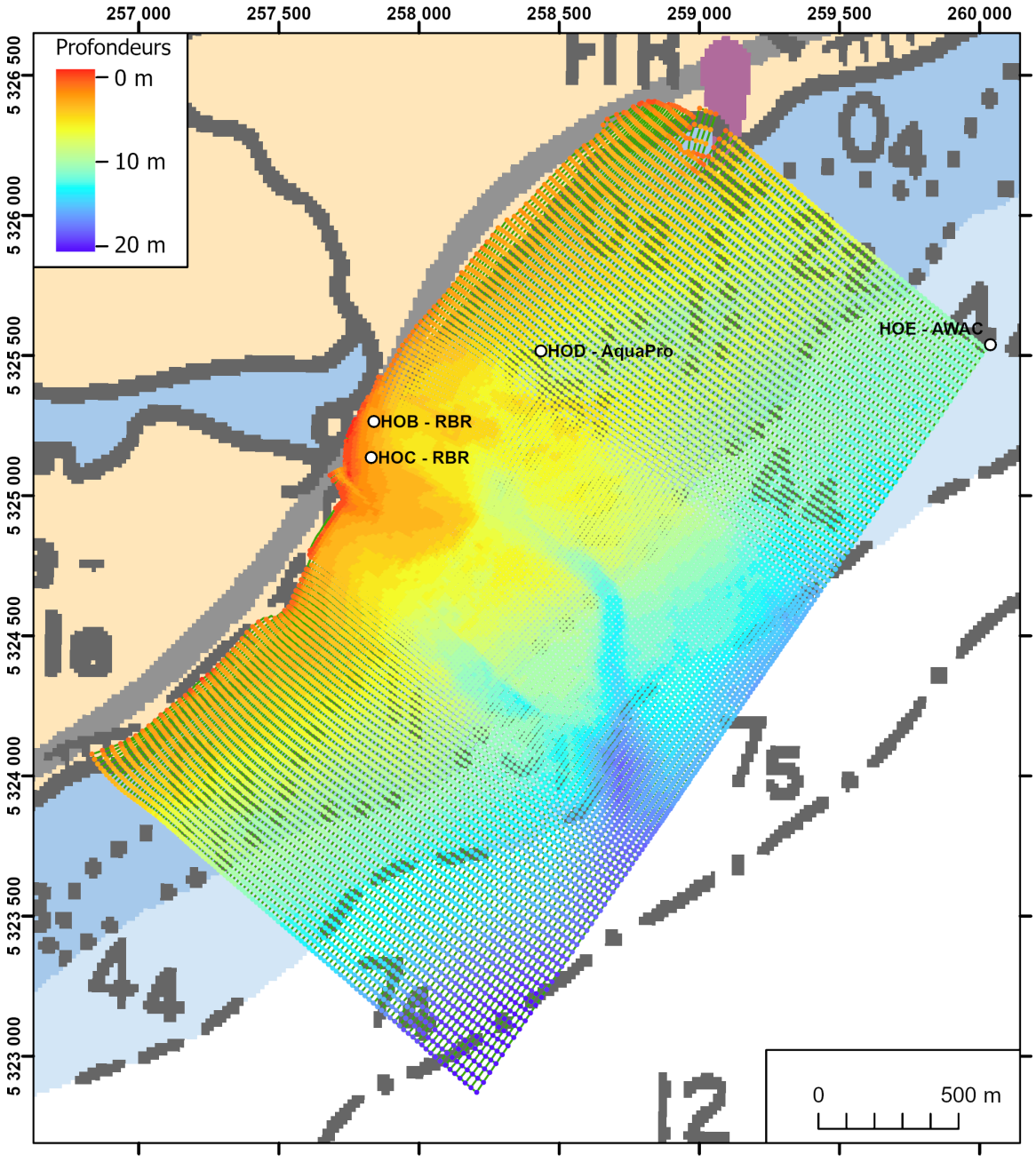



*Figure 90. Grille de modélisation des vagues G4w avec la bathymétrie de la grille et la position des mouillages ayant mesurés les vagues. Les profondeurs de la carte marine sont en brasses/pieds.*

*Forçages*

Les données de station météorologique de Miscou (située à 48 km à l'est du site d'étude) ont été utilisées pour le vent. Quand elles sont manquantes, elles ont été complétées avec les données de la station météorologique de Cap d'Espoir (située à 72 km au nord-est du site d'étude).

Le niveau d'eau du module WAVE est défini par les données du marégraphe HOB situé juste devant la plage du champ d'épi (Figure 90).

Pour le module FLOW avec la grille grossière G4, les niveaux d'eau et les courants aux frontières ouvertes sont contrôlés en imposant des niveaux d'eau aux frontières nord-est, sud-est et sud-ouest. Pour les frontières nord-est et sud-ouest, deux séries temporelles de niveaux d'eau ont été définies à partir du niveau d'eau mesuré par le marégraphe HOB auquel est ajouté/soustrait la pente observé entre le marégraphe HOB et le marégraphe de Paspébiac, distant de 12 km. Pour la frontières sud-est, le niveau d'eau imposé est spatialement variable entre les deux séries temporelles des frontières nord-est et sud-ouest. Ces trois frontières sont faiblement réflectives, c'est-à-dire que les vagues sortantes peuvent franchir ces frontières sans être réfléchies (frontières de type Rieman).

Pour le module Flow avec la grille imbriquée G5, les conditions aux frontières proviennent des simulations avec la grille grossière G4. Aux frontières nord-est, sud-est et sud-ouest, le niveau d'eau est imposé. Ces trois frontières sont faiblement réflectives, c'est-à-dire que les vagues sortantes peuvent franchir ces frontières sans être réfléchies (frontières de type Rieman). Par contre, c'est le débit par cellule qui est imposé à la frontière ouverte du chenal de la lagune.

Le débit des rivières Paspébiac et Saint-Godefroi, qui se jettent dans la lagune de Hope Town, est représenté avec une climatologie mensuelle, qui avait été préparé pour le projet MTQ CC07.1 (Neumeier et Joly, 2019). Cette climatologie avait été estimée à partir de la superficie de chaque versant et du débit de la Grande Rivière entre 1972 et 1997. Le débit de chaque moment est interpolé entre les valeurs mensuelles moyennent attribuées au 15$^{e}$ jour de chaque mois.

Pour le module WAVE, les vagues aux frontières nord-est, sud-est et sud-ouest de la grille G4w sont repris des vagues mesurées par l'AWAC du site HOE, qui est localisé au coin est de la grille G4w.

*Transport sédimentaire*

Le transport sédimentaire a été modélisé seulement sur la grille fine G5. La formulation de Van Rijn (1993) a été utilisé dans Delft3D. Celle-ci distingue entre le transport en suspension au-dessus d'un niveau de référence (correspondant à la rugosité de Nikuradse ici) et le transport par charriage (Deltares, 2018).

Pour représenter la variabilité spatiale de la granulométrie à travers le domaine G5, quatre fractions de sédiments ont été utilisées en fonction des analyses granulométrique de la plage (voir section 7.2) et des autres observations de terrain (diamètres médians de 1 mm, 4 mm, 40 mm et 100 mm). Au démarrage de la modélisation, la majeure partie du domaine est couverte de sable 1 mm (Figure 91). Le gravier 4 mm se trouve en haut de la plage et sur le pourtour du domaine G5 (une rangée de cellule pour éviter que les courants parfois exagérés en bordure du domaine provoquent un transport sédimentaire irréaliste). Le chenal d'entrée de la lagune a des grands galets (100 mm) et l'approche du chenal successivement des petits gales (40 mm) et du gravier (4 mm). Enfin, une zone au nord-est du domaine est

sans sédiment, en partie car il y a une crête rocheuse sous-marine visible sur les données multifaisceau (Figure 35), et en partie car un très fort courant est parfois produit dans Delft3D au nord de cette crête, courant qui produit du transport sédimentaire irréaliste.

Initialement, il y a généralement 2 m de sédiments disponibles, mais seulement 0,5 m dans le chenal de la lagune et sur le pourtour du domaine. Le modèle fonctionne avec 4 couches superposées de sédiments ayant jusqu'à 0,15 m d'épaisseur et d'une couche basale. La morphologie (bathymétrie) et les sédiments disponibles dans chaque cellule sont mis à jour après chaque pas de temps en fonction du transport sédimentaire calculé.

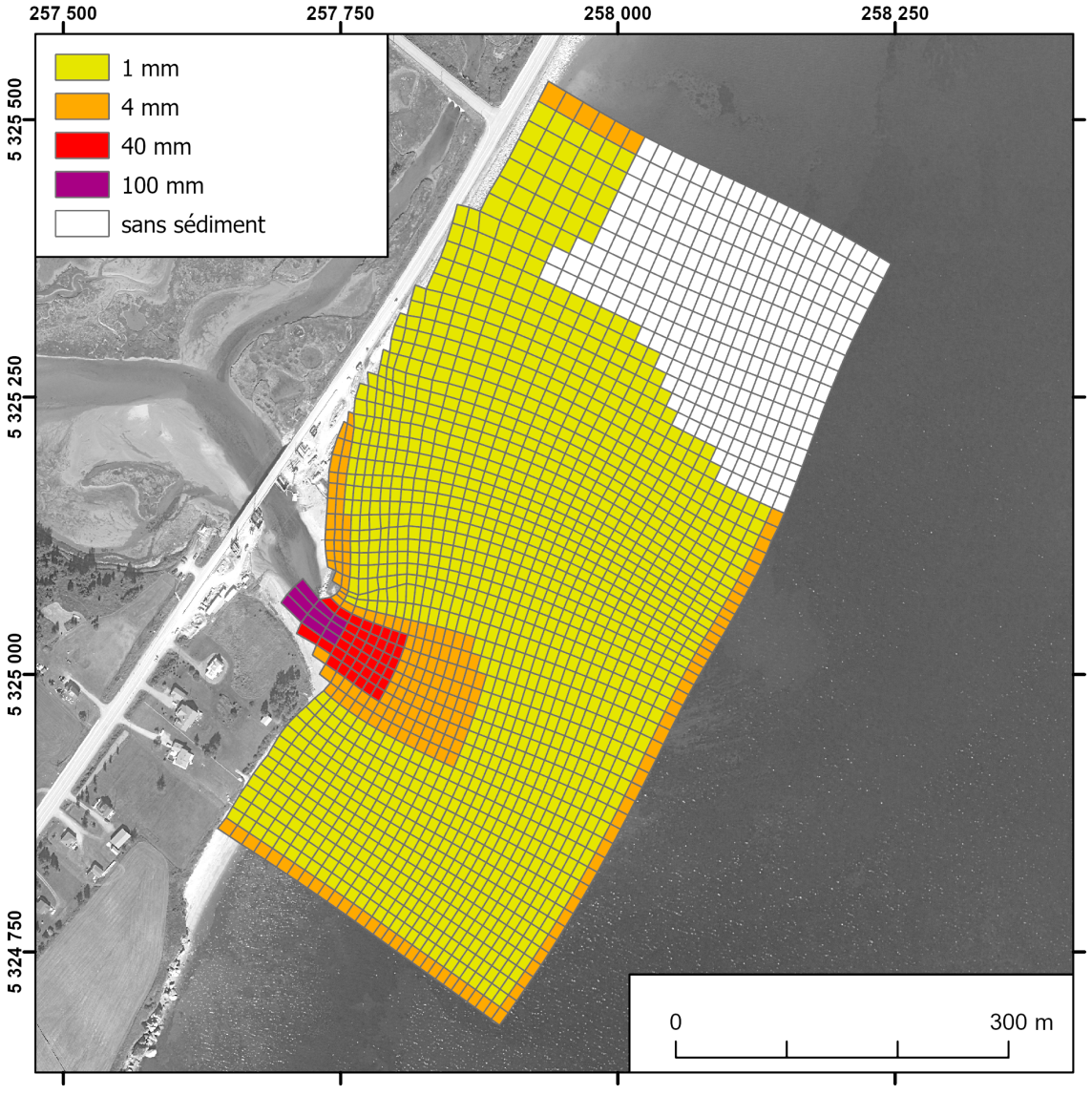



*Figure 91. Répartition initiale du sédiment pour la modélisation du transport sédimentaire sur la grille G5.*

*Configuration du modèle*

Le module FLOW est exécuté sur la grille G4 avec un pas de temps de 12 s. Le pas de temps pour l'écriture des sorties pour l'imbrication G4/G5 est de 2 minutes. Le module WAVE est exécuté sur la grille G4w avec un pas de temps de 1 heure. Les modules FLOW et MORPHOLOGY (incluant transport sédimentaire) sont ensuite exécutés sur la grille G5 avec un pas de temps de 6 s, en utilisant les résultats de FLOW sur la grille G4 pour les conditions aux frontières et les résultats de WAVE sur la grille G4w pour les conditions de vagues.

Le module FLOW nécessite des pas de temps relativement court pour qu'une particule d'eau ne se déplace pas plus que d'une cellule à chaque pas de temps. C'est pour cette raison que deux grilles sont imbriquées. En effet, une résolution fine avec un petit pas de temps et le calcul du transport sédimentaire sur l'ensemble du domaine de la grille G4 aurait nécessité un temps de calcul bien trop long. La grille grossière G4 (778 cellules de taille 40-130 m) permet de couvrir une zone plus grande, incluant la lagune de Hope Town, avec un temps de calcul raisonnable. La grille fine G5 (1923 cellules de taille 8-20 m) permet d'avoir une meilleure résolution sur le site d'étude en limitant aussi la modélisation du transport sédimentaire sur le secteur d'intérêt.

Comme la modélisation des vagues ne requiert pas des pas de temps aussi courts, il n'est pas nécessaire d'imbriquer deux grilles pour avoir des temps calcul raisonnables. Il est possible d'utiliser sur tout le domaine de la grille G4 la grille fine G4w (16127 cellules de taille 10-40 m), puis d'utiliser les résultats des vagues sur la grille G4w pour modéliser les courants et le transport sédimentaire sur la grille fine G5.

À noter que la modélisation hydrodynamique et la modélisation des vagues sont parallélisées dans Delft3D, c'est-à-dire que sur un processeur avec plusieurs cœurs tous les cœurs peuvent travailler en parallèle, alors que la modélisation du transport sédimentaire et de l'évolution morphologique n'est pas parallélisée dans Delft3D. Cela provoque un temps d'exécution nettement plus long pour les simulations avec la grille G5, sur laquelle sont modélisés les courants et le transport sédimentaire.

## 10.2 Validation du modèle

Les courants et les vagues du modèle Delft3D ont été validés avec les mesures de terrain. Les niveaux d'eau n'ont pas été validés car les différences spatiales sur le domaine G4 (seulement 3,2 × 1,3 km) sont trop faibles par rapport à la précision des capteurs de pression des mouillages. Il n'y a pas de validation du transport sédimentaire faute de données de terrain, mais les variations morphologiques observées sont comparées avec les résultats des relevés topographique à la section 10.4 ci-dessous.

*Paramètres statistiques de validation*

En plus des comparaisons visuelles sur les graphiques, les indicateurs statistiques standards suivants ont été utilisés pour quantifier la corrélation entre les courants et les vagues

prédites par Delft3D ($h_i$) et les courants et les vagues mesurés sur le terrain ($m_i$, Neumeier et al., 2013).

Le **biais** ou moyenne des erreurs indique l'écart moyen entre valeurs prédites par le modèle et celles mesurées, c'est-à-dire la tendance du modèle à sur- ou sous-estimer les valeurs :

$$biais = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i - m_i$$

Le **biais absolu**, qui est une mesure de la magnitude de l'erreur moyenne :

$$biais\ absolu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |h_i - m_i|$$

Le **biais relatif** est similaire au biais, mais normalisé par la moyenne des valeurs mesurées afin de pouvoir comparer la performance à plusieurs sites ayant des caractéristiques différentes (il n'est pas utilisé pour les courants pouvant être positifs ou négatifs) :

$$biais\ relatif = \sum_{i=1}^{n} h_i - m_i \ \ / \ \ \sum_{i=1}^{n} m_i$$

La racine de la moyenne du carré des erreurs (**RMSE**), une autre mesure de la magnitude de l'erreur moyenne qui donne plus de poids aux valeurs d'erreur extrêmes :

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - m_i)^2}{n}\right]^{0,5}$$

Les paramètre de la **droite de régression linéaire ($h_i$ = a $m_i$ + b)**, en particulier la pente (a), indiquent si le modèle sous-estime (a<1) ou surestime (a>1) les grandes valeurs, donc évalue particulièrement les performances lors de tempêtes ou lors des maxima des courants de marée. Le coefficient de détermination (**$R^2$**) indique la qualité de la régression linéaire, par contre, il n'est pas une mesure de la performance du modèle ($R^2$ peut être proche de 1 pour un mauvais modèle ayant un fort biais).

Enfin, le **critère de performance global** ($P_s$) est un indice synthétique d'appréciation de la qualité du modèle basé sur des critères de dispersion et d'erreur (Hanson et al., 2009). Plus le score est faible, moins bonne est la prévision, un score de 1 indiquant une prédiction parfaite. Ce critère de performance global est utilisé seulement pour les vagues.

$$P_s = \frac{\widehat{RMSE} + \hat{b} + (\widehat{SI})}{3}$$

Avec :

$$\widehat{RMSE} = \left(1 - \frac{RMSE}{m_{RMS}}\right)$$

$$\hat{b} = \left(1 - \frac{|b|}{m_{RMS}}\right)$$

$$\widehat{SI} = \left(1 - \frac{\sigma_d}{\overline{m}}\right)$$

$$m_{RMS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} m^2}{n}\right)^{0,5}$$

$$\overline{m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m$$

*Validation des courants*

Les courants modélisés sur la grille G4 ont été validés avec les courants mesurés par l'AWAC au site HOE (coin est de la grille G4), et l'Aquadopp Profiler au site HOD (Figure 88). Il n'y avait pas de courantomètre dans le chenal de la lagune durant l'année 2018 utilisée pour la modélisation. Néanmoins, l'amplitude des courants de marée et des débits dans le chenal est comparée avec les mesures de terrain de 2019 au site HOV (Figure 88). Les courants modélisés sur la grille G5 n'ont pas pu être validés, car il n'y avait pas de courantomètre dans le domaine de cette grille. Toutefois, FLOW sur la grille G5 a la même configuration que FLOW sur la grille G4 (la seule différence est la résolution de la grille et le pas de temps), les résultats de la validation des courants sur la grille G4 devraient aussi s'appliquer pour les courants sur la grille G5.

Pour la validation au site HOD, les courants modélisés (sorties aux 2 minutes) ont été sous-échantillonnés au pas de temps des mesures observationnelles (20 minutes). Les courants mesurés ont été moyennés verticalement, car le modèle travaille avec une seule couche. Enfin, seulement la période commune de déploiement et de modélisation est considérée (2018-05-16 20:00 à 2018-10-23 19:40).

Aussi bien les courants mesurés que les courants modélisés au site HOD sont orientés sud-ouest à nord-est, avec toutefois des angles légèrement différents (Figure 92). Les courants modélisés par Delft3D sont bien parallèles au trait de côte. Par contre, les courant de flot mesurés sont dirigés obliquement vers la côte, ce qui pourrait être dû à la présence d'une dépression orienté WSW-ENE à l'est du site HOD (Figure 35). Comme cette dépression est oblique par rapport à la grille G4, les bordures de la dépression ne sont pas représentées de manière nette dans la grille bathymétrique, ce qui probablement adoucit son effet sur les courants modélisés. De plus, la direction sud-ouest (flot) domine pour les courants mesurés alors que pour les courants modélisés la direction dominante est vers le nord-est (jusant).

Pour faciliter la comparaison des séries temporelles, les amplitudes des courants sur la Figure 93 sont référencées par rapport à l'orientation dominante des courants (58°) au lieu du nord géographique.

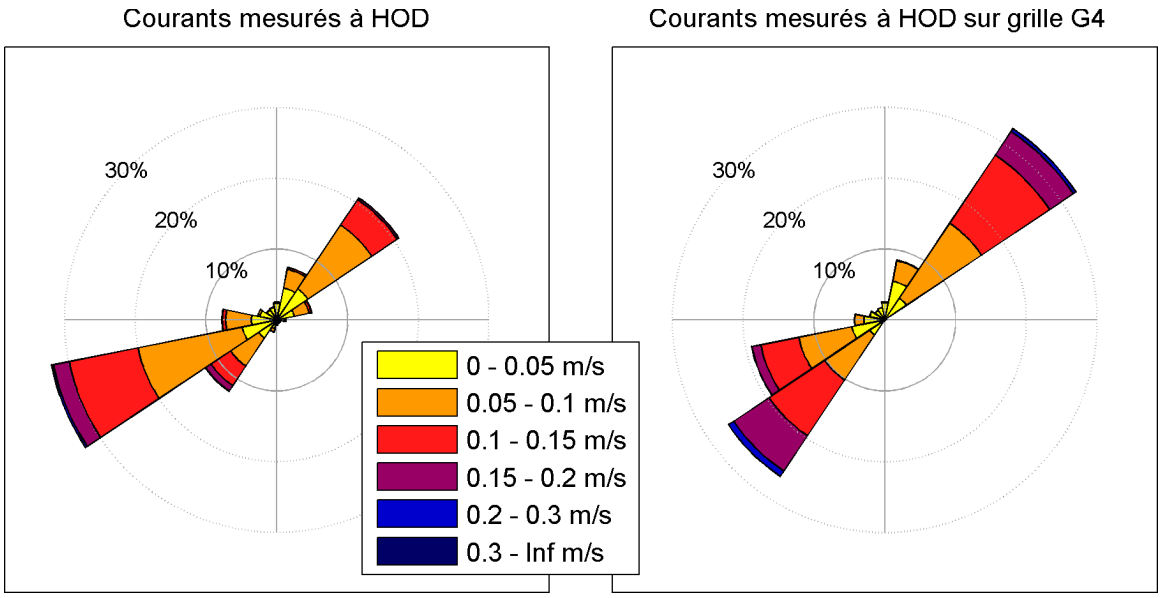



*Figure 92. Roses de courant au site HOD pour les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler et les courants modélisés par Delft3D sur la grille G4.*

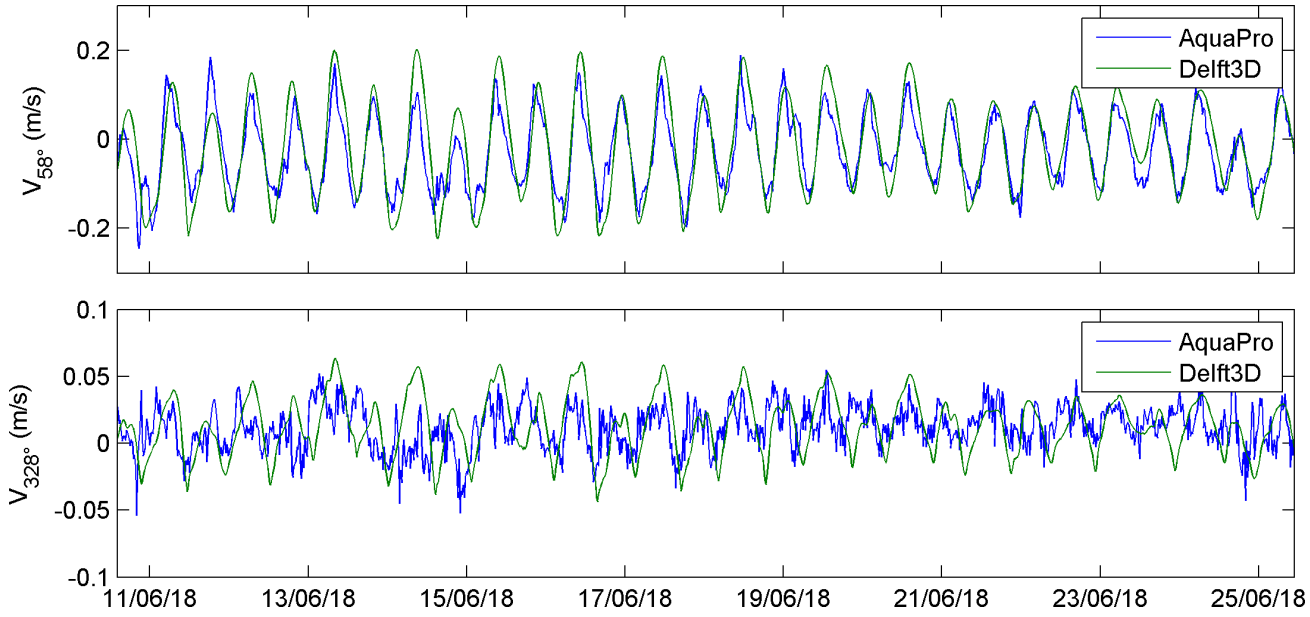



*Figure 93. Comparaison des séries temporelles des courants au site HOD pour les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler et les courants modélisés par Delft3D sur la grille G4. La composante du courant $V_{58°}$ correspond à l'orientation dominante, alors que $V_{328°}$ est la composante normale à l'axe principal.*

*Tableau 19. Statistiques de comparaison entre les courants mesurés par l'Aquadopp Profiler au site HOD et les courants modélisés par Deft3D sur la grille G4. La composante du courant $V_{58°}$ correspond à l'orientation dominante, alors que $V_{328°}$ est la composante normale à l'axe principal.*

| | $V_{58°}$ (m/s) | $V_{328°}$ (m/s) | Direction horizontale (°) | Magnitude horizontale (m/s) |
|---|---|---|---|---|
| Biais | 0,0096 | 0,0016 | -59,53 | 0,0179 |
| Biais absolu | 0,0421 | 0,0179 | 79,96 | 0,0368 |
| Biais relatif | – | – | – | 0,2571 |
| RMSE | 0,0533 | 0,0222 | 89,96 | 0,0474 |
| a (pente) | 1,0949 | 0,3608 | – | 0,6749 |
| b | 0,0117 | 0,0083 | – | 0,0406 |
| $R^2$ | 0,7150 | 0,0892 | – | 0,3053 |
| n | 11520 | 11520 | 11520 | 11520 |

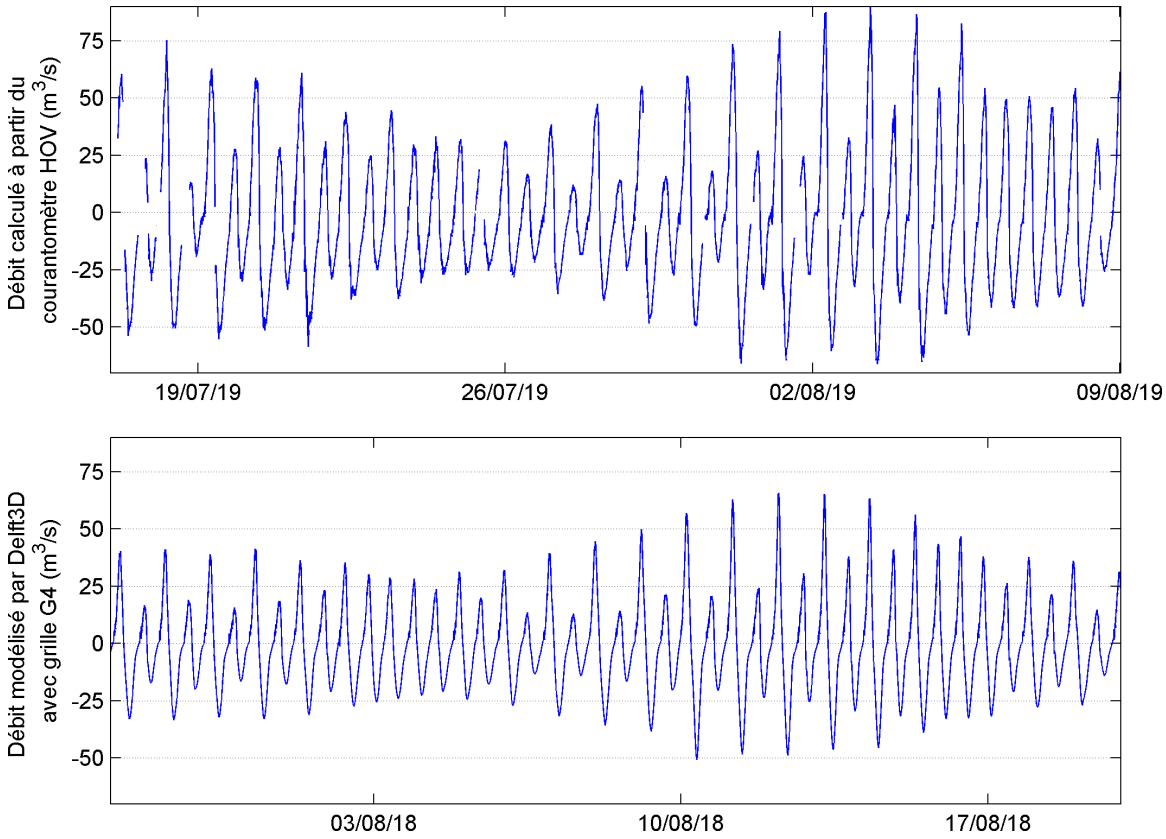



*Figure 94. Comparaison des débits du chenal de la lagune de Hope Town (haut) calculés à partir des données du courantomètre (voir section 5.2) et (bas) modélisés par Delft3D. Les périodes illustrées ne sont pas les mêmes, mais les deux exemples couvrent un cycle similaire morte eau/vive eau. Le débit est positif vers la lagune.*

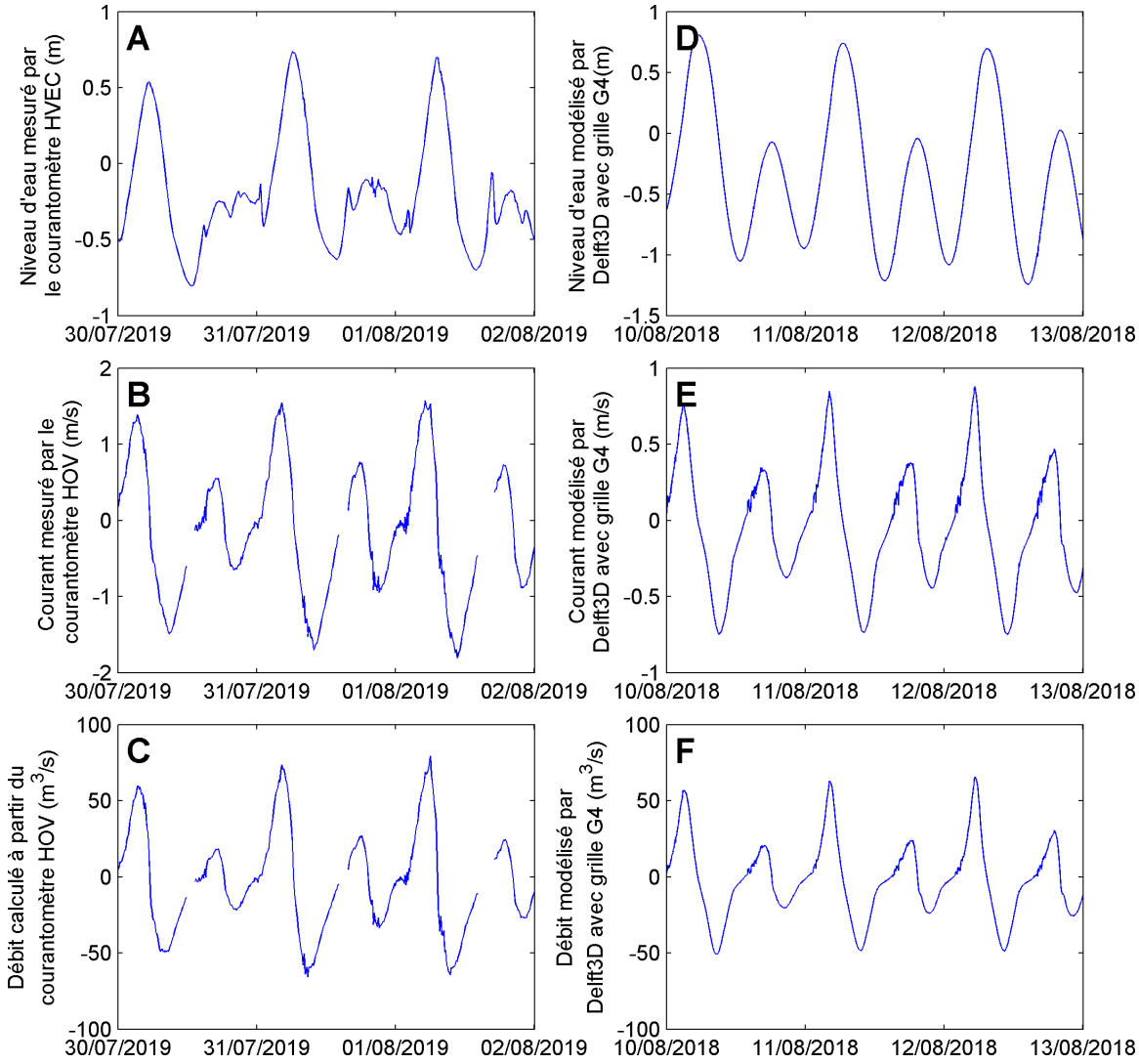
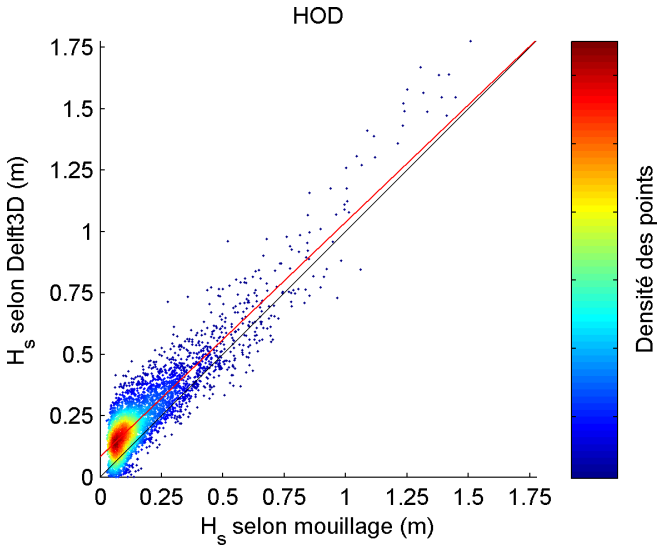



*Figure 95. Exemples des conditions dans le chenal de la lagune de Hope Town selon les mesures du courantomètre (A, B et C) et selon la modélisation par Delft3D avec la grille G4 (D, E et F). Pour les données de courant, les observations de terrain représentent le courant mesuré à 45-50 cm du fond au centre du chenal (B) alors que les résultats de modélisation correspondent au courant moyen pour l'ensemble du transect du chenal (E). Le courant et le débit sont positifs vers la lagune.*

*Validation des vagues*

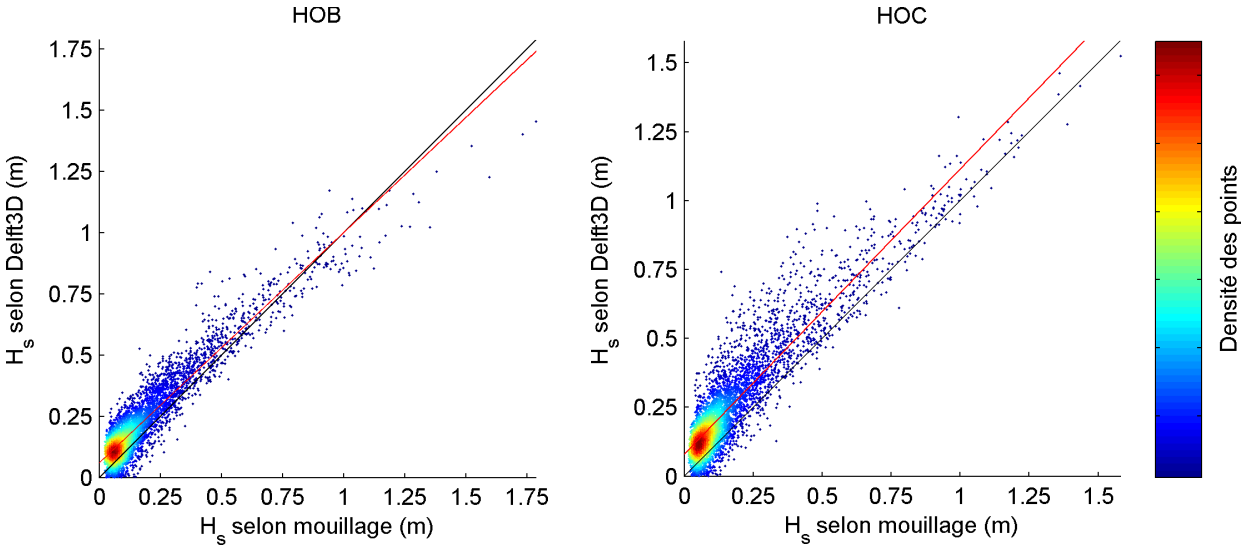
Les vagues modélisés sur la grille G4w ont été validées avec les vagues mesurées par l'Aquadopp Profiler au site HOD à 4 m de profondeur devant la plage ainsi que par les RBR TWR-2050 aux sites HOB et HOC juste en bas de plage (Figure 90).

Delft3D surestime légèrement la hauteur des vagues aux sites HOD, HOB et HOC (biais respectivement 0,07 m, 0,05 m et 0,09 m, Figures 96 et 97). Les deux paramètres statistiques qui incluent aussi la dispersion des erreurs, c'est-à-dire la racine de la moyenne du carré des erreurs (RMSE, respectivement 0,11 m, 0,08 m, 0,12) et le critère de performance global (respectivement 0,53, 0,64 et 0,45), ont des valeurs raisonnables pour un modèle de vague. À noter, que Delft3D reproduit moins bien les vagues au site HOC qu'au site HOB, même s'ils ne sont distants que de 129 m et à une profondeur similaire, probablement car l'effet des hauts-fonds devant le site HOC est imparfaitement reproduit par Delft3D (Figure 35). Lorsque seulement les vagues supérieures à 0,4 m sont considérées, les performances s'améliorent aux sites HOD et HOB (biais respectivement 0,05 m, 0,03 m). Les plus fortes vagues sont surestimées aux sites HOD et HOC, mais sous-estimées au site HOB (Figures 96 et 97).




| | HOD | $H_s$ (m) | $T_{01}$ (s) | Dir (°) |
|---|---|---|---|---|
| Toutes les vagues | biais | 0,074 | -1,459 | 21,60 |
| | biais abs | 0,087 | 1,637 | 27,62 |
| | RMSE | 0,108 | 1,906 | 38,73 |
| | biais rel | 0,406 | -0,377 | – |
| | Critère de performance | 0,525 | 0,604 | – |
| | a | 0,956 | 0,814 | – |
| | b | 0,082 | -0,740 | – |
| | $R^2$ | 0,811 | 0,276 | – |
| | n | 3845 | 3841 | 3841 |
| $H_s$ > 0,4 m | biais | 0,047 | -0,481 | 5,70 |
| | biais abs | 0,094 | 0,760 | 7,85 |
| | RMSE | 0,122 | 0,844 | 9,50 |
| | biais rel | 0,079 | -0,122 | – |
| | n | 345 | 345 | 345 |

*Figure 96. Analyses statistiques de la comparaison entre les observations des mouillages et la modélisation par Delft3D pour le site HOD. La comparaison est effectuée pour deux jeux de données (toutes les vagues et les vagues avec $H_s$ > 0,4 m) et pour les paramètres hauteur significative ($H_s$), période moyenne ($T_{01}$) et direction des vagues (Dir).*




| | HOB | $H_s$ (m) | $T_{01}$ (s) |
|---|---|---|---|
| Toutes les vagues | biais | 0,050 | -1,416 |
| | biais abs | 0,065 | 1,677 |
| | RMSE | 0,082 | 2,067 |
| | biais rel | 0,277 | -0,340 |
| | Critère de performance | 0,636 | 0,600 |
| | a | 0,939 | 0,626 |
| | b | 0,061 | 0,141 |
| | $R^2$ | 0,878 | 0,198 |
| | n | 4567 | 4563 |
| $H_s$ > 0,4 m | biais | 0,028 | 0,153 |
| | biais abs | 0,078 | 0,594 |
| | RMSE | 0,104 | 0,739 |
| | biais rel | 0,045 | 0,036 |
| | n | 430 | 430 |

| | HOC | $H_s$ (m) | $T_{01}$ (s) |
|---|---|---|---|
| Toutes les vagues | biais | 0,086 | -1,441 |
| | biais abs | 0,094 | 1,646 |
| | RMSE | 0,120 | 2,033 |
| | biais rel | 0,487 | -0,338 |
| | Critère de performance | 0,451 | 0,616 |
| | a | 1,035 | 0,618 |
| | b | 0,080 | 0,184 |
| | $R^2$ | 0,832 | 0,231 |
| | n | 4577 | 4573 |
| $H_s$ > 0,4 m | biais | 0,093 | 0,176 |
| | biais abs | 0,105 | 0,640 |
| | RMSE | 0,142 | 0,802 |
| | biais rel | 0,148 | 0,040 |
| | n | 435 | 435 |

*Figure 97. Analyses statistiques de la comparaison entre les observations des mouillages et la modélisation par Delft3D pour les sites HOB et HOC. La comparaison est effectuée pour deux jeux de données (toutes les vagues et les vagues avec $H_s$ > 0,4 m) et pour les paramètres hauteur significative ($H_s$) et période moyenne ($T_{01}$).*

Delft3D sous-estime fortement la période des vagues aux sites HOD, HOB et HOC (biais respectivement -1,5 s, -1,4 s et -1,4 s, Figures 96 et 97), mais ce problème concerne surtout les petites vagues. En effet, pour les vagues de plus de 0,4 m les performances de Delft3D sont nettement meilleures (biais respectivement -0,5 s, 0,2 s et 0,2 s) avec une dispersion (RMSE) raisonnable.

Les directions de vagues mesurées sont uniquement disponibles pour le mouillage HOD. L'orientation des vagues simulées par Delft3D est décalée vers le sud-ouest ou sud (biais de 22°, Figure 96). Mais, si seulement les vagues de plus de 0,4 m sont considérées, Delft3D reproduit nettement mieux la direction (biais de 6°, RMSE de 10°).

En résumé, Delft3D tend à surestimer légèrement la hauteur des vagues. Pour les petites vagues, les périodes sont fortement sous-estimées. Pour les vagues supérieures à 0,4 m, qui sont aussi les plus susceptibles à contribuer au transport sédimentaire, Delft3D reproduit bien la hauteur, la période et la direction des vagues. Toutefois, à l'extrémité sud de la plage du champ d'épis (site HOC) les performances de Delft3D sont un peu moins bonnes, probablement car les hauts fonds devant ce secteur sont insuffisamment résolus par la grille bathymétrique du modèle.

## 10.3 Scénarios modélisés

Différents scénarios ont été prévus d'être modélisés avec Delft3D pour simuler la réaction de la plage du champ d'épis à divers changements de condition des niveaux d'eau et de l'intensité des tempêtes. Le premier scénario sont les conditions observées durant l'année 2018. Ce scénario illustre les variations saisonnières morphodynamiques. Il sert aussi d'état de référence pour comparer avec les autres scénarios.

Un impact majeur des changements climatiques sera la hausse du niveau marin global (eustatique) due à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires ainsi qu'à l'expansion thermique des océans (Freeland et Gilbert, 2009). L'IPCC (2021) estime une hausse probable du niveau marin global entre 0,20 m et 0,29 m d'ici 2050 et entre 0,63 m et 1,01 m d'ici 2100 comparé à la période 1995-2014 avec le scénario climatique SSP5-8.5. Localement, les variations du niveau marin relatif (c'est-à-dire les variations du niveau marin par rapport à la côte) sont aussi influencées par les mouvements verticaux de la croute terrestre. Dans l'est du Canada, des ajustement isostatiques sont encore en cours suite à la fonte de l'inlandsis laurentidien à la fin de la glaciation, avec la croute terrestre remontant dans la région allant du nord du Québec jusqu'à environ la Gaspésie, alors qu'elle s'enfonce du Nouveau-Brunswick jusqu'à la Nouvelle Écosse (Koohzare et al., 2008).

Le modèle de Koohzare et al. (2008) indique un enfoncement d'environ 2,5 mm/an pour le site d'étude. Le modèle géophysique de déglaciation global de Peltier et al. (2015) indique un abaissement isostatique de 2-3 mm/an pour le site d'étude. Barnett et al. (2019) obtient à partir d'une carotte sédimentaire d'un marais littoral de Saint-Siméon (situé 30 km à l'est du site d'étude) une hausse du niveau relatif marin de 0,93 ±1,25 mm/an durant les derniers 1500 ans, dû principalement à l'enfoncement isostatique post-glaciaire. Ces différentes sources suggèrent donc un enfoncement de la croute de 1 à 2 mm/an.

La combinaison des prédictions la hausse globale du niveau marin et des mouvements locaux de la croute terrestre indique une hausse du niveau marin relatif entre 0,25 m et 0,38 m d'ici 2050 et entre 0,73 m et 1,20 m d'ici 2100 comparé à la période 1995-2014. Cela est similaire aux résultats de Han et al. (2015), qui indiquent une hausse du niveau marin relatif de 0,80-0,90 m entre la période 1986-2005 et la période 2081-2100 pour le scénario climatique AR5 RCP8.5. Deux scénarios de hausse du niveau marin relatif sont retenus pour la modélisation avec Delft3D, à savoir +0,40 m et +0,90 m par rapport au niveau marin mesuré en 2018, qui lui-même est probablement déjà 0,05 à 0,10 m plus haut que la moyenne de la période 1995-2014.

La glace de mer hivernal limite la génération des vagues par le vent et atténue les vagues, bloquant fortement les vagues à beaucoup d'endroits de l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent jusqu'à récemment (Ruest et al., 2016). Avec le réchauffement climatique, la réduction de la glace de mer hivernale augmentera les événements avec fortes vagues, car les vents sont plus tempétueux en hiver (Ruest et al., 2016).

Notre modélisation ne couvre pas la période hivernale. Pour néanmoins représenter une telle évolution, les vague aux frontières de la grille G4 et les vents ont été amplifiés durant la période du 1er septembre au 23 novembre pour certains scénarios modélisés. Toutes les hauteurs de vagues aux frontières ont été multipliées par 1,2. Il a été vérifié qu'aucune des vagues augmentées était sur le point de déferler avec une profondeur de 5 m.

Les plus grandes vagues sont générées par du vent plus rapide et soufflant plus longtemps. Comme dans différentes formules paramétriques estimant la hauteur des vagues ($H_s$) à partir de la vitesse du vent (U), $H_s$ est proportionnel soit à $U^2$, soit à $U^{1,35}$, soit à U (Neumeier et al. 2013), nous avons utilisées la relation $H_s \div U^{1,5}$. La vitesse des vents a donc été multipliée par un facteur de 1,13 ($1,2^{1/1,5}$).

## 10.4 Résultats de modélisation

Comme indiqué au début de ce chapitre 10, la modélisation n'a pas pu être terminée, car la modélisation du transport sédimentaire sur la grille G5 n'était pas stable pour les longues simulations. Néanmoins, les figures ci-dessous illustrent quelques résultats intermédiaires.

La Figure 98 présente la propagation des vagues sur le domaine G4w pour deux tempêtes, l'une de l'est, l'autre du sud-sud-ouest. On remarque l'importance des hauts-fonds pour la variation spatiale des hauteurs de vague. Il est aussi intéressant de noter comment les vagues venant du sud-sud-ouest tourne à l'approche de la côte pour arriver jusqu'à la plage à épis.

La Figure 99 montre trois pas de temps de l'évolution morphologique selon la modélisation du transport sédimentaire avec Delft3D pour les conditions de l'année 2018. La Figure 100 permet de mieux visualiser les variations morphologiques sur deux profils perpendiculaires à la plage à épis. Le haut de la plage est invariable dans les conditions printanières et estivales (les tempêtes automnales seraient nécessaires pour remanier cette zone, mais Delft3D était instable avec ces conditions). Une barre parallèle à la plage se développe, aux dépens de la zone au large qui se fait éroder. Une structure ressemblant à un delta de jusant se développe à la sortie du chenal de la lagune, incluant une barre d'embouchure. Toutefois, dans le modèle Delft3D, le chenal n'est pas une source de sédiment. Par conséquent, cette structure correspond plutôt à la continuation vers le sud de la barre parallèle à la côte, avec un remaniement par les courants de marée entrants et sortants de la lagune.

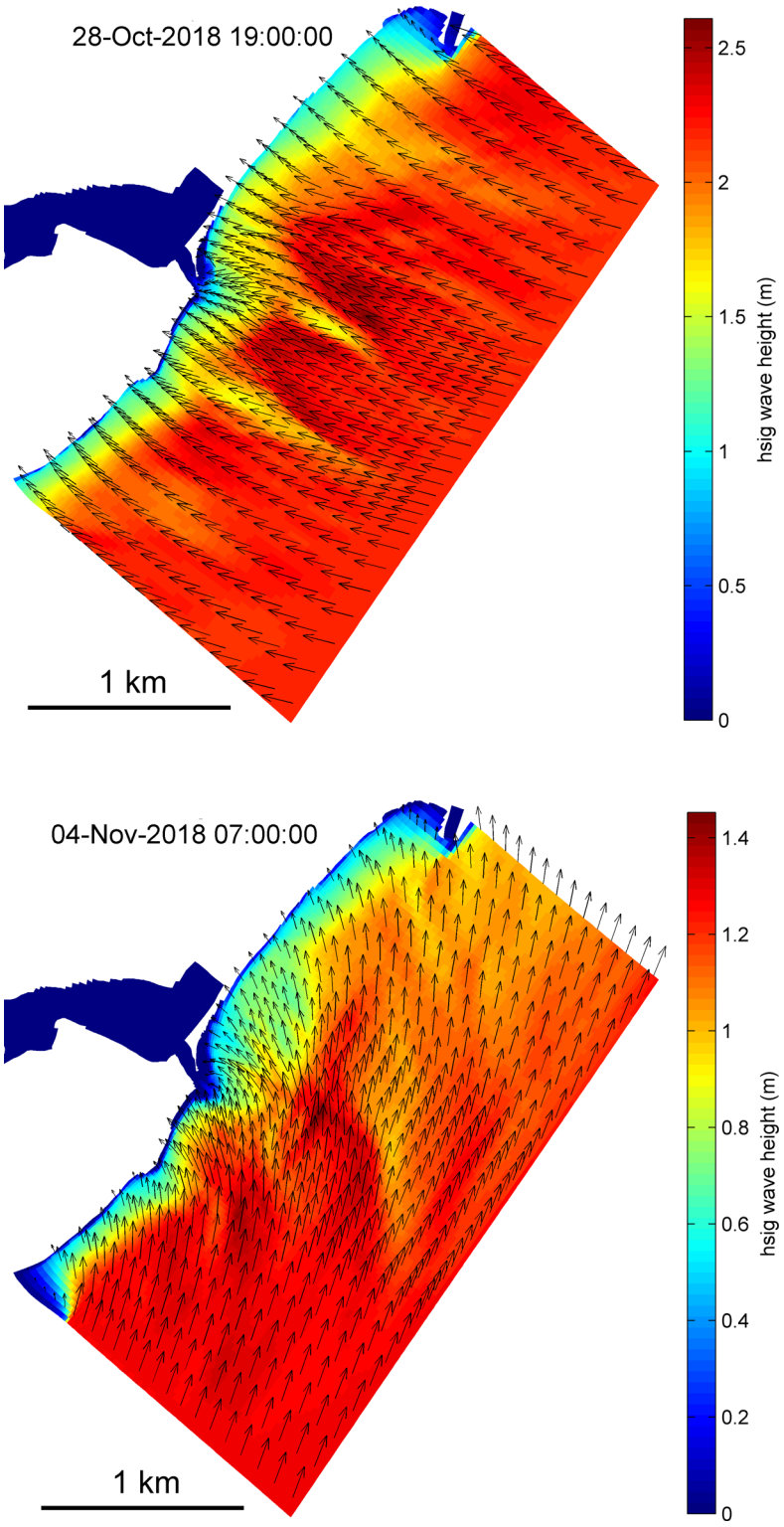



*Figure 98. Exemples de la modélisation des vagues sur la grille G4w. (Haut) Tempête provenant du l'est ($H_{m0}$ 2,19 m, $T_{02}$ 8,3 s, Direction 107°). (Bas) Tempête venant du sud-sud-ouest ($H_{m0}$ 1,84 m, $T_{02}$ 7,5 s, Direction 199°).*

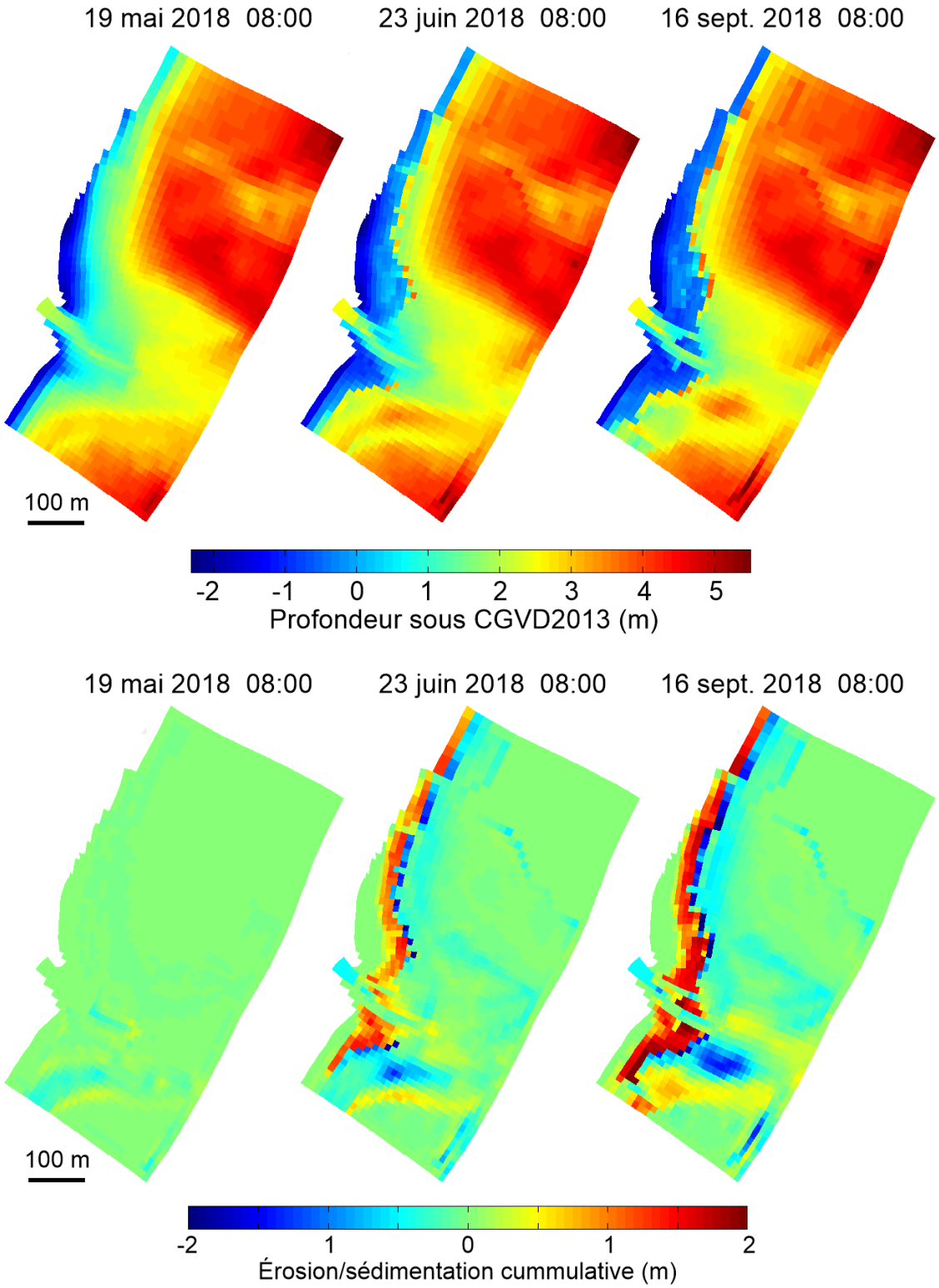



*Figure 99. Exemples de l'évolution morphologique selon la modélisation du transport sédimentaire avec Delft3D pour les conditions de l'année 2018. (Haut) Évolution de la bathymétrie. (Bas) Modification de la bathymétrie (érosion ou sédimentation) relatif au début de la modélisation (16 mai 2018).*

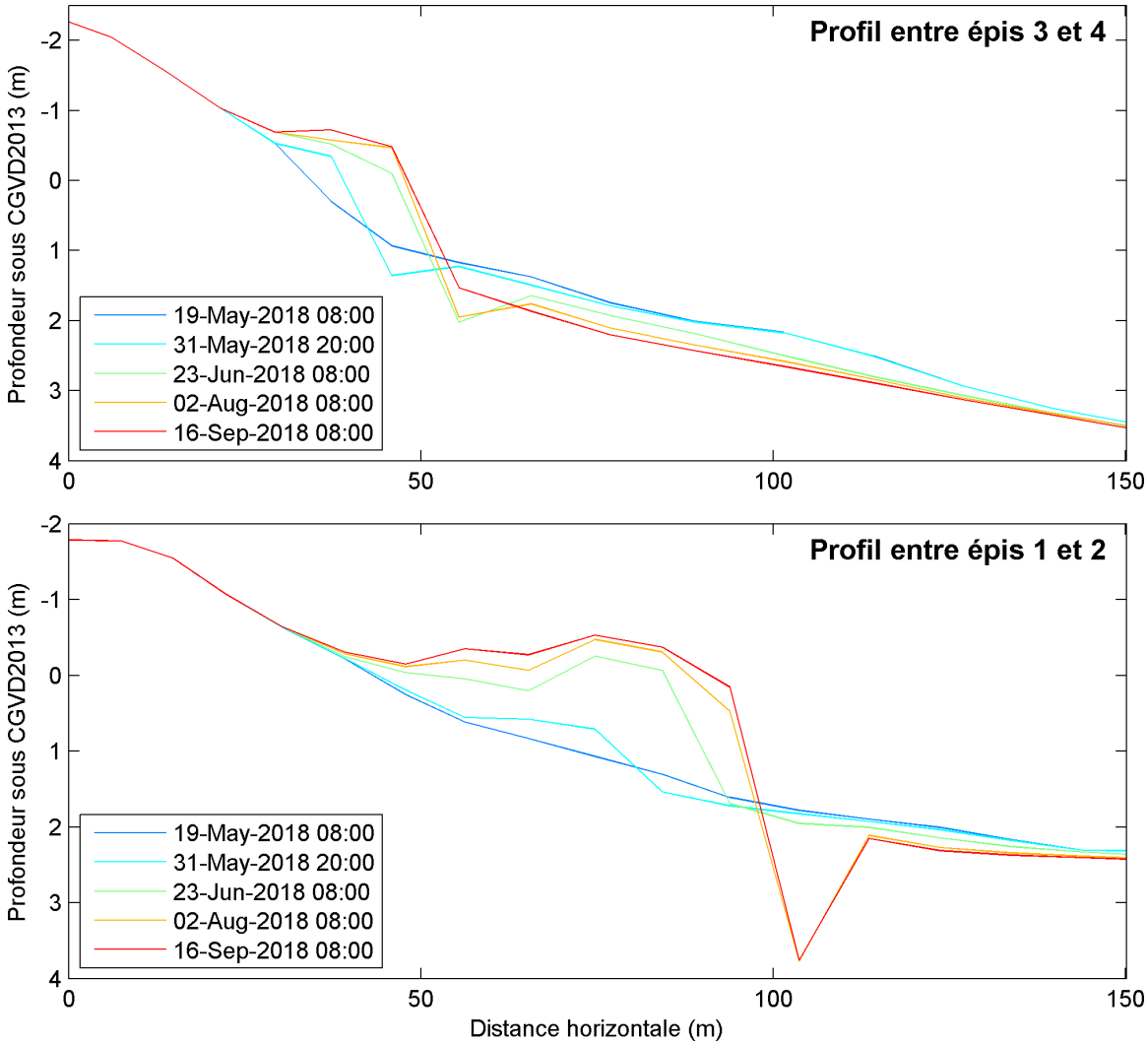



*Figure 100. Évolution morphologique selon la modélisation du transport sédimentaire avec Delft3D pour les conditions de l'année 2018. (Haut) Profil perpendiculaire à la plage entre le troisième épi et le quatrième épi à partir du sud. (Bas) Profil entre le premier et le deuxième épi à partir du sud.*

# 11 DISCUSSION

Les mesures des houlographes indiquent que la flèche de Hope Town est relativement protégée des tempêtes venant de l'ouest, qui sont les plus fréquentes dans la baie des Chaleurs. Par contre, ce site est exposé aux tempêtes de l'est, qui proviennent du golfe du Saint-Laurent. Dans cette direction, les vagues ne sont que faiblement atténuées par la bathymétrie avant d'atteindre la plage (diminution des hauteurs de vagues de 0-50 %). Une formule simple a d'ailleurs été proposée pour estimer les hauteurs des vagues au bas de la plage du champ d'épi à partir des hauteurs et des directions des vagues au large (site HOE) et du niveau d'eau.

La variabilité saisonnière des vagues mesurées au large de la flèche de Hope Town (site HOE) montre deux périodes avec des fortes vagues, entre septembre et début janvier, puis de mars à avril (Tableau 13, Figure 39). Les vagues sont moins fortes à la fin du printemps et en été, et la glace de mer bloque les vagues pendant la période la plus froide de l'hiver. Comme la série temporelle des vagues au site HOE est seulement de 2½ ans et que les vagues affectant la plage proviennent de l'est, il est intéressant de regarder la série temporelle des vagues de 10½ ans de Cap d'Espoir (Neumeier et Joly, 2021). Les statistiques calculées sur les plus grandes vagues mesurées chaque mois entre 2010 et 2021 montrent que décembre-janvier sont les mois avec les vagues les plus fortes, suivis ensuite par octobre, novembre et avril (Figure 101).

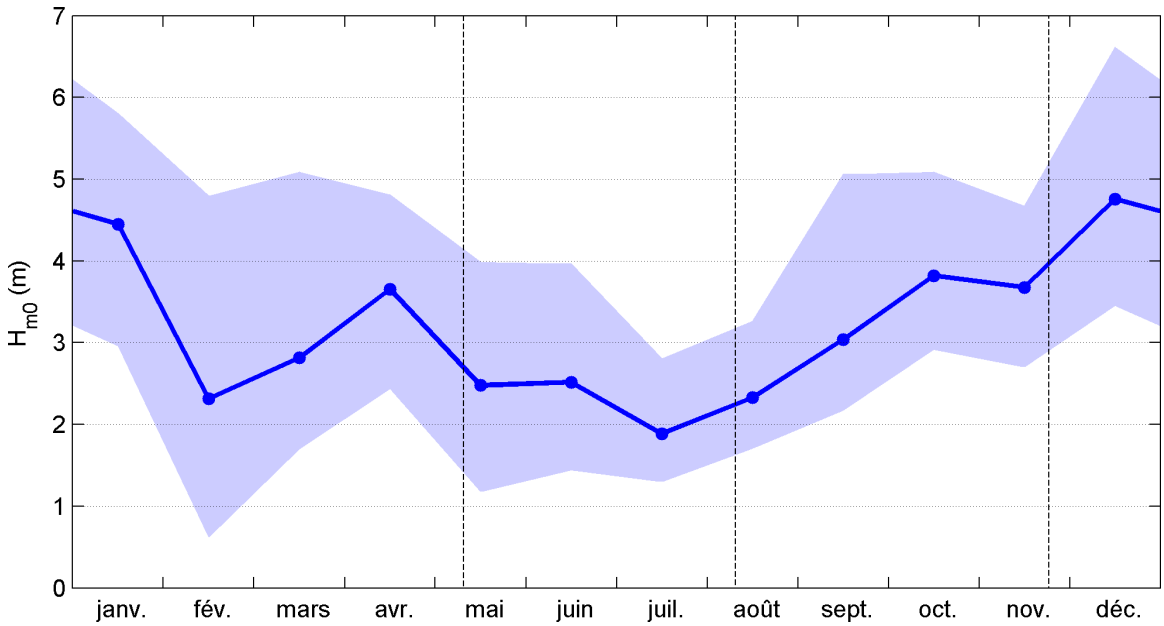



*Figure 101. Variabilité saisonnière des vagues à Cap d'Espoir calculée comme la moyenne des plus grandes vagues mesurées chaque mois d'octobre 2010 à mai 2021 (trait bleu). L'étendue entre le minimum et le maximum des plus grandes vagues mesurées chaque mois est indiquée en bleu clair. Les lignes traitillées verticales représentent le moment des relevés topographiques effectués en mai, en août et en novembre à Hope Town.*

Les variations de la morphologie de la plage du champ d'épi suivent une cyclicité saisonnière (Figure 74). Généralement la plage perd du sédiment en hiver (novembre à mai), surtout à cause d'une érosion du bas-estran et dans une moindre mesure de l'avant-plage. Ces sédiments sont probablement déposés dans la partie plus profonde de l'avant-plage, qui n'est pas couverte par les relevés topographiques. Le pied de glace, qui protège la partie supérieure de la plage en hiver, pourrait jouer en rôle en réfléchissant les vagues et concentrant leur énergie sur la bas-estran. C'est durant cette période que se produisent les vagues les plus fortes (Figures 39 et 101). À noter que l'hiver 2019-2020 avait moins de fortes tempêtes que les autres hivers et que la plage a globalement engraissée.

Au printemps et à l'été (mai à août), s'effectue une recharge du haut-estran et de la haute-plage, généralement au détriment du bas-estran et de l'avant-plage qui sont en érosion (Figure 74). En 2018, les sédiments provenaient probablement davantage de l'avant-plage plus profonde, qui n'était pas couverte pas les relevés topographiques. Cette migration de sédiments vers le haut de la plage se produit typiquement sous l'effet des faibles conditions hydrodynamiques (Figures 39 et 101; Bosboom et Stive, 2021).

À l'automne (août à novembre), un rééquilibrage du profil a lieu avec une recharge du bas-estran et de l'avant-plage, alors que le haut-estran et la haute-plage sont en érosion à cause de l'intensification des conditions hydrodynamiques et la multiplication des tempêtes (Figures 39, 74 et 101). La plage engraisse généralement durant cette saison, mais pas en automne 2019 quand la première et la quatrième plus fortes tempêtes se sont produites (Tableau 13).

La granulométrie suit les variations saisonnières des conditions hydrodynamiques, avec des sédiments plus fins en août lorsque les conditions sont plus calmes, et des sédiments plus grossiers à la fin de la période hivernale au mois de mai (Figure 79). On s'attendrait à trouver en novembre des sédiments plus grossiers, mais sur les deux campagnes d'échantillonnages granulométriques de novembre, celle de 2020 avait les sédiments les plus fins de toute l'étude.

La dynamique pluriannuelle de la plage est assez variable durant cette étude de trois ans. La plage a engraissé de 250 $m^3$ la première année (novembre 2017 à novembre 2018), elle a ensuite perdu 1400 $m^3$ la deuxième année (2018-2019) avant d'engraisser de 1300 $m^3$ la troisième année (2019-2020). Toutefois, le moment de fortes tempêtes d'automne peut fortement influencer les résultats avec une limite annuelle en novembre. Si l'on considère une limite annuelle en août, la plage a perdu 7 $m^3$ en 2017-2018 et elle a gagné 135 $m^3$ en 2018-2019 (la variabilité interannuelle est moindre, mais uniquement deux années sont disponibles avec ce choix de limite).

En moyenne, la plage a gagné 47 $m^3$/an de novembre 2017 à novembre 2020. Le résultat est assez similaire si une limite en août est utilisée (64 $m^3$/an d'août 2018 à août 2020). Cet engraissement est à l'opposé des résultats des campagnes de suivi à la recharge de plage effectuées par la firme BPR. Par rapport à 2013, les données de BPR indiquent une perte de 882 $m^3$ en 2014, une perte de 3426 $m^3$ en 2017 et une perte de 4375 $m^3$ en 2019 (Figure

78). Ces données de BPR correspondent donc une perte rapide de 857 $m^3$/an entre 2013 et 2017, puis une perte ralentie de 475 $m^3$/an entre 2017 et 2019.

Il est clair que la plage à épis a perdu une bonne partie des 4500 $m^3$ de sédiments de la recharge de 2012 durant les cinq années suivantes, puis que la perte de sédiments s'est ralentie. Mais c'est incertain, si la tendance s'est inversée, avec un engraissement lent selon nos résultats (47 $m^3$/an de novembre 2017 à novembre 2020) ou une perte seulement ralentie selon les résultats de BPR (-475 $m^3$/an entre mai-juin 2017 et juillet 2019). La différence est probablement liée au moment de l'année quand le relevé topographique est effectué et peut-être aussi à une étendue différente de la zone couverte par les relevés topographiques et la couverture plus dense de nos relevés topographiques.

L'analyse des photographies aériennes historiques est une autre source d'information sur l'évolution de la côte, couvrant même une période nettement plus longue, de 1963 à 2018. Toutefois, elle n'indique pas directement les changements de volume de sédiments d'une plage, comme on obtient avec des relevés topographiques, mais seulement les mouvements du trait de côte. Celui est défini pour une plage par la limite inférieure de végétation continue.

Peu de photographies aériennes historiques sont disponibles pour documenter l'évolution récente de la flèche littorale (2001, 2005, 2007, 2016, 2018). Le trait de côte a avancé de +0,8 ±0,5 m/an (moyenne ±estimation de la précision) de 2001 à 2005, puis il a reculé rapidement de -4,0 ±0,9 m/an de 2005 à 2007, ensuite il a reculé de -1,1 ±0,2 m/an de 2007 à 2016, et finalement de -0,9 ±0,9 m/an de 2016 à 2018 (Figure 59). L'effet des imprécisions de la méthode augment lorsqu'un taux annuel est calculé sur des courtes périodes. Le ralentissement du taux de recul en 2016 (de -1,1 m/an à -0,9 m/an) n'est ainsi pas significatif.

L'effet de la recharge de plage de 2012 n'est pas directement visible dans le mouvement du trait de côte pour la période 2007-2016 (-1,1 m/an, soit un recul total de -15 m) et il n'y a malheureusement pas de photographie aérienne prise proche du moment de la recharge. Cette recharge était seulement de 4 500 $m^3$ (Lamontagne et Lefebvre, 2014). En supposant que ces sédiments aient été répartis uniformément sur l'estran et l'avant-plage peu profonde (aire de 15160 $m^2$ dans notre étude) lors de la mise en place et par les processus naturels lors du premier hiver, ce volume de sédiment correspond à un rehaussement de la plage de 0,30 m. Considérant la pente de la plage de 3,5% selon nos relevés, cela correspond à une avancée de 8,6 m. La Figure 102 présente les mouvements du trait de côte de la flèche de 2001 à 2018, en incluant un scénario hypothétique du recul de 2007 à 2012 (-2,4 m/an), de la recharge de plage (+8,6 m) en novembre 2012 et du recul de 2012 à 2016 (-1,55 m/an). En effet, il est probable que le recul a continué à être relativement rapide après 2007, ce qui a motivé la recharge de plage et l'installation des épis.

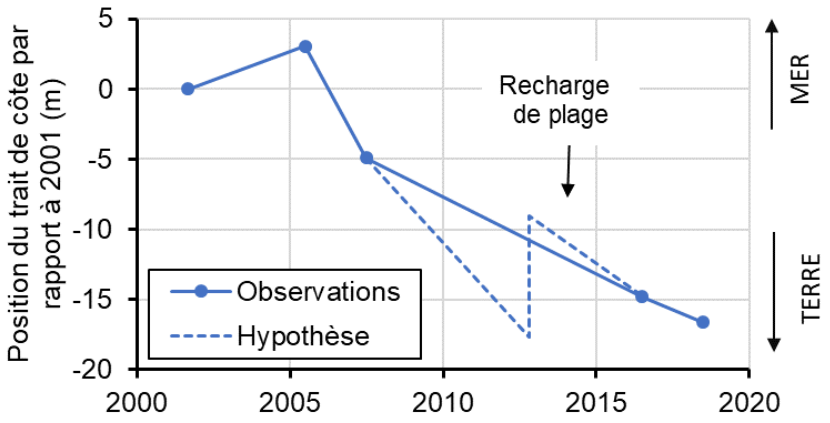



*Figure 102. Mouvements de trait de côte de la flèche littorale de Hope Town de 2001 à 2018, incluant un scénario hypothétique des mouvements entre 2017 et 2016.*

Lorsque toute la période couverte par les photographies aériennes historiques est considérée et la méthode *linear regression rate* est utilisée pour calculer le taux moyen, les imprécisions de mesures deviennent négligeables. Tous les secteurs sont en reculs, mais celui-ci est le plus rapide pour la flèche littorale, soit -0,64 m/an pendant la période 1963-2018. Cela est nettement plus que la falaise rocheuse au nord-est (-0,32 m/an), la côte aménagée au nord-est (-0,14 m/an), la basse falaise meuble au sud-ouest (secteur aussi appelé « plage adjacente au sud-ouest », -0,07 m/an) et la falaise rocheuse au sud-ouest (-0,01 m/an). À noter que le recul de la côte aménagée au nord-est ne correspond pas tellement à un recul de l'enrochement protégeant la route 132, mais surtout au recul de tronçons qui étaient encore naturels jusqu'à que l'enrochement ait été prolongé (Figure 57).

Après le démantèlement de la jetée à l'extrémité ouest de la flèche à la fin des années 1960, il y eu une période très érosive pour la flèche littorale alors que la plage adjacente au sud-ouest (secteur Basse falaise meuble sud-ouest) a avancé (figure 58).

Les analyses minéralogiques ont confirmé que les falaises rocheuses de Saint-Godefroi situées 900 à 2 000 m au nord-est de la plage à épis sont une source probable pour les sédiments de la flèche. Il est aussi possible que des sédiments provenant de plus loin au nord-est passent la pointe Trachy (à côté du port de Saint-Godefroi) et viennent alimenter la flèche. Toutefois, une grande partie de ces sédiments seront probablement exportés vers les plus grandes profondeurs au passage de la pointe Trachy ou lors du dragage du port de Saint-Godefroi. Une autre source de sédiments serait la remobilisation de stocks de sédiments sous-marins, mais les données bathymétriques détaillées ne montrent pas de grand stock de sédiments disponibles (Figure 2).

Dans le secteur de Hope Town, la dérive littorale est dirigée du nord-est vers le sud-ouest. La présence des épis n'influence pas fortement la morphologie locale de la plage. Certes, le niveau de la plage est généralement plus bas du côté sud-ouest des épis en bois comparé au côté nord-est, indiquant un déficit du côté sud-ouest, mais cette différence est

généralement inférieure à 0,20 m (Figure 75). Aucune différence d'altitude systématique n'a été notée de part et d'autre de la partie des épis composée de gros blocs. Néanmoins, une accrétion dans la partie nord-est de la plage suggère une certaine efficacité des épis à piéger le sédiment en transit le long de la côte. Toutefois, l'impact des épis sur la morphologie de la plage est nettement moins que ce qui est observé couramment avec des épis (French, 2001).

La construction des épis ne semble pas avoir eu d'effet néfaste sur la plage adjacente au sud-ouest, située en aval dans le sens de la dérive littorale. La recharge de plage, qui a accompagné la construction des épis, a probablement contribué à la stabilité de la plage sud-ouest. Mais cette dernière est aussi alimentée par des sédiments d'origine terrigène amenés par le chenal de la lagune, comme indiqué par la différence des compositions minéralogiques de la plage à épis et la plage sud-ouest (Tableau 18).

En résumé, les épis n'ont pas eu d'impact négatif, ni sur la morphologie de la plage, ni sur la perte de sédiments vers le large (la limite externe de la zone de déferlement des vagues est généralement au large de la terminaison direction mer des épis, et toujours lors des tempêtes), ni sur la plage en aval. Par contre, il est difficile d'évaluer la contribution des épis à la réduction de l'érosion de la plage. Un certain effet existe au niveau des épis en bois. Il est aussi possible que les blocs de la partie mer des épis contribuent à briser les vagues et à dissiper leur énergie.

Les épis sont fréquemment utilisés en cas d'érosion des plages pour ralentir la dérive littorale et maintenir une largeur de plage raisonnable (French, 2001; Basco, 2008). Leur utilisation au Québec se heurte à la difficulté d'avoir des structures résistant à l'action de la glace de mer en hiver. C'est pour cette raison qu'à Hope Town la partie mer des épis est constituée de gros blocs. Toutefois, ces alignements de blocs sont perméables à la dérive littorale et il n'est pas clair s'ils contribuent significativement à maintenir le sédiment sur la plage.

L'implantation de ce type d'ouvrages de protection doit être envisagée sur d'autres sites au Québec, mais plusieurs conditions doivent être remplies. Une dérive littorale significative doit exister, c'est-à-dire les épis ne peuvent pas réduire l'érosion d'une plage si les sédiments sont simplement exportés vers le large. L'efficacité des épis composés de gros blocs non jointifs n'est pas démontrée à Hope Town. Pour cette raison, la partie amont des épis doit être moins perméable; une palissade de pieux de bois est recommandée. Cependant, une certaine perméabilité des épis est utile. En effet, l'important n'est pas seulement la capacité des épis à retenir le sédiment, mais la dérive littorale résiduelle après l'installation des épis doit aussi être considérée. Il faut surtout évaluer l'impacts du champ d'épi sur les plages adjacentes pour éviter de déplacer simplement le problème d'érosion côtière et de devoir artificialiser de plus en plus de secteurs côtiers. Pour éviter les effets indésirables, une importante recharge de plage est généralement nécessaire pour restaurer la plage lors de l'installation des épis. Il faut aussi prévoir des recharges ponctuelles par la suite.

# 12 CONCLUSIONS

Les conclusions de cette étude sur le suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town sont les suivantes :

- Les vagues de tempêtes venant d'est ou d'ouest existent dans la baie des Chaleurs. À Paspébiac, deux tiers des tempêtes viennent d'ouest. La forme spécifique en coude de la baie permet à la côte à l'est de Paspébiac, notamment le secteur de Hope Town, d'être épargnée des tempêtes d'ouest. Par contre, les vagues en provenance du golfe du St-Laurent sont un peu plus fortes à St-Godefroi et à Hope Town qu'à Paspébiac. Au cours des 32 mois d'étude, il y a eu plusieurs tempêtes durant lesquelles les vagues ont presque atteint 3 m de hauteur significative à 2 km au large de Hope Town, et des vagues de 2 m ont été enregistrées à 500 au large de la plage et de 1,5 m en bas de la plage.

- Les plus fortes tempêtes ont lieu à l'automne, de septembre à janvier inclusivement, mais aussi dans une moindre mesure à la fin de l'hiver, en mars-avril lors d'un éventuel dégel hâtif de la baie. L'été, l'énergie des vagues est nettement plus faible.

- La glace de mer est moins fréquente en hiver à St-Godefroi qu'à Paspébiac, qui est plus loin dans la baie des Chaleurs. Ces périodes hivernales libres de glace pourraient permettre aux vagues d'atteindre la plage de Hope Town. Toutefois aucun événement majeur n'a été enregistré, probablement à cause de glace de mer présente plus loin vers le golfe du Saint-Laurent.

- Les marées sont mixtes surtout semi-diurnes, avec une amplitude des marées et des surcotes légèrement plus forte à Paspébiac qu'à Hope Town. La plus forte surcote à Paspébiac était de 1,10 m en janvier 2018. Les niveaux d'eau à Hope Town peuvent être calculés à partir des niveaux d'eau mesurés par le marégraphe de Paspébiac.

- Les courants de marée à 500 m au large de la plage de Hope Town sont asymétriques, avec une dominance vers l'ouest-sud-ouest, ce qui contribue à la dérive littorale des sédiments allant vers le sud-ouest dans ce secteur.

- Le courant dans le chenal de la lagune de Hope Town atteint des vitesses de 2,0 m/s vers la lagune et 1,9 m/s vers la baie des Chaleurs. Ces courants déplacent sable et gravier fin, qui ne peuvent pas s'accumuler. Par contre les galets tapissant le fond du chenal peuvent être déplacés uniquement lors de la crue du printemps. Le débit dans le chenal atteint 87 $m^3/s$ vers la lagune et 65 $m^3/s$ vers la baie des Chaleurs. Lors des marées de vive eau, 900 000 à 950 000 $m^3$ entrent et sortent de la lagune, mais lors des petites marées seulement un quart de ce volume.

- L'analyse des photographies aériennes indique un taux de recul moyen de la flèche littorale de -0,64 m/an pendant la période 1963-2018, ce qui est nettement plus que pour la côte aménagée au nord-est (-0,14 m/an), la falaise rocheuse au nord-est (-0,32 m/an), la falaise basse meuble au sud-ouest (-0,07 m/an) et la falaise rocheuse au sud-ouest (-0,01 m/an).

- Après le démantèlement de la jetée à l'extrémité ouest de la flèche à la fin des années 1960, il y eu une période très érosive pour la flèche littorale alors que la plage adjacente au sud-ouest a engraissé.

- La recharge de plage et la construction des épis en 2012 ont favorisé une progradation temporaire de la flèche, qui actuellement semble reculer lentement d'après les photographies aériennes.

- Les falaises rocheuses de St-Godefroi, situées 900 à 2 000 m au nord-est de la plage à épis, sont une source probable pour les sédiments de la flèche littorale d'après les analyses minéralogiques.

- Les variations saisonnières morphologiques de la plage à épis sont hétérogènes, avec des différences interannuelles importantes. En effet, la plage a engraissé de 250 $m^3$ la première année (novembre 2017 à novembre 2018), elle a ensuite perdu 1400 $m^3$ la deuxième année (2018-2019) avant d'engraisser de 1300 $m^3$ la troisième année (2019-2020). La plage a engraissé de 47 ±778 $m^3$/an (moyenne ±erreur standard) durant les trois ans du projet. Par contre, les données récoltées par la firme BPR pour le suivi post-recharge indiquent que des 4500 $m^3$ de la recharge de sable de novembre 2012, 3400 $m^3$ étaient déjà partis en juin 2017 et presque la totalité (4375 $m^3$) en juillet 2019.

- En hiver, on observe surtout une érosion du bas-estran. Le pied de glace qui protège la partie supérieure de la plage en hiver pourrait jouer un rôle. Au printemps et à l'été s'effectue une recharge du haut-estran et de la haute-plage, au détriment du bas-estran et de l'avant-plage qui sont en érosion (la migration de sédiments vers le haut de la plage se produit sous l'effet des faibles conditions hydrodynamiques). Enfin, un rééquilibrage du profil a lieu à l'automne, avec une recharge du bas-estran et de l'avant-plage, alors que le haut-estran et la haute-plage sont en érosion à cause de l'intensification des conditions hydrodynamiques et la multiplication des tempêtes.

- La granulométrie suit les variations des conditions hydrodynamiques, avec du sédiment plus fin en août lorsque les conditions sont plus calmes, alors qu'il est plus grossier à la fin de la période hivernale au mois de mai.

- Ces résultats démontrent des variations importantes de la morphologie et de la granulométrie de la plage au cours des saisons. Ces variations peuvent biaiser les suivis de longue durée si les dates échantillonnées varient dans l'année.

- La limite externe de la zone de déferlement des vagues est généralement au large de la terminaison direction mer des épis et toujours lors des tempêtes. Les épis relativement courts de Hope Town permettent donc aux sédiments transportés par la dérive littorale de passer d'un compartiment à l'autre sans être entrainés vers le large.

- La construction des épis ne semble pas avoir eu d'effet néfaste sur la plage adjacente au sud-ouest, située en aval dans le sens de la dérive littorale. La recharge de plage, qui a accompagné la construction des épis, a probablement contribué à la stabilité de cette plage au sud-ouest. Mais cette dernière est aussi alimentée par des sédiments d'origine

terrigène amenés par le chenal de la lagune, comme indiqué par la différence des compositions minéralogiques de la plage à épis et la plage au sud-ouest.

- La présence des épis n'influence pas fortement la morphologie locale. Néanmoins, une accrétion dans la partie nord-est de la plage indique l'efficacité des épis à piéger le sédiment en transit le long de la côte.

- Considérant la restriction de l'apport sédimentaire par la dérive littorale dû à la présence de l'enrochement de la route 132, les recharges de sable ponctuelles seront nécessaires pour maintenir la plage et mitiger l'érosion à l'avenir, considérant future la hausse du niveau marin.

# 13 LISTE DES FICHIERS

Fuseau horaire : Heure normale de l'Est (HNE, UTC-5) pour les mouillages F et HOE; UTC pour les mouillages HOB et HOD ainsi que les marégraphes et les autres données de niveaux d'eau.

***Fichiers de données de vagues***

Pour les bursts de vagues, le temps indiqué est le milieu de la période échantillonnée qui durait 1024 s pour F, HOD et HOE, et 512 s pour HOB et HOC. Les différents paramètres de vagues sont décrits à l'Annexe 1

HOB18A_vagues.xlsx Paramètres de vagues de l'instrument HOB de mai à novembre 2018.

HOC18A_vagues.xlsx Paramètres de vagues de l'instrument HOC de mai à novembre 2018.

HOC19A_vagues.xlsx Paramètres de vagues de l'instrument HOC de mai à novembre 2019.

HOD_18A-20A_vagues.xlsx Paramètres de vagues du mouillage HOD pour trois semestres estivaux, de mai à octobre 2018, de mai à octobre 2019 et de juin à octobre 2020.

HOE_17B-19B_vagues.xlsx Paramètres de vagues du mouillage HOE de novembre 2017 à juillet 2020.

SPF_17B-19B_vagues.xlsx Paramètres de vagues du mouillage F de novembre 2017 à juin 2020.

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. Annexe 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.

HOB-C-D_spectre.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres non directionnels des vagues :

| | |
|---|---|
| HOB18A.spectre | instrument HOB, été 2018 |
| HOC18A.spectre | instrument HOC, été 2019 |
| HOC19A.spectre | instrument HOC, été 2020 |
| HOD18A.spectre | mouillage HOD, été 2018 |
| HOD19A.spectre | mouillage HOD, été 2019 |
| HOD20A.spectre | mouillage HOD, été 2020 |

HOE-SPF_17B-19B_spectre.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres non directionnels des vagues :

| | |
|---|---|
| HOE17B.spectre | mouillage HOE, hiver 2017/2018 |

HOE18A.spectre mouillage HOE, été 2018
HOE18B.spectre mouillage HOE, hiver 2018/2019
HOE19A.spectre mouillage HOE, été 2019
HOE19B.spectre mouillage HOE, hiver 2019/2020
SPF17B.spectre mouillage F, hiver 2017/2018
SPF18A.spectre mouillage F, été 2018
SPF18B.spectre mouillage F, hiver 2018/2019
SPF19A.spectre mouillage F, été 2019
SPF19B.spectre mouillage F, hiver 2019/2020

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

HOD_18A-20A_spectredir.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site HOE :
HOD18A.spectredir mouillage HOD, été 2018
HOD19A.spectredir mouillage HOE, été 2019
(aucune donnée directionnelle n'a été enregistré à lors du déploiement HOD20A à cause du renversement de du mouillage)

HOE_17B-19B_spectredir.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site HOE :
HOE17B.spectredir mouillage HOE, hiver 2017/2018
HOE18A.spectredir mouillage HOE, été 2018
HOE18B.spectredir mouillage HOE, hiver 2018/2019
HOE19A.spectredir mouillage HOE, été 2019
HOE19B.spectredir mouillage HOE, hiver 2019/2020

SPF_17B-19B_spectredir.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site F :
SPF17B.spectredir mouillage F, hiver 2017/2018
SPF18A.spectredir mouillage F, été 2018
SPF18B.spectredir mouillage F, hiver 2018/2019
SPF19A.spectredir mouillage F, été 2019
SPF19B.spectredir mouillage F, hiver 2019/2020

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

### *Fichiers de données de courants*

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).

HOD-HOE-SPF_profils.zip Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les profils de vitesses :

| | |
|---|---|
| HOD18Aprofil.xlsx | Mouillage HOD, mai 2018 à octobre 2018. |
| HOD19Aprofil.xlsx | Mouillage HOD, mai 2019 à octobre 2019. |
| HOD20Aprofil.xlsx | Mouillage HOD, juin 2020 à octobre 2020. |
| HOE17Bprofil.xlsx | Mouillage HOE, novembre 2017 à avril 2018. |
| HOE18Aprofil.xlsx | Mouillage HOE, avril 2018 à octobre 2018. |
| HOE18Bprofil.xlsx | Mouillage HOE, octobre 2018 à mai 2019. |
| HOE19Aprofil.xlsx | Mouillage HOE, mai 2019 à octobre 2019. |
| HOE19Bprofil.xlsx | Mouillage HOE, octobre 2019 à mai 2020. |
| SPF17Bprofil.xlsx | Mouillage F, novembre 2017 à avril 2018. |
| SPF18Aprofil.xlsx | Mouillage F, avril 2018 à octobre 2018. |
| SPF18Bprofil.xlsx | Mouillage F, octobre 2018 à mai 2019. |
| SPF19Aprofil.xlsx | Mouillage F, mai 2019 à octobre 2019. |
| SPF19Bprofil.xlsx | Mouillage F, octobre 2019 à juin 2020. |

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 est de 0,5 m au-dessus du fond.

HVEC19_courants.xlsx Fichier Excel avec les courants et la turbulence mesurés dans le chenal de la lagune (site HVEC) à 45-50 cm au-dessus du fond du 27 juin au 16 septembre 2019.

### *Fichiers de données de glace*

HOE-SPF_17B-19B_glace.xlsx Fichier Excel avec les statistiques de glace aux sites HOE et SPF, avec une feuille Excel pour chaque site/hiver.

***Fichiers de données de niveaux d'eau***

Maregraphe_Paspebiac_17b-19b.xlsx
: Fichier avec les données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac (novembre 2017 à juin 2020), référence verticale CGVD28.

Maregraphe_Paspebiac_15a-19b.xlsx
: Fichier avec les données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac depuis de les mesures à ce site (juillet 2015 à juin 2020), référence verticale CGVD28.

Maregraphe_HopeTown_18A-19A.xlsx
: Fichier avec les données du marégraphe installé sur la plage de la flèche littorale de Hope Town durant les semestres estivaux 2018 et 2019, référence verticale CGVD28.

Niveaux_eau_F_17b-19b.xlsx
: Fichier avec les niveaux d'eau enregistrés par l'AWAC du site F (novembre 2017 à juin 2020), référence vertical niveau marin moyen de chaque déploiement.

Niveaux_eau_HOE_17b-19b.xlsx
: Fichier avec les niveaux d'eau enregistrés par l'AWAC du site HOE (novembre 2017 à juin 2020), référence vertical niveau marin moyen de chaque déploiement.

Ces fichiers Excel contiennent deux feuilles :
*data* avec le niveau d'eau, le niveau lissé avec un filtre passe-bas de 60 minutes (seulement pour les marégraphes), les prédictions avec T_TIDE, les surcotes/décotes (par rapport aux prédictions avec T_TIDE) et la température (seulement pour les marégraphes);
*max-min* avec les plus fortes surcotes, les plus fortes décotes et les plus hauts niveaux.

***Shapefiles des traits de côtes historiques***

Hope_Traits-de-cote.zip
: Fichier compressé avec tous les fichiers des shapefiles ArcGIS *Hope_Traits-de-cote_NE* et *Hope_Traits-de-cote_SW* contenant les polylignes des traits de côte historiques de 1964 à 2018 pour respecivement le secteur nord-est et le secteur au sud-ouest du chenal de la lagune.

***Fichiers des données topographiques***

HopeTown_DGPS_2017-2020.xls

Fichier Excel avec la base de données topographiques complète de tous les relevés DGPS effectués entre novembre 2017 et novembre 2020. Les coordonnées sont en NAD 1983 (SCRS) (1997.0) MTM 5 et l'altitude en CGVD2013. Les codes utilisés sont définis dans la seconde feuille de calcul.

HopeTown_Topo-Profils.xlsx

Fichier Excel avec tous les profils topographiques levés durant 12 campagnes, projetés sur la ligne idéale de chaque profil et interpolés à un intervalle de 0,01 m.

MNT_Hope.zip Fichier compressé contenant les modèles numériques de terrain (MNT) en format .TIF et les *world files* associés avec les informations de géoréférencement.

| | |
|---|---|
| HS_MNT_1.tif | Plage à épis, 28-29 novembre 2017 |
| HS_MNT_2.tif | Plage à épis, 15-16 mai 2018 |
| HS_MNT_3.tif | Plage à épis, 8-9 août 2018 |
| HS_MNT_4.tif | Plage à épis, 23-24 novembre 2018 |
| HS_MNT_5.tif | Plage à épis, 7-8 mai 2019 |
| HS_MNT_6.tif | Plage à épis, 2-4 août 2019 |
| HS_MNT_8.tif | Plage à épis, 27-28 novembre 2019 |
| HS_MNT_10.tif | Plage à épis, 7-8 mai 2020 |
| HS_MNT_11.tif | Plage à épis, 19-20 août 2020 |
| HS_MNT_12.tif | Plage à épis, 16-17 novembre 2020 |
| HT_MNT_1.tif | Plage sud-ouest, 28-29 novembre 2017 |
| HT_MNT_2.tif | Plage sud-ouest, 15-16 mai 2018 |
| HT_MNT_3.tif | Plage sud-ouest, 8-9 août 2018 |
| HT_MNT_4.tif | Plage sud-ouest, 23-24 novembre 2018 |
| HT_MNT_5.tif | Plage sud-ouest, 7-8 mai 2019 |
| HT_MNT_6.tif | Plage sud-ouest, 2-4 août 2019 |
| HT_MNT_8.tif | Plage sud-ouest, 27-28 novembre 2019 |
| HT_MNT_10.tif | Plage sud-ouest, 7-8 mai 2020 |
| HT_MNT_11.tif | Plage sud-ouest, 19-20 août 2020 |
| HT_MNT_12.tif | Plage sud-ouest, 16-17 novembre 2020 |

***Fichiers des données granulométriques***

Garnulometrie_HopeTown_2018-2020.xlsx

Fichier Excel avec les principaux paramètres de granulométries pour les échantillons de sédiments récoltés sur la plage entre novembre 2017 et octobre 2020 : granulométrie moyenne, classement, asymétrie, mode, $D_{50}$, pourcentages de Gravier / Sable / Silt / Argile calculé avec Gradistat avec l'option *Geometric method of moments* (Blott et Pye. 2001).

# 14 RÉFÉRENCES


Barnett, R.L., Bernatchez, P., Garneau, M., Brain, M.J., Charman, D.J., Stephenson, D.B., Haley, S., Sanderson, N., 2019. Late Holocene sea-level changes in eastern Québec and potential drivers. *Quaternary Science Reviews*, 203, 151-169. doi:10.1016/j.quascirev.2018.10.039

Basco, D.R., 2008. Shore protection projects. In: *Coastal Engineering Manual*, Chapter V-3, U.S. Army Corps of Engineers, 110 p.

Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248. doi:10.1002/esp.261

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.

Bosboom, J., Stive, M.J.F., 2021. *Coastal Dynamics*. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Revision no. 1269. 577 p.

Bourgault, D., 2008. Shore-based photogrammetry of river ice. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35, 80-86. doi:10.1139/L07-087

Bourgault, D., Pawlowicz, R., Richards, C., 2020. *g_rect: a MATLAB package for georectifying oblique images* [Source Code]. doi:10.24433/CO.4037678.v1

Cavaleri, L., Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 86/C11, 10961–10973.

Davis R.A., Fitzgerald, D.M., 2004. *Beaches and Coasts*. Blackwell Publishing, Malden (MA/USA) et Oxford (UK), 419 p.

Del Rio, L., Gracia, F.J., Benavente, J. 2013. Shoreline change patterns in sand coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology* 196, 252-266.

Deltares, 2018. *Delft3D-FLOW, simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User manual* (version 3.15). Deltares, Delft, 670 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 Transport 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.

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.

Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S., Drejza, S., 2012. *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 50 p. et annexes.

Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S., 2014. *Exposition des bâtiments et des infrastructures à l'érosion côtière : Développement d'un outil de planification de l'aménagement côtier - Municipalités régionales de comté d'Avignon et de Bonaventure*. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 108 p. et annexes cartographiques.

Freeland, H.J., Gilbert, D., 2009. Estimate of the steric contribution to global sea level rise from a comparison of the WOCE one-time survey with 2006–2008 Argo observations. *Atmosphere-Ocean*, 47, 292-298. doi:10.3137/OC312.2009

French, P.W., 2001. *Coastal defences: processes, problems and solutions*. Routledge, London, 366 p.

Genivar, 2009. *Caractérisation de l'habitat du poisson dans sept secteurs riverains de la Gaspésie, Secteur de Saint-Godefroi (12), Site No. A0401*. Rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Iles-de-la-Madeleine, Service des inventaires et du Plan, 29 p. et annexes.

Han, G., Ma, Z., Chen, N., Thomson, R., Slangen, A., 2015. Changes in mean relative sea level around Canada in the twentieth and twenty-first centuries. *Atmosphere-Ocean*, 53, 452-463. doi:10.1080/07055900.2015.1057100

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Ergänzungsheft A12.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S., 2018, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 2018–1179, 110 p.

IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 2391 p. doi:10.1017/9781009157896

Komen, G., Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14, 1271-1285.

Koohzare, A., Vanícek, P., Santos, M., 2008. Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics*, 45, 133-145. doi:10.1016/j.jog.2007.08.001

Kuleli, T., Gunerogly, A., Karsli, F., Dikhan, M., 2011. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38, 1141-1149.

Lamontagne, H., 2014. *Aménagement d'une frayère pour le capelan en compensation à la perte d'habitat engendrée par la mise en place d'un enrochement à Hope Town – Rapport 2014 du programme de suivi d'efficacité de l'aménagement compensatoire*. Rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, BPR-Infrastructures inc., 39 p. + annexes.

Lamontagne, H., Lefebvre, A., 2014. *Aménagement d'une frayère pour le capelan en compensation à la perte d'habitat engendrée par la mise en place d'un enrochement à Hope Town – Rapport 2013 du programme de suivi d'efficacité de l'aménagement compensatoire*. Rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, BPR-Infrastructures inc., 21 p. + annexes.

Lamontagne, H., Xhardé, R., 2020. *Aménagement d'une frayère pour le capelan en compensation à la perte d'habitat engendrée par la mise en place d'un enrochement à Hope Town - Rapport 2019 du programme de suivi d'efficacité de l'aménagement compensatoire*. Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec, BPR-Infrasctructure, 64 p. + annexes.

Lavallée, A., 2011. *Protection de la route 132 et de la Plage de Hope Town, complément d'étude hydraulique*. Rapport P-80123, Direction des Structures, ministère des Transports du Québec,10 p. + annexes.

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51, 883-915, doi: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014

Long, B., Xhardé, R., 2009. *Fusion des données aéroportées obtenues par LiDAR topographique et bathymétrique lors des projets RES2LON et FUDOTERAM*. Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec, INRS-ÉTÉ, 144 p. et annexes.

Mahapatra, M., Ratheesh, R., Rajawat, A.S., 2014. Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using Digital Shoreline Analysis System. *Journal of Indian Society of Remote Sensing* 42 (4), 869-876.

Mallet, C., Michot, A., 2012. *Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte*. Rapport final BRGM/RP-60616-FR, 162 p.

Moore, L.J., 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16 (1), 111-124.

Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgiesser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments. *Computers & Geosciences*, 34, 1223-1242. doi:10.1016/j.cageo.2008.02.007

Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2013. *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.

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., 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, 97 p.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, 929-937. doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4

Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R., 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G C VM5a model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 450-487. doi:10.1002/2014JB011176

Poirier, C., 2003. *Étude hydraulique – Érosion de la rive de la Baie des Chaleurs le long de la route 132 municipalité de Saint-God*efroi. Ministère des Transports du Québec, 82 p.

Renaud, L., 2000. *Évolution et dégradation du barachois de Paspébiac*. Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), 141 p.

Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Bismuth, E., Senneville, S., Caveen, J., 2016. Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Climate Dynamics*, 46, 449-466. doi:10.1007/s00382-015-2592-3

Stapleton, K.R., Huntley, D.A., 1995. Seabed stress determination using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 807-815. doi:10.1002/esp.3290200906

Thieler, E.R., Danforth, W.W., 1994. Historical shoreline mapping (II): Application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, 10 (3), 600-620.

Tucker, M.J., Pitt, E.G., 2001. *Waves in ocean engineering*. Elsevier ocean engineering book series vol. 5, Elsevier, Amsterdam, 521 p.

Van Rijn, L.C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam, 695 p.

Van Rijn, L.C., 2000. *General view on sand transport by currents and waves: data analysis and engineering modelling for uniform and graded sand (TRANSPOR2000 and CROSMOR2000 models).* Report Z2899.20 / Z2099.30 / Z2824.30, WL | Delft Hydraulics, Delft, Pays-Bas

Xhardé, R., 2007. *Évaluation du potentiel des techniques aéroportées vidéographique et LiDAR appliquées à l'étude des risques naturels en milieu côtier. Xhardé, R., 2007. Évaluation du potentiel des techniques aéroportées vidéographique et LiDAR*

*appliquées à l'étude des risques naturels en milieu côtier*. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 285 p.

# ANNEXE 1 : LISTE DES PARAMÈTRES DE VAGUES

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

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

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

**Symbol unité description**

| | | |
|---|---|---|
| $h$ | m | hauteur de l'eau au-dessus du fond à la position de l'instrument |
| $h_{PT}$ | m | hauteur de l'eau mesurée avec le capteur de pression |
| $h_{AST}$ | m | hauteur de l'eau mesurée avec le faisceau acoustique de l'AWAC (Acoustic Surface Tracking) |
| $H_{m0}$ | m | hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale |
| $H_{1/3}$ | m | hauteur significative des vagues calculée par méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues) |
| $H_{1/10}$ | m | hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing) |
| $H_{max}$ | m | hauteur de la plus grande vague (méthode zero-crossing) |
| $H_m$ | m | hauteur moyenne (méthode zero-crossing) |
| $H_{rms}$ | s | hauteur *root-mean-square* (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 (±variance) calculée pour le pic de fréquence |
| UI | | Index d'unidirecticité (*Unidirectivity index)* |
| U | m/s | vitesse moyenne dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP (près de la surface pour AWAC-AST, 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 :<br>0 = pression, 1 = vitesses orbitales, 3 = AST (faisceau acoustique de l'AWAC, Acoustic Surface Track).<br>Si c'est un chiffre à virgule, le chiffre après la virgule indique pour l'AST la fraction du burst utilisé (par exemple, 3,78 pour un calcul à partir des données AST sur 78 % du burst), et pour la pression le facteur maximal utiliser pour corriger l'atténuation des variations de pression avec la profondeur (par exemple, 0,15 pour un calcul à partir des données de pression avec un facteur maximal de correction de 15). |
| ice-coverage_% | | Pourcentage du burst avec présence de glace |

Les fichiers d'AWAC traités par Quickwave contiennent plusieurs autres paramètres (IceDistance, QW_nodetects, QW_baddetects, nbZC, QW_error) qui correspondent à des résultats intermédiaires ou des informations pour le contrôle de qualité.

# ANNEXE 2 : CODES DU CONTRÔLE DE QUALITÉ SUR LES DONNÉES DE VAGUES

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

Le chiffre de gauche (poids fort) indique la validité des données selon le Tableau 20.

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 21. 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 20. 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 21. Codes explicatifs du contrôle de qualité.*

| Bit | Valeur hexa décimale | lettre alias # | Pour paramètres | tests manqués |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 01 | l | tous | valeur trop basse |
| | | l | $Dir_m$, $Dir_{Tp}$ | direction venant de la côte |
| **2** | 02 | h | tous | valeur trop grande |
| **3** | 04 | t | tous | test de continuité temporelle |
| **4** | 08 | d | $H_{max}$, $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ | comparaison de $H_{m0}$ avec $H_{max}$, $H_{1/10}$ ou $H_{1/3}$ (flag de ces derniers) |
| | | d | $T_{01}$, $T_{02}$, $T_z$, $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ | comparaison de $T_{01}$, $T_{02}$, $T_z$, $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ (flag si différence à la médiane des T trop grandes) |
| | | d | $T_p$, $T_{pc}$ | comparaison de $T_p$ et $T_{pc}$ avec $T_{02}$ |
| | | d | $Dir_m$, $Dir_{Tp}$ | comparaison de $Dir_m$ et $Dir_{Tp}$ |
| | | d | $h_{PT}$, $h_{AST}$ | comparaison de $h_{PT}$ et $h_{AST}$ (flag de $h_{AST}$) |
| **5*** | 10 | s | h | valeur trop basse par rapport aux prédictions de marée |
| | | p | $Dir_m$, $Dir_{Tp}$, $Spr_{Dir}$, UDI | période trop courte pour déterminer la direction (dans QuickWave) |
| **6** | 20 | s | $T_{02}$, $T_{0/10}$ | pente des vagues, $T_{02}$ avec $H_{m0}$, et $T_{1/10}$ avec $H_{1/10}$ |
| | | r | h | valeur trop grande par rapport aux prédictions de marée |
| **7** | 40 | q | tous | marqué erroné dans QuickWave |
| **8** | 80 | b | tous | burst déficient, problématique ou présence de glace de mer |

\# Lettre utilisée dans l'interface du contrôle de qualité (qcwave_gui) pour marquer l'échec du test automatique.

* 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.

# ANNEXE 3 : TRAITEMENT DES DONNÉES DE VAGUES, DE COURANTS ET DE GLACE ENREGISTRÉES PAR LES AWAC ET LES AQUADOPP PROFILERS

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* 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* (version 7.14 plus récente), soit directement à la ligne de commande, soit avec une série de fonctions écrites par Urs Neumeier.

**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 varie parfois selon le cycle semi-diurne de la marée, ces oscillations sont généralement de 2 °C à 5 °C, mais peuvent 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 ±5 ° 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.

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. Les premiers et derniers enregistrements hors de l'eau sont marqué comme mauvais pour ne pas être affichés sur les graphiques ou être exportés.

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 directions de courants et de vagues ont été mesurés par les instruments par rapport au Nord magnétique. Ces données ont été corrigées pour la déclinaison magnétique locale. Une rotation a été appliquée aux vecteurs de vitesse Est et Nord. Les directions des vagues $Dir_m$ et $Dir_p$ ont été corrigées. Par contre, les spectres directionnels des vagues n'ont pas été corrigés.

**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). Le Tableau 20 (Annexe 2) décrit ces flags de qualité.

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

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

de $h_{PT}$ et $h_{AST}$, comparaison de $h_{PT}$ et $h_{AST}$ avec les prédictions de marées, la pente des vagues selon $T_{02}$ et $H_{m0}$, et selon $T_{1/10}$ et $H_{1/10}$ (*consistency checks*).

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

Pour les niveaux d'eau, les données mesurées ont été comparées aux prédictions de marée calculées avec le logiciel *XTide* 2.10 (Flater, 2008), qui est couramment utilisé en océanographie physique. Les harmoniques de marées disponibles pour un port à proximité sont utilisées.

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 103) :

- 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 (Tableau 21, 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.

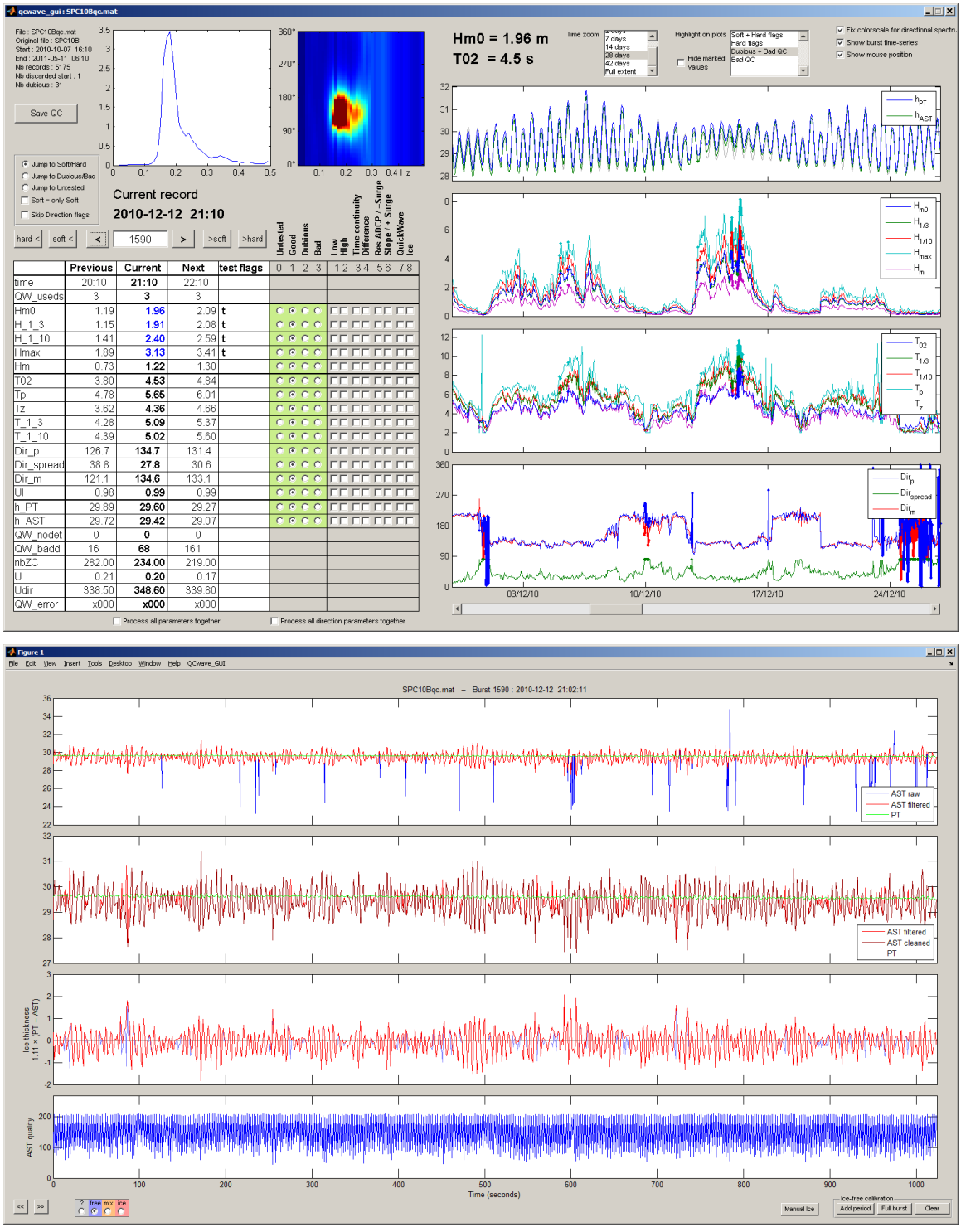



*Figure 103. Interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas).*

**Traitement et contrôle de qualité des données de courants**

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

La déclinaison magnétique a été corrigée et la hauteur d'eau est corrigée pour les variations de la pression atmosphérique. Ensuite toutes les cellules commençant à plus de 90 % de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument ont été marquées comme mauvais, car hors de l'eau et potentiellement affectées par la surface de l'eau. Pour les déploiements hivernaux, les cellules influencées par les glaces flottantes ont aussi été rejetés en se basant sur l'épaisseur de glace mesurée durant les bursts de vagues (cf. section 0) : l'épaisseur de la glace (épaisseur instantanée maximale observée à ±2 heures du profil) est soustraite à la hauteur de la colonne d'eau avant d'appliquer le test de 90 % de la colonne d'eau. Enfin un contrôle de qualité automatique a été effectué sur le rapport signal sur bruit (SNR) qui doit être supérieur à 3 dB.

Le contrôle de qualité est terminé manuellement avec l'interface graphique *awac_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 104). 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 22.

*Tableau 22. 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 |

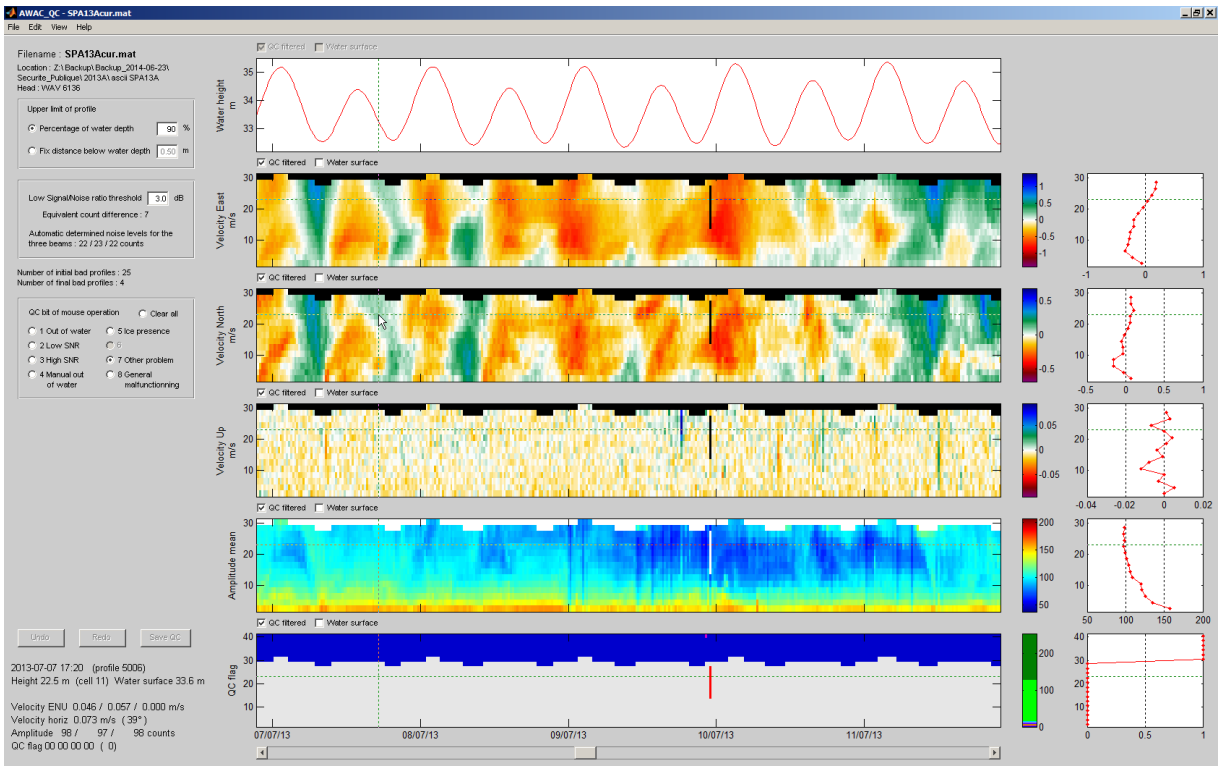



*Figure 104. Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.*

### 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 ×1,11 (Eicken et al., 2009), selon la formule suivante :

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

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. 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 105).

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 105).

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.

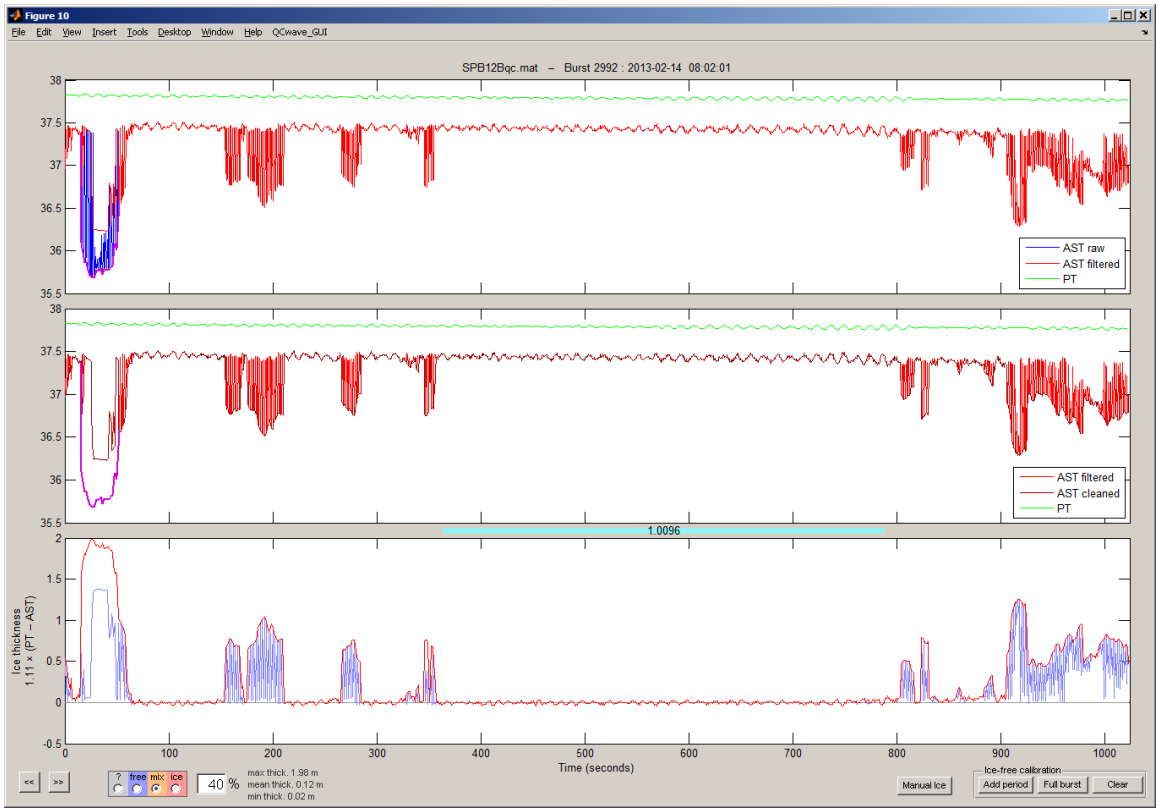



*Figure 105. Seconde fenêtre de l'interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l'interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L'épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances pression-AST est en turquoise entre les deux graphiques inférieurs.*

# ANNEXE 4 : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES UTILISÉES POUR LE TRAÇAGE DES TRAITS DE CÔTE HISTORIQUES

| Année | # photo | Date | Échelle | Taille de pixel (m) | Couleur | RMS (m) | Transfor-mation | Niveau marée estimé |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963 | Q63117_066 | 1963-08-13 | 1:15'840 | 0,56 | NB | 3,2 | Poly 1 | Bas |
| 1964 | Q64188_101 | 1964-09-13 | 1:31'680 | 0,48 | NB | 2,8 | Poly 1 | Bas |
| 1965 | Q65235_208 | 1965-08-16 | 1:9'600 | 0,18 | NB | 2,2 | Poly 2 | Bas |
| 1972 | Q72868_041 | 1972-07-09 | 1:10'000 | 0,15 | NB | 0,7 | Poly 2 | Bas |
| 1975 | Q75323_142 | 1975-07-01 | 1:15'000 | 0,51 | NB | 1,08 | Poly 2 | Bas |
| 1980 | Q80851_028 | 1980-10-11 | 1:15'000 | 0,23 | NB | 2,09 | Poly 2 | Bas |
| 1986 | Q86400_059 | 1986-07-03 | 1:15'000 | 0,22 | IR | 1,42 | Poly 2 | Bas |
| 1992 | Q92116_182 | 1992-08-15 | 1:15'000 | 0,23 | IR | 1,18 | Poly 2 | Bas |
| 2001 | Q01809_257<br>Q01809_217 | 2001-09-07 | 1:40'000 | 1 | NB | - | - | Bas |
| 2005 | Q05105_217 | 2005-07-03 | 1:15'000 | 0,50 | NB | 1,8 | Poly 2 | Moyen |
| 2007 | Idv122b_2007<br>Idv123_2007<br>Idv124_2007<br>Idv125_2007 | - | - | 0,16 | IR | - | - | Haut |
| 2009 | BPR_2575_532_55_2009<br>BPR_2575_532_60_2009<br>BPR_2580_532_60_2009<br>BPR_2580_532_65_2009 | 2009-08-02 | - | 0,10 | VC | 0,3<br>0,45 | Poly 1 | Bas |
| 2016 | mos_16_22a03_se_<br>30cm_f05_Pro | - | - | 0,30 | VC | - | - | Moyen |
| 2017 | Site-erosion_79 | 2017-07-12 | - | 0,05 | VC | - | - | Moyen |
| 2018 | c214_259C21_86_100_<br>2018 | - | - | 0,30 | VC | - | - | Moyen |

**Notes**

Couleur : NB pour photographies en noir et blanc, IR pour photographie fausses couleurs infra-rouge et VC pour photographies en vraies couleurs.

RMS : le total de la racine de l'erreur quadratique moyenne pour le géoréférencement.

Transformation : la transformation utilisée pour le géoréférencement, soit une transformation polynomiale de premier ordre (*poly 1*), soit une transformation polynomiale de deuxième ordre (*poly 2)*.

Les photographies de 2001, 2016, 2017 et 2018 étaient déjà géoréférencées.

# ANNEXE 5 : VARIATIONS TEMPORELLE DE L'ACCRÉTION / ÉROSION MOYENNE DE CHAQUE PROFIL

L'accrétion ou l'érosion moyenne de chaque profil a aussi été calculée sur le tronçon du profil qui est commun aux dix levés saisonniers, et qui ne s'étend direction terre pas au-delà de la limite x = -10 m. Le calcul a été effectué pour les dix levés saisonniers comme la moyenne des différences entre le levé saisonnier considéré et le premier levé de novembre 2017, après avoir interpolé les profils selon l'axe horizontal à intervalle de 0,01 m (Tableau 23).

*Tableau 23. Accrétion ou érosion moyenne en millimètre pour les différents profils par rapport au levé de novembre 2017. La position des cinq épis est marquée par un traitillé dans le tableau.*

| Profil | 2017 11 | 2018 05 | 2018 08 | 2018 11 | 2019 05 | 2019 08 | 2019 10 | 2019 11 | 2020 05 | 2020 08 | 2020 11 | Distance considérée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | -284 | -172 | 30 | -169 | -352 | | -251 | -475 | -440 | -490 | 7,47 à 102,51 m |
| 2 | 0 | -154 | -312 | -64 | -167 | -372 | | -340 | -326 | -222 | -297 | 7,14 à 67,77 m |
| 3 | 0 | 0 | -49 | 46 | 21 | -50 | | -141 | -4 | 0 | -13 | -3,55 à 77,13 m |
| 4 | 0 | 3 | 19 | 39 | 35 | -1 | | -110 | 7 | 48 | 7 | -3,24 à 80,39 m |
| 5 | 0 | 19 | 69 | 16 | 31 | 25 | -27 | -47 | -16 | 42 | -3 | -10 à 50,26 m |
| 6 | 0 | 28 | 59 | 16 | 16 | -51 | | -30 | -60 | -39 | -65 | -2,23 à 65,26 m |
| 7 | 0 | -1 | 54 | -5 | 12 | -26 | | -60 | -34 | -12 | -10 | -10 à 63,42 m |
| 8 | 0 | -10 | 59 | -10 | 17 | 35 | -14 | -21 | -27 | 24 | 67 | -10 à 49,87 m |
| 9 | 0 | -26 | 62 | 15 | -19 | -20 | | -29 | -39 | 1 | 20 | -10 à 56,89 m |
| 10 | 0 | -74 | 55 | -8 | -40 | 5 | | -52 | -53 | -30 | 19 | -10 à 52,30 m |
| 11 | 0 | 39 | 29 | -19 | -61 | -6 | -71 | -77 | -69 | -66 | 87 | -2,48 à 41,44 m |
| 12 | 0 | 15 | -5 | 6 | -63 | -51 | | -67 | -62 | -52 | -12 | -2,39 à 53,98 m |
| 13 | 0 | -78 | 11 | 29 | 10 | 10 | | -55 | -33 | -26 | 34 | -3,21 à 59,97 m |
| 14 | 0 | -165 | -59 | 49 | -29 | 22 | -30 | -40 | -54 | -35 | 109 | 0,81 à 47,51 m |
| 15 | 0 | -253 | -75 | 11 | -24 | 36 | | -10 | -40 | -32 | 58 | -1,19 à 58,89 m |
| 16 | 0 | -257 | -59 | 2 | 20 | 61 | | -6 | -21 | -50 | 101 | 0,30 à 56,38 m |
| 17 | 0 | -350 | -127 | -85 | -10 | 128 | | 66 | 25 | 113 | 193 | 1,49 à 52,97 m |
| 18 | 0 | -480 | -214 | -9 | -41 | 137 | | 105 | 27 | 130 | 198 | 1,46 à 47,14 m |
| 31 | 0 | -142 | -246 | -160 | -40 | -280 | | -215 | -226 | -176 | -39 | 1,71 à 52,92 m |
| 32 | 0 | 66 | 0 | -67 | 60 | -144 | | 33 | -71 | -90 | 28 | 2,59 à 37,25 m |
| 33 | 0 | 239 | 176 | 84 | 324 | 217 | | 250 | 98 | 130 | 135 | 5,13 à 30,07 m |
| 34 | 0 | 353 | 348 | 390 | 379 | 458 | | 463 | 301 | 393 | 336 | 6,44 à 29,06 m |
| 35 | 0 | 319 | 332 | 470 | 395 | 451 | | 446 | 386 | 414 | 356 | 2,64 à 29,82 m |
| 36 | 0 | 255 | 305 | 342 | 390 | 482 | | 363 | 400 | 447 | 390 | 2,39 à 26,37 m |

La Figure 106 basée sur les données du Tableau 23, montre l'accrétion ou l'érosion moyenne (en mm) sur les différents profils pour chaque campagne topographique, par rapport au premier levé en novembre 2017. Les campagnes de mai sont présentées en dégradés de vert, celles d'août en jaune et celles de novembre en bleu.

On remarque clairement que les profils 1 et 2 à proximité de l'embouchure de la rivière enregistrent d'importantes variations et une érosion marquée, notamment en 2020. Les profils 17 et 18 à l'extrémité nord-est de la plage, au-delà du 5$^{ème}$ épi, présentent également de fortes variations. De plus, les profils 14 à 18 enregistrent des déficits importants jusqu'à -500 mm en mai 2018 par rapport aux levés de novembre 2017. Ceci est probablement lié à la multiplication des tempêtes printanières fin mars-début avril cette année, comme noté précédemment.

Enfin, sur la plage sud-ouest, les profils 31 et 32 affichent de l'érosion par rapport aux levés initiaux alors que les profils 33 à 36 montrent une accrétion importante sur les différentes campagnes. Ceci confirme la situation contrastée nord-est/sud-ouest de la plage adjacente, telle que constatée sur les MNT saisonniers.

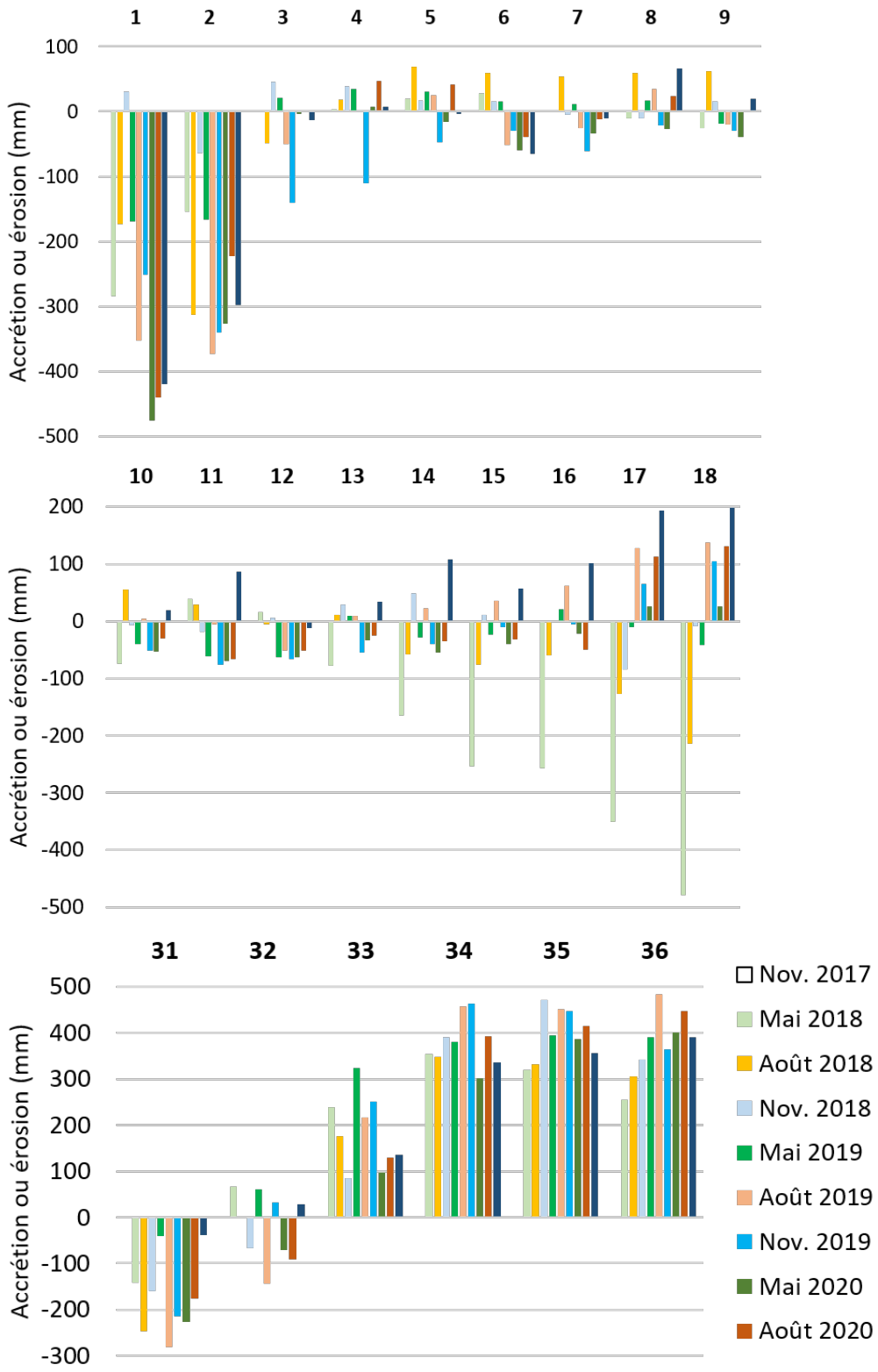



*Figure 106. Accrétion ou érosion moyenne sur les profils 1 à 9 (partie sud de la plage à épis), les profils 10 à 18 (partie nord de la plage à épis) et 31-36 (plage sud-ouest) pour chaque campagne topographique, par rapport au premier levé en novembre 2017.*

# ANNEXE 6 : VARIATIONS VOLUMÉTRIQUES SAISONNIÈRES

*Tableau 24. Variations volumétriques saisonnières de la plage à épis par secteurs.*

| Variable | Polygone # | Hiver 2017-2018 | Été 2018 | Automne 2018 | Hiver 2018-2019 | Été 2019 | Automne 2019 | Hiver 2019-2020 | Été 2020 | Automne 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Érosion /Accrétion moyenne (m) | 1 | -0,071 | 0,056 | 0,113 | -0,055 | -0,116 | 0,066 | 0,078 | -0,016 | -0,161 |
| | 2 | -0,244 | 0,036 | 0,237 | -0,031 | -0,056 | 0,009 | -0,041 | -0,040 | 0,098 |
| | 3 | 0,031 | 0,076 | -0,235 | -0,027 | 0,104 | -0,150 | -0,002 | 0,155 | 0,098 |
| | 4 | 0,108 | 0,092 | -0,102 | 0,012 | 0,053 | -0,111 | 0,082 | 0,078 | -0,007 |
| Volume ($m^3$) | 1 | -270 | 212 | 432 | -209 | -444 | 252 | 298 | -60 | -616 |
| | 2 | -1667 | 243 | 1616 | -214 | -379 | 59 | -282 | -274 | 670 |
| | 3 | 139 | 341 | -1060 | -121 | 467 | -678 | -8 | 697 | 441 |
| | 4 | 293 | 248 | -269 | 31 | 143 | -301 | 221 | 211 | -20 |
| % aire en érosion | 1 | 51,3 | 43,2 | 2,1 | 67,9 | 84,8 | 11,6 | 22,9 | 56,3 | 96,4 |
| | 2 | 85,2 | 44,4 | 0,8 | 66,0 | 63,4 | 37,2 | 72,1 | 69,0 | 37,3 |
| | 3 | 42,2 | 37,3 | 80,9 | 59,3 | 28,2 | 85,4 | 59,5 | 13,8 | 34,7 |
| | 4 | 24,9 | 21,3 | 68,7 | 49,9 | 17,0 | 81,9 | 19,2 | 17,8 | 48,4 |

# Polygone 1 : Avant-plage (aire 3 823 $m^2$)
Polygone 2 : Bas-estran (aire 6 826 $m^2$)
Polygone 3 : Haut-estran (aire 4 511 $m^2$)
Polygone 4 : Haute-plage (aire 2 709 $m^2$)

Voir la Figure 23 pour la position et l'étendue des polygones.

*Tableau 25. Variations volumétriques saisonnières de la plage à épis par parties nord/sud.*

| Variable | Polygone # | Hiver 2017-2018 | Été 2018 | Automne 2018 | Hiver 2018-2019 | Été 2019 | Automne 2019 | Hiver 2019-2020 | Été 2020 | Automne 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Érosion /Accrétion moyenne (m) | 1 | -0,030 | 0,019 | 0,037 | -0,031 | -0,063 | -0,026 | 0,032 | 0,039 | -0,019 |
| | 2 | -0,163 | 0,115 | 0,054 | -0,026 | 0,063 | -0,054 | -0,015 | 0,022 | 0,093 |
| Volume ($m^3$) | 1 | -311 | 176 | 372 | -315 | -672 | -311 | 357 | 412 | -196 |
| | 2 | -1187 | 839 | 328 | -190 | 456 | -389 | -111 | 157 | 673 |
| % aire en érosion | 1 | 50,5 | 53,1 | 31,0 | 57,7 | 62,4 | 47,8 | 42,3 | 45,6 | 55,8 |
| | 2 | 68,8 | 18,1 | 32,1 | 69,0 | 37,1 | 54,8 | 62,1 | 47,5 | 43,9 |

# Polygone 1 : Partie sud (aire 10 589 $m^2$)
Polygone 2 : Partie nord (aire 7 280 $m^2$)

Voir la Figure 24 pour la position et l'étendue des polygones.

*Tableau 26. Variations volumétriques saisonnières de la plage sud-ouest par secteur.*

| Variable | Polygone # | Hiver 2017-2018 | Été 2018 | Automne 2018 | Hiver 2018-2019 | Été 2019 | Automne 2019 | Hiver 2019-2020 | Été 2020 | Automne 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Érosion /Accrétion moyenne (m) | 1 | -0,044 | -0,030 | 0,117 | 0,070 | -0,151 | 0,156 | -0,054 | -0,071 | 0,057 |
| | 2 | 0,184 | -0,094 | 0,016 | 0,166 | -0,105 | 0,060 | -0,158 | 0,079 | -0,007 |
| | 3 | 0,339 | 0,005 | -0,062 | 0,045 | -0,071 | 0,002 | -0,047 | 0,068 | 0,036 |
| Volume ($m^3$) | 1 | -38 | -27 | 102 | 62 | -132 | 137 | -48 | -62 | 50 |
| | 2 | 327 | -167 | 28 | 296 | -188 | 106 | -282 | 140 | -12 |
| | 3 | 487 | 8 | -89 | 65 | -102 | 3 | -68 | 98 | 52 |
| % aire en érosion | 1 | 44,9 | 67,0 | 2,3 | 21,5 | 66,3 | 16,6 | 83,7 | 78,0 | 49,1 |
| | 2 | 18,5 | 91,4 | 36,1 | 5,4 | 55,3 | 41,1 | 99,4 | 27,0 | 59,9 |
| | 3 | 0,4 | 50,4 | 63,4 | 46,3 | 64,9 | 56,0 | 63,5 | 14,2 | 27,2 |

# Polygone 1 : Bas-estran (aire 876 $m^2$)
Polygone 2 : Haut-estran (aire 1 785 $m^2$)
Polygone 3 : Haute-plage (aire 1 440 $m^2$)

Voir la Figure 23 pour la position et l'étendue des polygones.

# ANNEXE 7 : POSITION DE LA ZONE DE DÉFERLEMENT

*Tableau 27. Limite externe (L.Ext.), limite interne (L.Int.) et largeur de la zone de déferlement aux profils topographiques 14 et 11, ainsi que le niveau d'eau CGVD2013, la hauteur des vagues $H_{m0}$ et la période des vagues $T_{02}$.*

| Temps (HAE) | Niveau eau (m) | $H_{m0}$ (m) | $T_{02}$ (s) | L.Ext. Prof. 14 (m) | L.Ext. Prof 11 (m) | L.Int. Prof. 14 (m) | L.Int. Prof. 11 (m) | Largeur Prof. 14 (m) | Largeur Prof. 11 (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2019-09-17 14:00 | -0,31 | 0,52 | 5,04 | 1,36 | 3,84 | -31,8 | -31,0 | 33,2 | 34,8 |
| 2019-09-17 15:00 | -0,03 | 0,55 | 5,41 | -7,68 | -4,00 | -36,3 | -34,6 | 28,7 | 30,6 |
| 2019-09-17 16:00 | 0,18 | 0,59 | 5,64 | 2,10 | 0,43 | -38,7 | -36,7 | 40,8 | 37,1 |
| 2019-09-17 18:00 | 0,21 | 0,50 | 5,67 | -4,45 | -8,04 | -39,0 | -37,0 | 34,6 | 28,9 |
| 2019-09-24 08:00 | -0,25 | 0,56 | 4,09 | 2,93 | 6,83 | -33,1 | -31,8 | 36,0 | 38,7 |
| 2019-09-24 09:00 | -0,15 | 0,65 | 4,22 | 11,88 | 24,23 | -34,7 | -33,2 | 46,6 | 57,4 |
| 2019-09-24 10:00 | -0,09 | 0,65 | 4,15 | 10,23 | 16,02 | -35,6 | -33,9 | 45,8 | 49,9 |
| 2019-09-24 11:00 | -0,10 | 0,69 | 4,16 | 21,16 | 27,41 | -35,4 | -33,8 | 56,6 | 61,2 |
| 2019-09-24 12:00 | -0,16 | 0,76 | 4,54 | 25,00 | 25,03 | -34,7 | -33,1 | 59,7 | 58,2 |
| 2019-09-24 13:00 | -0,25 | 0,77 | 4,43 | 28,75 | 31,31 | -33,1 | -31,8 | 61,8 | 63,1 |
| 2019-09-24 14:00 | -0,33 | 0,79 | 4,58 | 15,63 | 23,23 | -31,1 | -30,6 | 46,7 | 53,8 |
| 2019-09-24 15:00 | -0,41 | 0,77 | 4,51 | 13,53 | 13,99 | -28,2 | -28,9 | 41,7 | 42,8 |
| 2019-09-24 16:00 | -0,46 | 0,70 | 4,35 | 26,81 | 25,91 | -26,9 | -27,8 | 53,8 | 53,7 |
| 2019-09-24 17:00 | -0,43 | 0,74 | 4,38 | 13,53 | 17,90 | -27,6 | -28,4 | 41,1 | 46,3 |
| 2019-09-24 18:00 | -0,32 | 0,78 | 4,55 | 9,28 | 7,49 | -31,4 | -30,8 | 40,6 | 38,3 |
| 2019-09-25 07:00 | -0,61 | 0,62 | 4,40 | 12,87 | 14,34 | -23,7 | -23,6 | 36,6 | 37,9 |
| 2019-09-25 08:00 | -0,51 | 0,60 | 4,59 | 10,11 | 18,88 | -25,8 | -26,6 | 35,9 | 45,5 |
| 2019-09-25 09:00 | -0,33 | 0,61 | 4,79 | 2,23 | 4,57 | -31,0 | -30,6 | 33,2 | 35,2 |
| 2019-09-25 10:00 | -0,15 | 0,70 | 4,66 | 1,36 | 3,55 | -34,8 | -33,2 | 36,1 | 36,8 |
| 2019-09-25 11:00 | 0,00 | 0,71 | 4,98 | -5,53 | -1,76 | -36,6 | -34,9 | 31,1 | 33,1 |
| 2019-09-25 12:00 | 0,00 | 0,75 | 5,12 | 1,94 | 1,69 | -36,7 | -34,9 | 38,6 | 36,6 |
| 2019-09-25 13:00 | -0,03 | 0,71 | 4,84 | 13,28 | 6,77 | -36,4 | -34,6 | 49,7 | 41,4 |
| 2019-09-25 14:00 | -0,16 | 0,71 | 4,87 | 1,16 | 0,13 | -34,6 | -33,1 | 35,8 | 33,2 |
| 2019-09-25 15:00 | -0,30 | 0,66 | 4,69 | 4,00 | 3,33 | -32,0 | -31,1 | 36,0 | 34,5 |
| 2019-09-25 16:00 | -0,46 | 0,70 | 4,53 | 15,92 | 19,79 | -26,9 | -27,8 | 42,8 | 47,5 |
| 2019-09-25 17:00 | -0,58 | 0,62 | 4,37 | 6,72 | 6,83 | -24,3 | -24,7 | 31,0 | 31,5 |
| 2019-09-25 18:00 | -0,60 | 0,58 | 4,47 | 20,54 | 13,08 | -23,9 | -24,1 | 44,5 | 37,2 |
| 2019-10-02 07:00 | 0,34 | 0,60 | 4,62 | -7,51 | -5,13 | -40,1 | -38,0 | 32,6 | 32,9 |
| 2019-10-02 08:00 | 0,07 | 0,54 | 4,63 | -3,67 | -3,60 | -37,5 | -35,6 | 33,8 | 32,0 |
| 2019-10-02 09:00 | -0,26 | 0,58 | 4,66 | -0,74 | 0,82 | -32,9 | -31,7 | 32,2 | 32,6 |
| 2019-10-02 10:00 | -0,52 | 0,53 | 4,35 | 8,50 | 3,50 | -25,7 | -26,5 | 34,2 | 30,0 |
| 2019-10-12 10:00 | -0,65 | 0,50 | 3,75 | 13,37 | 7,23 | -22,9 | -18,6 | 36,3 | 25,9 |

*Tableau 27. (suite)*

| Temps (HAE) | Niveau eau (m) | $H_{m0}$ (m) | $T_{02}$ (s) | L.Ext. Prof. 14 (m) | L.Ext. Prof 11 (m) | L.Int. Prof. 14 (m) | L.Int. Prof. 11 (m) | Largeur Prof. 14 (m) | Largeur Prof. 11 (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2019-10-12 11:00 | -0,46 | 0,50 | 3,67 | 4,08 | 1,67 | -26,9 | -27,8 | 31,0 | 29,5 |
| 2019-10-12 12:00 | -0,21 | 0,55 | 3,76 | 1,69 | 3,87 | -34,0 | -32,5 | 35,7 | 36,4 |
| 2019-10-12 13:00 | 0,01 | 0,58 | 3,85 | 1,28 | 1,98 | -36,8 | -35,0 | 38,1 | 37,0 |
| 2019-10-12 14:00 | 0,14 | 0,57 | 4,15 | -4,91 | -2,27 | -38,3 | -36,3 | 33,4 | 34,1 |
| 2019-10-12 15:00 | 0,16 | 0,64 | 4,32 | 0,58 | 1,86 | -38,4 | -36,4 | 39,0 | 38,3 |
| 2019-10-12 16:00 | 0,06 | 0,58 | 4,45 | -1,86 | -1,56 | -37,3 | -35,5 | 35,5 | 33,9 |
| 2019-10-12 17:00 | -0,14 | 0,55 | 4,27 | 0,00 | -0,55 | -34,9 | -33,3 | 34,9 | 32,8 |
| 2019-10-12 18:00 | -0,36 | 0,57 | 4,34 | 2,52 | -1,59 | -29,6 | -29,9 | 32,1 | 28,3 |
| 2019-10-17 09:00 | -0,48 | 0,59 | 3,75 | 9,32 | 15,97 | -26,5 | -27,4 | 35,9 | 43,4 |
| 2019-10-17 10:00 | -0,55 | 0,58 | 3,85 | 15,55 | 18,72 | -24,9 | -25,5 | 40,4 | 44,2 |
| 2019-10-17 11:00 | -0,52 | 0,63 | 3,83 | 7,01 | 9,20 | -25,5 | -26,3 | 32,5 | 35,5 |
| 2019-10-17 12:00 | -0,36 | 0,81 | 4,31 | 11,67 | 21,99 | -29,8 | -30,0 | 41,4 | 52,0 |
| 2019-10-17 13:00 | -0,06 | 0,89 | 4,40 | 22,19 | 23,86 | -36,0 | -34,2 | 58,1 | 58,1 |
| 2019-10-17 14:00 | 0,31 | 1,12 | 4,66 | 31,43 | 42,66 | -39,9 | -37,8 | 71,3 | 80,5 |
| 2019-10-17 15:00 | 0,63 | 1,28 | 4,79 | 18,93 | 25,54 | -44,7 | -44,3 | 63,6 | 69,8 |
| 2019-10-17 16:00 | 1,02 | 1,46 | 5,08 | 47,06 | 50,48 | -48,0 | -49,0 | 95,1 | 99,5 |
| 2019-10-17 17:00 | 1,09 | 1,56 | 5,19 | 36,92 | 34,31 | -48,9 | -49,8 | 85,8 | 84,1 |
| 2019-10-18 08:00 | -0,29 | 0,68 | 5,21 | 1,82 | 3,58 | -32,3 | -31,3 | 34,1 | 34,9 |
| 2019-10-18 09:00 | -0,54 | 0,59 | 4,88 | 1,53 | 5,10 | -25,3 | -26,0 | 26,8 | 31,1 |
| 2019-10-18 10:00 | -0,68 | 0,63 | 4,73 | 4,62 | 8,82 | -22,2 | -17,5 | 26,8 | 26,3 |
| 2019-10-18 11:00 | -0,64 | 0,56 | 4,91 | 3,22 | 8,23 | -23,0 | -18,7 | 26,2 | 26,9 |
| 2019-10-18 12:00 | -0,50 | 0,60 | 4,98 | -6,43 | -2,06 | -26,1 | -26,9 | 19,6 | 24,9 |
| 2019-10-18 13:00 | -0,28 | 0,56 | 5,31 | -2,89 | -4,32 | -32,4 | -31,4 | 29,6 | 27,1 |
| 2019-10-18 14:00 | -0,01 | 0,51 | 5,67 | -10,93 | -10,06 | -36,6 | -34,8 | 25,7 | 24,8 |
| 2019-10-23 09:00 | -0,24 | 0,55 | 3,59 | -4,78 | -0,58 | -33,3 | -32,0 | 28,5 | 31,4 |
| 2019-10-23 10:00 | -0,14 | 0,66 | 3,86 | 1,94 | 1,78 | -34,8 | -33,3 | 36,8 | 35,1 |
| 2019-10-23 11:00 | -0,11 | 0,68 | 3,91 | 7,34 | 8,86 | -35,3 | -33,6 | 42,6 | 42,5 |
| 2019-10-23 12:00 | -0,21 | 0,72 | 3,93 | 5,07 | 7,88 | -33,9 | -32,4 | 39,0 | 40,3 |
| 2019-10-23 13:00 | -0,28 | 0,75 | 4,22 | 5,07 | 5,07 | -32,5 | -31,5 | 37,6 | 36,5 |
| 2019-10-23 14:00 | -0,37 | 0,73 | 3,97 | 14,23 | 15,42 | -29,1 | -29,6 | 43,3 | 45,1 |
| 2019-10-23 15:00 | -0,48 | 0,66 | 4,14 | 9,32 | 6,61 | -26,4 | -27,2 | 35,7 | 33,9 |
| 2019-10-23 16:00 | -0,56 | 0,66 | 4,23 | 21,45 | 19,59 | -24,7 | -25,3 | 46,2 | 44,9 |
| 2019-10-23 17:00 | -0,50 | 0,64 | 4,14 | 19,35 | 19,95 | -26,0 | -26,9 | 45,4 | 46,8 |