

Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques

Projet de recherche CC16.1

Rapport final

**Rapport produit pour le compte du
Bureau de la coordination du Nord-du-Québec
Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec**

Urs Neumeier, Sylvain Joly et Sophie Collin

Février 2023

Référence complète : Neumeier, U., Joly, S., Collin, S., 2023. Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques. Rapport final présenté au ministère des Transport du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xvi + 121 p.

RÉSUMÉ

Les infrastructures maritimes des villages nordiques du Nunavik servent de points d'attache pour les embarcations utilisées pour les déplacements locaux, la pêche et la chasse. Dans la continuité des précédents projets liés à ces problématiques, le ministère des Transports du Québec a mandaté l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) de poursuivre et compléter ce travail d'acquisition de données océanographiques et d'y inclure une étude de sensibilité via la modélisation numérique, afin d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes en lien avec les conditions des glaces, de niveaux d'eau et de vagues dans un contexte de changements climatiques. Deux secteurs ont été étudiés : Kuujjuarapik situé au sud-est de la baie d'Hudson avec des marées allant jusqu'à 1,8 m, et Quaqtq situé dans le détroit d'Hudson proche de la baie d'Ungava avec des marées dépassant 9 m.

Les relevés bathymétriques à proximité de Kuujjuarapik et de Quaqtq ont été réalisés par le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) à l'aide de deux types de bouées HydroBall, munies d'un échosondeur et d'un système de positionnement satellitaire. Trois missions de terrain ont été nécessaires, deux pour le site de Kuujjuarapik à l'été et l'automne 2017, et une seule mission pour le site Quaqtq à l'automne 2017. La bathymétrie de la majeure partie des secteurs prévus au devis a été levée. Il s'agit notamment de larges zones peu profondes de moins de 50 m en avant des installations portuaires de chaque site. Certaines zones prévues n'ont pu être totalement couvertes par les relevés bathymétriques du fait du caractère expérimental en milieu arctique avec des moyens de navigation limités et des conditions météorologiques souvent peu favorables.

Les conditions de vagues, courants, glaces et de niveaux d'eau ont été mesurées, de manière quasi continue pendant trois ans (quatre ans pour Quaqtq), à l'aide de profileur de courant de type AWAC-AST installé au large de chacun des deux sites à 35-40 m de profondeur. Sur ce même mouillage était monté en parallèle un marégraphe pour mesurer à haute fréquence les niveaux d'eau. Ces mouillages étaient sortis de l'eau toutes les années en été pour être nettoyés, reprogrammés et réimmergés. Leur récupération finale aurait dû avoir lieu à l'été 2020 mais s'est finalement faite à l'automne 2021 à cause des perturbations liées à la pandémie de Covid-19. Ce délai non prévu a permis l'obtention d'une année supplémentaire de données pour Quaqtq alors qu'à Kuujjuarapik, la limitation en mémoire de l'instrument n'a pas permis cela. Également des houlographes côtiers utilisés pour la mesure non-directionnelle des vagues et des marées ont été installés de manière ponctuelle à la fin de l'été 2018 pour une durée de quelques semaines. Deux ont été utilisés à Kuujjuarapik : l'un placé dans le détroit de Manitoonuk à proximité de l'infrastructure maritime et le second proche de la côte devant l'aéroport de Kuujjuarapik. Un seul houlographe côtier a été utilisé à 80 m devant l'infrastructure maritime principale de Quaqtq. Des baromètres ont aussi été installés à Kuujjuarapik et à Quaqtq pour être certain d'avoir des enregistrements de pressions atmosphériques nécessaires pour le traitement des données des marégraphes.

Sur ces trois années (4 ans pour Quaqtq) de suivi des conditions maritimes, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes ont évolué d'une année à l'autre. Les tempêtes interviennent à l'automne de septembre à décembre et présentent une grande variabilité

interannuelle : sur les trois années de données à Kuujjuarapik, recensant les quinze plus fortes tempêtes, neuf sont survenues à l'automne 2017, quatre à l'automne 2018 et deux à l'automne 2019. À Quaqlaq, sur les quinze plus fortes tempêtes, sept sont survenues à l'automne 2017, quatre à l'automne 2018, une seule à l'automne 2019 et trois à l'automne 2020. L'année 2017 a été la plus tempétueuse, phénomène observé aux deux sites malgré leur distance. Le site de Kuujjuarapik est exposé surtout aux fortes vagues de l'ouest et dans une moindre mesure à celles du nord-ouest à cause de la protection partielle des îles Belcher distantes de 100 km. La plus grosse tempête a généré des vagues de 5,75 m de hauteur significative avec une période de 6,6 s. Le site de Quaqlaq est exposé aux fortes vagues du nord-ouest en provenance du détroit d'Hudson. La plus grosse tempête a généré des vagues de 5,70 m de hauteur significative avec une période de 7,1 s. Malgré ces hauteurs impressionnantes atteintes lors d'événements extrêmes, les données enregistrées aux deux sites montrent que les vagues ne dépassent pas 1 m de hauteur 90% du temps où l'eau est libre de glace. La saison de glace est très longue s'étend de la fin décembre jusqu'au mois de juillet, quand il n'est pas rare de voir flotter encore des floes de glace.

Les profileurs des courants ont échantillonné les courants sur la quasi-totalité de la colonne d'eau produisant ainsi des profils verticaux de courants à haute résolution temporelle, aux vingt minutes pour Kuujjuarapik et aux heures pour Quaqlaq. Ces informations de courants ne sont valides que pour l'endroit où ils ont été mesurés et ne représentent pas la courantologie des zones environnantes. À Kuujjuarapik les courants sont très faibles et sont inférieurs à 0,2 m/s la plupart du temps, ils induisent un transport net vers le nord-est. Le signal de la marée y est très peu décelable. À Quaqlaq, les courants mesurés sont plus forts et peuvent atteindre plus de 1 m/s. Ils engendrent un transport net vers le nord-est et l'est-nord-est.

Les surcotes de tempêtes ont été déterminées à partir des données de niveaux d'eau mesurés par les marégraphes, mais également par les capteurs de pression des profileurs de courant. Ces deux sources présentent des résultats très similaires. À Kuujjuarapik, les surcotes et décotes sont relativement importantes et ont un effet certain sur le niveau d'eau à cause du faible marnage. Ces surcotes interviennent généralement à l'automne pendant les périodes libres de glace. La plus forte surcote était de 1,36 m. À Quaqlaq, par contre, les surcotes sont plus faibles, ne dépassant pas 0,53 m. C'est le signal de marée qui domine dans les variations du niveau d'eau. Les plus fortes surcotes mesurées n'ont pas toutes lieu à l'automne car plus de la moitié d'entre elles, sur les dix-huit plus importantes, sont intervenues lorsque l'englacement était présent. Il pourrait s'agir d'un effet lié au frottement de l'onde de marée avec le couvert de glace induisant un décalage temporel du niveau d'eau avec marées astronomiques.

La modélisation des vagues a été effectuée avec le modèle SWAN pour comparer les conditions du passé récent (1982-2010) avec les conditions de deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) en suivant la simulation climatique AHJ du Modèle régional canadien du climat (MRCC). Celle-ci est basée sur le scénario climatique SRES A2. Les vents utilisés proviennent directement de la simulation AHJ, les vagues venant du large proviennent d'une modélisation avec Wavewatch III de la baie d'Hudson (résolution 10 km) qui avait été réalisée par Caroline Sévigny et Dany Dumont pour les conditions de la simulation AHJ, les niveaux d'eau, les courants et la glace de mer proviennent des sous-domaines à 400 m de résolution du modèle océanique MOR-HB qui avaient été réalisés par Simon Senneville pour les conditions de la simulation AHJ. À Kuujjuarapik, le modèle

SWAN utilise une grille de calcul curvilinéaire (c'est-à-dire composée de quadrilatères de forme et de taille variées) avec une résolution à la côte de 200 m. À Quaqtaq, SWAN utilise deux grilles rectilignes imbriquées (résolutions 800 m et 100 m).

La modélisation des vagues pour les deux secteurs avec la simulation AHJ révèle une augmentation de la hauteur des vagues pendant l'hiver de 1982 à 2100 en raison de l'augmentation des périodes d'eaux libres au cours fin du XXI^e siècle. Ceci est dû à la diminution de la durée de couvert de glace associée au réchauffement climatique. L'analyse de la distribution des vagues pendant les périodes de transition indique que l'état des glaces serait plus critique pour la période de transition automnale que la période de transition printanière à cause de la saisonnalité des tempêtes.

La modélisation des vagues révèle une augmentation progressive du climat de vague au cours du XXI^e siècle aussi bien au large que près de la côte pour le secteur de Kuujjuarapik et pour le secteur de Quaqtaq. Ainsi à Kuujjuarapik, la hauteur des vagues survenant 0,1 % du temps augmente progressivement au large de 3,73 m (1982-2010) à 4,09 m (2071-2100), près de la côte devant le village, cette hauteur augmente de 2,86 m à 3,07 m et dans le détroit de Manitounouk cette hauteur passe de 1,02 m à 1,19 m. Comme la tempête du siècle s'est produite à Kuujjuarapik dans la période passée pour la simulation climatique AHJ (le 16 octobre 2001 avec des vagues de 6,49 m au large et 3,99 m près de la côte), cette augmentation des hauteurs des vagues est moins évidente pour les événements extrêmes, bien que présente si l'on ignore cette tempête exceptionnelle. Les hauteurs des vagues pour la période de retour de 50 ans sont d'environ 6 m au large et entre 4,0 et 4,5 m près de la côte. Les résultats des simulations ne révèlent pas de changement significatif de la direction des vagues durant le XXI^e siècle.

Pour le secteur de Quaqtaq, la hauteur des vagues survenant 0,1 % du temps augmente progressivement au large de 3,93 m (1982-2010) à 4,10 (2071-2100), devant la côte de 2,52 m à 2,86 m et dans l'anse de la Mission où est situé le village de 1,02 m à 1,19 m. La hausse existe aussi pour les tempêtes extrêmes au cours du XXI^e siècle, mais elle n'est pas progressive entre les trois périodes modélisées. Les hauteurs des vagues pour la période de retour 50 ans sont d'environ 6 m au large et entre 2,6 et 3,6 dans l'anse de la Mission. Les directions durant les événements extrêmes changent durant le XXI^e siècle, passant pour les vagues au large de nord-est (1982-2010) à nord-est et nord-ouest (2071-2100).

Une étude de sensibilité de l'influence de la hausse du niveau marin sur la hauteur des vagues indique que pour la hausse du niveau marin relatif prévue à Kuujjuarapik (+0,1 m à +0,5 m durant le XXI^e siècle, en tenant compte du rehaussement isostatique) les vagues des tempêtes majeures pourraient augmenter de 0,02 m à 0,10 m près de la côte, alors que les vagues plus petites seraient très peu affectées. La situation est plus complexe à Quaqtaq, avec l'impact d'une hausse du niveau marin variant fortement selon la direction des tempêtes et le niveau de marée.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Table des matières.....	vi
Liste des figures	viii
Listes des tableaux	xiv
Remerciements.....	xvi
1. Introduction.....	1
2. Données de bathymétrie.....	4
2.1. Acquisition des données de bathymétrie.....	5
2.2. Traitement des données de bathymétrie.....	8
2.3. Description des fichiers de données de bathymétrie.....	10
3. Acquisitions des données des mouillages	13
3.1. Positions des instruments et périodes d'enregistrement	13
3.1.1. Positions des mouillages de Kuujjuarapik	13
3.1.2. Positions des mouillages de Quaqlaq.....	14
3.1.3. Positions des baromètres enregistreurs	18
3.2. Description des instruments des mouillages	19
3.3. Configuration des mouillages	19
3.4. Programmation des mouillages et des baromètres.....	20
4. Traitement des données.....	24
4.1. Traitement des données des marégraphes	24
4.2. Traitement des données de pression atmosphérique utilisées.....	24
4.3. Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants	25
4.4. Traitement des données de vagues.....	26
4.5. Traitement et contrôle de qualité des données de courants.....	32
5. Résultats des mouillages	34
5.1. Données de vagues.....	34
5.2. Données de courants	45
5.3. Données de niveau d'eau	50
6. Travaux de modélisation des vagues	58
6.1. Périodes modélisées	58

6.2. Description du modèle utilisé	58
6.3. Configuration du modèle	59
6.4. Validation du modèle	65
6.4.1. Méthode de validation.....	65
6.4.2. Paramètres statistiques de validation	68
6.4.3. Résultats de la validation pour Kuujjuarapik.....	69
6.4.4. Résultat de la validation pour Quaqtac	71
6.5. Distribution spatiale des vagues en milieu côtier	74
6.5.1. Distribution spatiale dans le secteur de Kuujjuarapik.....	74
6.5.2. Distribution spatiale dans le secteur de Quaqtac	79
6.6. Comparaison du passé récent et du futur	83
6.6.1. Future évolution pour le secteur de Kuujjuarapik.....	86
6.6.2. Future évolution pour le secteur de Quaqtac	93
6.7. Influence de la remontée du niveau marin global	101
7. Synthèse des conclusions et recommandations.....	106
8. Références.....	108
Annexe 1 : Liste des fichiers.....	111
Annexe 2 : Lexique.....	114
Annexe 3 : Liste des paramètres de vagues	116
Annexe 4 : Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues	118
Annexe 5 : Vents au large de Kuujjuarapik et Quaqtac durant les déploiements.....	120
Annexe 6 : Rapport du CIDCO sur l'acquisition et le traitement des données de bathymétrie à Kuujjuarapik.....	122
Annexe 7 : Rapport du CIDCO sur l'acquisition et le traitement des données de bathymétrie à Quaqtac	123

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Position de Kuujjuarapik dans la baie d'Hudson et de Quaqaq dans le détroit d'Hudson.	3
Figure 2. Carte des différents secteurs prévus pour le levé bathymétrique près de Kuujjuarapik. L'espacement prévu entre les lignes du levé est indiqué pour chaque secteur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.....	4
Figure 3. Carte des différents secteurs prévus pour le levé bathymétrique près de Quaqaq. L'espacement prévu entre les lignes du levé est indiqué pour chaque secteur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.	5
Figure 4. Résultats des relevés bathymétriques effectués par le CIDCO à Kuujjuarapik en 2017. Les zones de plus de 50m de profondeur ne sont pas couvertes car hors de portée du sondeur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.	8
Figure 5. Résultats des relevés bathymétriques effectués par le CIDCO à Quaqaq en 2017. Les zones de plus de 50m de profondeur ne sont pas couvertes car hors de portée du sondeur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.	9
Figure 6. Positions des mouillages installés à Kuujjuarapik. Les profondeurs de la carte sont en brasses.....	14
Figure 7. Position des mouillages installés à Quaqaq. Les profondeurs de la carte sont en brasses	15
Figure 8. Mouillage côtier devant l'infrastructure maritime de Quaqaq. (Haut) Photo prise lors de l'installation. (Bas) Position sur photographie satellite.	16
Figure 9. Installation des baromètres enregistreurs : (gauche) au sommet d'une étagère dans le garage de la station de recherche du CEN à Kuujjuarapik; (droite) sur un grillage de la mezzanine du garage de l'aéroport de Quaqaq (seulement à partir d'août 2018).	18
Figure 10. Plateforme GP-TRBM avec AWAC juste avant la mise à l'eau. L'AWAC est à gauche, la bouée pour la récupération est à droite, les caissons batteries, le déclencheur acoustique et le marégraphe sont à l'intérieur de la plate-forme antichalutage. Au-dessus de la plate-forme sont les bouées parachutes et un déclencheur acoustique additionnel utilisés seulement pour assurer la bonne orientation du mouillage pendant la descente; ces éléments sont récupérés juste après la mise à l'eau.	20
Figure 11. Support de mouillage utilisé pour les houlographes TWR-2050 à Kuujjuarapik	23
Figure 12. Fixation du houlographe TWR-2050 à Quaqaq.	23
Figure 13. 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).	30

Figure 14. Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1).	31
Figure 15. Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.	33
Figure 16. Probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} enregistrées par les deux mouillages à Kuujjuarapik d'août 2017 à juillet 2020; et à Quaqtaq d'août 2017 à septembre-2021. Pour Kuujjuarapik, il existe deux jeux de données, le premier couvrant une période de 3 ans et inclut les données mesurées par le capteur de pression d'août 2017 à septembre 2018, et le second, d'une durée de 2 ans, contient uniquement les données mesurées par signal acoustique de septembre 2018 à juillet 2020.	35
Figure 17. Roses de vagues pour l'AWAC de Kuujjuarapik (haut) et Quaqtaq (bas) sur l'ensemble des données disponible à chaque site. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.	36
Figure 18. Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des 15 plus fortes tempêtes mesurées par les AWACs à Kuujjuarapik (gauche) en 2018-2020 et à Quaqtaq (droite) en 2017-2021.	39
Figure 19. Séries temporelles des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées par l'AWAC à Kuujjuarapik d'août 2017 à la mi-juillet 2020. La période hivernale n'est pas illustrée pour cause de glace. Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	41
Figure 20. Séries temporelles des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées par l'AWAC à Quaqtaq d'août 2017 à la mi-septembre 2021. La période hivernale n'est pas illustrée pour cause de glace. Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.	43
Figure 21 Roses de courants (destination des courants) enregistrés aux deux sites et moyennés sur l'ensemble du projet : (gauche) Kuujjuarapik; (droite) Quaqtaq. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiqués les pourcentages de temps avec les différentes classes de vitesse de courant. La valeur en mètre représente la distance au-dessus du fond.	46
Figure 22. Exemple de profil de vitesse enregistré à Quaqtaq au début septembre 2019. Le premier panneau illustre la vitesse horizontale en m/s (l'échelle colorimétrique des vitesses varie de 0 à 80 cm/s) et le panneau du bas la direction de propagation des courants. Le niveau d'eau est indiqué sur chaque panneau par la ligne rouge.	47
Figure 23. Exemple de profil de vitesse enregistré à Kuujjuarapik au début juillet 2020. Le premier panneau illustre la vitesse horizontale en m/s (l'échelle colorimétrique des	

vitesse varie de 0 à 50 cm/s) et le panneau du bas la direction de propagation des courants. Le niveau d'eau est indiqué sur chaque panneau par la ligne rouge. 48

Figure 24. Exemple de courants tidaux de surface observés à Kuujjuarapik (gauche) et à Quaqtaq (droite) sur un cycle de marée (~ 12 heures). Les courants sont en m/s. L'échelle colorimétrique, du bleu foncé vers le rouge-brun, est utilisée pour montrer la rotation des courants durant un cycle tidal de 12 heures. La ligne en grisée représente la trajectoire des vecteurs courants sur un cycle de morte-eau / vive-eau (~ 15 jours). ... 49

Figure 25. Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote (différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions de marée calculées) mesurés par le TGR-2050 du mouillage de Kuujjuarapik d'août 2017 à juin 2021. Des symboles indiquent les dix plus fortes surcotes, décotes et niveaux absolus. Le trait jaune est le niveau d'eau lissé par un filtre passe-bas de 30 jours..... 52

Figure 26. Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote (différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions de marée calculées) mesurés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Quaqtaq d'août 2017 à octobre 2020. Des symboles indiquent les dix plus fortes surcotes, décotes et niveaux absolus. Le trait jaune est le niveau d'eau lissé par un filtre passe-bas de 30 jours..... 53

Figure 27. Grille de calcul avec bathymétrie du secteur de Kuujjuarapik avec les positions mouillage AWAC (point rouge) et des houlographes côtiers (points verts). 62

Figure 28. Grille de calcul grossière "Dianabay" du secteur de Quaqtaq avec la bathymétrie de chaque point de la grille. Le rectangle rouge indique la position de la position de la grille fine "Quaqtaq" 63

Figure 29. Grille de calcul fine "Quaqtaq" du secteur de Quaqtaq avec la bathymétrie de chaque point de la grille. Les points de la grille grossières "Dianabay" et la position des sorties sauvegardées du modèle sont aussi indiquées..... 64

Figure 30. Limite de la grille de validation à Quaqtaq (Quaqtaq-Validation, rectangle bleu) comparé à la grille fine standard fine "Quaqtaq", ainsi que les positions du mouillage AWAC, qui définit les conditions aux frontières de la grille de validation, et du mouillage RBR, qui est le point de validation. 66

Figure 31. Points de sortie de modélisation comparés entre SWAN et WW3 à Kuujjuarapik. La grille bleue correspond à la grille de calcul curvilinéaire créée pour le secteur de Kuujjuarapik dans le cadre de ce projet. Les points noirs correspondent aux points du modèle WW3. 67

Figure 32. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s), périodes (T_{02}) et direction (Dir_m) des vagues pour la zone A (près de l'île Gillies) entre SWAN et WW3 pour la validation du modèle de Kuujjuarapik. 70

Figure 33. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s) des zones A, B et C entre SWAN et WW3 pour la validation du modèle de Kuujjuarapik. .. 70

Figure 34. Analyses statistiques de la comparaison des résultats de modélisation entre SWAN et WW3 des zones A et B pour la validation du modèle de Kuujjuarapik..... 71

Figure 35. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s) et des périodes (T_{02}) des vagues pour le site du mouillage côtier de Quaqtak entre SWAN et les enregistrements du mouillage. Le niveau d'eau par rapport au niveau marin moyen utilisé dans SWAN est aussi affiché. 73

Figure 36. Analyses statistiques de la comparaison pour le site du mouillage côtier de Quaqtak entre les résultats de modélisation avec SWAN et les enregistrements du mouillage côtier. 74

Figure 37. Roses de vagues aux points AWAC, hA et hB du secteur de Kuujjuarapik pour les résultats de SWAN 1982-2010 avec la simulation climatique AHJ. 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'emphasis 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. 76

Figure 38. Tempête caractéristique d'ouest pour le secteur de Kuujjuarapik. (haut) Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). (bas) Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points AWAC, hA et hB. 77

Figure 39. Tempête caractéristique du nord/nord-ouest pour le secteur de Kuujjuarapik. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points AWAC, hA et hB. 78

Figure 40. Roses de vagues aux points Off, Mid-4 et Coast-5 de la grille Quaqtak pour les résultats de SWAN 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100 avec la simulation climatique AHJ. 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'emphasis 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 80

Figure 41. Tempête caractéristique du nord-est pour le secteur de Quaqtak. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points Off, qAWAC, Mid-4 et Coast-5. 81

Figure 42. Tempête caractéristique du nord-ouest pour le secteur de Quaqtak. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points Off, AWAC, Mid-4 et Coast-5. 82

Figure 43. Évolution de la concentration saisonnière de glace de 1981 à 2100 dans la région de Kuujjuarapik avec la simulation climatique AHJ (Senneville, 2018).....	83
Figure 44. Évolution de la concentration saisonnière de glace de 1982 à 2099 sur la grille Dianabay (région de Quaqtq) avec la simulation climatique AHJ (données de Senneville, 2018).	84
Figure 45. Exemples de la diminution de l'englacement de 1981 à 2100 d'après le scénario climatique AHJ : couverture moyenne de glace sur la grille de Kuujjuarapik pour trois hivers consécutifs caractéristiques pour chaque période de 30 ans.....	85
Figure 46. Séries temporelles des hauteurs des vagues modélisées par SWAN pour le point d'intérêt AWAC du secteur de Kuujjuarapik pour trois années consécutives pour chaque période de 30 ans d'après le scénario climatique AHJ (voir Figure 45 pour la couverture de glace pendant les mêmes périodes).	85
Figure 47. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives des vagues pour les trois points d'intérêt AWAC, hA et hB du secteur de Kuujjuarapik.	88
Figure 48. Évolution au cours du XXI ^e siècle de plusieurs indicateurs d'événements extrêmes pour les points AWAC, hA et hB du secteur de Kuujjuarapik, à savoir les hauteurs significative (H_s) associées à la période de retour de 50 ans (calculée avec la distribution Pareto généralisée) et les probabilités de dépassement de 0,01 %, 0,1 % et 1 %.	89
Figure 49. Roses de vagues aux points AWAC et hB (Secteur de Kuujjuarapik) pour les résultats de SWAN 1982-2010 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Voir la Figure 50 pour l'explication du graphique.	90
Figure 50. Roses de vagues au point hA du secteur de Kuujjuarapik pour les résultats de SWAN 1982-2010 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. 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.	91
Figure 51. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives des vagues pour les trois points d'intérêt Off, Mid-4 et Coast-5 du secteur de Quaqtq.....	96
Figure 52. Évolution au cours du XXI ^e siècle de plusieurs indicateurs d'événements extrêmes pour les points Off, Mid-4 et Coast-5 du secteur de Quaqtq, à savoir les hauteurs significative (H_s) associées à la période de retour de 50 ans (calculée avec la distribution Pareto généralisée) et les probabilités de dépassement de 0,01 %, 0,1 % et 1 %.	97
Figure 53. Roses de vagues aux points Off et Mid-5 du secteur de Quaqtq pour les résultats de SWAN 1982-2020 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Voir la Figure 54pour l'explication du graphique.	98

Figure 54. Roses de vagues au point Coast-5 du secteur de Quaqtq pour les résultats de SWAN 1982-2020 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. 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'emphasis 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. 99

Figure 55. Relation entre le niveau d'eau et la hauteur des vagues (H_s) aux points Mid-4 et Coast-5 pour quatre tempêtes représentatives du secteur de Quaqtq. 105

Figure 56. Roses des vents au large de Kuujjuarapik (55,5°N / 78,75°) pour les périodes du 1^{er} août au 19 décembre des années 2017 à 2019 selon les sorties de ERA5. 120

Figure 57. Roses des vents au large de Quaqtq (61,5°N / 69,75°) pour les périodes du 1^{er} août au 14 décembre des années 2017 à 2020 selon les sorties de ERA5. 121

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des fichiers de données bathymétriques produits par le CIDCO. Le contenu de chaque type de fichier est indiqué dans le texte ci-dessous.....	11
Tableau 2. Position des mouillages (sites visés pour les AWACs).	17
Tableau 3. Position exacte ainsi que le début et fin de chaque déploiement aux sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide).....	17
Tableau 4. Synthèse des paramètres de programmation des profileurs de courants AWAC.	21
Tableau 5. Paramètres de programmation des marégraphes et baromètres RBR.	22
Tableau 6. Paramètres de programmation des houlographes RBR TWR-2050.	22
Tableau 7. Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants.	32
Tableau 8. Liste des 15 tempêtes les plus fortes mesurées par les AWACs à Kuujjuarapik d'août 2017 à juillet 2020 et à Quaqaq d'août 2017 à septembre 2021. La hauteur significative des vague (H_{m0}), la période moyenne des vagues (T_{02}) et la direction de provenance (Dir) sont indiquées pour l'apogée de chaque tempête. Pour Kuujjuarapik les données mesurées par le capteur de pression entre août 2017 et septembre 2018 sont présentées en grisées. Considérant un biais dans le calcul des hauteurs et périodes de ces données mesurées uniquement par le capteur de pression, celles-ci sont exclues dans un deuxième tableau.	38
Tableau 9. Liste des 18 plus fortes surcotes, des 18 plus fortes décotes et des 18 plus hauts niveaux observés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Kuujjuarapik (niveau par rapport au niveau marin moyen observé).	54
Tableau 10. Liste des 18 plus fortes surcotes, des 18 plus fortes décotes et des 18 plus hauts niveaux observés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Quaqaq (niveau par rapport au niveau marin moyen observé).	55
Tableau 11. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le mouillage de Kuujjuarapik d'août 2017 à juin 2021, 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)..	56
Tableau 12. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le mouillage de Quaqaq d'août 2017 à octobre 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)..	57
Tableau 13. Plus fortes tempêtes pour les trois périodes du passé récent et du futur de la simulation AHJ et pour les trois sites d'intérêt à Kuujjuarapik. Les couleurs signalent	

les tempêtes figurant aussi bien pour le site AWAC au large que pour les sites côtiers hA et hB.	92
Tableau 14. Hauteurs significatives des vagues en mètre pour différentes périodes de retour aux points AWAC, hB et hA à Kuujjuarapik pour les périodes 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les périodes de retour ont été calculées avec trois distributions : la distribution de Pareto généralisée (GPD) et les distributions probabilistes Gumbel et Weibull.....	93
Tableau 15. Plus fortes tempêtes pour les trois périodes du passé récent et du futur de la simulation AHJ et pour les trois sites d'intérêt à Quaqaq. Les couleurs signalent les tempêtes figurant aussi bien pour le site Off au large que pour le site intermédiaire Mid-4 et le site côtier Coast-5 près de Quaqaq.....	100
Tableau 16. Hauteurs significatives des vagues en mètre pour différentes périodes de retour aux points Off, Mid-4 et Coast-5 à Quaqaq pour les périodes 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les périodes de retour ont été calculées avec trois distributions : la distribution de Pareto généralisée (GPD) et les distributions probabilistes Gumbel et Weibull.....	101
Tableau 17. Étude de sensibilité des hauteurs significatives en fonction de la hausse du niveau marin pour différentes conditions de tempêtes au secteur de Kuujjuarapik. Les hauteurs et périodes des vagues sont indiquées à la frontière externe du domaine du modèle et au point AWAC, alors que le rapport de sensibilité dH_s / dz est indiqué pour les trois points AWAC, hB et hA.....	103
Tableau 18. Étude de sensibilité des hauteurs significatives en fonction de la hausse du niveau marin pour quatre tempêtes de la simulation AHJ 1982-2010 au secteur de Quaqaq. Les caractéristiques des vagues sont indiquées à la frontière externe de la grille Dianabay et pour le point Mid-4. Le rapport de sensibilité dH_s / dz est indiqué pour les points Mid-4 et Coast-5.....	104
Tableau 19. 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).	118
Tableau 20. Codes explicatifs du contrôle de qualité.	119

REMERCIEMENTS

Sans le savoir-faire technique et la débrouillardise du technicien Bruno Cayouette, ce projet de terrain au Nunavik n'aurait pas été possible. Il a réalisé toutes les missions de terrain, certaines seules, d'autres avec Urs Neumeier. Il a aussi préparé et entretenu les mouillages.

James Caveen, Simon Senneville et Dany Dumont ont fournis des conseils précieux et de l'assistance très utile pour le volet modélisation du projet. Simon a aussi préparé et mis à disposition les données de niveaux d'eau, de glace, de courants et de vents de son modèle hydrodynamique de la baie d'Hudson et des sous-domaines Kuujjuarapik et Quaqlaq.

Les mouillages au large ont été installés puis récupérés chaque année avec des bateaux de pêche du Nunavik, à savoir pour le travail à Kuujjuarapik le bateau *Tatsiq* avec le capitaine Charlie Kumarluk ou le capitaine Abelie Napartuk et leur équipage venu du village nordique d'Umiuq, et pour le travail à Quaqlaq le bateau l'Annisaq II avec le capitaine Charly Puttayuk ou le capitaine Stevie Page avec leur équipage. Les mouillages côtiers à Kuujjuarapik ont été installés et récupérés en 2018 avec la petite embarcation de Jobie Abraham. Maxime Saunier, un résident de Kuujjuarapik, s'est occupé de la récupération de ces mouillages côtiers.

Les responsables des Hunter Support d'Umiuq et de Quaqlaq, Alec Niviaxie et Philippe Bigonnesse, ainsi que les secrétaires-trésoriers des villages nordiques d'Umiuq et de Quaqlaq, Abelie Napartuk et Sammy Tukkiapik, ont aidé pour l'organisation des missions de terrain. À Kuujjuarapik, les responsables et les employés de la station de recherche du Centre d'Étude Nordique ont aussi aidé pour la réalisation des missions. Gaëlle Bailon-Poujol de l'administration régionale Kativik a aidé pour le démarrage du projet, et Véronique Gilbert de l'administration régionale Kativik a donné des conseils tout le long du projet.

Les levés bathymétriques et le traitement des données bathymétrique ont été effectués principalement par Julien Desrochers et Mathieu Rondeau du Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans (CIDCO).

Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030, en vertu d'un contrat de recherche entre le ministère des Transports du Québec (MTQ) et l'Université du Québec (UQAR)/Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER). Anick Guimond, Geneviève Paiement-Paradis, puis Geneviève Trudel ont assuré la coordination du projet au MTQ.

1. INTRODUCTION

Les infrastructures maritimes des villages nordiques du Nunavik servent de points d'attache pour les bateaux et petites embarcations utilisées pour les déplacements locaux, la pêche et la chasse. De plus, une partie importante du ravitaillement de ces communautés arrive par bateau. Certains de ces villages peuvent également être confrontés à des problèmes d'érosion côtière et de submersion marine.

Les connaissances scientifiques des environnements côtiers et marins du Nunavik sont limitées. Pour cette raison, le ministère des Transport du Québec (MTQ) avait mené un programme de recherche intitulé « Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et solutions d'adaptation », pour lequel des données sur les conditions météorologiques (vent, température), les niveaux d'eau (Tremblay et Lorrain, 2013) et les glaces de mer (Clerc et al., 2012) ont été acquises à différents sites au Nunavik. Aucune donnée sur les vagues n'avait toutefois été acquise à l'époque.

Les données acquises ont été utilisées pour modéliser de longues séries temporelles passées et futures (1980 à 2070) de différents paramètres, de façon à mesurer l'impact des changements climatiques sur les conditions de niveaux d'eau et de glace (Massé et Villeneuve, 2013; Savard et al., 2014; Senneville et St-Onge Drouin, 2013). Dans un second temps, le projet visait à évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes en lien avec les conditions de glace, de niveaux d'eau et de vagues, car les caractéristiques d'une infrastructure maritime sont dépendantes de la hauteur de vague attendue. En l'absence de données sur les vagues, Ropars (2014a, 2014b) a dû utiliser des données de vagues modélisées qui n'ont pu être calibrées avec des données réelles pour évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes aux vagues de tempête. Par conséquent, l'évaluation n'a pas été concluante et Ropars (2014b) recommandait de mettre en place un réseau d'instruments de mesure directionnelle des vagues opérant à longueur d'année pour valider les modélisations de vagues et permettre de mieux évaluer l'influence des glaces sur la propagation des vagues.

En effet, la présence de glace de mer influence fortement la génération et la propagation des vagues. D'une part, la glace de mer bloque le transfert d'énergie du vent aux vagues (Squire, 2007). D'autre part, les vagues sont progressivement atténuées lorsqu'elles se propagent dans la glace de mer (Dumont et al., 2011; Ruest et al., 2016). Par contre, les vagues de tempêtes sont capables de fragmenter la glace de mer, érodant progressivement la marge de la banquise (Dumont, 2022). Ces processus sont dominants au début et à la fin de la période d'englacement, quand des zones marginales de banquise côtoient l'eau ouverte. Il est donc essentiel d'avoir des enregistrements à longueur d'année, et pas seulement pendant la période libre de glace en été. Toutefois, des houlographes capables de mesurer les vagues toute l'année, incluant la période d'octobre à janvier, durant laquelle se produisent les plus fortes tempêtes mais également la période où la glace de mer commence à se former, doivent être placés assez profondément pour ne pas être endommagés par la glace de mer, voire par les icebergs qui peuvent transiter par le détroit d'Hudson. Cela nécessite des équipements et des moyens logistiques relativement importants qui ont finalement pu être réalisés avec le présent projet de recherche.

Les changements climatiques futures pourraient modifier significativement le climat de vagues des zones arctiques et subarctiques, c'est-à-dire la distribution des hauteurs, périodes et directions des vagues. Des études dans le golfe du Saint-Laurent ont montré que dans des eaux saisonnièrement englacées, l'effet principal est dû au réchauffement climatique, qui réduira le couvert de glace de mer et allongera la période d'eau libre pendant laquelle les vagues peuvent se former et se propager jusqu'à la côte, alors qu'un possible changement du climat de vent aura généralement un effet moins important (Ruest et al, 2016, Wang et al., 2018).

Les objectifs du présent projet de recherche intitulé « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques », sont :

- (1) de mesurer les vagues, les courants et les glaces au large de Kuujjuarapik et de Quaqtaq pour une durée de trois ans soit de 2017 à 2020;
- (2) d'acquérir des données bathymétriques près des infrastructures maritimes à Quaqtaq et à Kuujjuarapik et dans les secteurs environnants où les vagues interagissent avec le fond marin;
- (3) d'évaluer par modélisation l'impact des changements climatiques (CC) sur le climat de vagues à Kuujjuarapik et à Quaqtaq jusqu'à la période 2071-2100.

L'analyse des données permettra d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le régime des vagues à proximité des infrastructures maritimes.

Le site de Quaqtaq, sur le détroit d'Hudson, a été choisi car l'infrastructure maritime est exposée aux vagues et le site a déjà été étudié dans le cadre de l'initiative de recherche réalisée dans le cadre PACC 2006-2012 (voir ci-dessus). À Kuujjuarapik, au sud de la baie d'Hudson, il y a deux infrastructures maritimes et la piste d'atterrissage de l'aéroport située à proximité de la côte est exposée aux vagues et pourrait potentiellement être vulnérable à l'érosion littorale et aux risques de submersion. Par conséquent, l'intérêt pour ce site est multiple.

L'acquisition de nouvelles données bathymétriques a été effectuée par le Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans (CIDCO) dans le cadre d'un sous-contrat du présent projet de recherche.

La modélisation des vagues a été effectuée principalement par Sophie Collin dans le cadre de son projet de maîtrise en océanographie sous la direction d'Urs Neumeier et la codirection de Dany Dumont. Toutefois, elle a terminé la modélisation seulement pour le secteur de Kuujjuarapik. Pour le secteur de Quaqtaq, différents intrants pour SWAN ont été préparés par Sophie Collin, mais la modélisation proprement dite a été effectuée par Urs Neumeier après son départ. En effet, après avoir travaillé durant deux ans sur le projet, Sophie Collin est retournée voir sa famille en Nouvelle-Calédonie en janvier 2020. Il était prévu qu'elle termine sa maîtrise et la partie modélisation du projet principalement à distance avec des visites à Rimouski. Toutefois, la pandémie de Covid-19 a bloqué tout voyage international pour de nombreux mois et a aussi compliqué toutes les activités d'enseignement, de recherche et de la vie courante. Suite à une combinaison de facteurs défavorables, Sophie Collin a finalement abandonné sa maîtrise et le volet de modélisation

du projet. Elle n'est malheureusement pas la seule étudiante qui a eu des difficultés dans son parcours et qui a arrêté ses études.

Certains résultats du projet ont déjà été présentés lors de conférences scientifiques. Les mesures des vagues de la première année de déploiement ont été présentées lors de la réunion scientifique annuelle 2018 d'ArcticNet (Neumeier et al., 2018). Les résultats intermédiaires de la modélisation ont été présentés à la réunion scientifique annuelle 2018 de Québec-Océan (Collin et al., 2018) et au congrès scientifique 2019 de la Société canadienne de météorologie et d'océanographie (SCMO) (Collin et al., 2019).

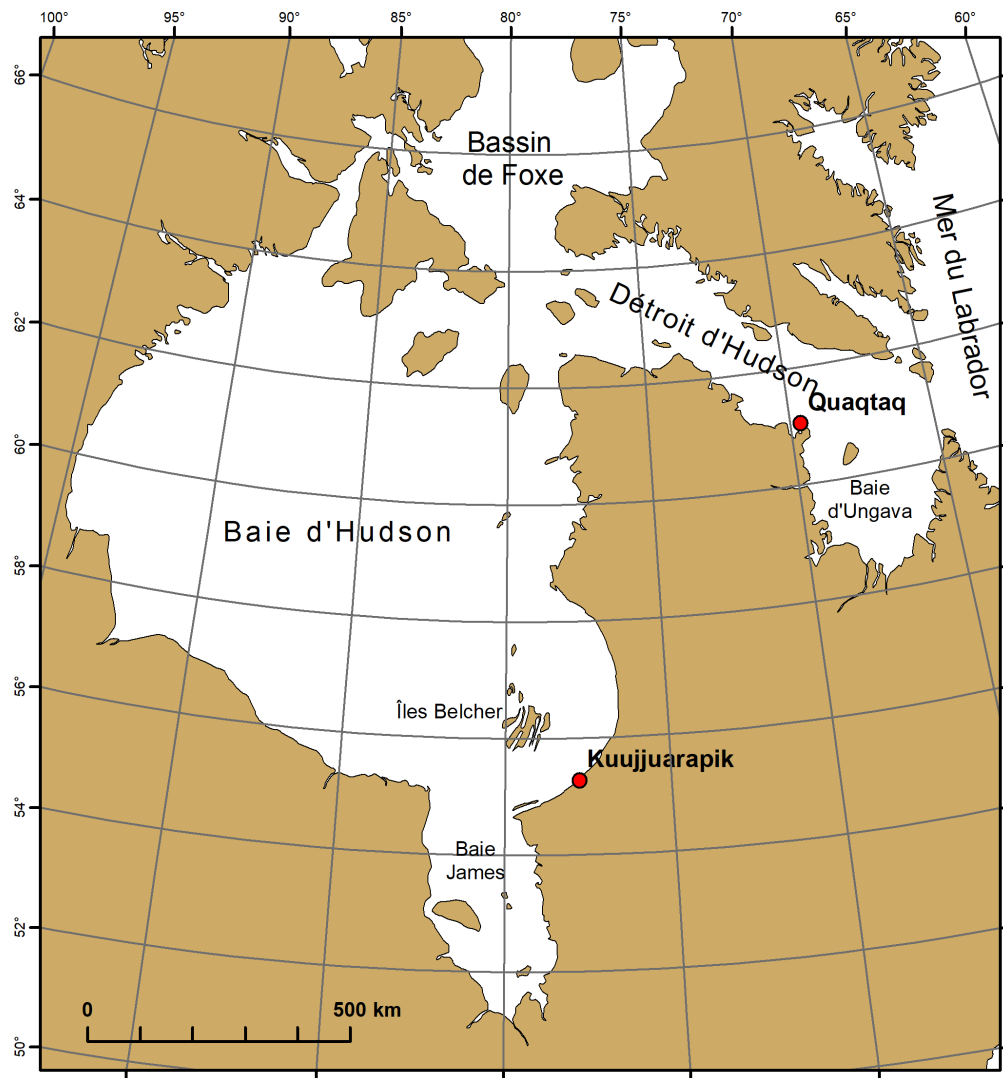


Figure 1. Position de Kuujjuarapik dans la baie d'Hudson et de Quaqtaq dans le détroit d'Hudson.

2. DONNÉES DE BATHYMÉTRIE

Comme prévu dans le devis du projet, des nouvelles données bathymétriques ont été acquises à proximité de Kuujjuarapik et de Quaqaq. L'objectif est d'augmenter les connaissances dans ces deux secteurs nordiques, où les données bathymétriques étaient assez lacunaires par endroit, et d'améliorer les grilles bathymétriques utilisées pour la modélisation numérique. Le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) s'est occupé de l'acquisition et le traitement des données dans le cadre d'un sous-contrat.

Ce chapitre 2 présente sommairement l'acquisition et le traitement des données bathymétriques. Plus de détails sont indiqués dans les deux rapports du CIDCO sur l'acquisition et le traitement des données, qui figurent aux annexes 6 et 7.

Les Figures 2 et 3 présentent les différents secteurs qui étaient prévus de cartographier avec l'espacement des lignes du levé pour chacun des secteurs.

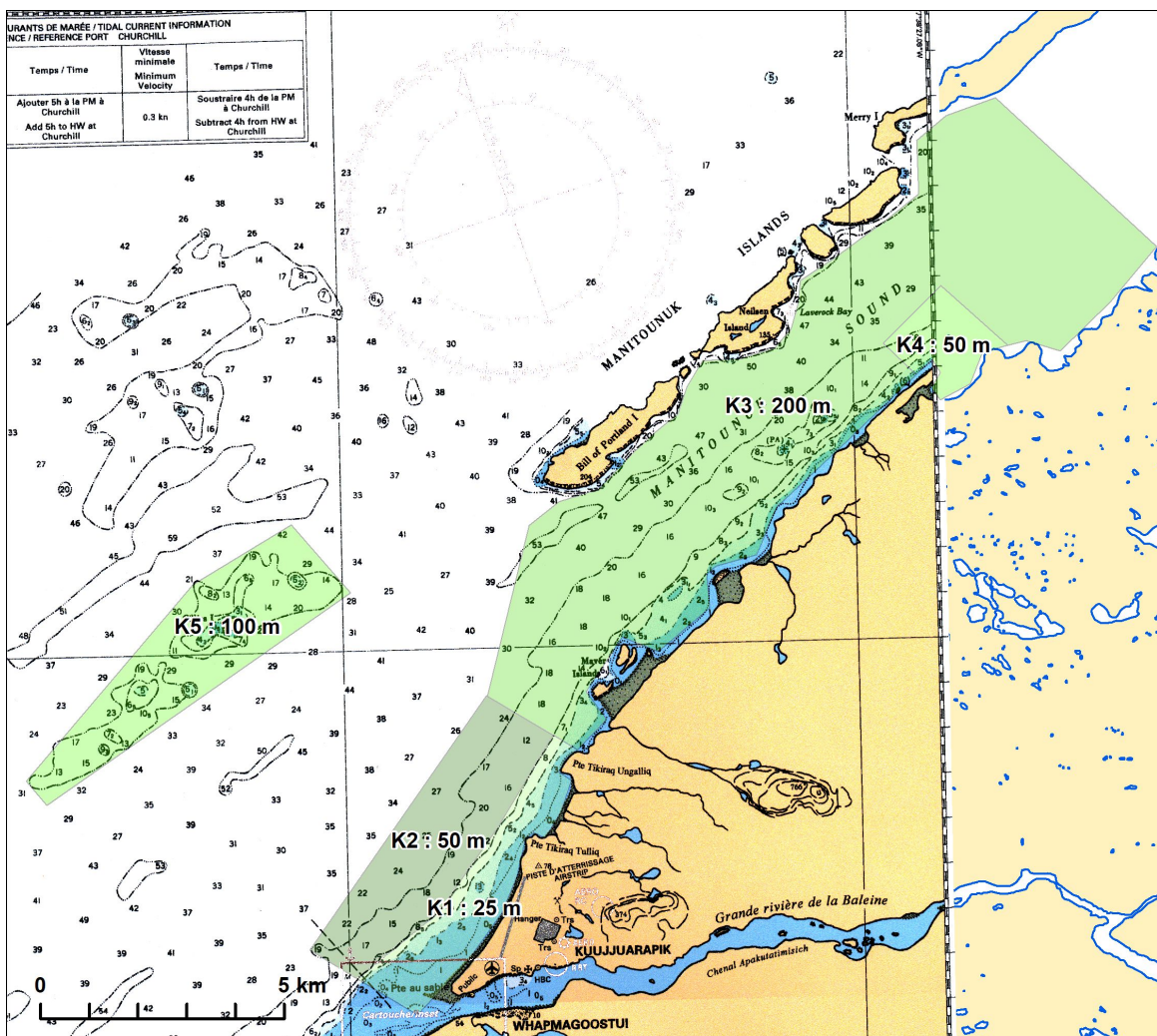


Figure 2. Carte des différents secteurs prévus pour le levé bathymétrique près de Kuujjuarapik. L'espacement prévu entre les lignes du levé est indiqué pour chaque secteur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.

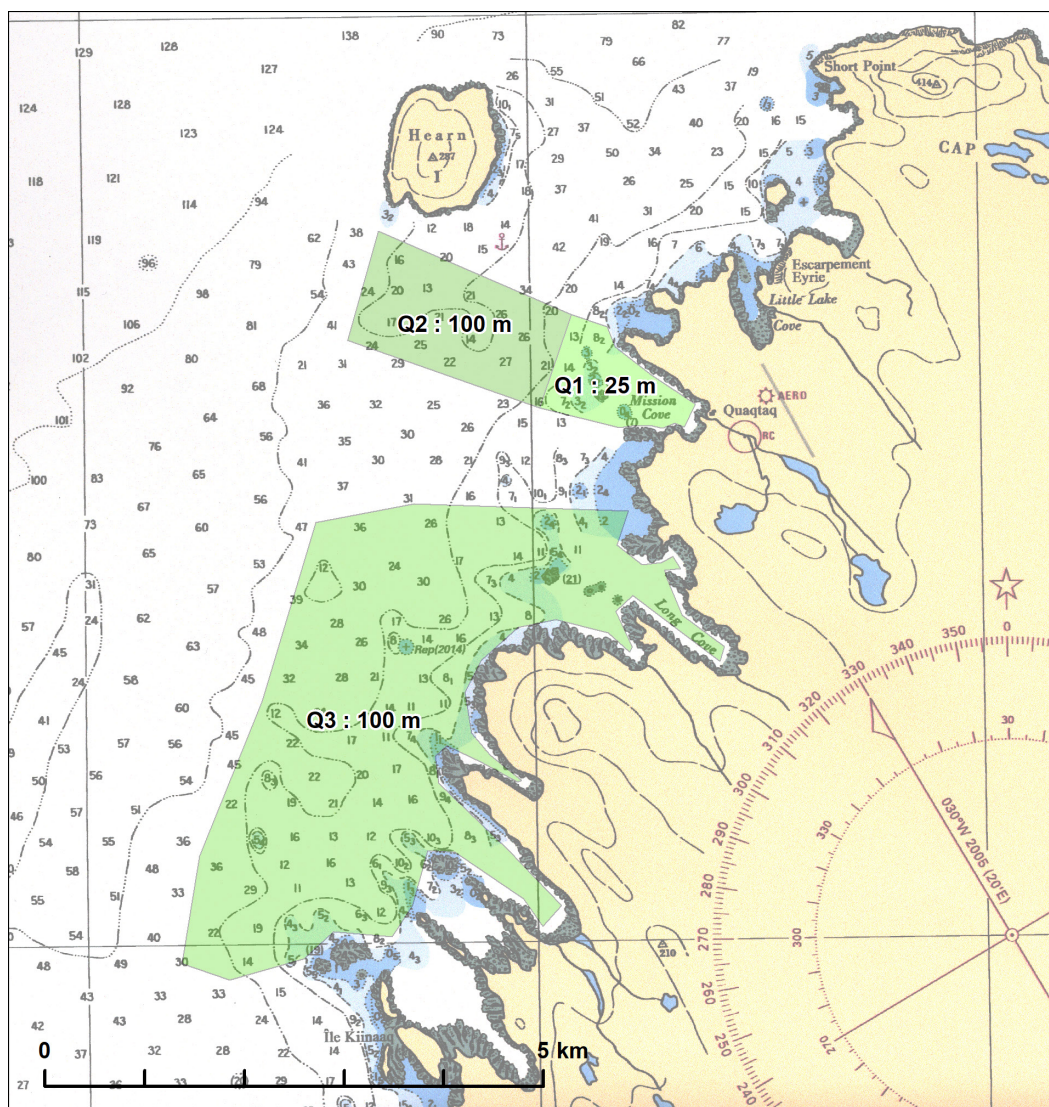


Figure 3. Carte des différents secteurs prévus pour le levé bathymétrique près de Quaqtaq. L'espacement prévu entre les lignes du levé est indiqué pour chaque secteur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.

2.1. Acquisition des données de bathymétrie

Les relevés bathymétriques ont été réalisés par le CIDCO avec des bouées HydroBall, comme prévu au devis de recherche. Le chargé du projet chez le CIDCO était Mathieu Rondeau, mais c'est Julien Desrochers qui s'est principalement occupé de l'acquisition des données hydrographiques sur le terrain.

Deux versions de bouée HydroBall ont été utilisées pour le projet :

- La bouée HydroBall classique est une bouée sphérique contenant un échosondeur, un GPS, de l'électronique et des batteries. D'habitude elle est remorquée derrière une petite embarcation. Elle a déjà été très bien testée, et est complètement autonome, mais elle perd de manière intermittente le signal GPS lorsque les vagues sont trop grandes.

- L'HydroBall éclaté (aussi nommé Hydrobox) consiste en une barre verticale installée sur le côté du bateau. L'échosondeur se trouve à la base de la barre. Au sommet de la barre sont montés le GPS et l'électronique. Cette version est alimentée avec une batterie placée dans le bateau. Cette configuration a l'avantage de pouvoir opérer dans des vagues plus grandes que l'HydroBall classique. Toutefois, c'était un développement récent du CIDCO, qui avait été testé moins intensivement avant la mission, et qui a posé des problèmes techniques lors de la première mission de terrain à Kuujjuarapik.

À Kuujjuarapik, deux missions de terrain ont été nécessaires. Julien Desrochers a fait une première mission du 17 juillet au 21 août 2017 (Kuujjuarapik 1) avec l'aide d'assistants locaux. Les conditions météorologiques défavorables et divers problèmes techniques (cf. section 3.3 ci-dessous) ont significativement retardé les travaux, si bien que la mission a été interrompue après 36 jours. Julie Desrochers a fait une seconde mission du 26 octobre au 2 novembre 2017 (Kuujjuarapik 2) avec l'aide de Jean-Rémy Marchand (stagiaire au CIDCO) et d'assistants locaux. Au total, 44 jours de travaux de terrain ont été réalisés, dont 15 jours productifs avec levé en mer, sans compter les voyages aller et retour qui duraient 1½ à 2 jours pour chaque trajet.

À Quaqtq, Julien Desrochers et Mathieu Rondeau ont fait une mission de terrain qui s'est déroulée du 21 septembre au 1^{er} octobre 2017 avec l'aide d'assistants locaux. Au total, 11 jours de travaux terrain ont été réalisés, dont 4 jours productifs avec levés en mer, sans compter les voyages aller et retour qui duraient 1½ à 2 jours pour chaque trajet.

Pour les trois missions de terrain, les levés bathymétriques ont été faits avec deux canots freighters en parallèle. Lors de la mission Kuujjuarapik 1, l'acquisition dans le deuxième canot était réalisée par un assistant local (cri, inuit ou une personne de la station de recherche du Centre d'Étude Nordique). Pour les missions Quaqtq et Kuujjuarapik 2, le CIDCO a envoyé deux personnes, ce qui n'était pas prévu au contrat, mais a permis d'accélérer les levés lors des journées avec des conditions météorologiques favorables.

Différents problèmes ont été rencontrés lors des missions de terrain, en particulier pour le travail en mer, à cause des conditions météorologiques défavorables et du caractère expérimental du projet de réaliser des relevés bathymétriques précis en milieu arctique. C'est pourquoi de nombreuses journées ont été non-productives, ou partiellement productive (levé avec un seul bateau au lieu de deux ou durant seulement une demi-journée).

Le plus important problème était les vents et les vagues trop forts, qui empêchaient le travail sécuritaire avec les canots freighters, qui sont les petites embarcations disponibles localement. Les canots freighters pouvaient naviguer sur les lignes prévues pour les relevés bathymétriques seulement jusqu'à des vagues d'environ 1 m. De plus, la bouée HydroBall classique pouvait perdre par intermittence le signal GPS à partir de vagues d'environ 0.5 m. Pour éviter cette contrainte, une nouvelle version, l'HydroBall éclaté a été utilisée.

À Kuujjuarapik, les capitaines de bateau et les assistants locaux ne se sont pas présentés au travail certains jours, ou alors il n'était pas possible de trouver des personnes disponibles. De manière générale, beaucoup d'énergie a dû être consacré pour trouver tous les jours des capitaines et des assistants à Kuujjuarapik. Ce problème ne s'est pas posé à Quaqtq.

Enfin, différents problèmes techniques sont survenus lors de la mission Kuujjuarapik 1, notamment une bouée HydroBall dont l'électronique a été endommagée par quelques gouttes d'eau de mer ayant pénétré dans la bouée, des fils électriques endommagés dans les bouées HydroBall par l'utilisation prolongée avec des vagues importantes, des cartes mémoires corrompues lorsque l'alimentation des HydroBall éclatés était déconnectée par mégarde, et des pertes du signal GPS par les bouées HydroBall classiques lorsque les vagues étaient trop grandes.

Les zones plus profondes que 50 m n'ont pas été levées, car des échosondeurs de haute précision dédiés aux levés côtiers ont été utilisés. Ces derniers ne mesurent pas plus profond que 50 m. Cette absence de données bathymétriques détaillées pour ces zones profondes n'est pas un problème pour le projet de recherche, car les vagues n'interagissent pas avec le fond à ces profondeurs.

La bathymétrie de la majeure partie des secteurs prévus au devis a été levée. Les Figures 4 et 5 présentent en détail la couverture réalisée par rapport aux secteurs prévus au devis. Certaines parties n'ont pas été levées à cause des conditions météorologiques défavorables à la fin des missions. Ces parties avaient préalablement été identifiées comme non-prioritaires lors des échanges réguliers qui ont eu lieu durant les missions de terrain entre Julien Desrochers et Urs Neumeier. L'absence de données pour ces parties non levées ne pose pas de problème pour la suite du projet de recherche. Il s'agit des zones suivantes :

- L'extrémité nord-est du secteur K3 à Kuujjuarapik (Figure 4) un peu au nord-est de l'infrastructure maritime (les derniers 2.7 km du secteur dans le détroit de Manitounouk, soit environ 25% du secteur K3). Toutefois, cette partie interne du détroit de Manitounouk non levée n'influence pas les vagues de tempêtes pouvant atteindre l'infrastructure maritime, et encore moins la côte près du village. Cette zone avait été incluse dans le secteur K3 pour augmenter nos connaissances bathymétriques de manière générale.
- L'extrémité sud-est du secteur K5 à Kuujjuarapik (Figure 4) au sud-est de l'île Gillies (environ 25% du secteur K5). Toutefois, la majeure partie des hauts-fonds entourant l'île Gillies ont été levés, notamment dans la zone nord-est où a été installé le mouillage. Pour la partie non-levée du secteur K5 il existe des données du SHC aux 250 m. Bien qu'elles soient anciennes, ces données seront suffisantes pour la modélisation numérique dans cette zone constituée de roches dures.
- L'extrémité sud du secteur Q3 à Quaqtq (Figure 5) couvrant la région côtière au sud du village (environ 11 % du secteur Q3). Cette zone non levée n'influence pas les vagues atteignant l'infrastructure maritime à cause de hauts-fonds un peu plus au nord; cette zone devait simplement augmenter nos connaissances bathymétriques.

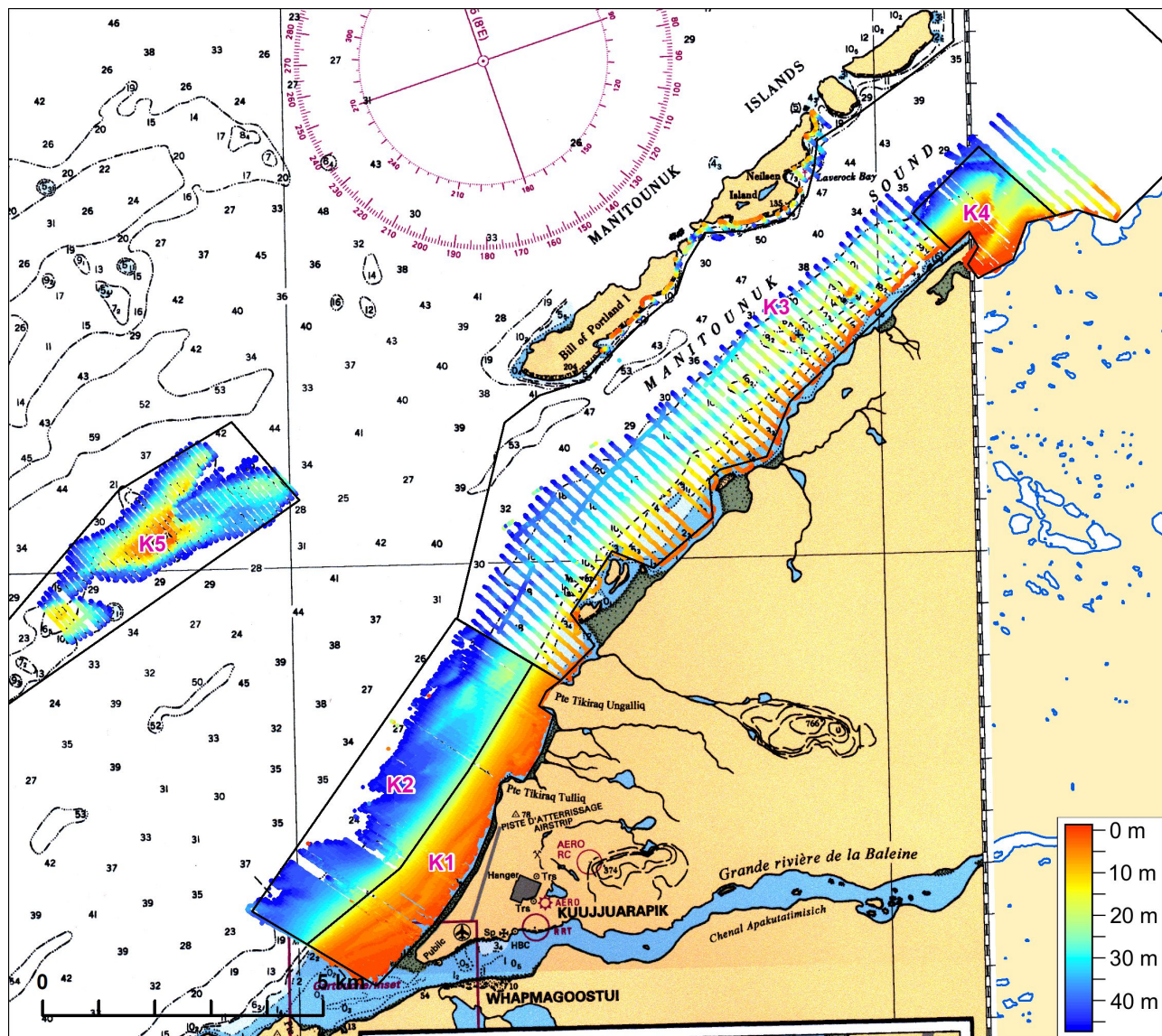


Figure 4. Résultats des relevés bathymétriques effectués par le CIDCO à Kuujjuarapik en 2017. Les zones de plus de 50m de profondeur ne sont pas couvertes car hors de portée du sondeur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.

2.2. Traitement des données de bathymétrie

Le traitement des données bathymétriques est décrit en détail dans les deux rapports du CIDCO qui sont reproduits à l'Annexe 6 et à l'Annexe 7. Les principales étapes étaient les suivantes.

- 1) Correction pour la vitesse du son dans l'eau, qui était déterminée avec des profils de célérité qui étaient effectués aux 3-4 heures.

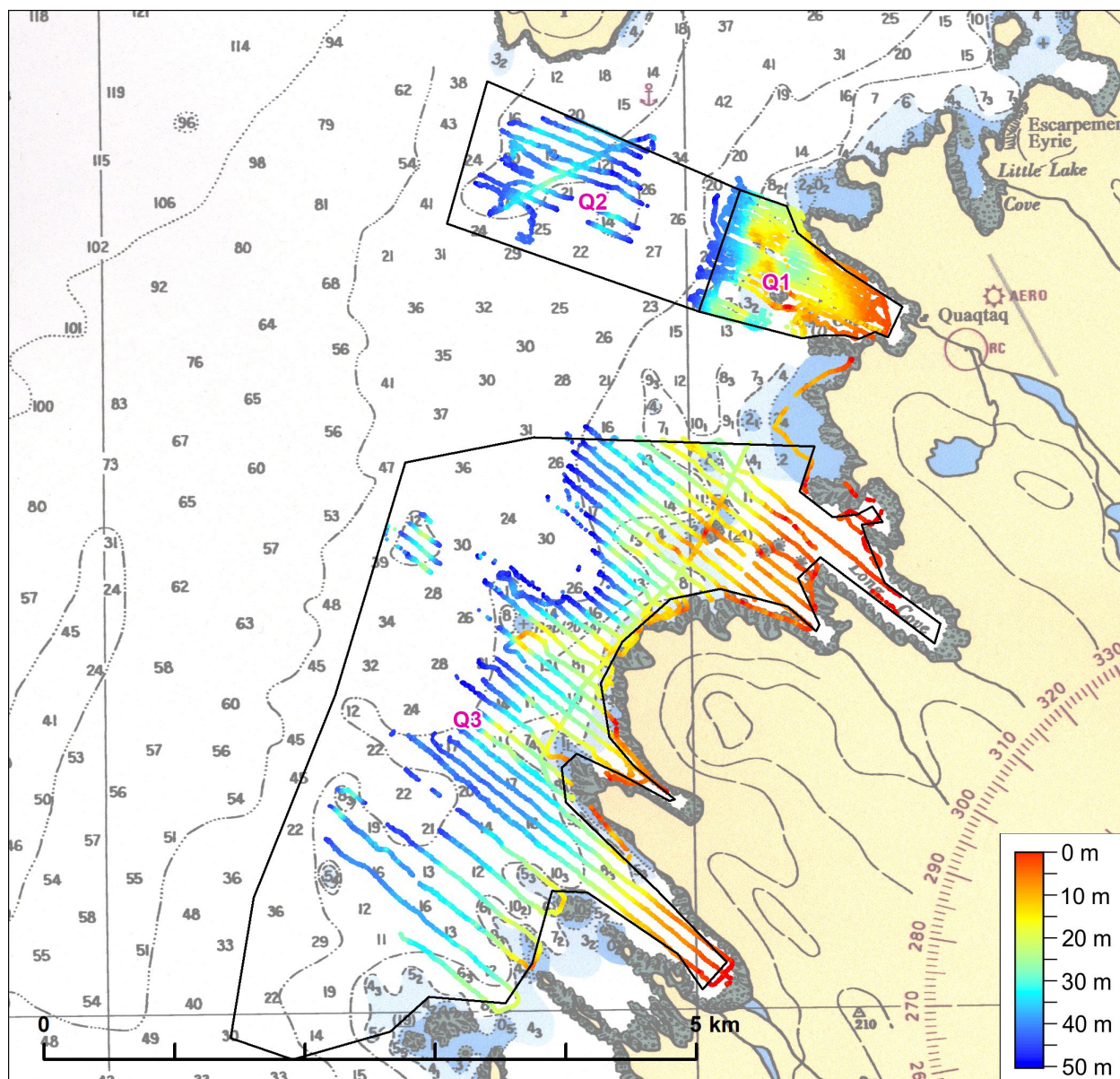


Figure 5. Résultats des relevés bathymétriques effectués par le CIDCO à Quaqtak en 2017. Les zones de plus de 50m de profondeur ne sont pas couvertes car hors de portée du sondeur. La bathymétrie de la carte marine est en brasses.

- 2) Correction pour le niveau d'eau (c'est-à-dire l'altitude de l'échosondeur fixé sur le bateau). Comme la qualité des données GPS (GNSS) enregistrées par l'HydroBall était parfois mauvaise à cause des vagues et des embruns, deux méthodes ont été appliquées.
 - Méthode ERS en utilisant les données GPS (GNSS) pour avoir l'altitude du sondeur par rapport à l'ellipsoïde NAD83 (SCRS) époque 1997, altitude qui est ensuite convertie en altitude par rapport au géoïde CGVD2013.
 - Méthode WLRs (lorsque les données GPS (GNSS) n'étaient pas utilisables) en utilisant les prédictions de marée du Service hydrographique du Canada (SHC) pour connaître l'altitude du bateau et ainsi l'altitude du sondeur, altitude qui est ensuite

convertie du référentiel *zéro des cartes marines* à l'altitude par rapport au géoïde CGVD2013. Cette méthode est moins précise, car elle ne tient pas compte des surcotes et des vagues. Les surcotes et décotes sont 80% du temps inférieures de 0,25 m à Kuujjuarapik et de 0,15 m à Quaqtaq. Les relevés bathymétriques étaient généralement interrompus lorsque les vagues dépassaient 0,5 m, c'est-à-dire avait une amplitude de plus de 0,25 m. L'erreur maximale ajoutée par l'utilisation de la méthode WLRS peut donc être estimée à 0,5 m à Kuujjuarapik et 0,4 m à Quaqtaq.

- 3) Nettoyage manuel pour suppression des points de sonde aberrants.
- 4) Qualification des données acquises en analysant l'écart des profondeurs mesurées aux points d'intersection des lignes de sondages.
- 5) Moyennage des points de sonde : les données ont ensuite été moyennées sur deux grilles matricielles à 5×5 m et 25×25 m de résolution.

Les Figures 4 et 5 illustrent les données obtenues respectivement à Kuujjuarapik et à Quaqtaq.

2.3. Description des fichiers de données de bathymétrie

Les profondeurs sont exprimées par rapport au niveau marin moyen CGVD2013 (plus exactement par rapport au géoïde CGG2013), avec des valeurs négatives pour les profondeurs sous CGVD2013. Les coordonnées longitudes et latitudes sont dans le datum horizontal NAD83(SCRS) époque 1997 (le datum normalement utilisé au Québec).

Il y a deux types de résultats bathymétriques :

- 1) Les profondeurs mesurées moyennées sur des grilles de 5×5 m et de 25×25 m. Ces grilles ont été définies dans la projection UTM 18N (pour Kuujjuarapik) et la projection UTM 19V (pour Quaqtaq), mais les coordonnées des résultats sont en longitude/latitude. Ces données sont fournies sous plusieurs formats, à savoir des fichiers textes, des images geotiff et des fichiers .csar pouvant être visualisés avec le logiciel *Caris Easy View*.
- 2) Tous les points de sondes individuels, avec deux versions différentes du traitement pour les profondeurs. Normalement la position verticale de la bouée HydroBall est mesurée précisément par GPS (GNSS). Les résultats avec ce traitement contiennent "ERS" dans le nom du fichier. Toutefois, certains jours la bouée perdait parfois le signal GNSS à cause des trop grandes vagues, aussi le CIDCO a fait un traitement alternatif avec la position verticale de la bouée estimée par les prédictions de marées. La précision des profondeurs est moindre car les surcotes (potentielle erreur jusqu'à ± 0.3 m) et les vagues sont ignorées (erreur jusqu'à ± 0.5 m). Les résultats avec ce traitement contiennent "WLRS" dans le nom du fichier.

Le Tableau 1 énumère tous les fichiers de données et décrit leur contenu.

Tableau 1. Liste des fichiers de données bathymétriques produits par le CIDCO. Le contenu de chaque type de fichier est indiqué dans le texte ci-dessous.

Répertoire	Nom fichier	Type	Secteurs
Surfaces_combinees	Kuujj_K12345_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	Kuujjuarapik tous les secteurs
	Kuujj_K12345_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
	Quaq_Q123_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	Quaqtaq tous les secteurs
	Quaq_Q123_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
Kuuj\Data	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_filtered_id.txt	ers	Kuujjuarapik K1-K4
	Kuujj_K1234_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt	wlrs	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_filtered_id.txt	ers	Kuujjuarapik K5
	Kuujj_K5_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt	wlrs	
Kuuj\Surfaces	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_25m.csar	c25	Kuujjuarapik K1-K4
	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_25m.tiff	i25	
	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	
	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_5m.csar	c5	
	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_5m.tiff	i5	
	Kuujj_K1234_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.csar	c25	Kuujjuarapik K5
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.tiff	i25	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.csar	c5	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.tiff	i5	
	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
Quaq\Data	Quaq_Q1_ERS-CGG2013_filtered_id.txt	ers	Quaqtaq Q1
	Quaq_Q1_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt	wlrs	
	Quaq_Q2_ERS-CGG2013_filtered_id.txt	ers	Quaqtaq Q2
	Quaq_Q2_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt	wlrs	
	Quaq_Q3_ERS-CGG2013_filtered_id.txt	ers	Quaqtaq Q3
	Quaq_Q3_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt	wlrs	
Quaq\Surfaces	Quaq_Q1_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	Quaqtaq Q1
	Quaq_Q1_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
	Quaq_Q1_ERS_CGG2013_25m.csar	c25	
	Quaq_Q1_ERS_CGG2013_25m.tiff	i25	
	Quaq_Q1_ERS_CGG2013_5m.csar	c5	
	Quaq_Q1_ERS_CGG2013_5m.tiff	i5	
	Quaq_Q2_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	Quaqtaq Q2
	Quaq_Q2_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
	Quaq_Q2_ERS_CGG2013_25m.csar	c25	
	Quaq_Q2_ERS_CGG2013_25m.tiff	i25	
	Quaq_Q2_ERS_CGG2013_5m.csar	c5	
	Quaq_Q2_ERS_CGG2013_5m.tiff	i5	
	Quaq_Q3_ERS-CGG2013_25m.txt	t25	Quaqtaq Q3
	Quaq_Q3_ERS-CGG2013_5m.txt	t5	
	Quaq_Q3_ERS_CGG2013_25m.csar	c25	
	Quaq_Q3_ERS_CGG2013_25m.tiff	i25	
	Quaq_Q3_ERS_CGG2013_5m.csar	c5	
	Quaq_Q3_ERS_CGG2013_5m.tiff	i5	

Type des fichiers

- t5* fichier texte (*.txt) avec données moyennées sur grille 5×5 m
- t25* fichier texte (*.txt) avec données moyennées sur grille 25×25 m
- i5* image geotiff (*.tiff) avec données moyennées sur grille 5×5 m
- i25* image geotiff (*.tiff) avec données moyennées sur grille 25×25 m
- c5* fichier Caris (*.csar et *.csar0) avec données moyennées sur grille 5×5 m
- c25* fichier Caris (*.csar et *.csar0) avec données moyennées sur grille 25×25 m
- ers* tous les points de sonde, positionnement vertical par GPS (GNSS)
- wlrs* tous les points de sonde, positionnement vertical selon prédictions de marée

Les fichiers *t5* et *t25* sont des fichiers textes avec une ligne d'entête et trois colonnes (latitude, longitude, profondeur).

Les fichiers *c5* et *c25* sont des fichiers Caris. Chaque fichier *.csar est accompagné d'un fichier *.csar0. Ils peuvent être visualisés avec le logiciel gratuit *Caris Easy View* (<http://www.caris.com/products/easy-view/>).

Les fichiers *ers* et *wlrs* sont des fichiers textes sans entête et avec 7 colonnes (1 : heure GPS, 2 : année, 3 : jour julien, 4 : latitude, 5 : longitude, 6 : profondeur, 7 : 1 = position GNSS valide, 0 = position GNSS incertaine). Les profondeurs des fichiers *ers* sont seulement fiables si la position GNSS est valide (colonne 7 = 1).

3. ACQUISITIONS DES DONNÉES DES MOUILLAGES

3.1. Positions des instruments et périodes d'enregistrement

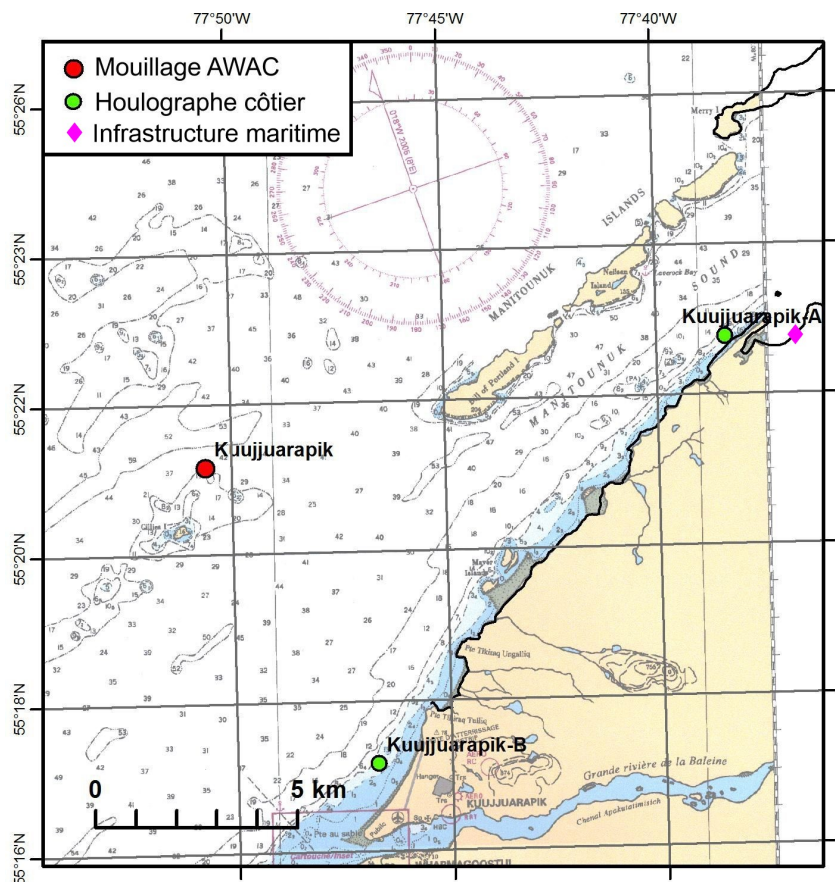
Ce projet a mesuré les conditions océanographiques au large de Kuujjuarapik et de Quaqaq à l'aide de profileurs de courant de type AWAC de la firme Nortek, de marégraphes et de houlographes côtiers de la firme RBR. Chacun des deux mouillages principaux, constitué d'un profileur de courants et d'un marégraphe monté en parallèle, a été installé en août 2017 à Kuujjuarapik et à Quaqaq, puis remplacé aux étés 2018 et 2019 pour une récupération finale en 2021 (au lieu de 2020 comme prévu initialement, à cause de la pandémie Covid-19). Les marégraphes mesurent à haute fréquence le niveau d'eau. Les houlographes côtiers utilisés pour la mesure non-directionnelle des vagues et des marées ont été installés de manière ponctuelle à la fin de l'été 2018 pour une courte durée de quelques semaines.

3.1.1. Positions des mouillages de Kuujjuarapik

À Kuujjuarapik, le mouillage principal avec AWAC a été installé à 7 km de la côte et à 1,5 km au nord-nord-est de l'île Gillies, sur le flanc nord-ouest du haut-fond qui s'étend au nord-est de l'île Gillies (Figure 6). Cette position a été choisie afin de mesurer les vagues venant du large avant qu'elles soient influencées par les hauts-fonds qui entourent l'île Gillies. La position exacte a été sélectionnée dans une zone à la morphologie sous-marine douce, après un relevé de sonar à balayage latéral effectué le 9 août 2017, pendant laquelle la bathymétrie était aussi régulièrement notée.

Les sites A et B pour les houlographes côtiers à Kuujjuarapik ont été sélectionnés pour mesurer respectivement les vagues dans le détroit de Manitounuk à proximité de l'infrastructure maritime et les vagues atteignant la côte devant l'aéroport (Figure 6).

Figure 6. Positions des mouillages installés à Kuujjuarapik. Les profondeurs de la carte sont en brasses.



3.1.2. Positions des mouillages de Quaqtq

À Quaqtq, le mouillage principal avec AWAC a été installé à 2,2 km de la côte et à 800 m au sud de l'île Hearn, sur la pente ouest des hauts-fonds situé au sud de l'île (Figure 7). Cette position a été choisie afin de mesurer les vagues venant du nord-ouest, c'est-à-dire de l'extrémité nord-ouest du détroit d'Hudson, et les vagues venant de l'ouest et du sud-ouest, c'est-à-dire du fond de la baie de Diana. Ce sont ces vagues qui peuvent atteindre les infrastructures maritimes de Quaqtq. Les vagues venant du nord-est à est, c'est-à-dire de la partie est du détroit d'Hudson, auront été influencées par l'île Hearn et par le cap Hopes Advance (situé au nord de Quaqtq) avant d'atteindre le site du mouillage, mais ces vagues n'atteindront non plus pas les infrastructures maritimes de Quaqtq. La position exacte a été sélectionnée en se basant sur les données bathymétriques disponible (du Service hydrographique du Canada et de l'Ocean Mapping Group d'ArcticNet) ainsi que d'un relevé de sonar balayage latéral effectué le 12 août 2017 pour vérifier la morphologie sous-marine et l'absence de sillon creusé par les icebergs.

Le houlographe côtier de Quaqtq a été placé dans l'anse de la Mission (*Mission Cove*) à 80 m devant l'infrastructure maritime principale de Quaqtq à une altitude d'environ 2 m au-dessus du zéro des cartes marines (Figure 8). Cette position dans la zone intertidale, émergée aux marées de vive-eau, a été choisi à cause de l'amplitude importante des marées à Quaqtq (jusqu'à 9 m) et des limitations de profondeurs des houlographes RBR TWR-2050 pour avoir des excellentes données (de préférence 5 m, maximum 10 m).

Figure 7. Position des mouillages installés à Quaqtuaq. Les profondeurs de la carte sont en brasses

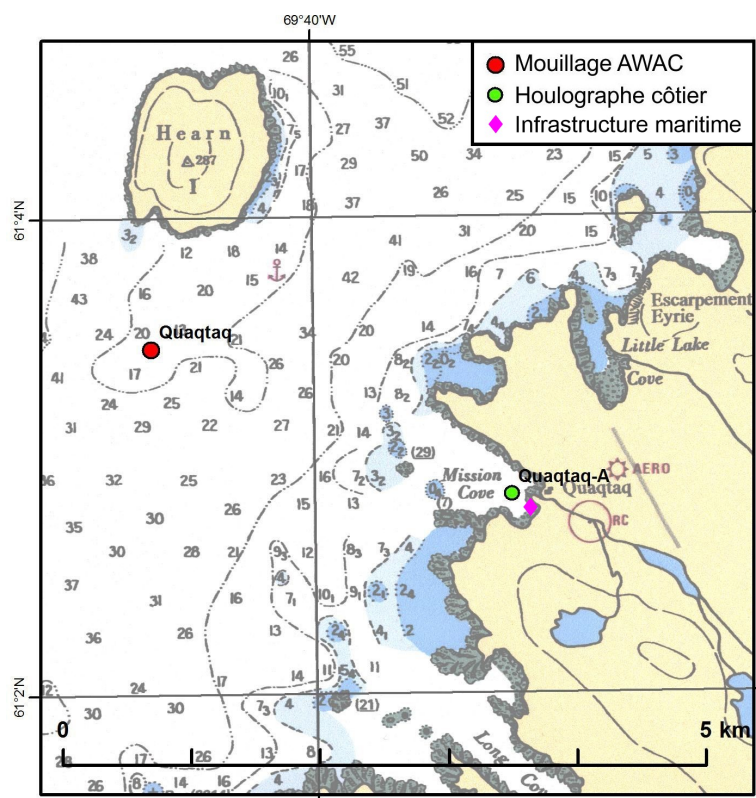




Figure 8. Mouillage côtier devant l'infrastructure maritime de Quaqtq. (Haut) Photo prise lors de l'installation. (Bas) Position sur photographie satellite.

Les positions prévues des mouillages sont présentées dans le Tableau 2 et dans les Figures 1, 6 et 7. Les périodes de fonctionnement de chaque mouillage et la position exacte de chaque déploiement de mouillage sont indiquées dans le Tableau 3. À Kuujjuarapik, la distance entre les positions réelles et la position visée pour les mouillages avec AWAC était entre 14 m et 47 m. À Quaqtac, cette distance était entre 5 m et 28 m.

Tableau 2. Position des mouillages (sites visés pour les AWACs).

	Latitude / Longitude	MTM X / Y (fuseau)	Prof. #
Kuujjuarapik AWAC	55° 21.150' N / 77° 50.620' W	219580 / 6136681(9)	31 m
Kuujjuarapik houlographe A	55° 22.771' N / 77° 38.382' W	232565 / 6139458 (9)	5 m
Kuujjuarapik houlographe B	55° 17.179' N / 77° 46.717' W	223570 / 6129237 (9)	5 m
Quaqtac AWAC	61° 03.450' N / 69° 41.400' W	348543 / 6771494 (7)	35 m
Quaqtac houlographe A	61° 02.833' N / 69° 38.304' W	351344 / 6770384 (7)	-2 m

Profondeur sous le zéro des cartes marines.

Tableau 3. Position exacte ainsi que le début et fin de chaque déploiement aux sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide)

Période	Fichier	Début (UTC)	Fin (UTC)	Latitude	Longitude	Prof. m #
Kuujjuarapik AWAC						
2017	KUJ17	2017-08-10 17:09	2018-09-09 16:09	55° 21,157' N	77° 50,616' W	31
2018	KUJ18	2018-09-10 23:09	2019-09-04 14:09	55° 21,165' N	77° 50,618' W	30
2019	KUJ19	2019-09-04 18:09	2020-07-07 20:09	55° 21,170' N	77° 50,647' W	31
Kuujjuarapik marégraphe						
2017	Kuuj_mar17	2017-08-10 17:00	2018-09-09 16:20	55° 21,157' N	77° 50,616' W	31
2018	Kuuj_mar18	2018-09-10 22:10	2019-09-04 14:20	55° 21,165' N	77° 50,618' W	30
2019	Kuuj_mar19	2019-09-04 17:40	2021-06-23 19:30	55° 21,170' N	77° 50,647' W	31
Kuujjuarapik houlographe						
2018	Kuuj_rbrA18w	2018-08-13 23:00	2018-09-19 22:00	55° 22.771' N	77° 38.382' W	5
2018	Kuuj_rbrB18w	2018-08-13 22:00	2018-09-19 23:00	55° 17.179' N	77° 46.717' W	5
Quaqtac AWAC						
2017	QUA17	2017-08-13 17:09	2018-08-15 17:09	61° 03,449' N	69° 41,405' W	35
2018	QUA18	2018-08-18 22:09	2019-08-15 14:09	61° 03,456' N	69° 41,402' W	35
2019	QUA19	2019-08-16 17:09	2021-09-17 18:09	61° 03,451' N	69° 41,369' W	34
Quaqtac marégraphe						
2017	Qua_mar17	2017-08-13 16:20	2018-08-15 17:30	61° 03,449' N	69° 41,405' W	35
2018	Qua_mar18	2018-08-18 21:20	2019-08-15 15:10	61° 03,456' N	69° 41,402' W	35
2019	Qua_mar19	2019-08-16 17:00	2020-10-25 01:00	61° 03,451' N	69° 41,369' W	34
Quaqtac houlographe						
2018	Qua_rbr18w	2018-08-16 00:00	2018-11-06 16:00	61° 02.833' N	69° 38.304' W	-2

3.1.3. Positions des baromètres enregistreurs

Des baromètres enregistreurs RBR DR-1050 ont aussi été installés à Kuujjuarapik et à Quaqtaq pour être certain d'avoir des enregistrements de pressions atmosphériques nécessaires pour le traitement des données des marégraphes RBR TGR-2050.

À Kuujjuarapik, le baromètre enregistreur est installé dans le garage de la station de recherche du Centre d'études nordiques (CEN). Les coordonnées du bâtiment sont 55° 16.597' N / 77° 44.847' W. Le baromètre enregistreur est attaché avec des serres-câbles sur un barreau horizontal au sommet d'une étagère située à l'angle est du bâtiment (Figure 9).

À Quaqtaq, le baromètre enregistreur est laissé en août 2017 dans la petite caisse de transport, qui devait être conservé dans le garage de l'aéroport de Quaqtaq. Toutefois, cette caisse a été déplacé à l'extérieur en octobre 2017, ce qui influença les données du baromètre, qui n'est que partiellement compensé pour la température. Lors de la mission suivante en août 2018, le baromètre enregistreur fut installé dans le garage de l'aéroport sur un grillage de la mezzanine à 4.15 m du sol (Figure 9).

Les données de ces baromètres enregistreur RBR DR-1050 ont toutefois été peu utilisées, la préférence ayant été donnée pour celles des enregistrements de pression de la station météorologique de l'aéroport de Kuujjuarapik, de la station météorologique de l'aéroport de Quaqtaq et de la station météorologique du MDDELCC située un peu au nord de l'aéroport de Quaqtaq.



Figure 9. Installation des baromètres enregistreurs : (gauche) au sommet d'une étagère dans le garage de la station de recherche du CEN à Kuujjuarapik; (droite) sur un grillage de la mezzanine du garage de l'aéroport de Quaqtaq (seulement à partir d'août 2018).

3.2. Description des instruments des mouillages

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

La mesure des profils de courants est effectuée par les ADCPs de manière classique avec les trois faisceaux acoustiques inclinés de 25° par rapport à la verticale : la vitesse des particules en suspension est déterminée dans l'axe de chaque faisceau par effet Doppler acoustique (déphasage de l'écho renvoyé par les particules); les vitesses sont converties en vitesses *est*, *nord*, et *haut* grâce aux mesures de la boussole électronique et des inclinomètres intégrés. La colonne d'eau est découpée en couches appelées *cellules* (d'une épaisseur de 2 m), sur lesquelles les profils de vitesse sont mesurés. L'instrument n'enregistre pas des vitesses instantanées, mais moyenne les mesures sur une durée de 60 secondes (Tableau 4).

Les vagues sont mesurées pendant des périodes de 1024 s (17 minutes) qui sont appelées *bursts*. Le spectre non directionnel des vagues et les paramètres, tels que les hauteurs et les périodes des vagues, sont calculées à partir des enregistrements du niveau d'eau. Les AWACs enregistrent le niveau d'eau avec un faisceau acoustique vertical (AST, Acoustic Surface Tracking) fonctionnant comme un échosondeur. (La première méthode est plus précise, surtout pour les profondeurs supérieures à 10 m.) Les directions des vagues sont déterminées à partir des vitesses orbitales des vagues qui sont mesurées près de la surface de l'eau pour les AWACs. L'instrument enregistre ces paramètres à une fréquence de 1 ou 2 Hz (Tableau 4).

3.3. Configuration des mouillages

Chacun des mouillages, installé entre 30 et 40 m de profondeur, est constitué des éléments suivants (masse totale ~ 250 kg) :

- un support de mouillage antichalutage en uréthane vert (modèle GP-TRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×127×56 cm, Figure 10), incluant une bouée pour la récupération (diamètre de 30 cm, couleur jaune avec autocollants réflecteurs) 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 courants avec options vagues et glace, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb; le sommet de la tête est situé 52 cm au-dessus de la base du support;
- trois caissons de batteries contenant au total six batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC.
- un marégraphe RBR TGR-2050.

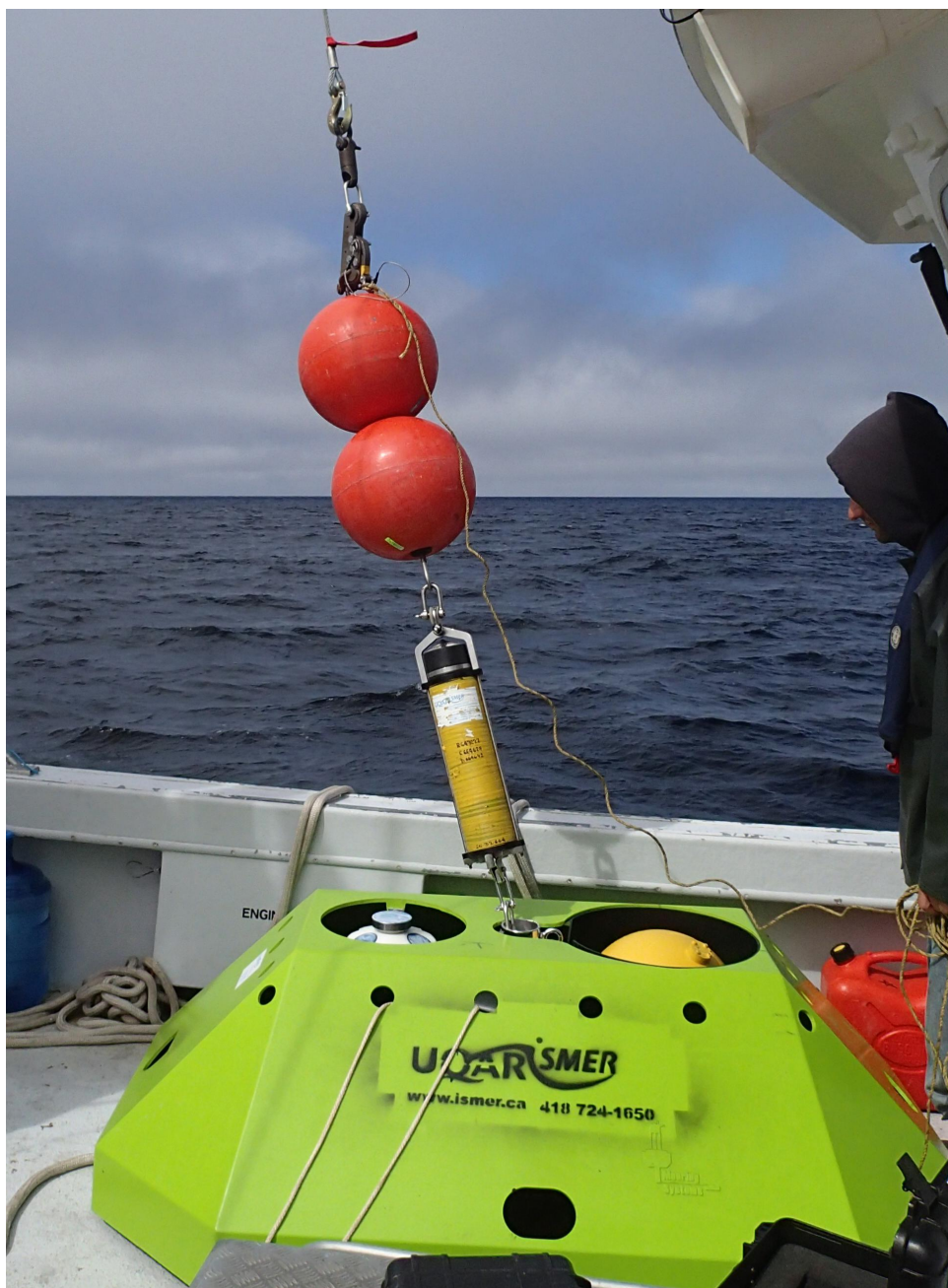


Figure 10. Plateforme GP-TRBM avec AWAC juste avant la mise à l'eau. L'AWAC est à gauche, la bouée pour la récupération est à droite, les caissons batteries, le déclencheur acoustique et le marégraphe sont à l'intérieur de la plate-forme antichalutage. Au-dessus de la plate-forme sont les bouées parachutes et un déclencheur acoustique additionnel utilisés seulement pour assurer la bonne orientation du mouillage pendant la descente; ces éléments sont récupérés juste après la mise à l'eau.

3.4. Programmation des mouillages et des baromètres

Toutes les données ont été enregistrées dans le fuseau horaire *Universal Time Coordinated* (UTC). Les paramètres de programmation des AWAC-AST 600 kHz sont résumés ci-dessous et dans le Tableau 4.

Les profileurs de courant de type AWAC au site de Quaqtak ont été programmés pour mesurer un profil de vitesse toutes les heures et un burst de vague de 17 minutes toutes les heures également alors qu'à Kuujjuarapik les mesures de profil de vitesse ont pu être réalisées toutes les 20 minutes. L'intervalle entre les mesures de courant est plus long à Quaqtak (60 minutes) qu'à Kuujjuarapik (20 minutes), car la profondeur moyenne (incluant les marées) est plus grande à Quaqtak et par conséquent la consommation d'énergie y est plus importante. À Quaqtak, 98% de l'énergie des batteries est consacrée à la mesure des vagues et seulement 2 % pour les mesures de profils de vitesse, alors que c'est 89 % et 11 % à Kuujjuarapik.

Les AWACs sont alimentés par trois caissons de batteries, pour un total de six batteries de 540 Wh à 13,5 V, soit 3240 Wh. Ils ont mesuré des profils de vitesses avec des cellules de 2 m, le centre de la première cellule étant situé à 2,5 m au-dessus de l'instrument.

Tableau 4. Synthèse des paramètres de programmation des profileurs de courants AWAC.

	Kuujjuarapik	Quaqtak
Profils de vitesse		
Intervalle entre profils	20 min.	60 min
Hauteur cellules	2 m	2 m
Nombre de cellules	23	24
Blanking distance	0,5 m	0,5 m
Période moyennée ^a	60 s	60 s
Measurement load ^a	50 %	25 %
Power level	high	High
Coordinate system	ENU	ENU
Compass update rate	20 min.	20 min.
Salinité	31	32
Vitesse du son	calculée ^b	calculée ^b
Précision vitesse horiz.	2,2 cm/s	3,2 cm/s
Précision vitesse vert.	0,7 cm/s	1 cm/s
Vagues		
Intervalle entre mesures	1 heure	1 heure
Fréquence	1 Hz / 2 Hz ^c	1 Hz / 2 Hz ^c
Durée	1024 s	1024 s
Wave sampling cell size	dynamique	dynamique

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

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

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

Sur chaque support de mouillage pour les AWACs, était installé un marégraphe de type TGR-2050. Les marégraphes permettent de mesurer avec une plus grande précision et à plus haute fréquence le niveau d'eau au-dessus des mouillages. La pression atmosphérique était mesurée à l'aide de baromètre enregistreur de type DR-1050 de la firme RBR

également. Le Tableau 5 résume la programmation des marégraphes et baromètres. La marée est mesurée toutes les 10 minutes et la pression atmosphérique toutes les 5 minutes. Les baromètres enregistreurs étaient installés, pour Kuujjuarapik dans le garage de la station de recherche du Centre d'études nordiques (CEN), et dans le garage de l'aéroport à Quaqtaq.

Le Tableau 6 résume la programmation des houlographes TWR-2050 des mouillages côtiers (Figure 11 et Figure 12). Les vagues sont mesurées toutes les heures durant 8,5 minutes. La marée est mesurée toutes les heures.

Tableau 5. Paramètres de programmation des marégraphes et baromètres RBR.

	Kuujjuarapik		Quaqtaq	
Instrument	TGR-2050	DR-1050	TGR-2050	DR-1050
Type	marégraphe	baromètre	marégraphe	baromètre
Intervalle de mesure	10 min.	5 min.	10 min.	5 min.
Durée moyenne	45 s	—	45 s	—

Tableau 6. Paramètres de programmation des houlographes RBR TWR-2050.

	Kuujjuarapik A	Kuujjuarapik B	Quaqtaq
Instrument	TWR-2050	TWR-2050	TWR-2050
<i>Fonction houlographes</i>			
Intervalle entre mesures	1 h	1 h	1 h
Fréquence	2 Hz	2 Hz	2 Hz
Durée	8,5 min. (512 s)	8,5 min. (512 s)	8,5 min. (512 s)
<i>Fonction marégraphe</i>			
Intervalle de mesures	1 h	1 h	1 h
Durée moyenne	60 s	60 s	60 s



Figure 11. Support de mouillage utilisé pour les houlographes TWR-2050 à Kuujjuarapik



Figure 12. Fixation du houlographe TWR-2050 à Quaqtak.

4. TRAITEMENT DES DONNÉES

4.1. Traitement des données des marégraphes

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

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

avec z_{eau} l'altitude du niveau d'eau au-dessus de l'instrument, p_{rbr} la pression enregistrée par le marégraphe (Pa), p_{atmo} la pression atmosphérique au niveau de la mer (Pa), p_{offset} une constante propre à chaque instrument pour corriger les différences de calibration entre le marégraphe et le baromètre (Pa), g l'accélération gravitationnelle ($m\ s^{-2}$), ρ la masse volumique de l'eau ($kg\ m^{-3}$). L'accélération gravitationnelle est de $9,81464\ m/s^2$ à Kuujjuarapik et de $9,81970\ m/s^2$ à Quaqtaq (Ressources naturelles Canada, 2022). La masse volumique a été calculée selon Fofonoff (1985) avec la température mesurée par le marégraphe et une salinité constante de 31 pour Kuujjuarapik et de 32 pour Quaqtaq.

L'altitude (ou profondeur) exacte des marégraphes par rapport à un référentiel altimétrique comme CGVD28 n'était pas connue. De plus, elle variait d'un déploiement à l'autre. Pour pouvoir combiner les séries des déploiements 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020 (2019-2021 pour Quaqtaq), le niveau marin moyen a donc été soustrait à la série temporelle. Ce niveau marin moyen a été estimé comme la moyenne du niveau marin mesuré dans les données du déploiement. Pour être sûr d'utiliser le même nombre de marées hautes que de marées basses, la moyenne a été calculée seulement sur la période entre le premier et le dernier passage du niveau de mi-marée à marée montante.

Les surcotes et décotes de tempêtes sont la différence entre le niveau marin réel et les prédictions des marées astronomiques. Comme les prédictions de marée ne sont pas disponibles pour les sites des marégraphes, ils ont été calculés dans Matlab avec la boîte à outils T_TIDE de Rich Pawlowicz (Pawlowicz et al., 2002). En premier la série temporelle du niveau z_{eau} de chaque marégraphe (3,2 ans à Quaqtaq, 3,9 ans à Kuujjuarapik) a été analysée pour déterminer les harmoniques de marées, puis celles-ci ont été utilisées pour calculer les prédictions de marées. Les surcotes et les décotes ont finalement été calculées comme la différence entre les niveaux observés et les niveaux d'eau prédits par T_TIDE.

4.2. Traitement des données de pression atmosphérique utilisées

Les instruments des mouillages mesurent la pression totale, à laquelle il faut soustraire la pression atmosphérique pour obtenir la pression exercée par la colonne d'eau. Il est nécessaire de tenir compte des variations de la pression atmosphérique pour traiter les données de marégraphes, et pour déterminer la profondeur des mouillages à faible profondeur.

Pour les mouillages de Kuujjuarapik, la pression atmosphérique mesurée à la station météorologique de l'aéroport de Kuujjuarapik, qui enregistre des données en continu, (identifiant climat 7103539, altitude 30 m) a été utilisée.

Par contre, à Quaqtaq, la station météorologique de l'aéroport (identifiant climat 7116271, altitude 32,3 m) enregistrait les premières années des données seulement pendant les heures d'ouverture de l'aéroport. La première année, les données du baromètre enregistreur RBR DR-1050 du projet ont été utilisées (altitude 32 m). Mais comme l'instrument a passé l'hiver dehors et que le capteur de pression de ce modèle n'est pas compensé pour la température, une correction en fonction de la température a été déterminée par ajustement d'un polynôme du 3^e degré sur la différence entre les données du RBR DR-1050 et les données de la station météorologique de l'aéroport :

$$p_corr = p + (-0,0000002005 T^3 - 0,0000687172 T^2 + 0,0002011470 T + 0,02642)$$

(équation 1)

avec p la pression brute (dbar), p_corr la pression corrigée (dbar) et T la température (° Celsius). La deuxième année, la préférence a été donnée à la pression mesurée par la station météorologique de Quaqtaq du réseau québécois Info-Climat (station 7116275, altitude 50 m), qui a pu être obtenue. La troisième année, ce sont les données de la station météorologique de l'aéroport, fonctionnant maintenant jour et nuit, qui ont été utilisées

Les pressions atmosphériques mesurées par tous ces baromètres installés à différentes altitudes ont ensuite été ajustées au niveau de la mer.

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

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

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

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

En premier, nous avons vérifié les codes d'état et les codes d'erreur des instruments, l'évolution du voltage des batteries, et la plausibilité des mesures de température (qui est utilisée par les instruments pour calculer la vitesse du son de l'eau). La température mesurée par les instruments près du fond variait parfois selon le cycle semi-diurne de la

marée, ces oscillations étaient généralement de 2 °C à 5 °C, mais pouvaient atteindre exceptionnellement jusqu'à 10 °C.

Ensuite nous avons vérifié la position des instruments (verticalité de la tête), leur stabilité (mouvements enregistrés par la boussole électronique et les inclinomètres) et l'enregistrement de la pression (pour repérer des changements de profondeur). La plupart du temps, les instruments étaient généralement orientés correctement, la tête regardant vers le haut à $\pm 5^\circ$ de la verticale, à quelques exceptions près. Des rotations latérales significatives des supports de mouillages sur le fond ont pu être observées lors d'événements 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. L'heure et la date du premier et dernier enregistrement de vagues valides sont indiquées au Tableau 3.

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

Le capteur de pression des instruments mesure la pression totale (poids de la colonne d'eau plus la pression atmosphérique). Ces données ont été corrigées avec la pression atmosphérique enregistrée par le baromètre ou par la station météorologique de Quaqtac ou de Kuujuarapik.

4.4. Traitement des données de vagues

Les paramètres des vagues pour les AWACs sont usuellement calculés avec le logiciel *Quickwave*. Celui-ci peut 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. Le spectre d'énergie et moments du spectre ont été calculés sur l'intervalle 0,02-0,48 Hz. Les directions de vagues et le spectre directionnel ont été calculés avec les vitesses orbitales mesurées près de la surface en utilisant la méthode *Maximum Likelihood Method with Surface Tracking* (MLMST). La déclinaison magnétique a aussi été corrigée avec les valeurs publiées par Ressources naturelles Canada pour 2017 (16° vers l'ouest à Kuujuarapik, 24° vers l'ouest à Quaqtac). Les fichiers texte produits par *QuickWave* ont été importés dans Matlab pour la suite du traitement, notamment la correction de la hauteur de la colonne d'eau pour les variations de la pression atmosphérique, et pour le contrôle de qualité.

Pour les houlographes côtiers TWR-2050, ainsi que pour le premier déploiement de l'AWAC de Kuujuarapik pour lequel seulement les données de pression sont exploitables (voir section 5.1), le traitement a été effectué entièrement dans Matlab avec une série de fonctions écrites par Urs Neumeier. En premier, la pression mesurée (pression totale) a été

corrigée pour les variations de la pression atmosphérique afin d'obtenir la pression de la colonne d'eau. Ensuite les paramètres non-directionnels de vagues ont été calculés avec la fonction *wavesp.m.* Lors de ces calculs, il faut tenir compte du fait que les variations de pression dues au passage des vagues sont atténuées en profondeur selon l'équation suivante :

$$p = p_0 + \frac{\cosh(k(z + D))}{\cosh(kD)} \rho g a \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (\text{équation 2})$$

avec p la pression mesurée (Pa), p_0 la pression moyenne (Pa), k le nombre d'onde (m^{-1}), z la distance sous la surface du capteur de pression (m, négatif vers le bas), D la profondeur totale (m), ρ la masse volumique de l'eau (kg m^{-3}), g l'accélération gravitationnelle (m s^{-2}), a l'amplitude des vagues (m), x la position horizontale (m) ω la fréquence angulaire des vagues (s^{-1}), t le temps (s) et φ l'angle de phase (rad). Il s'agit donc pour chaque fréquence de vague d'appliquer le facteur de correction C suivant :

$$C = \frac{\cosh(k(z + D))}{\cosh(kD)} \quad (\text{équation 3})$$

Le maximum du facteur de correction C utilisé était de 10 pour les mouillages côtiers Kuujjuarapik-A, Kuujjuarapik-B et Quaqtq, et de 20 pour le mouillage au large avec AWAC de Kuujjuarapik. Le spectre d'énergie et les moments du spectre ont été calculés sur l'intervalle 0,02-0,50 Hz.

Le contrôle de qualité vérifie que les résultats sont valides, c'est-à-dire que le capteur fonctionnait correctement, qu'il n'a pas mesuré un artefact et que les conditions permettaient de calculer correctement les différents paramètres. Le contrôle de qualité a été réalisé en deux étapes dans Matlab. Une série de tests automatiques a été appliquée en premier. Ensuite les résultats de ces tests et l'ensemble des données ont été validés manuellement avec une interface graphique permettant de bien visualiser les données et les bursts de vagues individuels. Le contrôle de qualité ne supprime pas les données erronées, afin de permettre une révision du contrôle de qualité par la suite au besoin. Par contre, le contrôle de qualité ajoute à chaque donnée un sémaphore ou flag de qualité, qui décrit la validité des valeurs. Avant d'utiliser une donnée, il faut donc vérifier sa validité en regardant le flag de qualité (appelé parfois sémaphore de qualité). 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 une mauvaise donnée). De plus, une donnée peut être non testée (pour les paramètres ne subissant pas de test de qualité ou avant que le contrôle de qualité n'ait été effectué) ou manquante (quand aucun instrument n'a enregistré à ce moment-là, par exemple les quelques heures entre deux déploiements). L'annexe 4 et en particulier son Tableau 19 décrit ces flags de qualité.

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

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

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

Pour les niveaux d'eau, les données mesurées ont été comparées aux prédictions de marée calculées avec le logiciel *XTide 2.10* (Flater, 2008), qui est couramment utilisé en océanographie physique.

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 13) :

- 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. La limite des périodes des vagues, pour lesquelles la

direction ne peut être déterminée, varie proportionnellement selon la racine carré de la profondeur.

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

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

La raison pour laquelle une donnée est douteuse/erronée est indiquée avec huit bits (un octet), spécifiant quel(s) test(s) a (ont) échoué (cf. Tableau 20 de l'annexe 4). Le flag de qualité est exprimé en chiffre hexadécimal de trois caractères, le premier (poids fort) représentant la qualité, les deux caractères suivants l'octet des tests (cf. annexe 4).

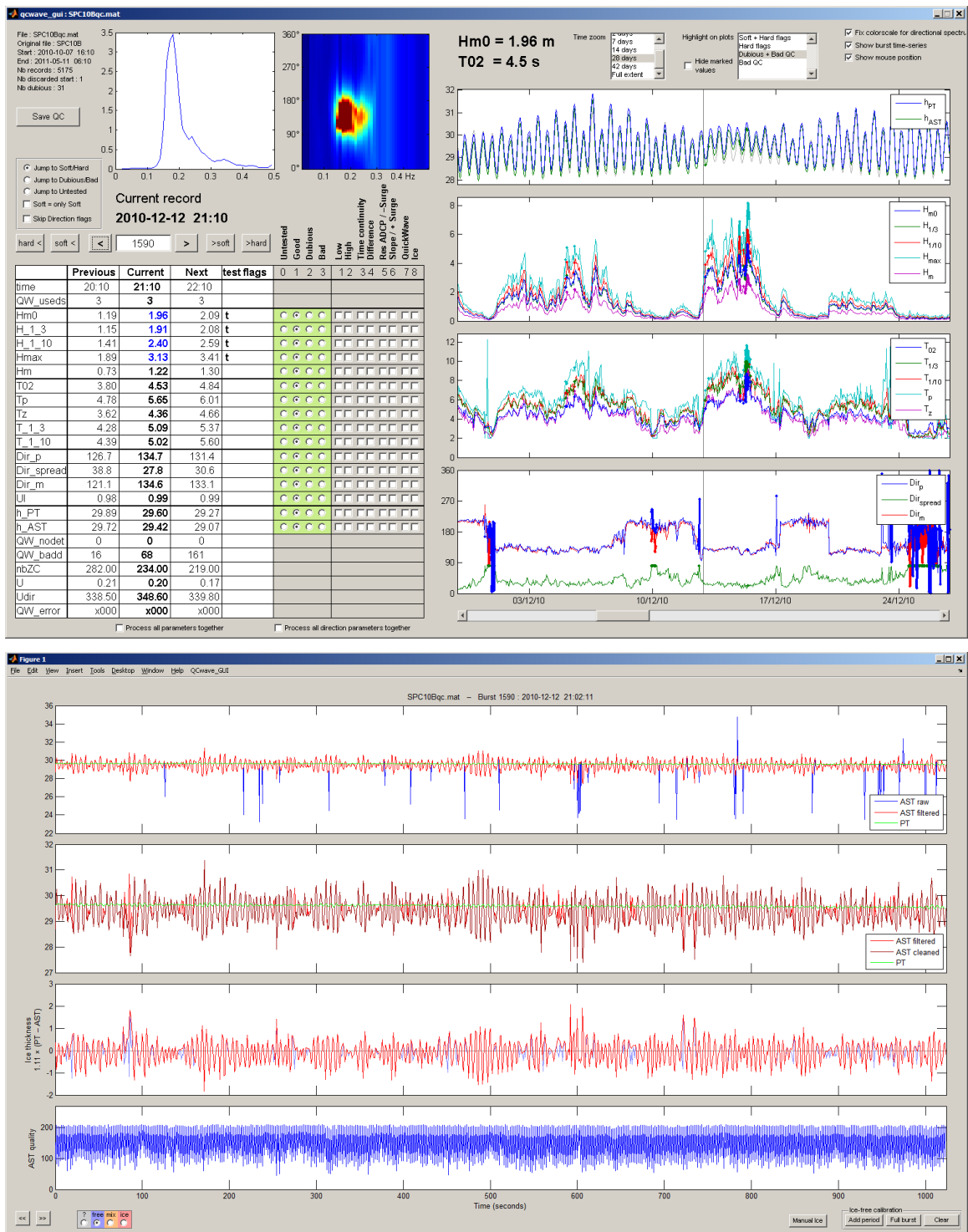


Figure 13. Interface graphique « `qcwave_gui` » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas).

Afin de faire la liste des événements avec les plus fortes vagues de tempêtes (événements appelés par simplicité "*tempêtes*" dans la suite du rapport) et de pouvoir calculer les périodes de retour, les plus fortes tempêtes furent déterminées avec un algorithme écrit par Urs Neumeier, qui

- 1) interpole linéairement jusqu'à trois heures de données manquantes dans les séries temporelles;
- 2) trouve en premier tous les maxima dans la série temporelle de H_{m0} ;
- 3) élimine ensuite les maxima suivants, car ils sont considérés faisant partie d'une tempête plus importante (Figure 14) :
 - a) les maxima qui ne sont pas séparés d'au moins 6 heures d'une valeur plus grande de H_{m0} dans la série temporelle;
 - b) les maxima qui sont à moins de 12 heures d'un maxima plus grand;
 - c) les maxima qui sont à moins de 24 heures d'un maxima plus grand dont la direction moyenne des vagues diffère de moins de 60° ;
 - d) les maxima qui ne sont pas séparés d'un maxima plus grand par une diminution de H_{m0} d'au moins la moitié du plus petit maxima.

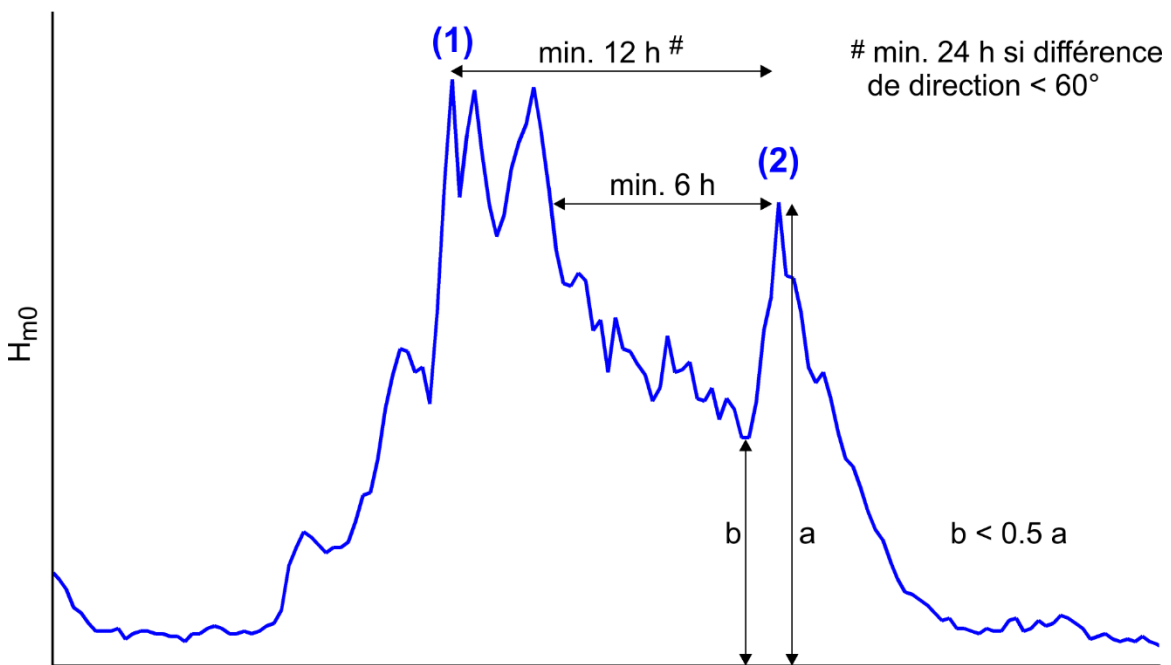


Figure 14. Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1).

4.5. Traitement et contrôle de qualité des données de courants

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

La déclinaison magnétique a été corrigée et la hauteur d'eau est corrigée pour les variations de la pression atmosphérique. Ensuite toutes les cellules commençant à plus de 90 % de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument ont été marquées comme mauvais, car hors de l'eau et potentiellement affectées par la surface de l'eau. Pour les déploiements hivernaux, les cellules influencées par les glaces flottantes ont aussi été rejetées en se basant sur l'épaisseur de glace mesurée durant les bursts de vagues: l'épaisseur de la glace (épaisseur instantanée maximale observée à ± 1 heure du profil) est soustraite à la hauteur de la colonne d'eau avant d'appliquer le test de 90 % de la colonne d'eau. Enfin un contrôle de qualité automatique a été effectué sur le rapport signal sur bruit (SNR) de chaque faisceau qui doit être supérieur à 3 dB.

Le contrôle de qualité est terminé manuellement avec l'interface graphique *awac_qc*, qui permet d'une part de visualiser et de zoomer dans les données et d'autre part d'attribuer les flags de qualité (Figure 15). L'interface montre simultanément les séries temporelles des profils de vitesse ou d'amplitude en teintes de couleurs, les graphiques de profils des vitesses et les flags de qualité. La sélection des paramètres examinés peut être modifiée à tout moment et il est aussi possible d'afficher la série temporelle d'une cellule. Les flags du contrôle de qualité peuvent être attribués ou corrigés avec la souris.

La validité des données de courants est définie avec un flag de qualité pour chaque cellule (ou point de profil) de chaque profil. Ce flag est une valeur entre 0 et 255, 0 indiquant une donnée valide, et une valeur supérieure à 0 une donnée erronée. La raison de l'erreur est codée en binaire sur un octet selon le Tableau 7.

Tableau 7. Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants.

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

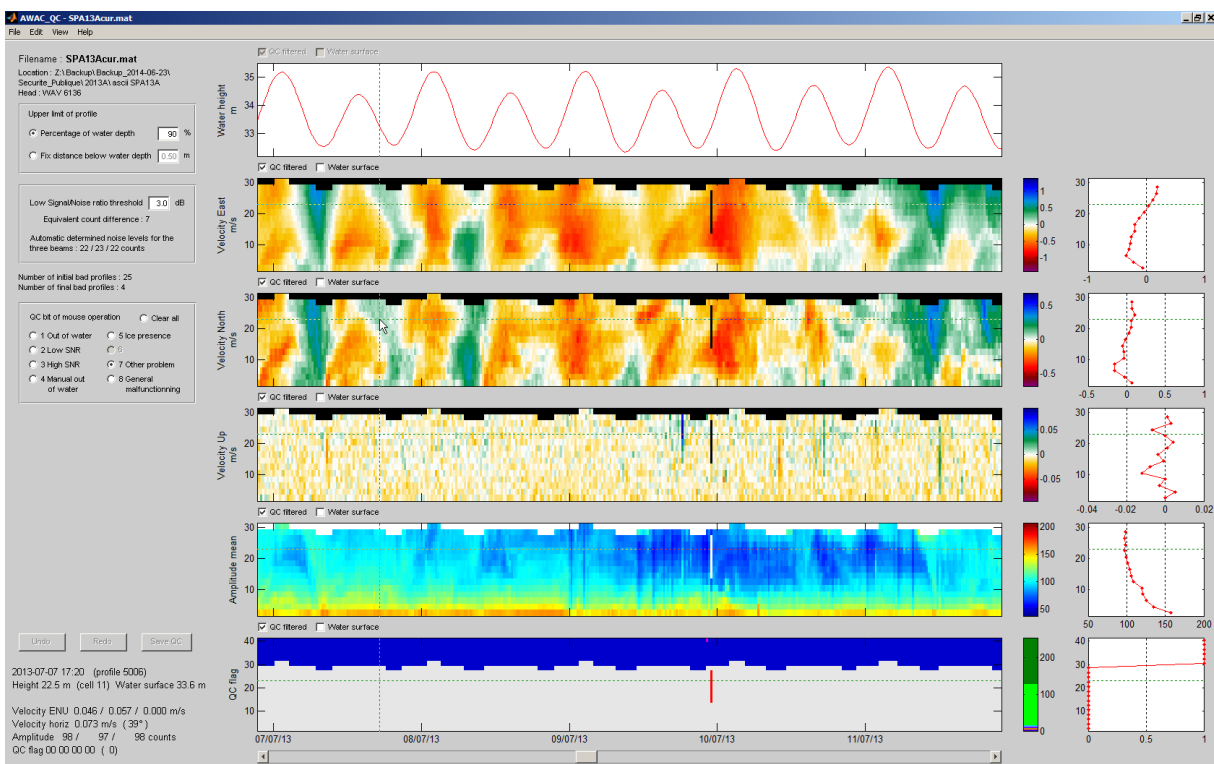


Figure 15. Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.

5. RÉSULTATS DES MOUILLAGES

5.1. Données de vagues

Toutes les données de vagues enregistrées aux deux sites ont été compilées pour obtenir des séries temporelles continues de trois (Kuujjuarapik) et quatre ans (Quaqtaq). Néanmoins, pour le site de Kuujjuarapik, nous avons dû séparer les données en deux jeux car sur les trois années de suivi, les données de vagues n'ont pas toutes été mesurées de façon similaire à cause d'un incident technique lors de la première année d'échantillonnage. L'instrument immergé au fond de l'eau s'était retourné sur le côté et les données de hauteurs et périodes des vagues ont dû être estimées à l'aide du capteur de pression au lieu du signal acoustique vertical, qui est la méthode conventionnelle. Il n'y a donc pas eu de données directionnelles pour le site de Kuujjuarapik entre août 2017 et septembre 2018. Par la suite, de septembre 2018 à juillet 2020, aucun problème d'intégrité des données n'est survenu. Des analyses plus poussées, notamment décrites dans le premier rapport d'étape de ce projet, ont montré que les données de hauteurs de vagues mesurées par le capteur de pression tendent à être surévaluées par rapport à ce qui est mesuré par le signal acoustique, considéré comme la référence car plus précis. Nous avons donc construit un premier jeu de données qui couvrait la période août 2017 à juillet 2020, dont la première année inclut des données avec un biais, et un second jeu de données qui couvrait la période septembre 2018 à juillet 2020, réduit mais plus intègre.

Les probabilités de dépassement des hauteurs de vagues ont été calculées à partir de ces différents jeux de données et sont présentées à la Figure 16. Présentées sous forme logarithmique, ces courbes de probabilité de dépassement correspondent à une représentation graphique de la fréquence d'occurrence des hauteurs de vagues atteintes, avec l'emphase mise sur les tempêtes. Ces courbes demeurent représentatives du régime de vagues présent à chacun des sites. Les courbes issues des deux jeux de données du site de Kuujjuarapik présentent quelques différences. La première différence observée entre les deux courbes (bleue et verte sur le graphique) pour les vagues supérieures à 4,90 m correspond à la différence de taille de l'échantillonnage, le premier jeu de données est construit à partir de 25 500 heures alors que le second est construit sur 16 000 heures. Ensuite, nous observons un écart entre les 2 courbes pour les vagues comprises entre 1 et 4 m de hauteur significative : pour une même probabilité d'occurrence, les données qui incluent celles obtenues par le capteur de pression, montrent des tailles de vagues supérieures à celle issues des données mesurées uniquement par le signal acoustique. Cet écart observé confirme le biais de mesure du capteur de pression. Dans l'ensemble, le site de Kuujjuarapik est exposé à de très fortes vagues générées par des tempêtes de l'ouest, soient celles qui se développent à l'intérieur du bassin de la Baie d'Hudson. Mais ces événements sont très minoritaires. Bien que des vagues atteignant 5,75 m furent enregistrées au site de Kuujjuarapik, celles-ci ne dépassent pas 1 m dans 90% du temps. Au site de Quaqtaq, nous disposons de quatre années consécutives de données. Dans l'ensemble, le régime de vagues illustré par la courbe est relativement similaire à celui observé à Kuujjuarapik. Les événements de tempêtes génèrent des vagues de plus de 5 m de hauteur significative, avec un maximum observé à 5,70 m. Les vagues inférieures à 1 m représente plus des 90% des données. La durée de 3 ans (4 ans pour Quaqtaq) pendant laquelle les vagues ont été mesurées permet de construire un régime de vague cohérent basé sur les observations, et où la variabilité interannuelle n'est observable que sur les

événements extrêmes. La fréquence de mesure aux heures des conditions de vagues constitue un atout certain dans la fiabilité et la robustesse de ces données. Celles-ci peuvent servir de référentiel pour des études de modélisation.

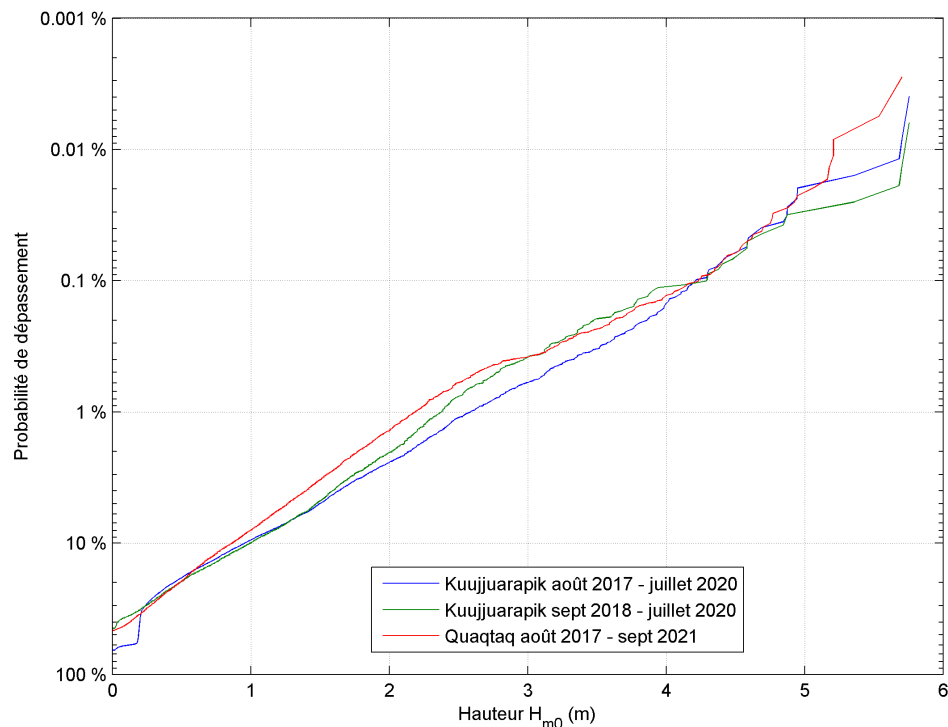


Figure 16. Probabilités de dépassement des hauteurs de vagues H_{m0} enregistrées par les deux mouillages à Kuujjuarapik d'août 2017 à juillet 2020; et à Quaqtac d'août 2017 à septembre-2021. Pour Kuujjuarapik, il existe deux jeux de données, le premier couvrant une période de 3 ans et inclut les données mesurées par le capteur de pression d'août 2017 à septembre 2018, et le second, d'une durée de 2 ans, contient uniquement les données mesurées par signal acoustique de septembre 2018 à juillet 2020.

Les roses de vagues permettent de visualiser les directions prédominantes de provenance des vagues les plus fortes à Kuujjuarapik (Figure 17). Les vagues les plus élevées proviennent quasiment toutes des secteurs ouest et ouest-nord-ouest. Ce sont des vagues de tempêtes supérieures à 4,5 m de hauteur significative. C'est de ce secteur que le fetch est le plus long permettant ainsi la propagation de la houle et des vagues. Ces tempêtes se développent au centre du bassin de la Baie d'Hudson et les vagues générées par les vents puissants passent au sud des îles Belcher (Figure 1) avant d'atteindre la côte est et le site de l'AWAC de Kuujjuarapik avec des hauteurs importantes. La tempête la plus forte a généré des vagues de 5,75 m de hauteur significative. Quelques vagues supérieures à 2,50 m en provenance du nord-ouest se propagent également jusqu'au site de mesure malgré la protection partielle qu'offrent les îles Belcher. Enfin, il est possible d'observer des vagues supérieures à 1,50 m en provenance du secteur nord. À noter que les secteurs d'où proviennent les vagues les plus élevées sont aussi les secteurs où les vagues sont les plus fréquentes.

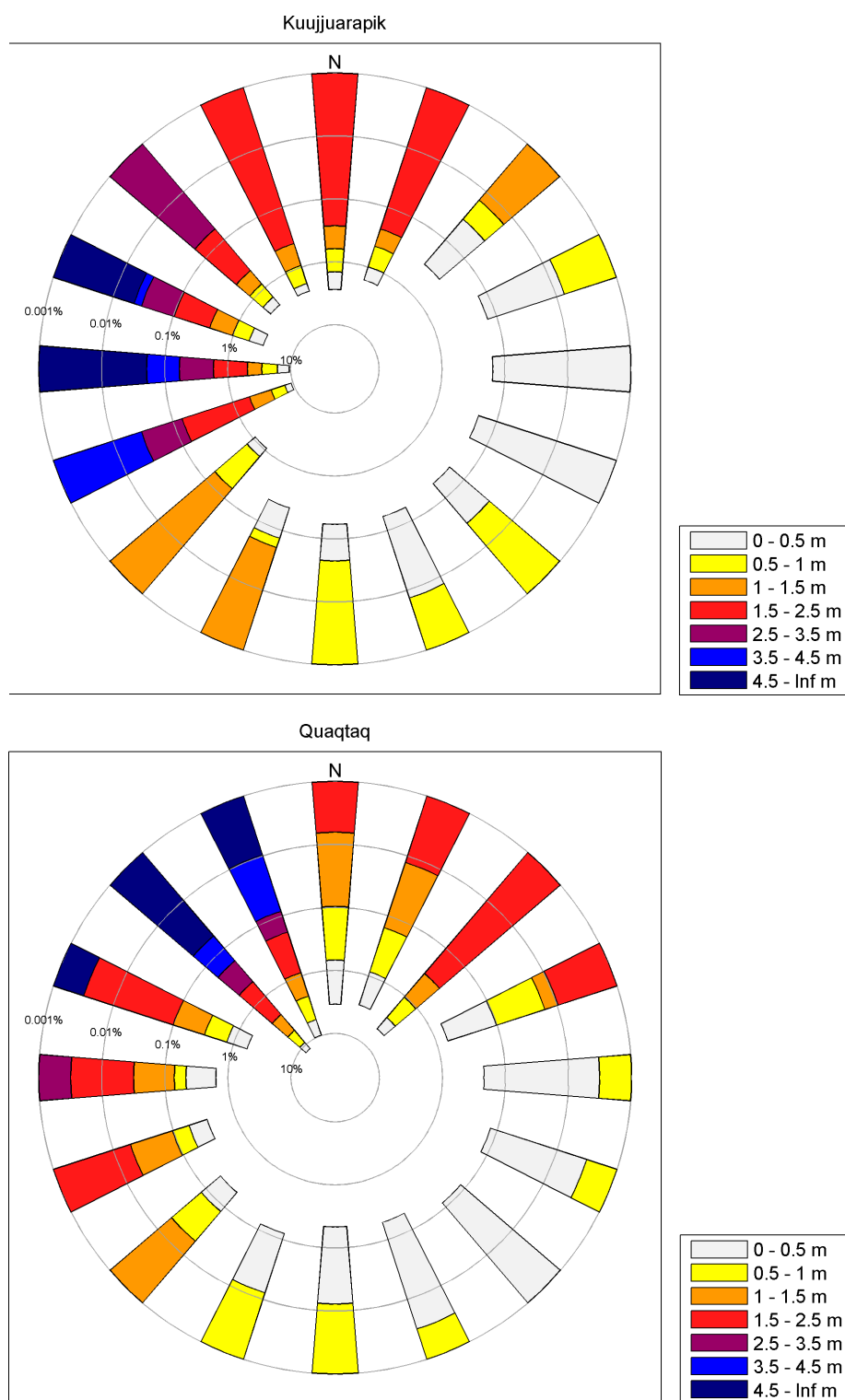


Figure 17. Roses de vagues pour l'AWAC de Kuujjuarapik (haut) et Quaqtuaq (bas) sur l'ensemble des données disponible à chaque site. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphasis 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.

Au site de Quaqtak, les vagues les plus élevées proviennent des secteurs nord-ouest et nord-nord-ouest (Figure 17), soit en provenance du détroit d'Hudson, secteur d'où sont originaires le plus souvent les vagues et également les grosses houles de tempête qui transitent à travers le détroit. La tempête la plus forte a généré des vagues de 5,70 m de hauteur significative. Quelques tempêtes ont généré des vagues supérieures à 1,50 m en provenance du secteur nord-est, mais cela demeure minoritaire par rapport aux tempêtes du nord-ouest. Ces vagues transitent entre la côte et l'île Hearn et sont mesurées au site de l'instrument mais le port de Quaqtak en tant que tel est protégé de ces vagues.

Nous avons répertorié dans le Tableau 8 les 15 événements de tempête les plus importants aux deux sites, avec les hauteurs significatives, les périodes et directions de provenance des vagues. La direction d'origine des vagues générées spécifiquement lors de ces 15 tempêtes est également illustrée sur la Figure 18 sous forme de cible (avec le nord en haut). Comme pour les courbes de probabilité de dépassement, nous avons présenté pour Kuujjuarapik les deux jeux de données, sachant que pour celui incluant les mesures réalisées en 2017-2018, les directions des vagues ne sont pas disponibles pour cette période spécifique.

La tempête la plus importante à Kuujjuarapik a eu lieu le 4 octobre 2018 en provenance de l'ouest (260°) et a généré des vagues de 5,75 m de hauteur significative. Lors de cette tempête, des vagues de 10 m ont été enregistrées, mais il s'agit de hauteur maximale atteinte, et non de hauteur significative. Si l'on considère le jeu de données de trois ans, qui inclut les données obtenues par le capteur de pression en 2017-2018, neuf (9) des quinze (15) tempêtes les plus fortes ont eu lieu à l'automne 2017. Pour ces événements de tempêtes où la direction de provenance des vagues n'est pas disponible, il est très probable que ces vagues proviennent des secteurs similaires à celles dont nous disposons cette information directionnelle, soit de l'ouest. Ces résultats doivent être considérés avec prudence car les données de hauteur significative sont légèrement surestimées quand mesurées à partir du capteur de pression, tout comme les données de période. Sur l'ensemble de la période de suivi, les vagues dépassant les 3 m de hauteur significative sont relativement peu fréquentes. Du fait de la période d'englacement relativement étendue dans ces régions, les tempêtes sont toutes recensées au cours de l'automne.

À Quaqtak la tempête la plus importante a eu lieu le 3 novembre 2020 (Tableau 8) et a généré des vagues de 5,70 m (hauteur significative) qui provenaient du nord-ouest (314°). La hauteur maximale atteinte par les vagues lors de cet événement a été quantifiée à 9,39 m. Il y a eu une autre tempête le 27 octobre 2018, lors de laquelle les vagues ont dépassé les 5 m de hauteur significative ($H_{m0} \rightarrow 5,21$ m). Sur les quatre années de données, sept (7) des quinze (15) tempêtes les plus fortes ont eu lieu à l'automne 2017. Il y a eu une recrudescence marquée des événements de tempête lors de l'automne 2017, tendance détectée aux deux sites d'étude.

Tableau 8. Liste des 15 tempêtes les plus fortes mesurées par les AWACs à Kuujjuarapik d'août 2017 à juillet 2020 et à Quaqtaq d'août 2017 à septembre 2021. La hauteur significative des vague (H_{m0}), la période moyenne des vagues (T_{02}) et la direction de provenance (Dir) sont indiquées pour l'apogée de chaque tempête. Pour Kuujjuarapik les données mesurées par le capteur de pression entre août 2017 et septembre 2018 sont présentées en grisées. Considérant un biais dans le calcul des hauteurs et périodes de ces données mesurées uniquement par le capteur de pression, celles-ci sont exclues dans un deuxième tableau.

Kuujjuarapik 2017-2020					Kuujjuarapik 2018-2020				
Rang	Date/Heure (UTC)	H_{m0} (m)	T_{02} (s)	Dir (°)	Rang	Date/Heure (UTC)	H_{m0} (m)	T_{02} (s)	Dir (°)
1	04/10/2018 20:00	5.75	6.64	260	1	04/10/2018 20:00	5.75	6.64	260
2	31/10/2017 17:00	4.95	8.13	ND	2	16/11/2019 01:00	3.94	6.25	278
3	29/11/2017 14:00	4.21	7.38	ND	3	23/09/2018 09:00	3.77	6.22	263
4	14/10/2017 19:00	4.20	7.91	ND	4	18/12/2018 00:00	3.35	6.38	306
5	16/11/2019 01:00	3.94	6.25	278	5	09/12/2019 04:00	3.23	5.93	263
6	23/09/2018 09:00	3.77	6.22	263	6	26/09/2019 12:00	2.80	5.76	250
7	20/11/2017 21:00	3.53	7.39	ND	7	31/08/2019 03:00	2.80	5.70	258
8	20/10/2017 07:00	3.52	7.13	ND	8	18/11/2018 02:00	2.72	5.62	256
9	06/10/2017 04:00	3.52	7.34	ND	9	03/09/2019 01:00	2.71	5.60	267
10	18/12/2018 00:00	3.35	6.38	306	10	09/11/2019 11:00	2.71	5.91	257
11	15/12/2017 03:00	3.28	7.06	ND	11	30/09/2019 00:00	2.70	5.63	261
12	09/12/2019 04:00	3.23	5.93	263	12	29/09/2018 05:00	2.62	5.42	285
13	30/09/2017 15:00	3.19	7.12	ND	13	20/11/2018 11:00	2.53	5.27	258
14	07/09/2018 11:00	3.17	6.74	ND	14	12/12/2019 16:00	2.53	4.96	249
15	06/11/2017 23:00	3.09	6.82	ND	15	08/10/2019 05:00	2.45	5.33	256

Quaqtaq 2017-2021				
Rang	Date/Heure (UTC)	H_{m0} (m)	T_{02} (s)	Dir (°)
1	03/11/2020 15:00	5.70	7.14	314
2	27/10/2018 12:00	5.21	7.31	316
3	28/11/2017 04:00	4.77	6.46	332
4	23/11/2018 03:00	4.69	7.05	321
5	01/11/2017 14:00	4.23	6.82	328
6	12/11/2019 17:00	3.93	6.48	320
7	01/10/2017 11:00	3.80	7.12	327
8	18/11/2020 13:00	3.59	6.42	314
9	30/09/2018 01:00	3.55	6.15	315
10	30/08/2017 02:00	2.75	5.81	332
11	24/09/2018 07:00	2.72	5.77	318
12	04/10/2017 01:00	2.70	5.68	319
13	10/09/2017 09:00	2.68	5.81	331
14	21/11/2020 19:00	2.66	5.86	312
15	24/09/2017 22:00	2.61	5.67	331

La répartition spatiale des plus fortes tempêtes survenues à chaque site est représentée à la Figure 18. Pour le site de Kuujjuarapik (à gauche sur la figure), seules les plus grosses tempêtes entre septembre 2018 à juillet 2020 sont illustrées. Les tempêtes de la période août 2017 à septembre 2018 dont nous ne disposons pas la direction de provenance sont probablement issues du même secteur, soit de l'ouest. En effet, la présence des îles Belcher et la situation géographique de Kuujjuarapik permet de filtrer la propagation des grosses vagues de tempête en provenance du centre de la Baie d'Hudson, et restreint ainsi leur provenance à presque un seul secteur : seules les grosses vagues d'ouest se rendent jusqu'au site. Néanmoins, une tempête en provenance du nord-ouest, soit directement des îles Belcher, a généré des vagues de plus de 3,3 m. Le site de Quaqtq (à droite sur la figure) rencontre la même configuration, les plus grosses tempêtes sont toutes originaires du même secteur, le nord-ouest (Figure 18).

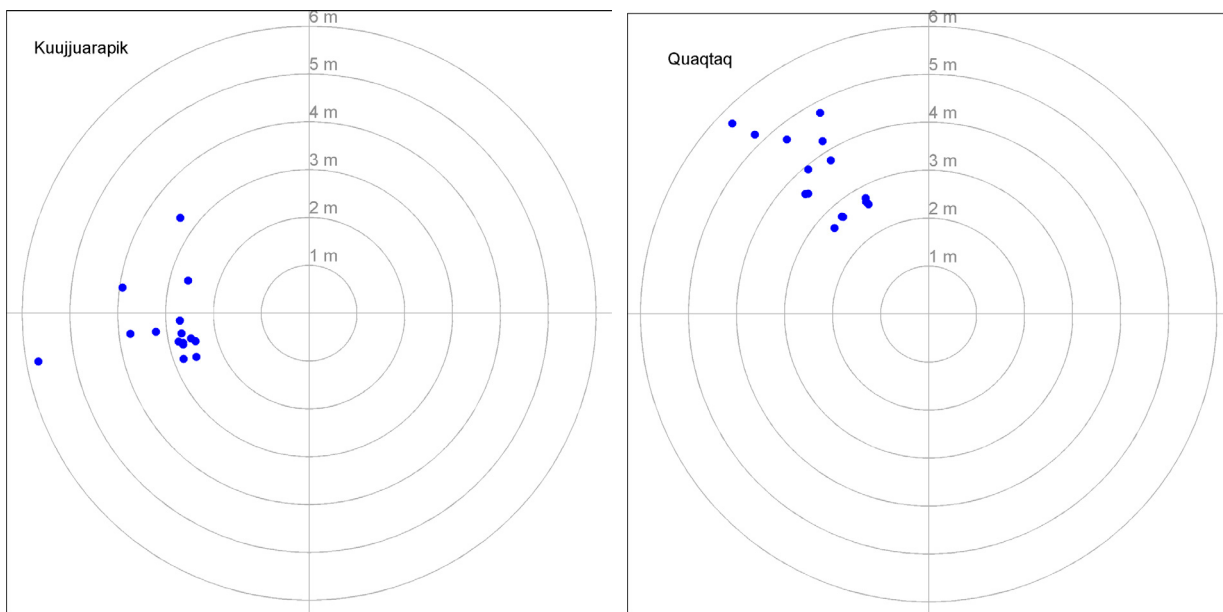


Figure 18. Hauteurs de vagues H_{m0} et directions de provenance des 15 plus fortes tempêtes mesurées par les AWACs à Kuujjuarapik (gauche) en 2018-2020 et à Quaqtq (droite) en 2017-2021.

Toutes les données de hauteurs significatives des vagues sont présentées sous forme de séries temporelles pour les deux sites avec la mise en évidence des quinze (15) plus fortes tempêtes (Figure 19 et Figure 20). Pour chaque année de données nous avons représenté uniquement la période libre de glace, du 1^{er} juin au 31 décembre de chaque année. Ces données nous informent sur la fréquence et la répartition temporelle des événements de tempêtes qui se propagent jusqu'aux infrastructures. Sur la Figure 19, le panneau du haut illustre, pour Kuujjuarapik, les hauteurs de vagues pour l'automne 2017, données mesurées par le capteur de pression, le panneau du milieu illustre l'automne 2018, le panneau du bas l'automne 2019, et enfin sur une autre page, le dernier panneau illustre les données de vagues à l'été 2020 avant que l'instrument ne cesse de fonctionner au début juillet. L'automne 2017 a connu une fréquence des tempêtes supérieures aux années suivantes. Entre le début octobre et la mi-décembre 2017, il y a eu pas moins de neuf (9) tempêtes majeures où les vagues ont dépassé les 3 m de hauteur significative. Bien que les mesures réalisées par le capteur de pression tendent à surestimer la hauteur des vagues, la détection

des événements de tempête n'en demeure pas moins valide. L'automne 2018 a connu quatre (4) tempêtes majeures, mais réparties de manière non-homogène. À l'automne 2019, il n'y a eu que deux (2) événements au cours desquels les vagues ont dépassé 3 m de hauteur significative. La période de mesure de trois ans est trop limitée pour savoir s'il s'agit d'une tendance à la diminution des événements de tempête au site de Kuujjuarapik.

Les roses des vents au large de Kuujjuarapik durant la période libre de glace en 2017, 2018 et 2019 montrent une variation interannuelle similaire à celle des vagues (Annexe 5, Figure 56). En 2017 les vents les plus forts étaient issus de l'ouest, du sud-ouest et du nord. L'année suivante en 2018 les vents les plus forts provenaient de l'ouest-nord-ouest, mais le fetch est limité dans cette direction par les îles Belchers. En 2019 les vents étaient les plus faibles de ces trois dernières années. Par ailleurs pour cette année 2019, les données météorologiques de l'aéroport de Kuujjuarapik indiquent des vents inférieurs à 55 km/h, alors que cette limite était franchie à de nombreuses reprises en 2017 et 2018.

La série temporelle des hauteurs de vagues à Quaqtq pour les quatre années de données disponibles est représentée la Figure 20. Les quinze (15) événements de tempêtes les plus importants sont représentés également par des cercles rouges sur la figure. Seule la période été-automne est présentée, soit du 1^{er} juin au 31 décembre de chaque année, à l'exception de la dernière année en 2021, où dès le mois de mai des vagues sont détectées. Le premier panneau illustre l'automne 2017, le deuxième panneau illustre l'automne 2018, et ainsi de suite jusqu'au dernier été et début d'automne 2021. Tout comme ce qui est observé plus au sud à Kuujjuarapik, l'automne 2017, a connu de nombreux événements de tempête. Nous en dénombrons sept (7) entre la fin août et la fin novembre, bien que seulement trois (3) présentent des vagues supérieures à 3 m de hauteur significative. Lors du deuxième automne, en 2018, seules quatre (4) tempêtes majeures sont dénombrées. Hormis la tempête du 27 octobre et celle du 23 novembre 2018, la fin de l'automne connaît des conditions de vagues relativement calme. L'automne 2019 a connu seulement un seul événement de tempête durant lequel les vagues ont dépassé les 3 m. À l'automne 2020, il y a eu trois (3) événements majeurs, dont celui où les vagues ont été les plus élevées ($H_{m0} \rightarrow 5,70$ m) au cours des quatre années de données. Outre les événements majeurs de tempête, sur les quatre années de données disponible, il semble y avoir un rallongement de la saison libre de glace.

Les roses des vents au large de Quaqtq durant la période libre de glace en 2017, 2018, 2019 et 2020 montrent également une variation interannuelle similaire à celle des vagues (Annexe 5, Figure 57). C'est en 2017 et 2020 que les vents les plus forts issus du nord-ouest sont mesurés; alors qu'en 2018 les vents issus du nord-ouest ont faibli et de manière similaire à ce qui est observé à Kuujjuarapik, l'année 2019 présentent les vents les plus faibles. L'ordre des années est différent si l'on considère les vents venant de l'est, mais le site du mouillage avec AWAC et le village de Quaqtq sont protégés des vagues venant de cette direction.

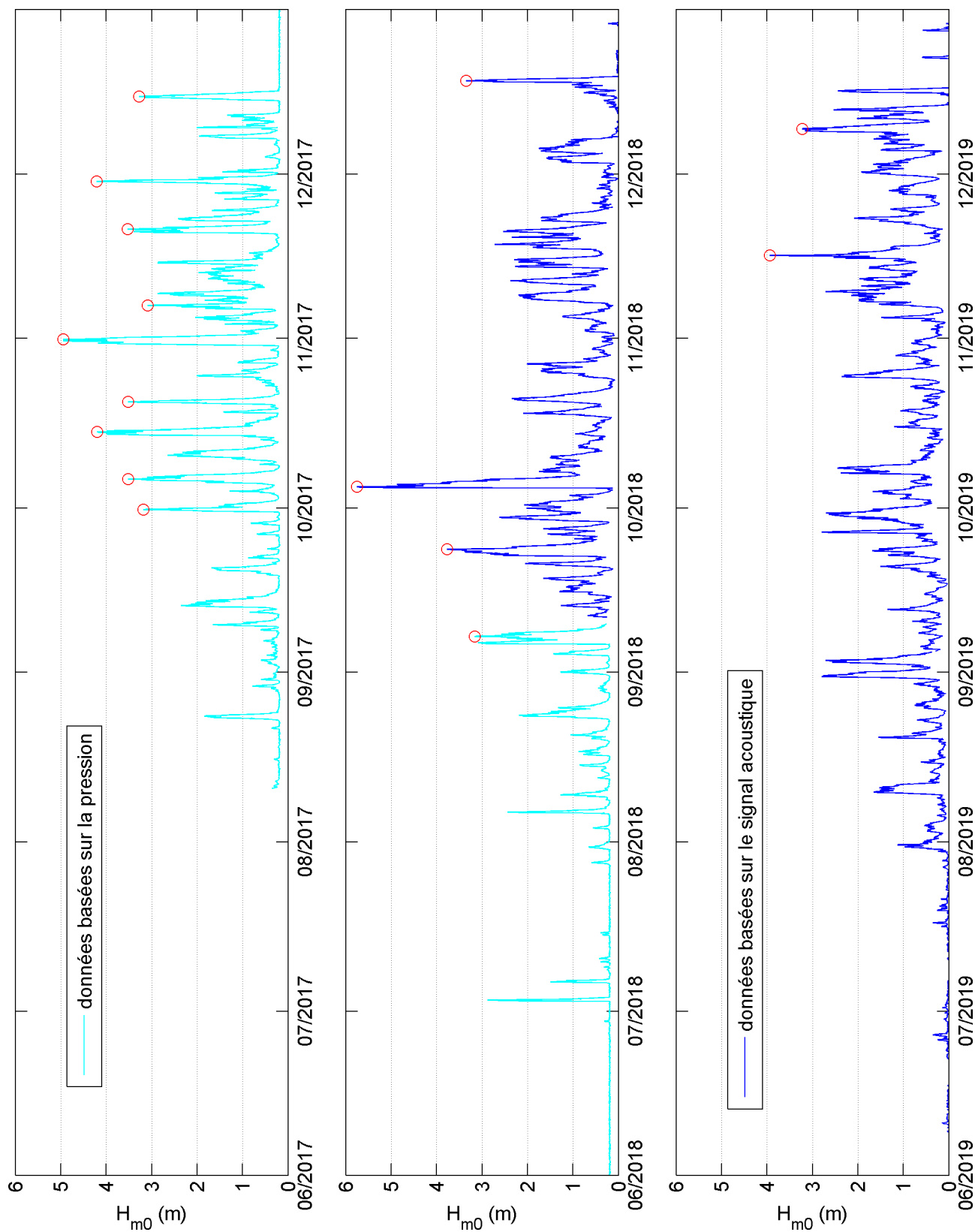


Figure 19. Séries temporelles des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées par l'AWAC à Kuujjuarapik d'août 2017 à la mi-juillet 2020. La période hivernale n'est pas illustrée pour cause de glace. Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

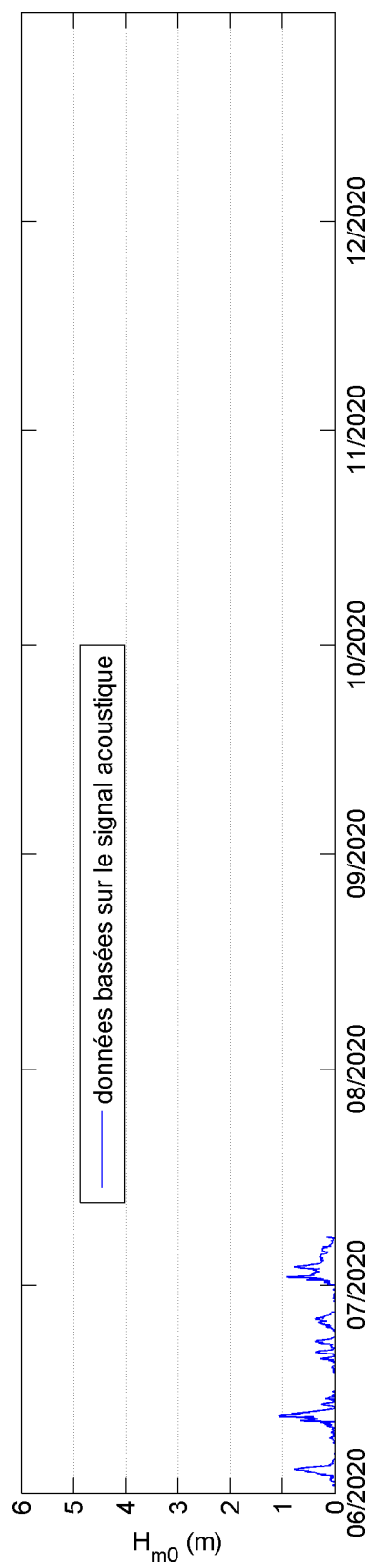


Figure 19 (suite).

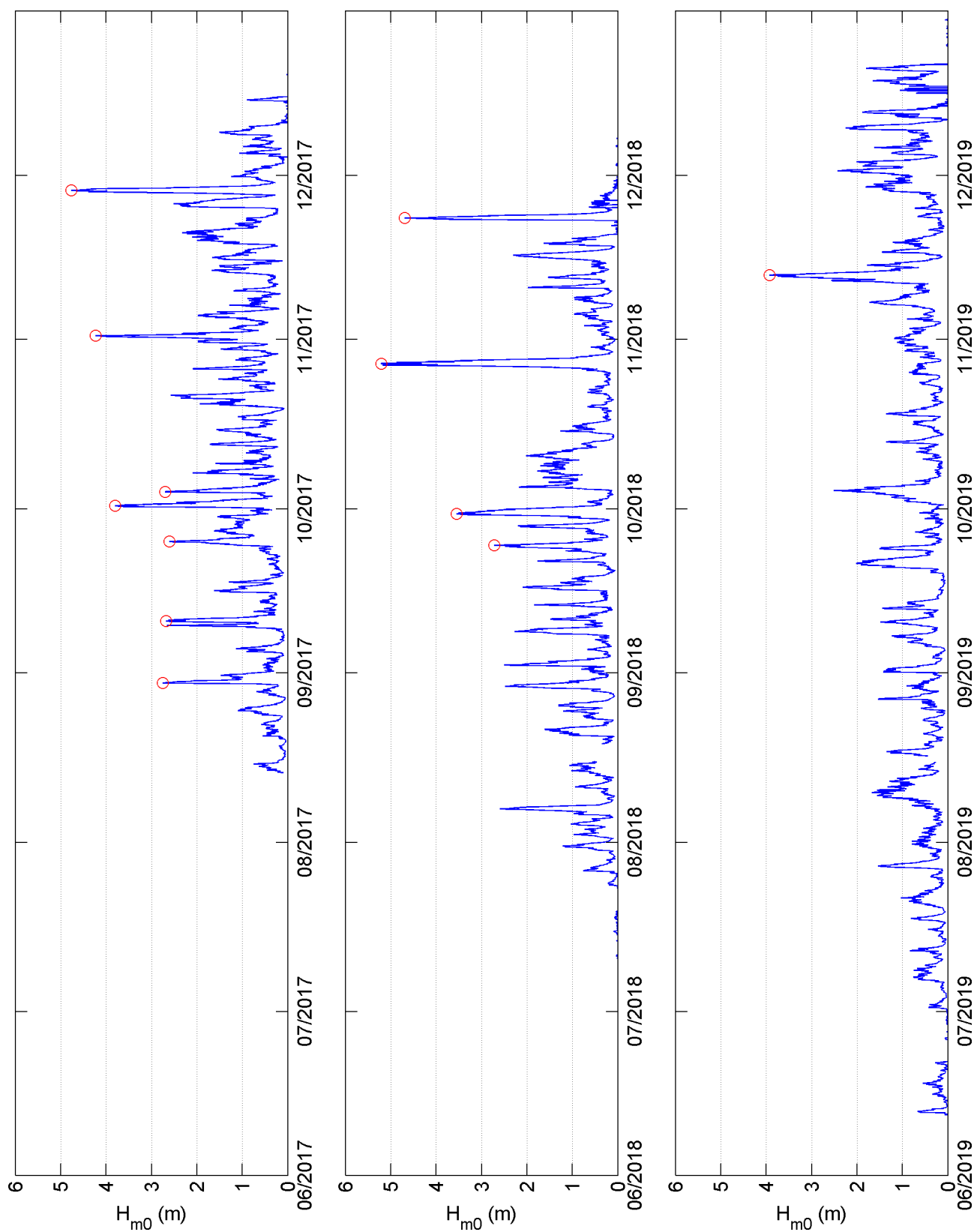


Figure 20. Séries temporelles des hauteurs de vagues H_{m0} mesurées par l'AWAC à Quaqtuq d'août 2017 à la mi-septembre 2021. La période hivernale n'est pas illustrée pour cause de glace. Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

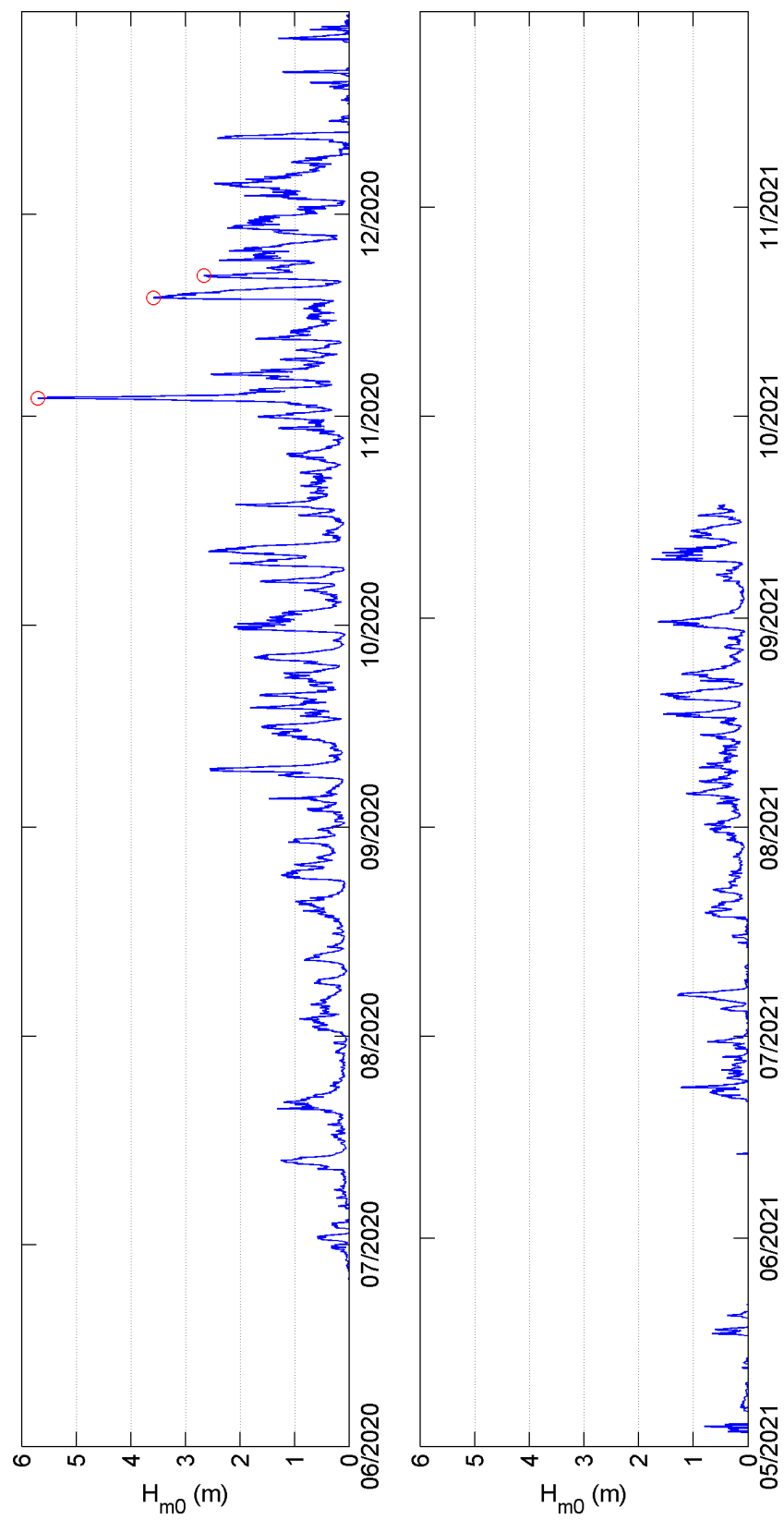


Figure 20 (suite).

5.2. Données de courants

Outre les vagues en surface, les instruments utilisés échantillonnent l'ensemble de la colonne d'eau (de 1,5 m au-dessus du fond à 3-5 m sous la surface) et permettent ainsi d'obtenir des profils verticaux de courants à haute résolution temporelle. Les instruments ont mesuré un profil de vitesse toutes les 20 minutes à Kuujjuarapik et toutes les 60 minutes à Quaqtak.

Les roses des courants présentées à la Figure 21 font ressortir les directions prédominantes des courants en surface (jusqu'à 70 cm/s) et en profondeur. Il est important de noter que l'instrument ne peut pas mesurer les premiers 3 à 5 m sous la surface de l'eau. Ainsi les courants de surface représentés sont situés quelques mètres en-dessous de la surface. Pour Quaqtak la très grande amplitude marée (au-delà de 8 m), incite à choisir comme profondeur représentative des courants de surface, une "cellule de mesure" (*bin*) qui demeurerait en permanence immergée, soit 31 m au-dessus du fond.

À Kuujjuarapik, l'orientation des courants observée au fond (l'axe nord-est – ouest-sud-ouest) suit fortement la bathymétrie locale et révèlent un transport net vers le nord-est. Leur intensité est par ailleurs très faible. L'orientation des courants en fonction du cycle tidal n'est pas claire d'autant plus qu'il semble y avoir une rotation des courants sur la profondeur (voir aussi Figure 24). Les courants en surface sont en moyenne très faibles, et ne présentent qu'une seule direction préférentielle en direction du nord-est, soit parallèle à la côte. De manière générale, un signal de la marée est usuellement visible dans ce genre de représentation des courants, avec une distribution bimodale, reflétant le transport d'eau au flot et au jusant, ce qui n'est pas le cas pour ce site d'étude. Seuls les courants dans le fond de la colonne d'eau semblent révéler un patron directionnel lié à la marée. En surface, les courants sont logiquement plus élevés que ceux enregistrés sur le fond de la colonne d'eau.

À Quaqtak, le site où est positionné l'instrument est dans l'axe d'une vallée sous-marine entourée de deux hauts-fonds, où le transport des masses d'eau est guidé. Cette morphologie au nord-est du mouillage influence les courants au fond, qui sont relativement bidirectionnels avec une prédominance prononcée vers le nord-est. En surface, les courants sont moins restreints sur deux directions opposées, et s'étalent un peu plus du nord-est au sud-est. Ces courants sont particulièrement forts. Ceux de faible intensité sont très peu présents. La forte amplitude du signal tidal, un marnage allant jusqu'à 9 m, génère des courants de marée puissants, avec des vitesses mesurées proche de 1 m par seconde. La présence du détroit entre l'île Hearn et le continent participe à l'orientation de tels courants. Par ailleurs, les données indiquent des oscillations de la direction des courants pendant le flot, qui pourraient s'expliquer par la présence de tourbillons.

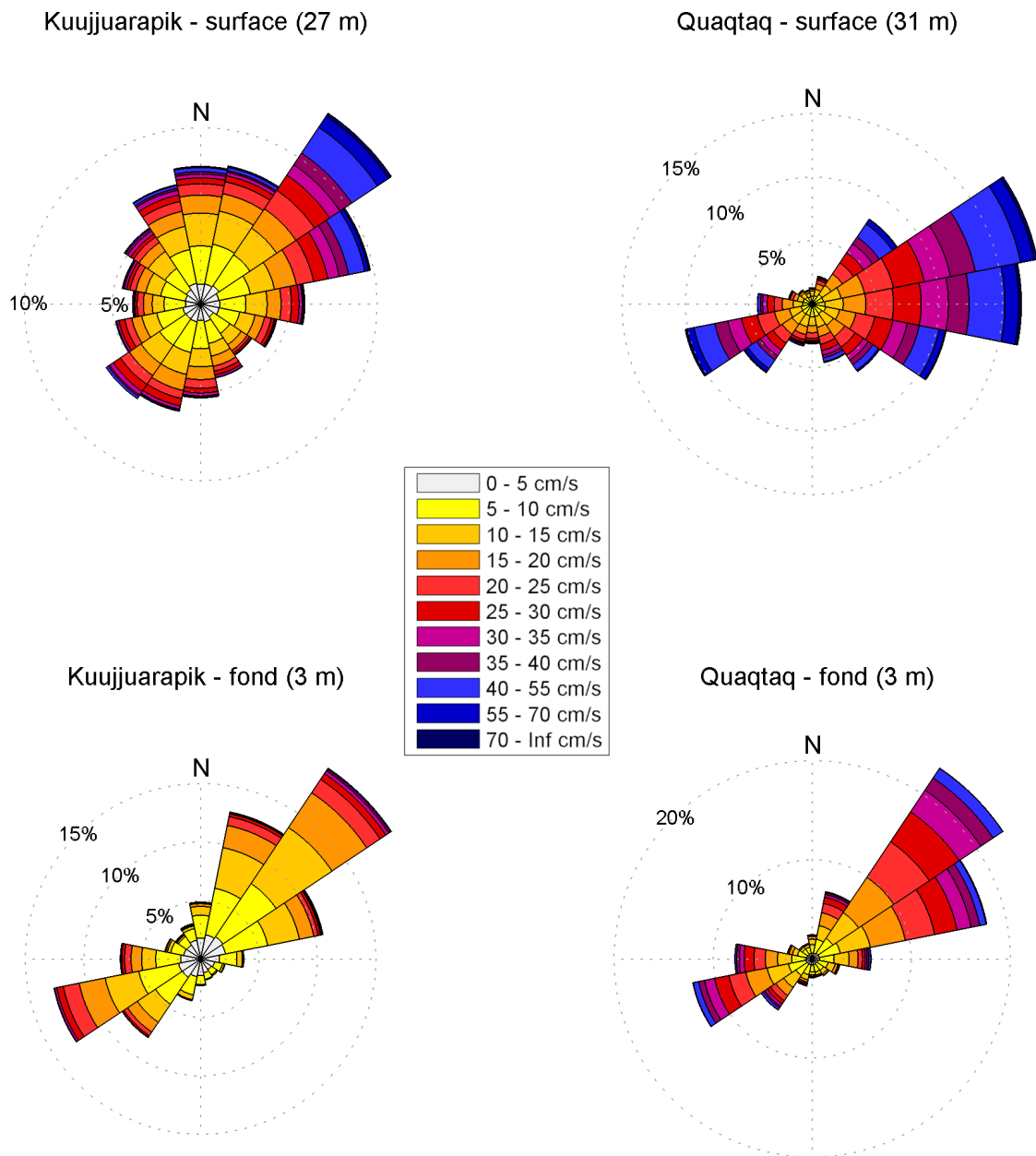


Figure 21 Roses de courants (destination des courants) enregistrés aux deux sites et moyennés sur l'ensemble du projet : (gauche) Kuujjuarapik; (droite) Quaqtaq. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiqués les pourcentages de temps avec les différentes classes de vitesse de courant. La valeur en mètre représente la distance au-dessus du fond.

Nous avons représenté un exemple de série temporelle des profils de courants pour Quaqtac à la Figure 22 et pour Kuujjuarapik à la Figure 23. L'échelle temporelle est sur l'axe horizontal alors que la distance à partir du fond est représenté sur l'axe vertical. L'intensité des courants suit une échelle colorimétrique. Ces périodes spécifiques ont été choisies pour illustrer le signal de la marée, lorsque significatif, et ayant une incidence sur le patron directionnel des courants et/ou leur intensité. À Quaqtac (Figure 22), les courants les plus forts interviennent à la fin de la marée descendante et se propagent jusqu'au fond de la colonne d'eau. Ensuite lorsque la marée remonte, les courants deviennent très faibles et s'orientent vers l'ouest-sud-ouest. À marée haute, les courants sont encore relativement faibles. Lorsque la marée redescend les courants se dirigent vers le nord et s'orientent progressivement vers le nord-est puis l'est. Dans l'ensemble nous observons une rotation des courants dans le sens horaire selon le cycle tidal (voir aussi Figure 24).

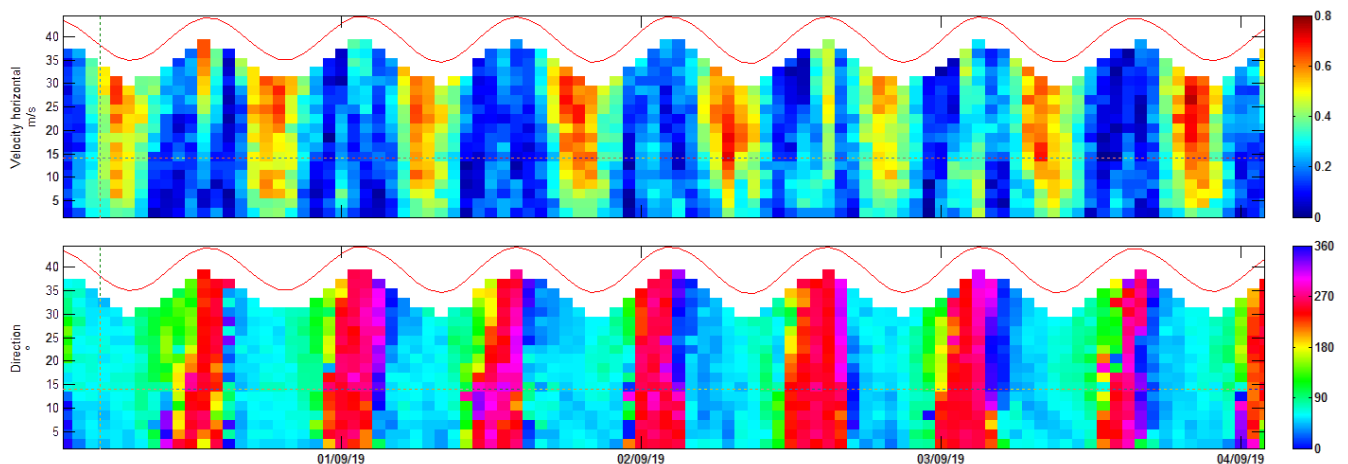


Figure 22. Exemple de profil de vitesse enregistré à Quaqtac au début septembre 2019. Le premier panneau illustre la vitesse horizontale en m/s (l'échelle colorimétrique des vitesses varie de 0 à 80 cm/s) et le panneau du bas la direction de propagation des courants. Le niveau d'eau est indiqué sur chaque panneau par la ligne rouge.

À Kuujjuarapik (Figure 23), tel qu'illustrée précédemment par la rose des courants, l'intensité des courants est très faible quel que soit la profondeur considérée. Sur cette figure, aucun signal de marée n'est détectable à travers une variation de l'intensité des courants. Au niveau de la direction de propagation des courants, une rotation est légèrement visible selon le cycle tidal, mais ce patron est très minoritaire sur l'ensemble des données. À marée haute, les courants sont dirigés vers le nord-nord-est, alors qu'à marée basse les courants s'orientent du sud-est à l'est. Lors de la marée descendante, les courants du fond sont dirigés vers le sud-ouest. La rotation des courants selon le cycle tidal n'est pas régulière ni continue. Les courants semblent osciller dans un sens et dans l'autre de manière chaotique lors de certaines phases de la marée.

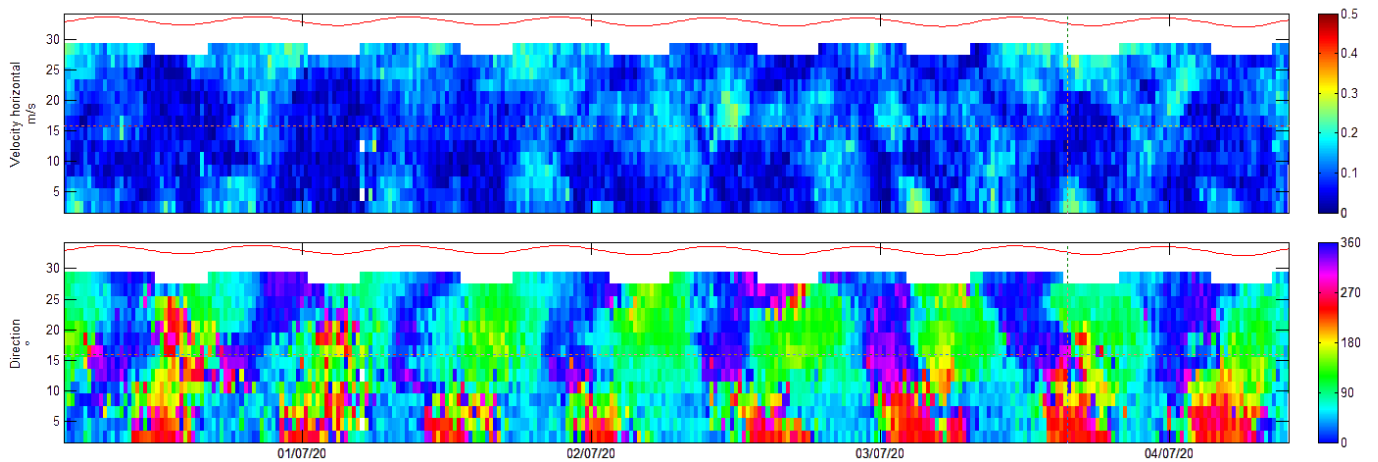


Figure 23. Exemple de profil de vitesse enregistré à Kuujjuarapik au début juillet 2020. Le premier panneau illustre la vitesse horizontale en m/s (l'échelle colorimétrique des vitesses varie de 0 à 50 cm/s) et le panneau du bas la direction de propagation des courants. Le niveau d'eau est indiqué sur chaque panneau par la ligne rouge.

La Figure 24 présente la composition tidale des courants de surface à Quaqtaq et à Kuujjuarapik pour un cycle 12 heures et de 15 jours. Cette composition tidale des courants a été obtenue avec T_TIDE en effectuant en premier une analyse harmonique des courants, puis en calculant la prédiction des courants de marée. Cette méthode utilise les mêmes principes et la même boîte à outils Matlab que pour les prédictions des niveaux d'eau (voir section 4.1). Cette méthode permet d'exclure les courants marins permanents ainsi que la composante aléatoire des courants liée aux phénomènes météorologiques et aux grands tourbillons.

Il s'agit d'un exemple de la variabilité des courants selon le cycle de la marée et ne constitue pas la représentation d'une ellipse de marée. L'échelle colorimétrique, du bleu foncé jusqu'au rouge brun, permet de visualiser le sens de propagation de l'onde de marée M2, soit dans le sens antihoraire à Kuujjuarapik et dans le sens horaire à Quaqtaq. Les lignes en grisée sur les graphiques représentent la trajectoire de la pointe des vecteurs courants sur un cycle morte-eau à vive eau. La trajectoire des courants, proche d'une ellipse, n'est que peu influencée par ce cycle à Quaqtaq (panneau de droite), alors qu'à Kuujjuarapik (panneau de gauche), une oscillation ainsi qu'une variation de l'intensité des courants sont très visibles, reflétant l'influence marquée du cycle morte-eau / vive eau sur l'orientation et l'intensité des courants.

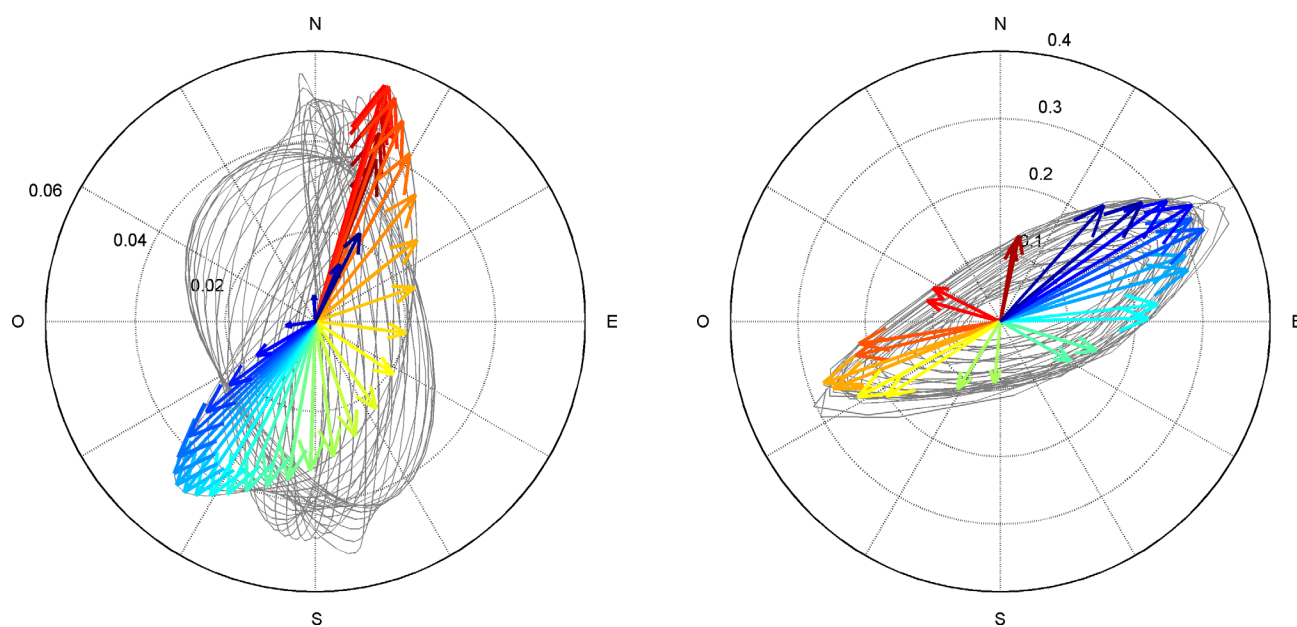


Figure 24. Exemple de courants tidaux de surface observés à Kuujjuarapik (gauche) et à Quaqtq (droite) sur un cycle de marée (~ 12 heures). Les courants sont en m/s. L'échelle colorimétrique, du bleu foncé vers le rouge-brun, est utilisée pour montrer la rotation des courants durant un cycle tidal de 12 heures. La ligne en grisée représente la trajectoire des vecteurs courants sur un cycle de morte-eau / vive-eau (~ 15 jours).

5.3. Données de niveau d'eau

Les niveaux d'eau étaient mesurés à la fois par les marégraphes RBR TGR-2050 et par le capteur de pression des AWACs. Les résultats sont très similaires avec des petites variations dues aux différences de calibration des instruments. Comme les marégraphes TGR-2050 ont l'avantage d'avoir enregistré des mesures toutes les 10 minutes, contre 20 et 60 minutes pour les AWACs de Kuujjuarapik et Quaqaq, respectivement, les niveaux d'eau enregistrés par les capteurs de pression des AWACs ne sont pas présentés dans ce rapport. Par contre, les données sont disponibles dans les fichiers avec les profils de courants.

Les niveaux d'eau mesurés correspondent à la combinaison des marées astronomiques et des surcotes et décotes. La marée est semi-diurne aux deux sites. La baie d'Hudson est microtidale et le marnage varie entre 1,0 et 1,8 m à Kuujjuarapik. Par contre la région de Quaqaq est fortement macrotidale (c'est à proximité de la baie d'Ungava où se produisent les plus fortes marées du monde) et le marnage atteint plus de 9 m en vive-eau et un peu moins de 4 m en morte-eau à Quaqaq.

À Kuujjuarapik, les surcotes et décotes sont relativement importantes. Elles y influencent clairement le niveau d'eau à cause du faible marnage (Figure 25). La plus forte surcote était de 1,36 m le 5 octobre 2018 à 2:10, et lors de cet événement il y a eu le troisième plus haut niveau d'eau (1,69 m) six heures plus tôt (Tableau 9). Le plus haut niveau d'eau mesuré le 17 novembre 2020 (1,72 m) était accompagné d'une surcote de 0,75 m (Tableau 9).

À Quaqaq par contre, les surcotes sont plus faibles, ne dépassant pas 0,53 m (Figure 26). C'est le signal de marée qui domine, et aucun des dix plus hauts niveaux d'eau n'était accompagné d'une surcote significative (Tableau 10).

Les harmoniques de marée utilisées pour déterminer les surcotes sont présentées dans les Tableaux 11 et 12. Elles ont été calculées à partir des niveaux d'eau enregistrés à Kuujjuarapik durant 3 ans et 10 mois ainsi que ceux enregistrés à Quaqaq durant 3 ans et deux mois.

La configuration des marégraphes n'était toutefois pas optimale pour des mesures très précises des niveaux d'eau pour deux raisons. D'une part, la position verticale exacte des marégraphes n'est pas connue et elle variait d'un déploiement à l'autre. Pour pouvoir construire une série temporelle sur plusieurs années, le niveau d'eau moyen observé lors chaque déploiement a été soustrait à la série temporelle de ce déploiement. Mais cette approximation suppose que le niveau marin annuel moyen soit le même chaque année, ce qui n'est pas exactement le cas.

D'autre part, la conversion de la pression de la colonne d'eau en hauteur d'eau nécessite de connaître la masse volumique de l'eau. Elle a été calculée à partir de la température mesurée au fond de l'eau par le marégraphe et une salinité invariable présumée durant l'année. Toutefois, la colonne d'eau peut être stratifiée en température et la salinité varie probablement légèrement au cours du temps. Une erreur de 1 °C de température induirait une erreur de 0,005 % à 0,015 %, soit 1,5 mm à 6 mm de hauteur de colonne d'eau pour une profondeur de 35 m. Une erreur d'une unité de salinité induirait une erreur de 0,08 %, soit 27 mm pour une profondeur de 35 m.

C'est pour éviter ce genre de problèmes que normalement les marégraphes sont installés, d'une part, à une position verticale connue et généralement fixe pour tous les déploiements, et, d'autre part, à une profondeur de 1-2 m sous le niveau de marée basse pour réduire les erreurs dues à une masse volumique de l'eau incorrecte (ces erreurs sont proportionnelles à la hauteur de la colonne d'eau).

Toutefois, une telle configuration des marégraphes n'étaient pas possibles à Kuujjuarapik et à Quaqtaq à cause de l'absence de quai avec une paroi verticale sur laquelle un marégraphe aurait pu être fixé sous le niveau de marée basse, et à cause des épaisseurs importantes de glace de mer en hiver qui imposent de placer les instruments à plus grande profondeur. Néanmoins, la précision estimée de 5 cm à 10 cm est suffisante pour le projet et n'enlève pas l'intérêt scientifique de ces données acquises en régions éloignées dont les conditions océanographiques sont peu documentées.

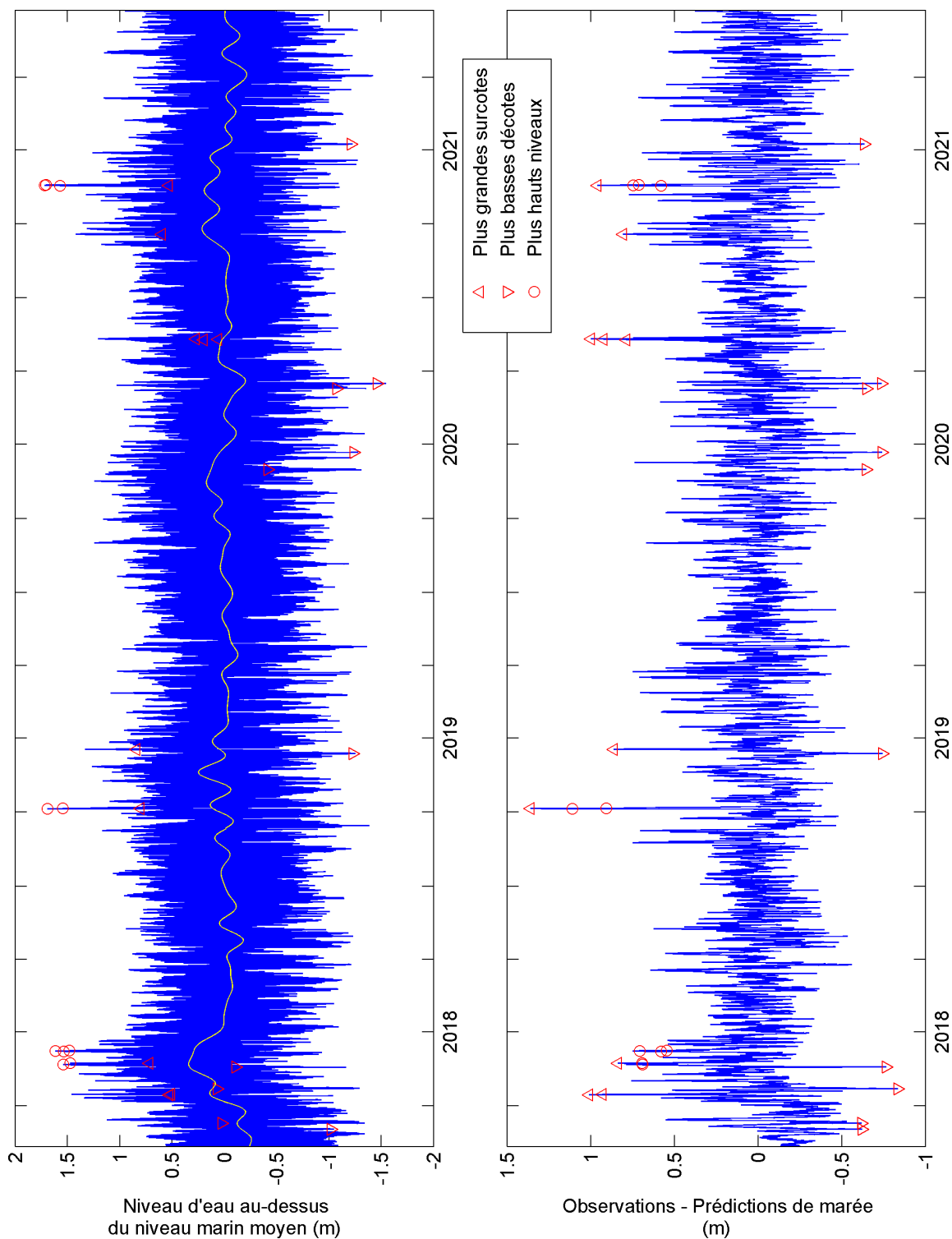


Figure 25. Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote (différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions de marée calculées) mesurés par le TGR-2050 du mouillage de Kuujuarapik d'août 2017 à juin 2021. Des symboles indiquent les dix plus fortes surcotes, décotes et niveaux absolus. Le trait jaune est le niveau d'eau lissé par un filtre passe-bas de 30 jours.

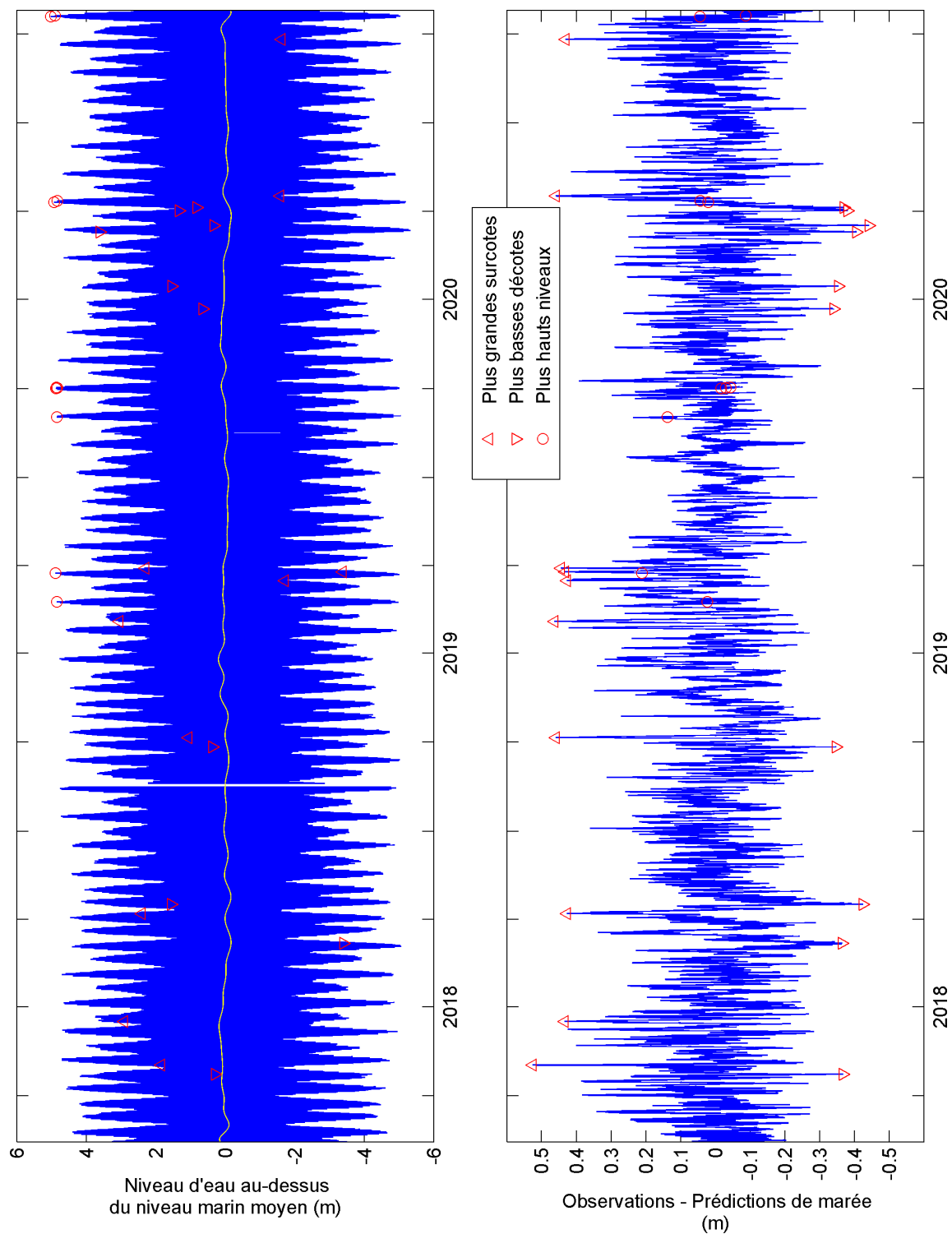


Figure 26. Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote (différence entre le niveau d'eau mesuré et les prédictions de marée calculées) mesurés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Quaqtak d'août 2017 à octobre 2020. Des symboles indiquent les dix plus fortes surcotes, décotes et niveaux absolus. Le trait jaune est le niveau d'eau lissé par un filtre passe-bas de 30 jours.

Tableau 9. Liste des 18 plus fortes surcotes, des 18 plus fortes décotes et des 18 plus hauts niveaux observés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Kuujjuarapik (niveau par rapport au niveau marin moyen observé).

Les plus hauts niveaux				Les plus fortes surcotes			
Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Surcote (m)	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Surcote (m)
1	2020-11-17 13:40	1,717	0,745	1	2018-10-05 02:10	0,804	1,359
2	2020-11-18 02:10	1,705	0,716	2	2017-10-14 13:10	0,526	1,011
3	2018-10-04 19:20	1,690	1,112	3	2020-05-10 22:00	0,272	0,996
4	2017-12-07 15:00	1,614	0,709	4	2020-11-17 09:40	0,532	0,955
5	2020-11-17 01:50	1,57	0,581	5	2017-10-15 00:50	0,508	0,925
6	2018-10-05 08:40	1,544	0,907	6	2020-05-10 09:30	0,061	0,922
7	2017-11-21 02:20	1,542	0,693	7	2018-12-17 16:40	0,840	0,860
8	2017-12-07 02:50	1,535	0,585	8	2017-11-22 11:10	0,608	0,839
9	2017-12-08 03:30	1,484	0,553	9	2020-09-17 16:40	0,599	0,809
10	2017-11-22 15:00	1,473	0,690	10	2017-11-20 22:50	0,647	0,793
11	2017-11-20 14:10	1,468	0,640	11	2020-05-09 21:50	0,197	0,784
12	2017-11-22 03:00	1,464	0,625	12	2020-11-05 22:10	0,165	0,777
13	2017-10-14 20:30	1,462	0,842	13	2017-10-31 16:20	0,430	0,756
14	2020-09-17 13:30	1,418	0,717	14	2018-08-23 14:20	0,728	0,750
15	2017-11-21 14:30	1,406	0,598	15	2020-09-18 08:30	0,038	0,748
16	2020-11-18 14:20	1,397	0,442	16	2019-03-24 09:10	-0,217	0,746
17	2017-11-09 04:00	1,388	0,442	17	2020-05-11 23:00	0,122	0,744
18	2020-09-18 13:10	1,374	0,565	18	2017-12-07 12:40	1,112	0,742

Les plus fortes décotes			
Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Décote (m)
1	2017-10-22 02:20	0,071	-0,828
2	2017-11-18 02:20	-0,109	-0,763
3	2020-03-16 10:30	-1,460	-0,742
4	2018-12-12 11:00	-1,188	-0,740
5	2019-12-21 15:00	-1,237	-0,736
6	2019-11-30 10:40	-1,071	-0,647
7	2020-03-10 05:00	-1,073	-0,646
8	2021-01-08 00:40	-1,213	-0,639
9	2017-09-01 15:50	-1,019	-0,62
10	2017-09-09 04:00	0,023	-0,616
11	2020-03-23 05:10	-1,04	-0,615
12	2020-12-13 18:40	-1,172	-0,601
13	2020-01-13 23:50	-0,565	-0,585
14	2021-04-10 04:50	-1,089	-0,570
15	2018-03-25 08:20	-0,467	-0,558
16	2019-04-24 09:10	-1,292	-0,550
17	2021-04-02 22:40	-1,412	-0,546
18	2021-05-24 03:40	-1,099	-0,534

Tableau 10. Liste des 18 plus fortes surcotes, des 18 plus fortes décotes et des 18 plus hauts niveaux observés par le marégraphe TGR-2050 du mouillage de Quaqtqaq (niveau par rapport au niveau marin moyen observé).

Les plus hauts niveaux				Les plus fortes surcotes			
Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Surcote (m)	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Surcote (m)
1	2020-10-18 13:30	5,021	0,056	1	2017-11-01 08:30	1,85	0,533
2	2020-04-10 02:00	4,923	0,030	2	2020-04-16 14:00	-1,581	0,479
3	2020-10-19 14:20	4,895	-0,073	3	2019-02-02 11:50	3,046	0,467
4	2019-03-24 02:50	4,882	0,215	4	2019-03-29 06:20	2,300	0,463
5	2019-09-30 13:40	4,877	-0,014	5	2020-09-25 01:50	-1,623	0,448
6	2019-10-01 14:20	4,856	-0,036	6	2019-03-25 08:40	-3,374	0,442
7	2019-09-01 01:40	4,843	0,150	7	2017-12-08 03:40	4,342	0,442
8	2019-02-22 14:50	4,840	0,036	8	2019-01-26 20:50	-1,341	0,441
9	2020-04-11 02:40	4,839	0,056	9	2018-10-05 11:40	1,058	0,441
10	2019-10-01 02:00	4,837	-0,025	10	2017-12-16 10:10	2,752	0,435
11	2019-09-30 01:20	4,832	0,058	11	2018-04-06 18:00	2,405	0,424
12	2019-09-02 02:20	4,828	0,006	12	2020-05-11 11:50	-1,078	0,423
13	2019-10-29 13:20	4,802	-0,024	13	2020-09-25 13:20	-1,737	0,422
14	2019-10-30 14:00	4,774	-0,007	14	2019-10-08 15:10	-1,120	0,413
15	2018-12-25 14:30	4,762	0,266	15	2019-03-16 14:30	-1,717	0,410
16	2019-09-01 14:00	4,761	0,092	16	2019-03-17 15:20	-2,027	0,396
17	2020-04-10 14:20	4,760	0,019	17	2017-10-01 07:00	0,839	0,393
18	2020-09-19 14:00	4,759	0,011	18	2017-11-21 15:50	3,091	0,381

Les plus fortes décotes			
Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau (m)	Décote (m)
1	2020-03-16 20:30	0,333	-0,423
2	2018-04-16 15:10	1,550	-0,407
3	2020-04-01 06:50	1,332	-0,398
4	2020-03-10 12:20	3,605	-0,393
5	2017-10-22 23:50	0,287	-0,388
6	2020-04-04 20:00	0,816	-0,379
7	2018-03-06 10:10	-4,454	-0,365
8	2019-12-21 18:10	0,642	-0,352
9	2020-01-14 13:00	1,538	-0,337
10	2018-09-25 15:50	0,371	-0,335
11	2020-02-28 01:00	0,726	-0,323
12	2019-10-24 06:40	0,613	-0,322
13	2020-10-13 07:10	0,411	-0,318
14	2019-10-23 17:40	0,519	-0,313
15	2018-03-28 02:20	-2,011	-0,307
16	2020-01-01 02:10	0,736	-0,300
17	2018-08-31 19:40	-1,669	-0,295
18	2017-09-18 15:30	-1,846	-0,292

Tableau 11. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le mouillage de Kuujjuarapik d'août 2017 à juin 2021, 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	8766.232	0.07825	0.02632	306.447	18.673	8.84
SSA	4382.906	0.05857	0.03143	131.624	29.382	3.47
Q1	26.868	0.00308	0.00203	5.137	42.062	2.30
O1	25.819	0.01733	0.00254	57.937	7.039	46.61
P1	24.066	0.01179	0.00217	94.237	11.350	29.59
S1	24.000	0.00403	0.00291	236.884	44.378	1.92
K1	23.934	0.03811	0.00228	93.881	3.948	279.06
PSI1	23.869	0.00194	0.00193	277.966	69.252	1.02
J1	23.098	0.00291	0.00232	199.885	42.648	1.58
SO1	22.420	0.00229	0.00220	284.545	64.512	1.08
EPS2	13.127	0.00661	0.00481	64.343	36.944	1.88
2N2	12.905	0.01346	0.00458	263.500	22.539	8.64
MU2	12.872	0.02269	0.00429	135.838	11.611	27.95
N2	12.658	0.12046	0.00492	321.138	2.392	598.69
NU2	12.626	0.02531	0.00487	332.802	9.881	27.06
GAM2	12.452	0.00878	0.00460	343.193	30.222	3.65
H1	12.438	0.03800	0.00478	3.162	6.961	63.24
M2	12.421	0.61671	0.00536	9.170	0.425	13216.59
H2	12.403	0.05201	0.00479	318.082	5.382	117.88
MKS2	12.386	0.01011	0.00458	252.301	27.925	4.88
LDA2	12.222	0.01540	0.00540	66.963	16.828	8.15
L2	12.192	0.03139	0.00504	77.778	9.566	38.85
S2	12.000	0.16027	0.00432	88.899	1.692	1378.18
R2	11.984	0.00655	0.00372	239.695	30.819	3.10
K2	11.967	0.04788	0.00500	86.910	6.069	91.54
MO3	8.386	0.00153	0.00049	3.768	18.743	9.83
M3	8.280	0.00090	0.00042	267.123	31.322	4.54
SO3	8.192	0.00115	0.00056	75.857	25.305	4.24
MK3	8.177	0.00128	0.00045	79.601	21.584	7.95
SK3	7.993	0.00083	0.00048	276.725	36.166	2.99
MN4	6.269	0.00863	0.00153	199.512	11.603	31.68
M4	6.210	0.02121	0.00173	247.557	4.845	150.99
SN4	6.160	0.00268	0.00162	247.232	36.739	2.73
MS4	6.103	0.01226	0.00177	323.634	8.062	48.13
MK4	6.095	0.00359	0.00196	341.970	29.215	3.37
2MK5	4.931	0.00097	0.00025	240.003	14.409	15.02
2MN6	4.166	0.00266	0.00035	82.341	6.459	59.06
M6	4.140	0.00447	0.00034	122.767	3.866	169.82
2MS6	4.092	0.00380	0.00033	188.079	5.196	129.14
2MK6	4.089	0.00094	0.00031	193.508	22.963	9.14
2SM6	4.046	0.00091	0.00035	254.140	23.158	6.96
MSK6	4.042	0.00050	0.00037	260.136	47.706	1.89
M8	3.105	0.00033	0.00008	10.795	13.174	17.62

Tableau 12. Composantes de marée significatives selon l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés par le mouillage de Quaqtak d'août 2017 à octobre 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	8766.232	0.06884	0.02206	325.897	17.174	9.74
SSA	4382.906	0.03491	0.02062	160.893	32.464	2.87
Q1	26.868	0.00850	0.00124	90.465	8.721	46.87
RHO1	26.723	0.00269	0.00136	47.367	33.976	3.92
O1	25.819	0.08717	0.00143	115.554	0.840	3735.20
NO1	24.833	0.00717	0.00135	132.209	10.594	28.01
PI1	24.132	0.00202	0.00138	151.112	35.294	2.14
P1	24.066	0.04587	0.00113	155.825	1.595	1645.02
S1	24.000	0.00740	0.00179	308.649	16.225	17.07
K1	23.934	0.14212	0.00118	158.211	0.539	14628.61
PSI1	23.869	0.00360	0.00122	80.326	20.702	8.66
PHI1	23.804	0.00231	0.00130	154.423	34.118	3.13
J1	23.098	0.00506	0.00121	161.654	14.913	17.41
SO1	22.420	0.00221	0.00122	74.678	34.248	3.31
OO1	22.306	0.00218	0.00154	177.448	37.882	2.01
OQ2	13.162	0.00669	0.00334	272.902	24.585	4.02
EPS2	13.127	0.00921	0.00341	274.242	21.409	7.29
2N2	12.905	0.07017	0.00349	301.029	2.745	404.87
MU2	12.872	0.06308	0.00377	303.019	3.516	280.37
N2	12.658	0.59935	0.00407	336.332	0.421	21733.45
NU2	12.626	0.11528	0.00358	341.892	1.955	1037.19
GAM2	12.452	0.01431	0.00385	344.018	12.205	13.86
H1	12.438	0.03188	0.00409	26.186	6.857	60.80
M2	12.421	2.97200	0.00383	7.918	0.069	600987.75
H2	12.403	0.01252	0.00404	312.457	20.127	9.61
LDA2	12.222	0.02969	0.00442	29.084	7.863	45.05
L2	12.192	0.08506	0.00425	41.689	2.801	399.73
T2	12.016	0.04865	0.00418	55.925	4.613	135.46
S2	12.000	0.99477	0.00384	65.047	0.215	66973.71
K2	11.967	0.28622	0.00420	64.434	0.944	4648.74
MSN2	11.786	0.00944	0.00355	272.612	22.742	7.07
ETA2	11.755	0.00996	0.00419	98.344	24.200	5.64
MO3	8.386	0.00223	0.00030	270.571	7.212	56.93
MK3	8.177	0.00231	0.00025	24.436	6.143	85.92
MN4	6.269	0.01489	0.00079	185.068	3.293	359.24
M4	6.210	0.03723	0.00081	220.745	1.270	2109.69
SN4	6.160	0.00484	0.00078	246.038	9.876	38.47
MS4	6.103	0.02480	0.00078	280.620	1.847	1017.31
MK4	6.095	0.00689	0.00096	281.479	7.349	51.10
S4	6.000	0.00430	0.00079	336.839	11.083	29.54
SK4	5.992	0.00253	0.00083	334.087	19.398	9.19
2MN6	4.166	0.00335	0.00035	351.868	6.703	90.66
M6	4.140	0.00695	0.00040	31.655	3.270	301.78
2MS6	4.092	0.00773	0.00039	112.516	3.117	396.25
2MK6	4.089	0.00237	0.00045	120.688	8.779	27.29

6. TRAVAUX DE MODÉLISATION DES VAGUES

6.1. Périodes modélisées

Pour évaluer l'impact des futurs changements climatiques, le principe est généralement de comparer une période du passé récent avec une ou plusieurs périodes du futur. Pour éviter des biais dus au changement de sources de données, ce sont les résultats de la même simulation climatique qui sont utilisés pour le passé récent et le futur. Comme le climat de vague dépend beaucoup de tempêtes extrêmes peu fréquentes, des périodes de 30 ans sont généralement utilisées pour caractériser le climat de vague. Par conséquent, c'est aussi des périodes de 30 ans qui sont utilisées pour évaluer l'impact des changements climatiques.

Pour le présent projet, uniquement la simulation climatique AHJ du MRCC a pu être utilisée comme forçage des conditions de vagues, car la modélisation des vagues de toute la baie d'Hudson avec le modèle WW3, dont les résultats sont nécessaires pour définir les conditions de vagues aux frontières du domaine de SWAN, a été réalisée seulement pour cette simulation climatique.

La simulation climatique régionale AHJ du MRCC est pilotée à ses frontières par un modèle de circulation générale océan-atmosphère (MCGOA), qui intègre le scénario d'évolution de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) SRES A2 (Nakicenovic et al. 2000). Le scénario SRES A2 se situe dans la tranche haute des scénarios d'émission de GES, mais n'est pas le plus pessimiste (IPCC, 2007). Son utilisation est préférée en impact et adaptation car on considère que ceux pouvant s'adapter à ce scénario s'adapteront également à des scénarios plus optimistes. Les courbes des émissions de GES et de température observées entre 1990 et 2007 soutiennent l'utilisation de ce scénario.

Le devis du projet prévoyait aussi la modélisation des vagues avec les conditions des simulations climatiques AEV du MRCC, aussi selon suivant le scénario SRES A2, ainsi que les simulations BBF/BBG, BBH/BBI et BBJ/BBK du MRCC5 suivant le scénario RCP 8.5 (assez similaire avec le scénario SRES A2). Toutefois l'absence de modélisation de vague sur l'ensemble de la baie d'Hudson pour ces simulations climatiques a empêché leur utilisation pour la modélisation côtière avec SWAN.

Il était initialement prévu de modéliser des vagues pour la période 1981-2100, cependant les données de vagues du modèle WW3 ne sont disponibles qu'à partir de 1982. La modélisation a donc été effectuée avec la simulation climatique AHJ pour trois périodes d'environ 30 ans du passé et du futur : 1982-2010 (passé récent), 2041-2070 (futur proche), 2071-2100 (future lointain).

6.2. Description du modèle utilisé

Les travaux de modélisation étaient initialement prévus avec le module *Wave* du logiciel de modélisation Delft3D, mais à la suite de quelques difficultés rencontrées dans les étapes d'implémentation du modèle, il a été décidé d'utiliser le modèle SWAN. Bien que le même

code de calcul tourne derrière les deux modèles, certaines fonctionnalités ne sont pas supportées par l'interface graphique de Delft3D, notamment la possibilité de définir en entrée du modèle des courants et niveaux d'eau qui varient à travers le domaine de modélisation. De plus, à partir de la version 41.31 sortie en mai 2019, SWAN inclut l'atténuation de l'énergie des vagues par la glace de mer, fonctionnalité qui n'était pas supportée auparavant (ni dans Delft3D, ni dans SWAN) et qui aurait dû être ajouté en modifiant le code du modèle.

SWAN (Simulating WAve Nearshore) cycle III version 41.35 est un modèle vent-vague de troisième génération : un modèle pleinement spectral (dans les domaines de fréquence et de direction) qui donne une description bidimensionnelle (2D) de l'état de la mer (Booij et al, 1999). 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). Il intègre également l'action des niveaux d'eau et de courants non-stationnaires sur la transformation des vagues. Il utilise une formulation implicite des schémas de propagation dans les espaces spectraux et géographiques, qui est plus robuste et économique en ressources que les schémas explicites d'autres modèles. Cette implémentation rend possible l'utilisation d'une grille bathymétrique haute résolution nécessaire à la propagation des vagues en domaine côtier. 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). La dissipation de l'énergie par la glace de mer est représentée avec la formulation de Collins et Rogers (2017) selon les résultats d'analyse de Meylan et al. (2014) comme dans le modèle Wavewatch III (Rogers, 2019).

6.3. Configuration du modèle

Pour faire fonctionner un modèle numérique de vagues comme SWAN, il faut (1) établir une grille de calcul à laquelle il faut aussi associer une grille bathymétrique, (2) fournir différents intrants qui varient dans le temps et dans l'espace (vents, niveaux d'eau, courants, glaces, vagues au large), et (3) configurer différents paramètres du modèle.

Grilles de calcul et bathymétries

Les grilles de calcul ont été créées avec le module *RFGRID* de Delft3D. Pour le secteur de Kuujjuarapik, il s'agit d'une grille de calcul curvilinéaire, c'est-à-dire composée de quadrilatères de forme et de taille variées, qui s'étend de la côte à 17 km vers le large et 30 km parallèle à la côte, et qui inclut les sites de mouillages des instruments, les îles Manitounuk et l'île Gillies. La résolution de la grille varie à travers le domaine ; à la côte elle est d'environ 200 m et est plus grossière au large (Figure 27).

Pour le secteur de Quaqtaq, il s'agit de deux grilles rectilignes imbriquées comprenant une grille grossière *Dianabay* (Figure 28) et une grille plus fine *Quaqtaq* (Figure 29). La grille grossière a une résolution de 800 m avec une rotation horaire de 8° par rapport aux axes du système de coordonnées MTM zone 7. Elle englobe l'ensemble de la baie de Diana (31.2×39.2 km). Cette grille comprend 1280 points actifs. La grille plus fine a une

résolution de 100 m et est centrée sur Quaqtuaq. Elle s'étend de la côte jusqu'à 4 km vers le large et inclut les sites de mouillage des instruments et l'île Hearn. Cette grille comprend 3278 points actifs, dont au moins 167 peuvent émerger à marée basse. La modélisation avec la grille fine *Quaqtuaq* inclut aussi un obstacle similaire à une digue pour représenter l'effet d'une série d'îlots au sud de l'anse de la Mission (*Mission Cove*, Figure 29).

Les grilles bathymétriques ont été construites avec le module *QUICKIN* de Delft3D. Deux sources de données bathymétriques sont utilisées, les nouveaux relevés effectués par le CIDCO en 2017 dans le cadre du projet et des données du Service Hydrographique du Canada (SHC) obtenue via Simon Senneville (projet CC05.1).

Vents

Pour la simulation du passé récent et du futur, c'est les résultats de la simulation climatique AHJ du Modèle régional canadien du Climat (MRCC), basée sur le scénario climatique A2. Ces données de vent ont été obtenues par l'entremise de Simon Senneville.

Vagues au large

Les conditions de vagues aux frontières, c'est-à-dire pour les vagues venant du large, ont été obtenues des sorties de simulation du modèle Wavewatch III (WW3) de toute la baie d'Hudson à 10 km de résolution réalisé par Caroline Sévigny et Dany Dumont pour le programme d'Alain Mailhot "*Providing climate scenarios for the Canadian Arctic with improved post-processing methods*" (Sévigny et al., 2017). Ces simulations de données de vagues sont alimentées avec la simulation climatique AHJ du MRCC. Les vagues aux frontières sont spécifiées avec la hauteur significative, la période moyenne T_{01} et la direction moyenne, en assumant un spectre générique de type JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), ce qui correspond à une mer en développement.

Niveaux d'eau, courants et glaces

Les niveaux d'eau, les courants et les glaces proviennent des sous-domaines à 2 km de résolution du modèle océanique MOR-HB simulant marées, courants, températures, salinités et glace, que Simon Senneville a réalisés pour le projet CC05.1 (Senneville, 2018). Pour la simulation du passé récent et du futur, ce sont les résultats du modèle MOR-HB alimenté avec la simulation climatique AHJ du MRCC, qui sont utilisés.

Paramètres et opération de SWAN

Pour la modélisation, SWAN a calculé l'énergie des vagues dans 36 directions (soit par secteur de 10°) et dans 25 intervalles de fréquence entre 0,05 Hz et 1 Hz. La diffraction des vagues a été incluse dans la modélisation de SWAN.

Le modèle SWAN a été installé sur le serveur de calcul Mingan de l'ISMER. Comme les vagues ont le temps de traverser tout le domaine de la grille de calcul en moins d'une heure, le modèle est opéré en mode quasi-stationnaire : il est exécuté pour chaque pas de temps (c'est-à-dire chaque heure) avec des conditions stationnaires de vent, vagues, niveau d'eau, courant et glace correspondantes. Le calcul se poursuit jusqu'à la convergence, c'est-à-dire quand la différence des hauteurs de vague en chaque point de la grille entre deux

itérations successives est suffisamment petite. Lorsque le modèle a convergé, les sorties sont sauvegardées, les données de vagues, vent, courant et niveau d'eau sont incrémentées au pas de temps suivant et le modèle se relance automatiquement.

Pour le secteur Quaqtq, SWAN a été en premier exécuté sur la grille grossière *Dianabay* en utilisant comme conditions aux limites les vagues du modèle WaveWatch III et sauvegardant les spectres directionnels des vagues sur les 20 points de grilles qui forment le pourtour de la grille fine *Quaqtq*. Ensuite SWAN a été exécuté sur cette grille fine en utilisant comme conditions aux limites les spectres directionnels enregistrés.

Les principaux résultats de SWAN sont la hauteur significative (H_s), la direction de propagation (Dir), et la période des vagues (T_{02}), qui sont calculées pour chaque heure. Ces sorties de modèle peuvent être obtenues pour des points précis du domaine de modélisation mais aussi pour l'ensemble de la grille.

Pour le secteur Kuujjuarapik, les sorties ont été sauvegardées pour 6 points le long de la côte et 5 points plus au large. Toutefois, pour éviter les redondances seulement les trois points les plus marquants sont présentés et analysés dans ce rapport : le site de l'*AWAC* et les sites des houlographes côtiers Kuujjuarapik-A (aussi appelé *hA*) et Kuujjuarapik-B (aussi appelé *hB*, Figure 27).

Pour le secteur Quaqtq, les sorties ont été sauvegardées pour 19 points, à savoir le site de l'*AWAC* (*qAWAC*), le site du houlographe RBR (*qRBR*), 9 points près de la côte (*Coast-1* à *Coast-9*), 7 points à 1-2 km devant la côte (*Mid-1* à *Mid-7*) et un point au large de l'île Hearn (*Off*, Figure 29). Toutefois, seulement les sorties des points *qOff* (profondeur moyenne 200 m), *qMid-4* (profondeur moyenne 41 m) et *qCoast-5* (profondeur moyenne 15 m) sont présentés dans ce rapport.

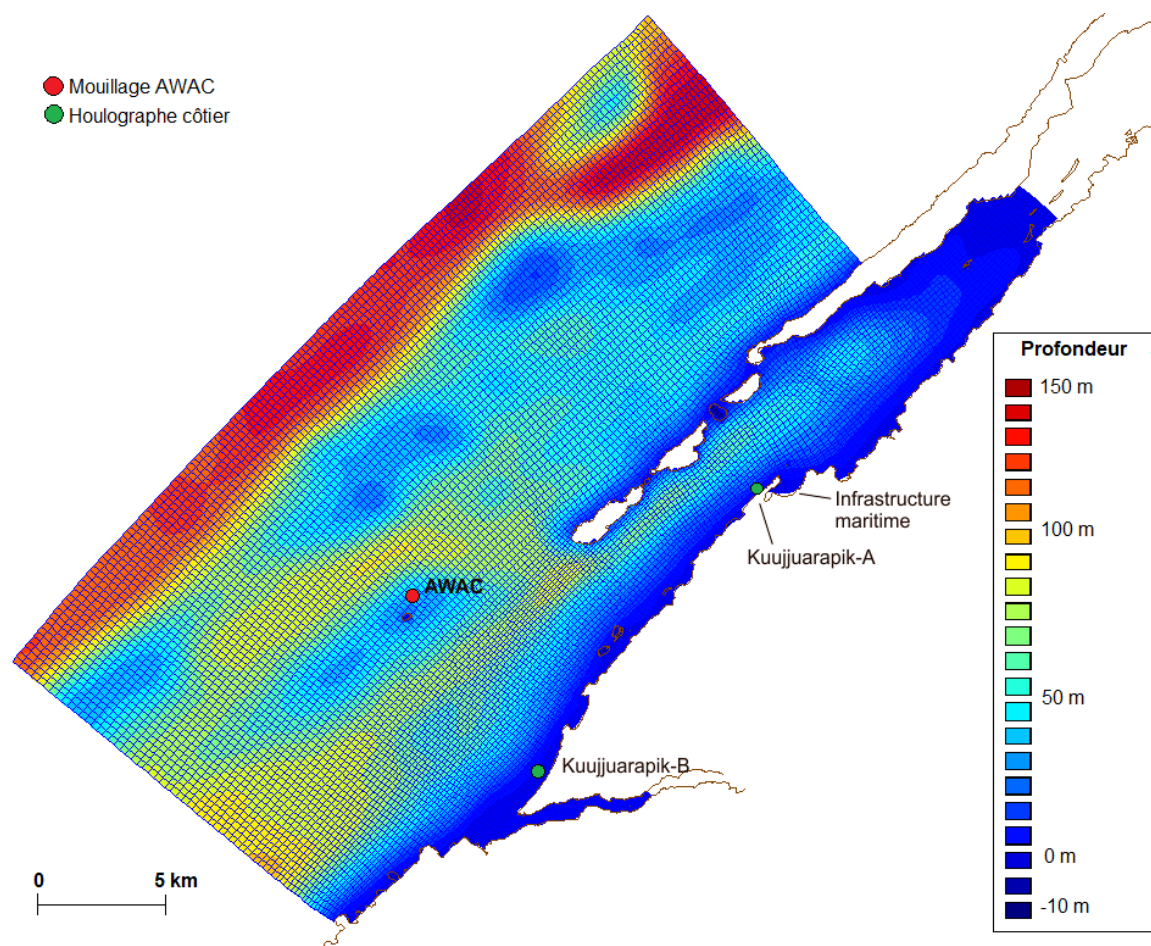


Figure 27. Grille de calcul avec bathymétrie du secteur de Kuujjuarapik avec les positions mouillage AWAC (point rouge) et des houlographes côtiers (points verts).

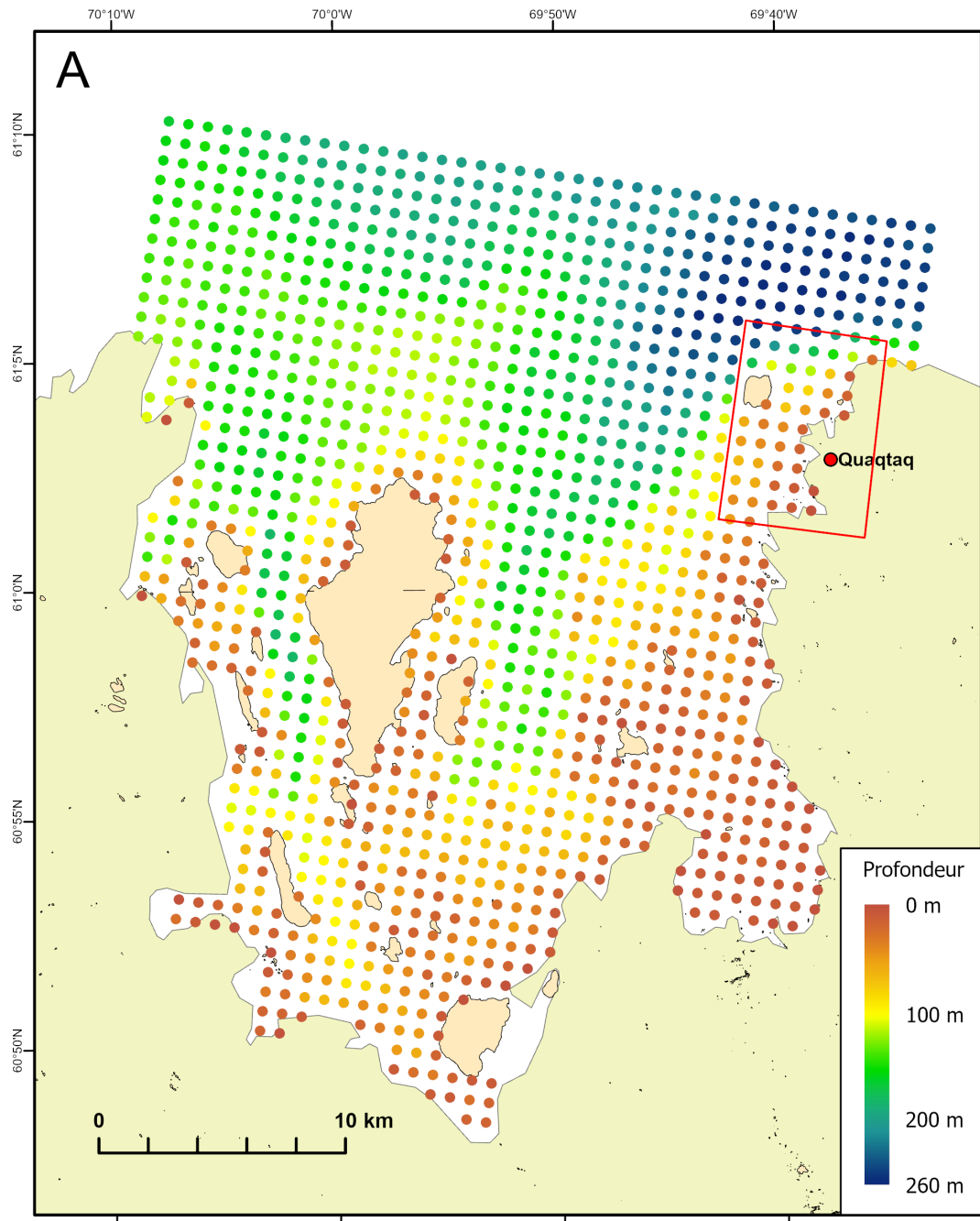


Figure 28. Grille de calcul grossière "Dianabay" du secteur de Quaqtaq avec la bathymétrie de chaque point de la grille. Le rectangle rouge indique la position de la position de la grille fine "Quaqtaq".

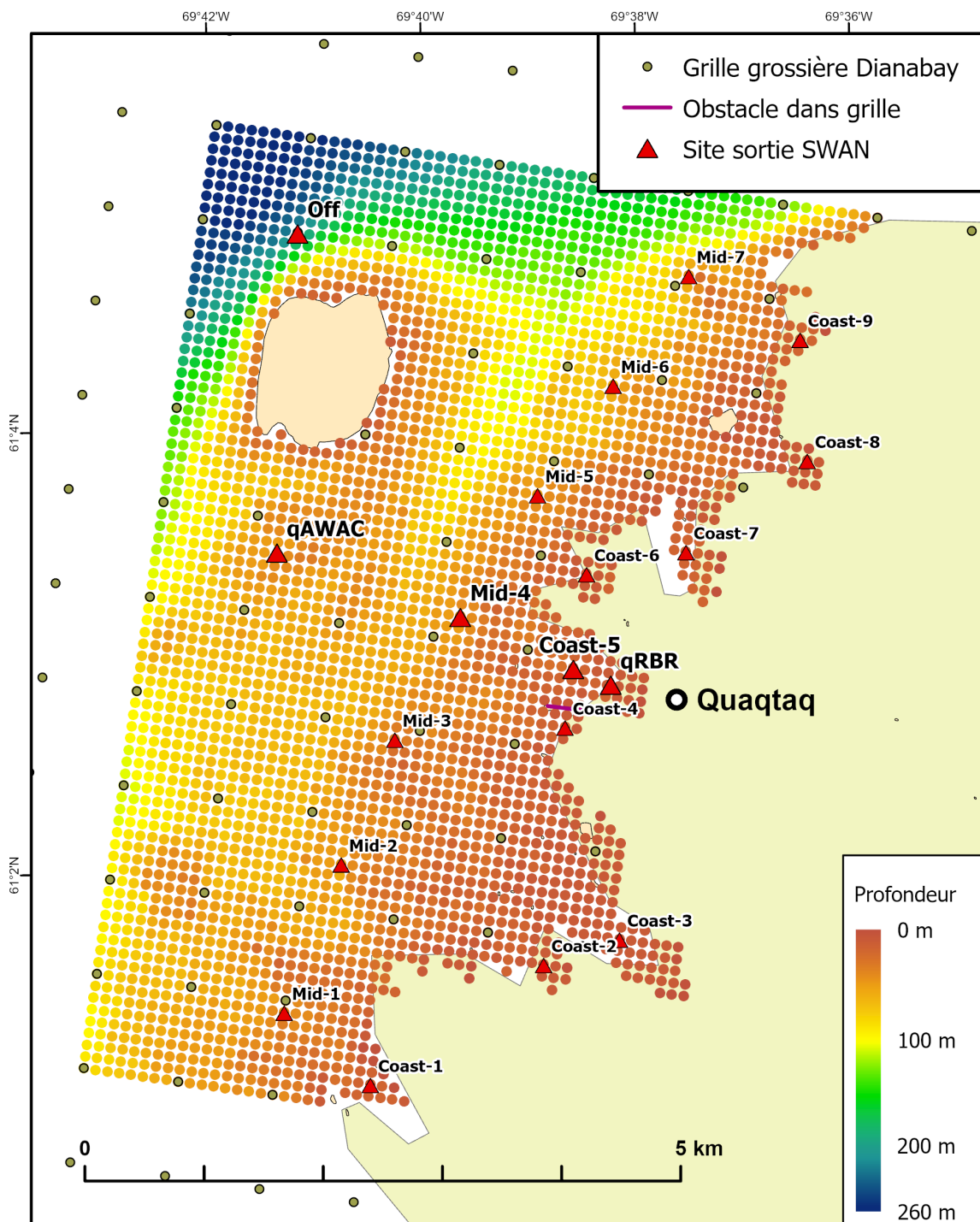


Figure 29. Grille de calcul fine "Quaqtak" du secteur de Quaqtak avec la bathymétrie de chaque point de la grille. Les points de la grille grossières "Dianabay" et la position des sorties sauvegardées du modèle sont aussi indiquées.

6.4. Validation du modèle

6.4.1. Méthode de validation

La méthode conventionnelle de validation d'un modèle de vague consiste à comparer les résultats du modèle avec des mesures réelles. Initialement, il était prévu de comparer d'une part les résultats de SWAN alimenté par le modèle WW3 pour les vagues venant du large et d'autre part les données mesurées par l'AWAC et les houlographes côtiers pour la période durant laquelle les trois mouillages étaient à l'eau en même temps, soit du 12/08/2018 au 09/09/2018. Toutefois, uniquement la simulation climatique AHJ a été utilisée avec le modèle WW3. Comme la personne ayant réalisé la modélisation avec WW3 (Caroline Sévigny) pour le projet "*Providing climate scenarios for the Canadian Arctic with improved post-processing methods*" est partie, il n'a pas été possible d'obtenir les vagues du large modélisées par WW3 pour les conditions réelles de l'année 2018.

Une méthode alternative de validation est de réduire le domaine de modélisation de manière à pouvoir définir comme conditions aux frontières les données mesurées par l'AWAC, et ainsi modéliser la propagation des vagues de la position de l'AWAC jusqu'à la côte. Les mesures d'un houlographe côtier peuvent alors être comparées aux résultats de cette modélisation.

Méthode utilisée pour Quaqtq

Cette méthode a été appliquée à Quaqtq, où la grille fine *Quaqtq* a été réduite avec une limite Ouest au niveau de l'AWAC et une limite Nord au milieu de l'île Hearn, tout en gardant la même résolution de 100 m (Grille *Quaqtq-Validation*, Figure 30). Les vagues mesurées par l'AWAC (H_{m0} , T_{01} , Dir_{Peak} , Dir_{Spread}) ont été utilisées comme conditions aux frontières de cette grille. Les résultats des simulations ont été comparés avec les mesures du houlographe côtier (RBR TWR-2050) placé devant l'infrastructure maritime principale de Quaqtq.

La validation couvre la période libre de glace du 18 août au 6 novembre 2018. Le niveau d'eau est donné par le marégraphe installé sur le mouillage de l'AWAC. Le niveau d'eau est spatialement constant, ce qui n'est pas un problème car la simulation des niveaux d'eau par modèle océanique MOR-HB produit seulement des variations spatiales de 0 à 0.03 m sur le domaine de la grille *Quaqtq-Validation*. Le vent est obtenu du modèle météorologique de réanalyse ERA5 (Hersbach et al., 2020) avec le point de grille 61°N 69,75°W situé dans la baie de Diana à 8 km au sud-ouest de Quaqtq. Le vent est spatialement constant car la résolution spatiale du modèle ERA5 (28×14 km) ne lui permet pas de tenir compte de la géomorphologie de l'île Hearn et de la côte à l'échelle de la grille *Quaqtq-Validation* (6,0×4,5 km). La validation est effectuée sans donnée de courants, car les sorties du modèle MOR-HB ne sont pas disponibles pour l'année 2018.

À noter que le houlographe côtier de Quaqtq était environ 2 m au-dessus du niveau des marées les plus basses, signifiant qu'il était à sec à marée basse lors des marées de vive eau. De plus, comme il n'est pas exactement sur un point de la grille *Quaqtq-Validation*, SWAN produit des résultats interpolés pour le site du houlographe seulement si les points autour du site sont mouillés.

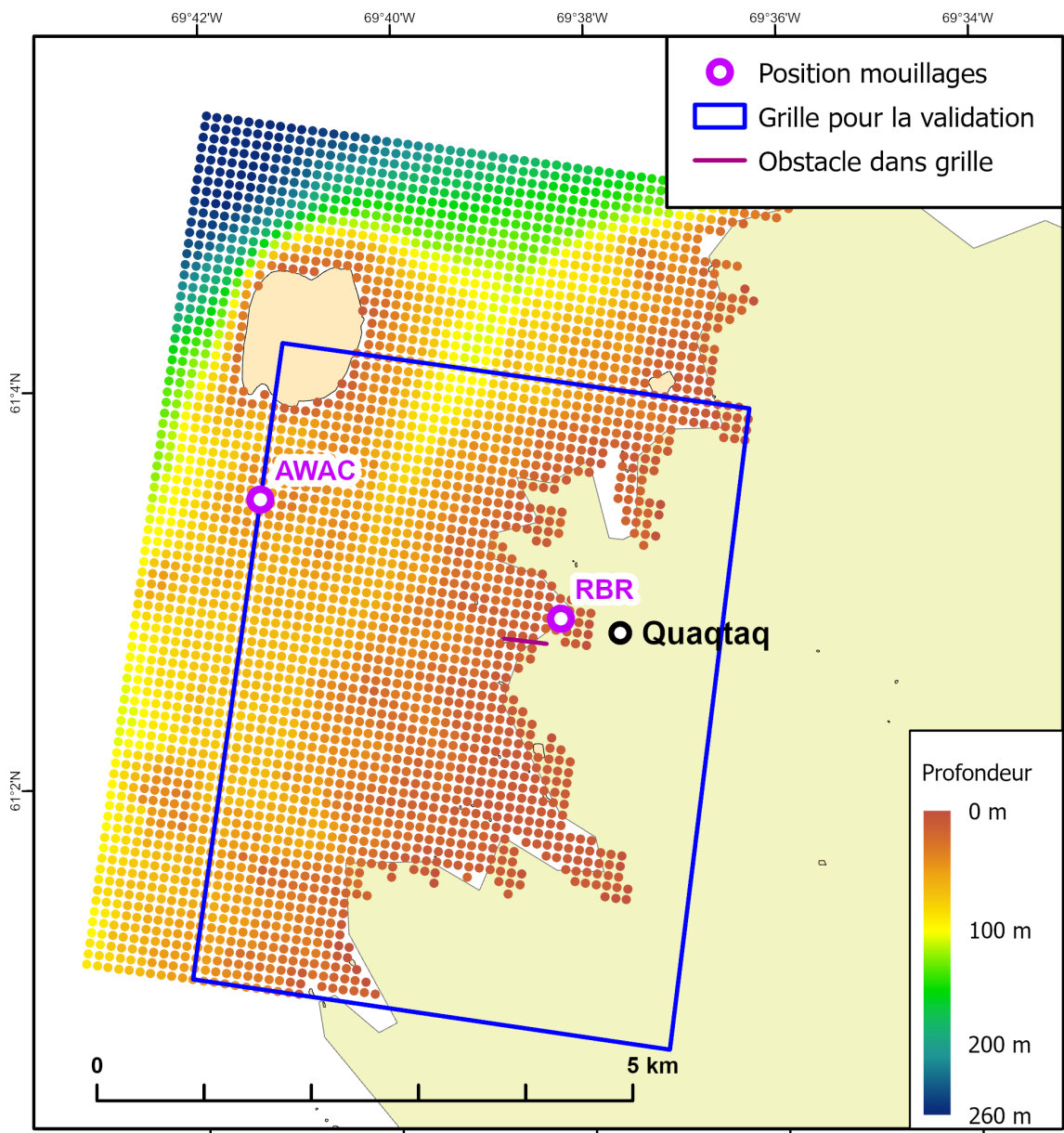


Figure 30. Limite de la grille de validation à Quaqtaq (Quaqtaq-Validation, rectangle bleu) comparé à la grille fine standard fine "Quaqtaq", ainsi que les positions du mouillage AWAC, qui définit les conditions aux frontières de la grille de validation, et du mouillage RBR, qui est le point de validation.

Méthode utilisée pour Kuujjuarapik

Cependant à Kuujjuarapik, le problème rencontré avec l'AWAC lors de cette première année de déploiement (instrument très incliné avec pour conséquence des hauteurs de vagues biaisées, des périodes non utilisables et des directions invalides) ne permet pas d'utiliser les données pour valider le modèle par cette méthode.

En l'absence de données réelles, une autre méthode de validation a donc été mise en place. Afin de valider le modèle SWAN implémenté pour le secteur de Kuujjuarapik, les résultats des simulations ont été comparés avec les résultats issus du modèle WW3 pour une période libre de glaces du 01/08/1993 au 01/12/1993 (4 mois) avec le forçage de la simulation climatique AHJ. Pour ce faire, des sorties de SWAN ont été générées pour 60 points autour de certains points de grille de WW3 situés à l'intérieur du domaine de modélisation (Figure 31) :

- Près de l'île Gillies (Figure 31, encadré A);
- Près de la côte proche de l'aéroport (Figure 31, encadré B);
- Au milieu du domaine, devant la dernière île Manitounuk (Figure 31, encadré C).

Les sorties de SWAN ont ensuite été moyennées pour chacun des trois points A, B et C, afin d'obtenir une résolution spatiale similaire entre WW3 et SWAN.

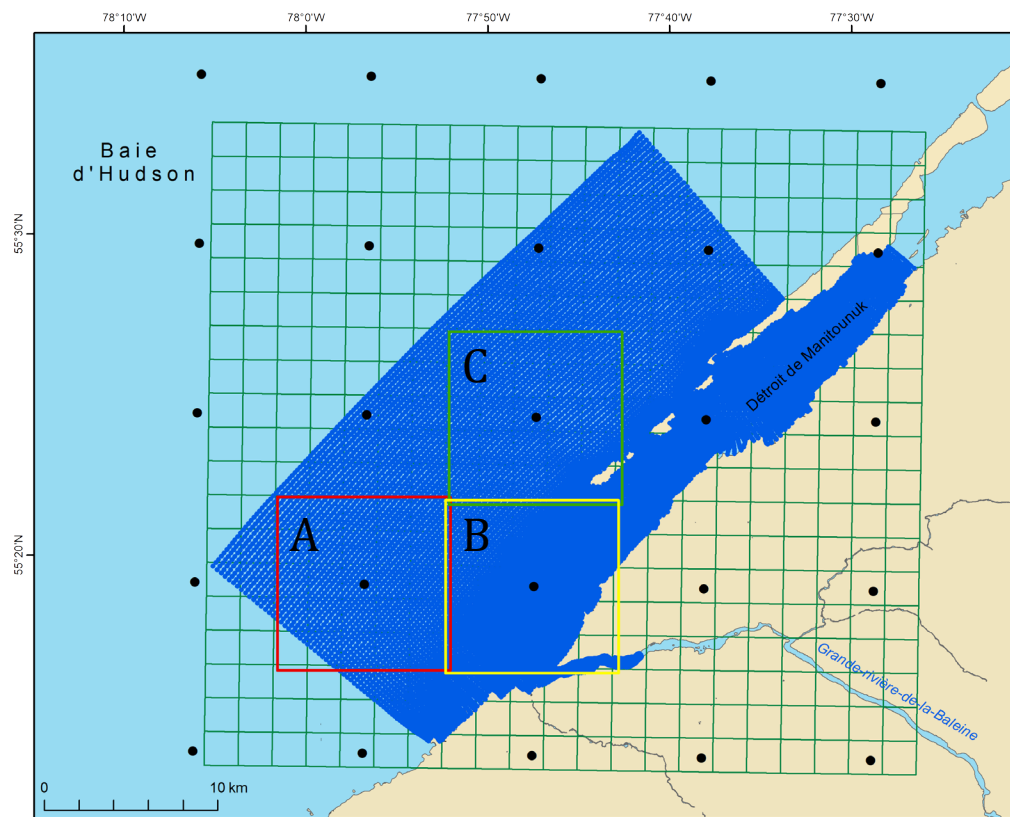


Figure 31. Points de sortie de modélisation comparés entre SWAN et WW3 à Kuujjuarapik. La grille bleue correspond à la grille de calcul curvilinéaire créée pour le secteur de Kuujjuarapik dans le cadre de ce projet. Les points noirs correspondent aux points du modèle WW3.

6.4.2. Paramètres statistiques de validation

Les hauteurs significatives, les périodes et les directions moyennes des vagues ont été comparées entre SWAN et WW3. En plus des comparaisons visuelles sur les graphiques, les indicateurs statistiques standards suivants ont été utilisés pour quantifier la corrélation entre les vagues prédites par SWAN (h_i) et les vagues du modèle WW3 (m_i , Neumeier et al., 2013).

Le **biais** ou moyenne des erreurs indique l'écart moyen entre valeurs prédites par SWAN et les sorties de WW3, c'est-à-dire la tendance de SWAN 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 vagues de références afin de pouvoir comparer la performance à plusieurs sites ayant des hauteurs de vagues différentes :

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

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 SWAN sous-estime ($a < 1$) ou surestime ($a > 1$) les grandes vagues, donc évalue particulièrement les performances lors de tempêtes.

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.

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

Avec :

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

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

$$\hat{SI} = \left(1 - \frac{\sigma_d}{\bar{m}}\right)$$

$$m_{RMS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m^2}{n}\right)^{0.5}$$

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

6.4.3. Résultats de la validation pour Kuujjuarapik

Globalement les résultats des simulations par SWAN et WW3 sont très proches (Figures 32 à 34). Le modèle SWAN reproduit bien les variations temporelles des hauteurs de vague, bien que l'estimation de SWAN pour les hauteurs de vague soit légèrement plus petite que celles calculées avec le modèle WW3. Pour la zone A, le biais n'est que de -0,06 m en moyenne, mais la pente de la régression linéaire est de 0,81 et les vagues de tempêtes sont sous-estimées de 0,7 m (Figure 34). Les différences entre SWAN et WW3 sont plus marquées près de la côte dans la zone B, avec un biais moyen de -0,11 m, mais les vagues des tempêtes sont encore sous-estimées de 0,7 m. Toutefois, ces différences peuvent s'expliquer par la résolution trop grossière du modèle WW3 (10 km de résolution pour WW3, et 150 m pour SWAN) pour bien représenter les variations bathymétriques avec plusieurs hauts-fonds (Figure 27) et pour résoudre de façon fiable ce qu'il se passe près de la côte. En particulier, le biais négatif des hauteurs de vague suggère que le modèle WW3 ne représente pas assez bien la dissipation par la friction sur le fond, probablement car la bathymétrie n'est pas assez précise.

Le paramètre RMSE, qui donne plus de poids aux erreurs extrêmes, ainsi que le critère de performance global, ont des valeurs très raisonnables pour les hauteurs des vagues (Figure 34) en comparaison avec les validations effectuées pour d'autres projets de modélisation des vagues (Neumeier et al., 2013).

Le modèle SWAN reproduit très bien les périodes et les directions de vague pour les événements avec des vagues de plus de 1 m, c'est-à-dire quand les vagues provenant du large sont dominantes. Par contre, pour les vagues plus petites "de beau temps", SWAN génère souvent des périodes de vague plus courtes (Figure 32), c'est-à-dire un spectre dominé par les vagues générés localement par le vent sur des courtes distances. Dans ces conditions les directions diffèrent parfois aussi considérablement entre les deux modèles. Ces différences peuvent être expliquées par la différence de résolution des grilles bathymétriques. La résolution de 10 km de WW3 n'est pas suffisante pour représenter correctement des vagues générées localement sur des distances de 5-20 km.

Bien que cette méthode de validation entre deux modèles de résolutions très différentes ne soit pas optimale (la validation avec des observation n'était pas possible à Kuujjuarapik, cf. section 6.4.1), les résultats de comparaison des deux modèles sont tout à fait acceptables (Figure 34). Cette validation n'a pas inclus de période avec une couverture partielle de glace de mer, ce qui aurait pourtant été intéressant, car les données de glace de mer utilisées par

WW3 (modèle de glace à résolution 10 km) étaient différentes des données utilisées pour SWAN (modèle local à 400 m de résolution).

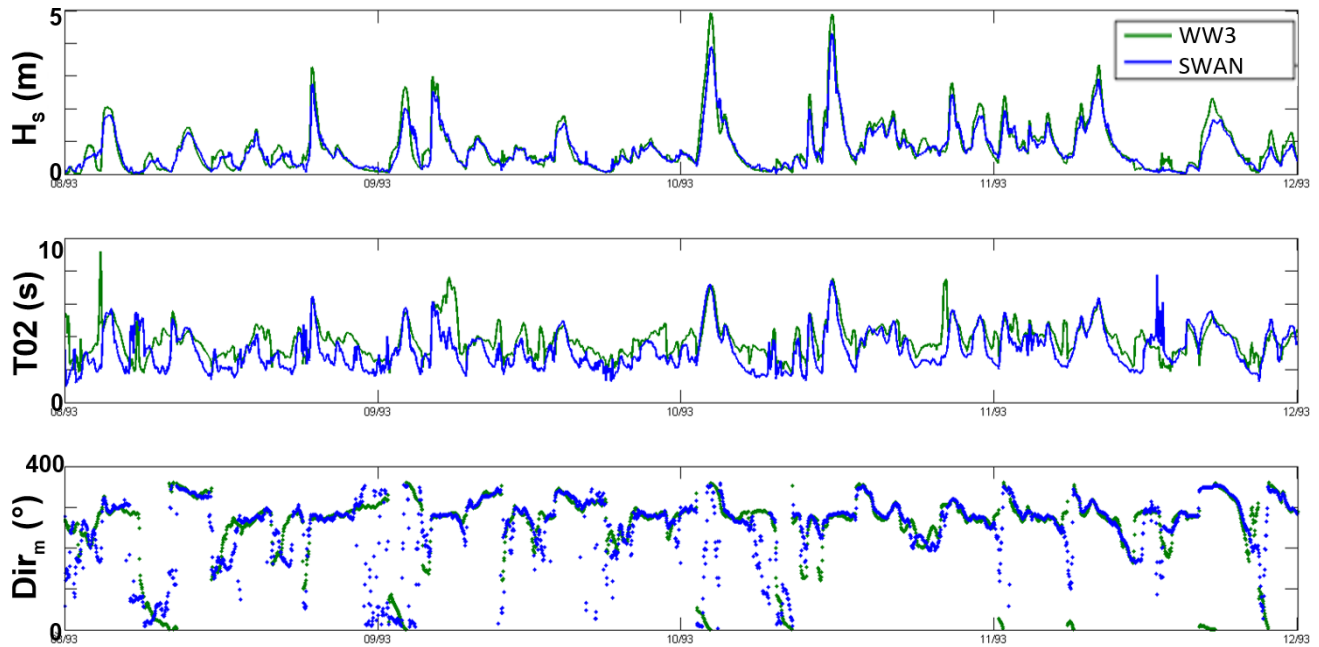


Figure 32. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s), périodes (T_{02}) et direction (Dir_m) des vagues pour la zone A (près de l'île Gillies) entre SWAN et WW3 pour la validation du modèle de Kuujjuarapik.

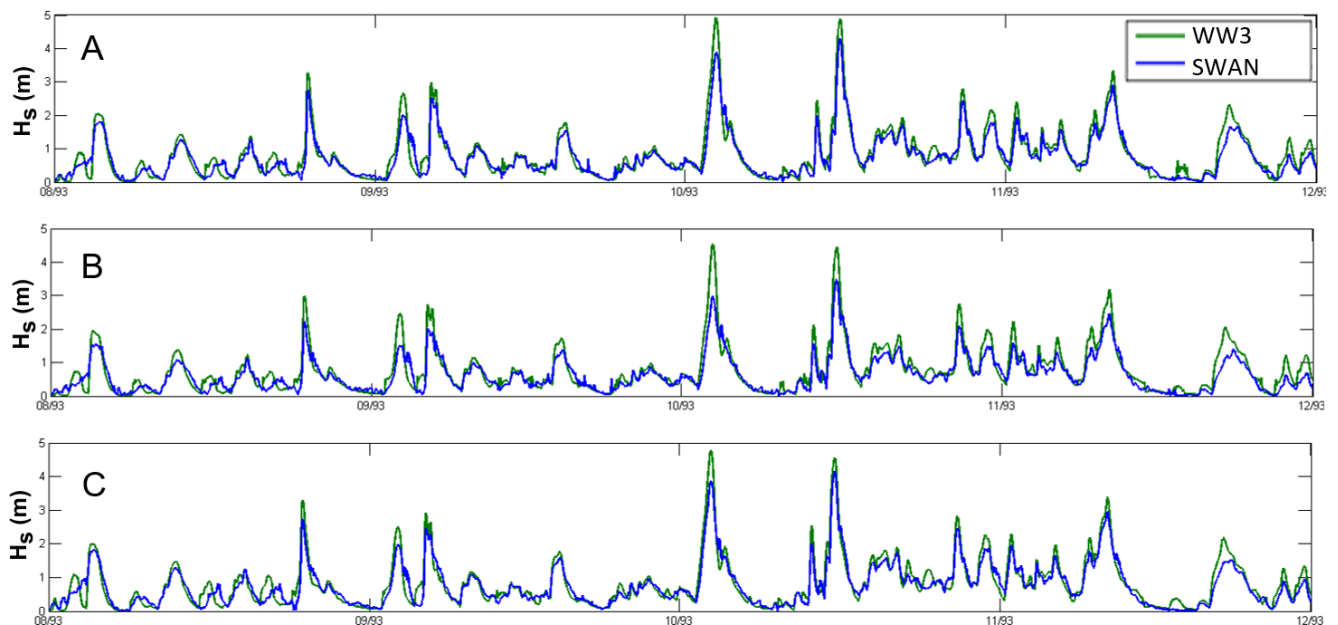


Figure 33. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s) des zones A, B et C entre SWAN et WW3 pour la validation du modèle de Kuujjuarapik.

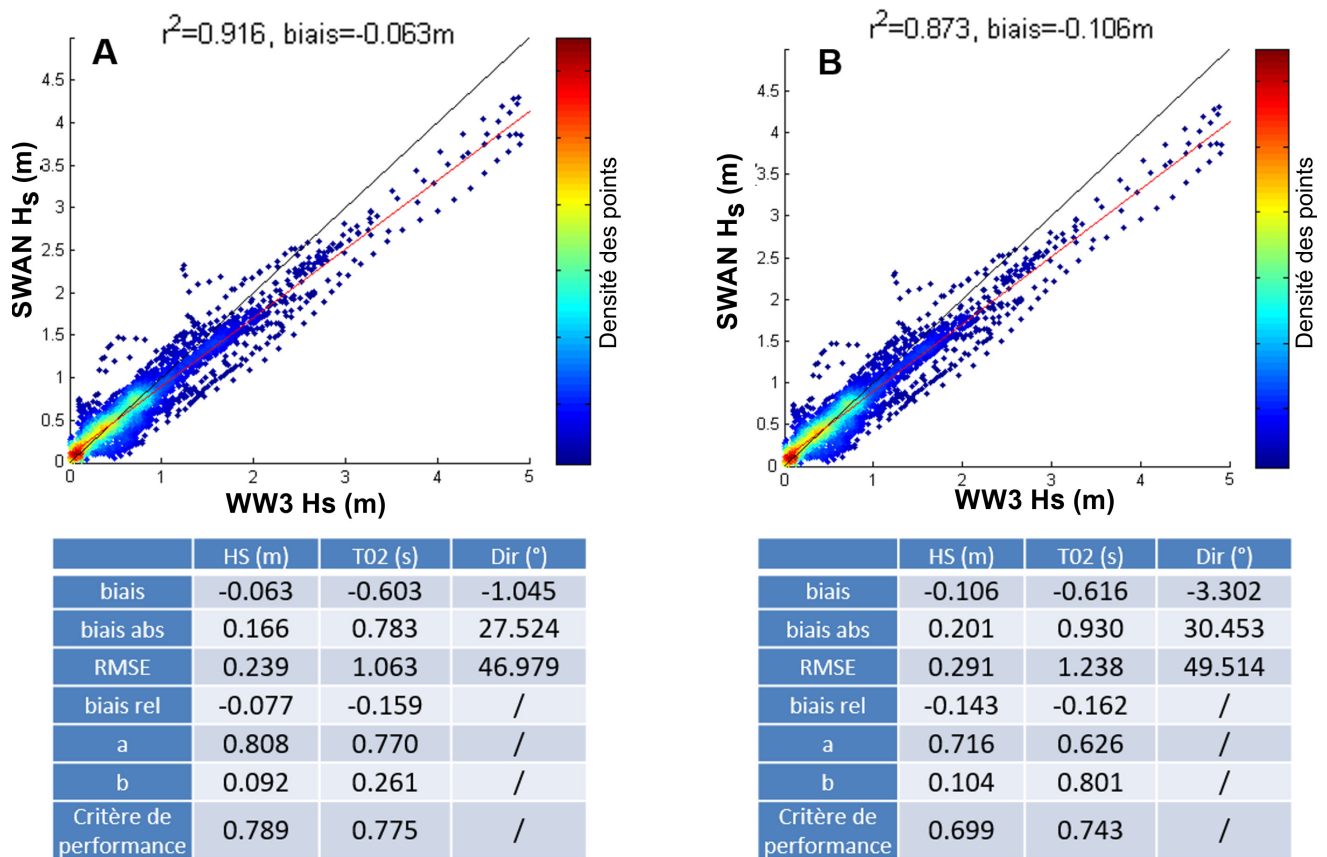


Figure 34. Analyses statistiques de la comparaison des résultats de modélisation entre SWAN et WW3 des zones A et B pour la validation du modèle de Kuujjuarapik.

6.4.4. Résultat de la validation pour Quaqtak

Globalement la modélisation par SWAN des vagues au site du mouillage côtier est relativement proche des mesures par le houlographe RBR TWR-2050 de ce mouillage pour les hauteurs des vagues, alors que les résultats sont nettement moins bons pour les périodes (Figures 35 et 36). À noter que le houlographe du mouillage côtier était non-directionnel, signifiant qu'il n'est pas possible de valider les directions des vagues de SWAN.

Le modèle SWAN reproduit bien les variations temporelles des hauteurs de vagues (Figure 35), bien que l'estimation de SWAN pour les hauteurs de vague soit plus grande que celles mesurées par le mouillage, avec un biais de 0,09 m en moyenne. La pente de la régression de 1,20 avec une petite ordonnée à l'origine (0,04 m) indique que SWAN surestime les hauteurs de vagues (Figure 36). La surestimation (biais relatif) est de 37 % en moyenne, et de 25 % pour les vagues de plus de 0,5 m. Le paramètre RMSE, qui donne plus de poids aux erreurs extrêmes, ainsi que le critère de performance global, ont des valeurs moins bonnes que pour la validation à Kuujjuarapik, mais elles restent encore raisonnables.

Il faut noter qu'à cause des très grandes marées (>9 m) et des capacités techniques du houlographe RBR TWR-2050, celui-ci n'aurait pas enregistré de données fiables de vagues à marée haute s'il avait été placé en-dessous du niveau de marée basse de vive eau. Par

conséquent, le site du mouillage côtier émerge à certain moment et la hauteur des vagues est fortement influencée par le niveau de la marée (Figure 35). Dans ce contexte, une résolution plus fine que celle de la grille *Quaqtaq-Validation* (100 m) pourrait aider pour bien représenter les vagues dans la zone intertidale et pour bien simuler la propagation des vagues venant du nord-est et diffractant pour pénétrer dans l'anse de la Mission.

Le modèle SWAN reproduit très mal les périodes des vagues, sous-estimant les périodes de vagues avec un biais moyen de -1,6 s (Figure 35). De plus, le coefficient de détermination R^2 est très faible ($R^2 = 0,10$). Toutefois le biais s'améliore à -0,9 s pour les vagues de plus de 0,5 m de hauteur ($R^2 = 0,41$). Deux raisons peuvent expliquer cette mauvaise performance : (1) SWAN pourrait surestimer l'atténuation des vagues de longue période par friction sur le fond et surestimer le transfert d'énergie vers les hautes fréquences lors des interactions vague-vague (triads); (2) les périodes des vagues calculées pour le houlographe RBR à partir des données de pression pourrait être surestimée, ce qui peut arriver lorsque l'équation 2 (section 4.4) est appliquée à des données de pression de plus de 5 à 10 m de profondeur.

En résumé, SWAN surestime la hauteur des vagues comparé aux mesures du mouillage d'environ 25%. Les périodes des vagues produites par SWAN ne sont pas fiables pour les petites vagues et elles sont sous-estimées pour les vagues de tempête.

Cette mauvaise performance pourrait être causée par la simplification d'utiliser les vagues mesurées par l'AWAC pour toutes les limites Ouest et Nord de la grille *Quaqtaq-Validation*, alors qu'en réalité les vagues varient le long de ces limites. En effet, lorsque les vagues proviennent du nord-ouest, les vagues aux premiers points de grille au sud et à l'est de l'île Hearn sont nettement plus faibles qu'à la position de l'AWAC (Figure 42). Lorsque les vagues proviennent du nord-est, les vagues à la limite Nord de la grille *Quaqtaq-Validation* sont plus fortes que celles à la position de l'AWAC (Figure 41).

Pour évaluer le biais introduit par cette simplification, une simulation additionnelle a été faite sur la grille *Quaqtaq-Validation* pour la période libre de glace de l'année 1985 en utilisant aux limites Ouest et Nord les sorties de vagues au site AWAC de la simulation AHJ et en utilisant directement les autres intrants (niveaux d'eau, vents, courants, glaces) de la simulation AHJ. Les résultats de cette simulation additionnelle ont été comparées à ceux de la simulation standard AHJ sur la grille *Quaqtaq*, dans laquelle les paramètres de vagues varient le long de la position des limites Ouest et Nord de la grille *Quaqtaq-Validation*. La comparaison pour le site RBR indique une très bonne concordance pour H_s (biais < 0,001 m, biais absolu 0,024 m, RMSE 0,037 m) et T_{02} (biais -0,015 s, biais absolu 0,265 s, RMSE 0,493 s). La simplification d'utiliser les vagues mesurées par l'AWAC pour toutes les limites Ouest et Nord de la grille *Quaqtaq-Validation* n'introduit donc pas un biais important.

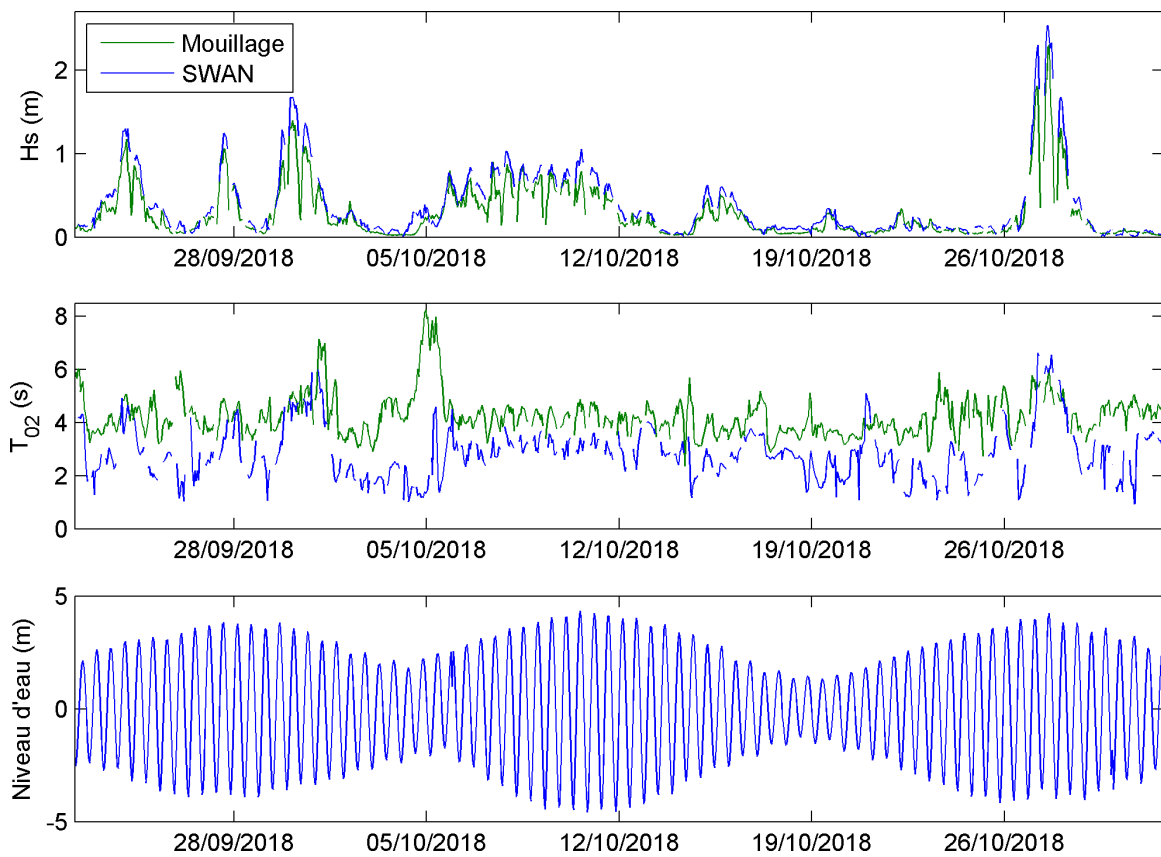
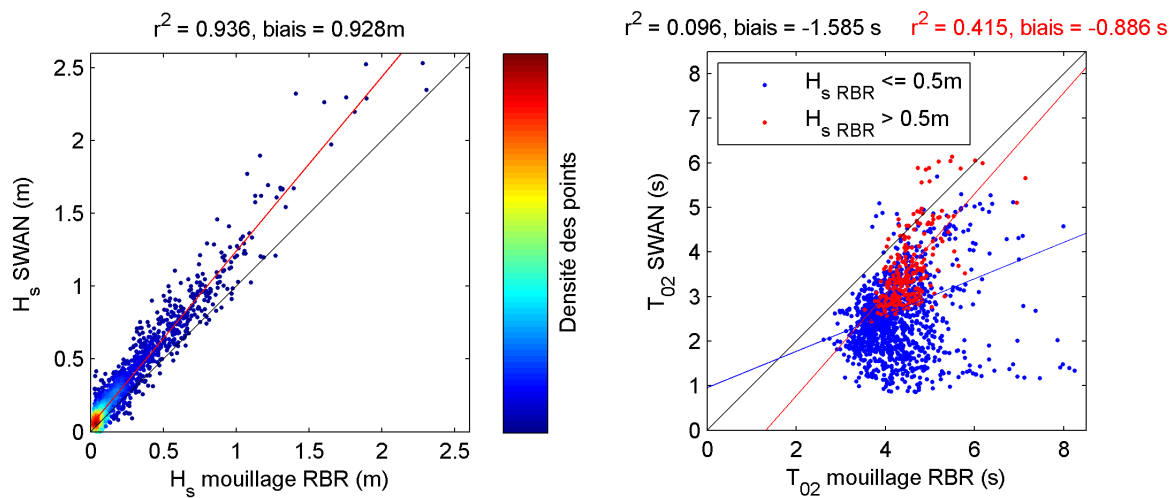


Figure 35. Comparaison des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s) et des périodes (T_{02}) des vagues pour le site du mouillage côtier de Quaqtaq entre SWAN et les enregistrements du mouillage. Le niveau d'eau par rapport au niveau marin moyen utilisé dans SWAN est aussi affiché.



	H_s (m)	T_{02} (s)
biais	0.093	-1.585
biais abs	0.103	1.610
RMSE	0.141	1.869
biais rel	0.368	-0.369
a	1.199	0.408
b	0.043	0.957
Critère de performance	0.550	0.655

Figure 36. Analyses statistiques de la comparaison pour le site du mouillage côtier de Quaqtaq entre les résultats de modélisation avec SWAN et les enregistrements du mouillage côtier.

6.5. Distribution spatiale des vagues en milieu côtier

6.5.1. Distribution spatiale dans le secteur de Kuujjuarapik

À Kuujjuarapik, les vagues au large proviennent surtout de l'ouest lors des plus fortes tempêtes et parfois du nord-ouest, comme indiqué à la fois par les mesures 2018-2020 avec l'AWAC (Figures 17 et 18) et par la modélisation avec SWAN forcée avec la simulation climatique AHJ pour la période 1982-2010 (Figure 37). La force plus grande des tempêtes de l'ouest par rapport à celles du nord-ouest s'explique par la présence des îles Belcher à 100 km au nord-ouest de Kuujjuarapik, qui limitent le fetch dans cette direction (Figure 1).

La distribution spatiale de ces deux types de tempêtes est illustrée avec deux tempêtes de la modélisation avec la simulation climatique AHJ (Figures 38 et 39). Afin de mieux observer et étudier les vagues près de la côte lors d'événements extrêmes, trois points ont été sélectionnés, qui correspondent à la position du mouillage AWAC près de l'île Gillies, ainsi que les positions des houlographes côtiers placés en 2018 : *hA* dans le détroit de Manitounuk et *hB* en face du village.

Lors des tempêtes d'ouest, les vagues provenant du large commencent à être atténuées par les différents hauts-fonds qui existent au niveau de l'île Gillies (où est situé l'AWAC), mais aussi 5 km plus au large (Figure 27). La réfraction des vagues devient significative entre l'île Gillies et la côte, tournant les vagues d'ouest vers le nord-ouest au niveau de la côte. Pour l'exemple de tempête d'ouest (modélisation avec les conditions du 3 novembre 2063 de la simulation AHJ), la hauteur des vagues atteignait 7 m au large, 5,1 m au niveau de l'AWAC, et seulement 3,7 m au point *hB* juste devant la côte (Figure 38). Les vagues qui atteignent la côte sableuse de Kuujuarapik sont donc déjà significativement atténuées par rapport aux vagues du large à cause de la bathymétrie.

Lors des tempêtes d'ouest, les vagues pénètrent dans le détroit de Manitounuk par le sud-ouest, mais elles sont fortement atténuées à cause de la profondeur et de la diffraction autour de la dernière des îles Manitounuk (île Bill of Portland, Figure 38). Peu d'énergie de vagues pénètre par les passes entre les îles Manitounuk, si bien que le point *hA* et le site de l'infrastructure maritime sont protégés par les îles Manitounuk avec des vagues ne dépassant pas 1,0-1,2 m. Lors de la tempête du 3 novembre 2063, les vagues au point *hA* devant l'infrastructure maritime étaient seulement de 1 m.

Lors des tempêtes du nord-ouest, qui sont moins fréquentes et moins fortes, il y a peu de réfraction car les vagues arrivent déjà perpendiculairement à la côte (Figure 39). Pour l'exemple de tempête du nord-ouest (modélisation avec les conditions du 28 novembre 2056 de la simulation AHJ), les vagues étaient aussi atténuées par les hauts-fonds, avec une hauteur de vagues de 3,9 m au niveau de l'AWAC et de 3,1 m au point *hB* (Figure 39), mais cette atténuation était un peu moindre par rapport à l'exemple de la tempête d'ouest (Figure 38).

Lors des tempêtes du nord-ouest, peu de vagues entrent dans le détroit de Manitounuk par le sud-ouest. Par contre, les vagues se fauillent par les passes entre les îles Manitounuk, ce qui définit certaines zones étroites nettement plus agitées dans le détroit de Manitounuk (Figure 39). Cela est aussi illustré par la série temporelle des hauteurs de vague pour le point *hA*, où les vagues étaient généralement d'environ 1 m durant cette tempête. Cependant les vagues atteignaient parfois 2,7 m quand leur orientation au large permettait au faisceau de vague passant entre la deuxième et la troisième îles Manitounuk (île Neilsen et île Merry) d'atteindre directement le point *hA* (Figure 39).

Il faut aussi signaler qu'au point *hA*, les hauteurs des vagues lors de cette tempête du nord-ouest (généralement 1 m avec pic de 2,7 m) étaient similaires ou supérieures à celles de l'exemple de la tempête d'ouest du 03/11/2063 (1 m). Pourtant, les hauteurs de vagues au large étaient moindres lors de cette tempête du nord-ouest (4,5 m) que lors de la tempête d'ouest du 03/11/2063 (7 m).

En résumé, les vagues les plus importantes modélisées aux points *AWAC* et *hB* sont générées suite à des tempêtes d'ouest, tandis qu'au point *hA* elles sont suite à des tempêtes du nord-ouest quand l'énergie des vagues peut passer entre les îles Manitounuk.

- La côte ouverte proche du village, devant l'aéroport et à l'embouchure de la Grande-Rivière-de-la-Baleine est directement exposée aux vagues du large qui ont toutefois été atténués par la bathymétrie, avec des vagues atteignant jusqu'à 4,0 m au point *hB* (Tableau 13).

- Le point *hA* et l'infrastructure maritime dans le détroit Manitounuk sont protégés par les îles Manitounuk avec généralement des vagues de tempêtes ne dépassant pas 1,0-1,2 m à *hA*. Toutefois, cette protection est moins efficace face aux tempêtes du nord-ouest lors desquelles le point *hA* est exposé aux vagues passant entre les îles Manitounuk. Dans ces cas, les vagues peuvent dépasser ponctuellement 2 m à *hA* (Figure 39, Tableau 13).

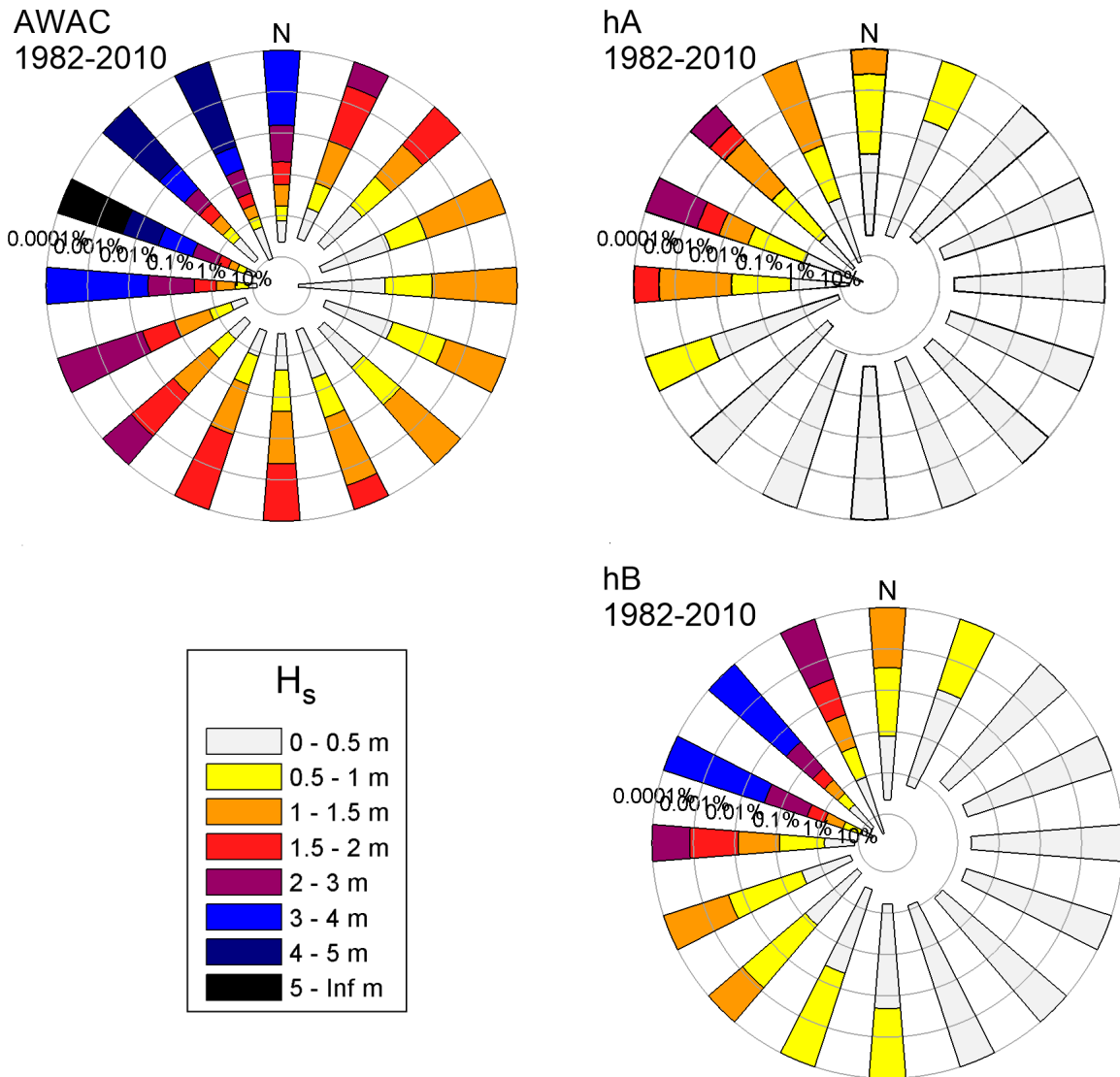


Figure 37. Roses de vagues aux points AWAC, *hA* et *hB* du secteur de Kuujjuarapik pour les résultats de SWAN 1982-2010 avec la simulation climatique AHJ. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphasis sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.

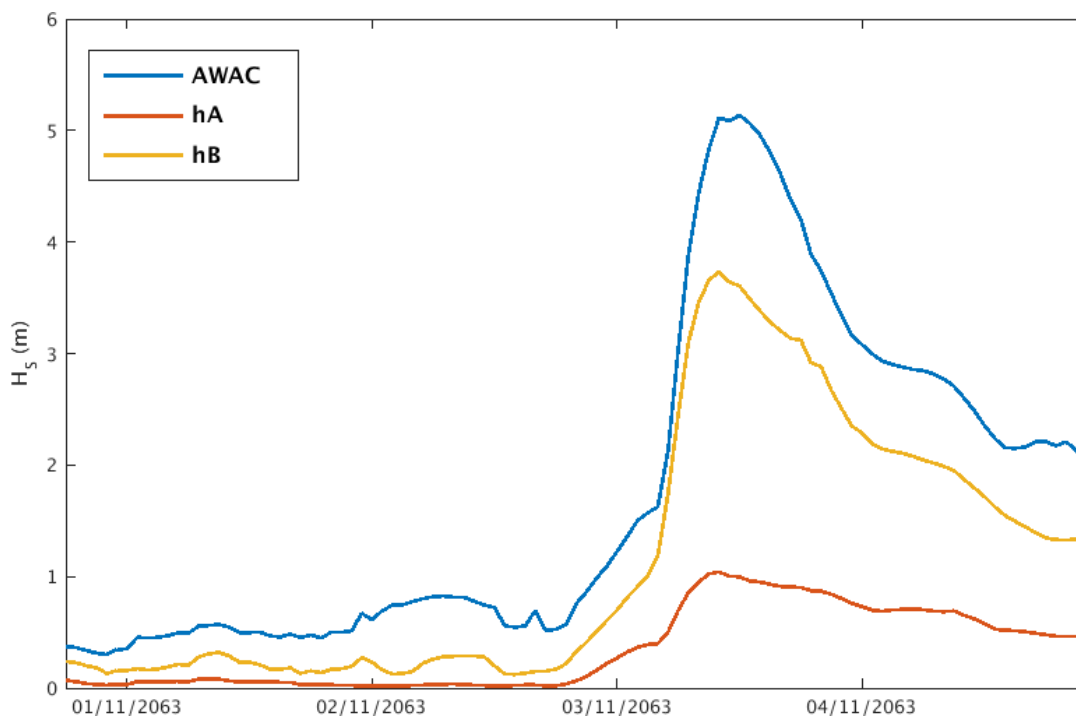
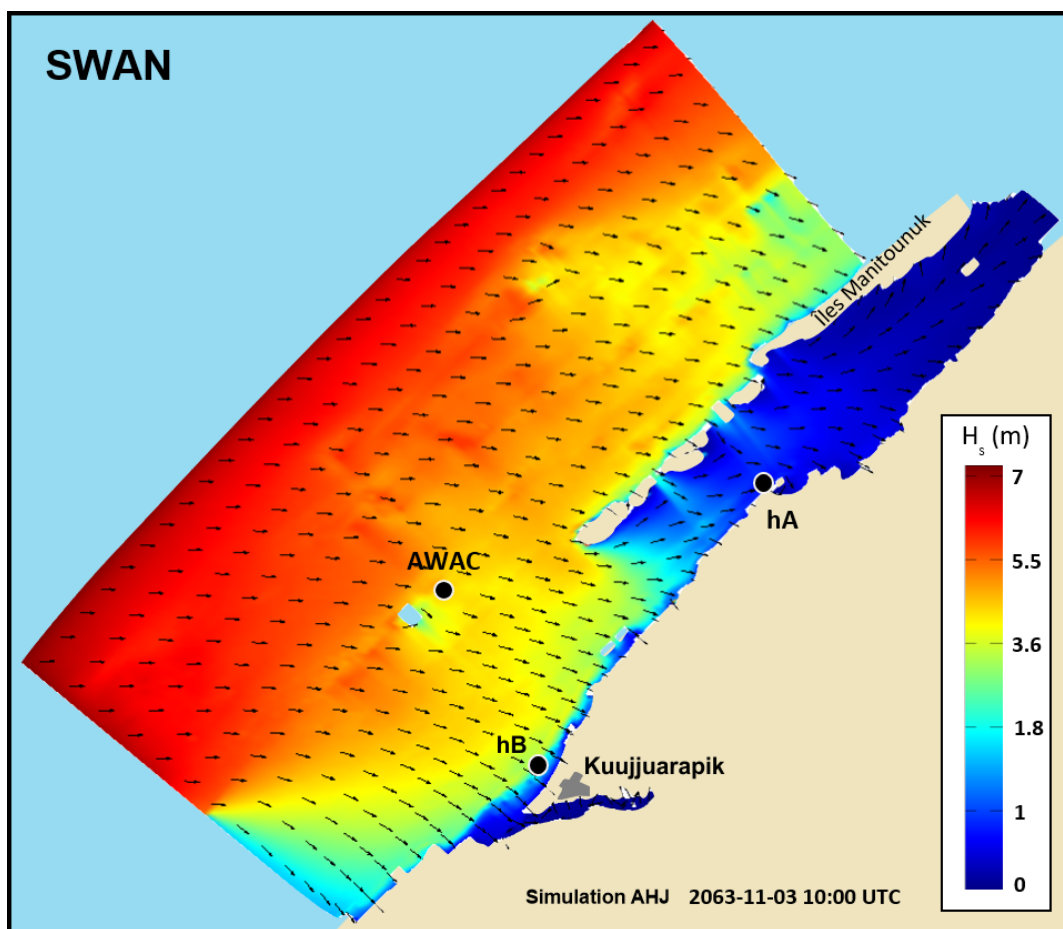


Figure 38. Tempête caractéristique d'ouest pour le secteur de Kuujjuarapik. (haut) Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). (bas) Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points AWAC, hA et hB.

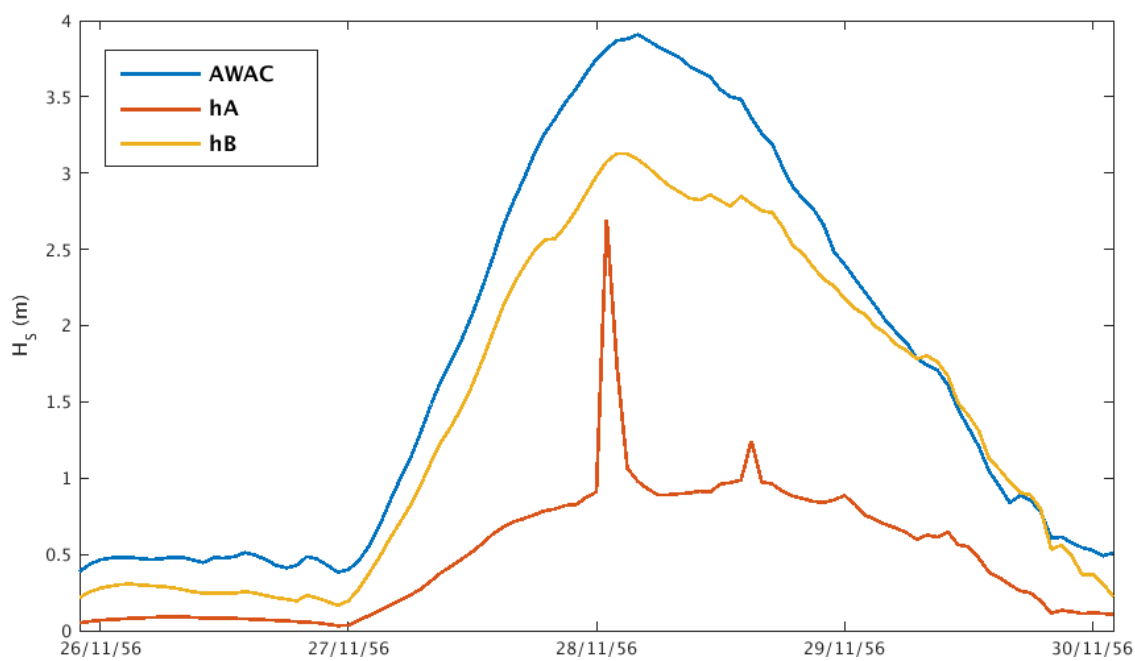
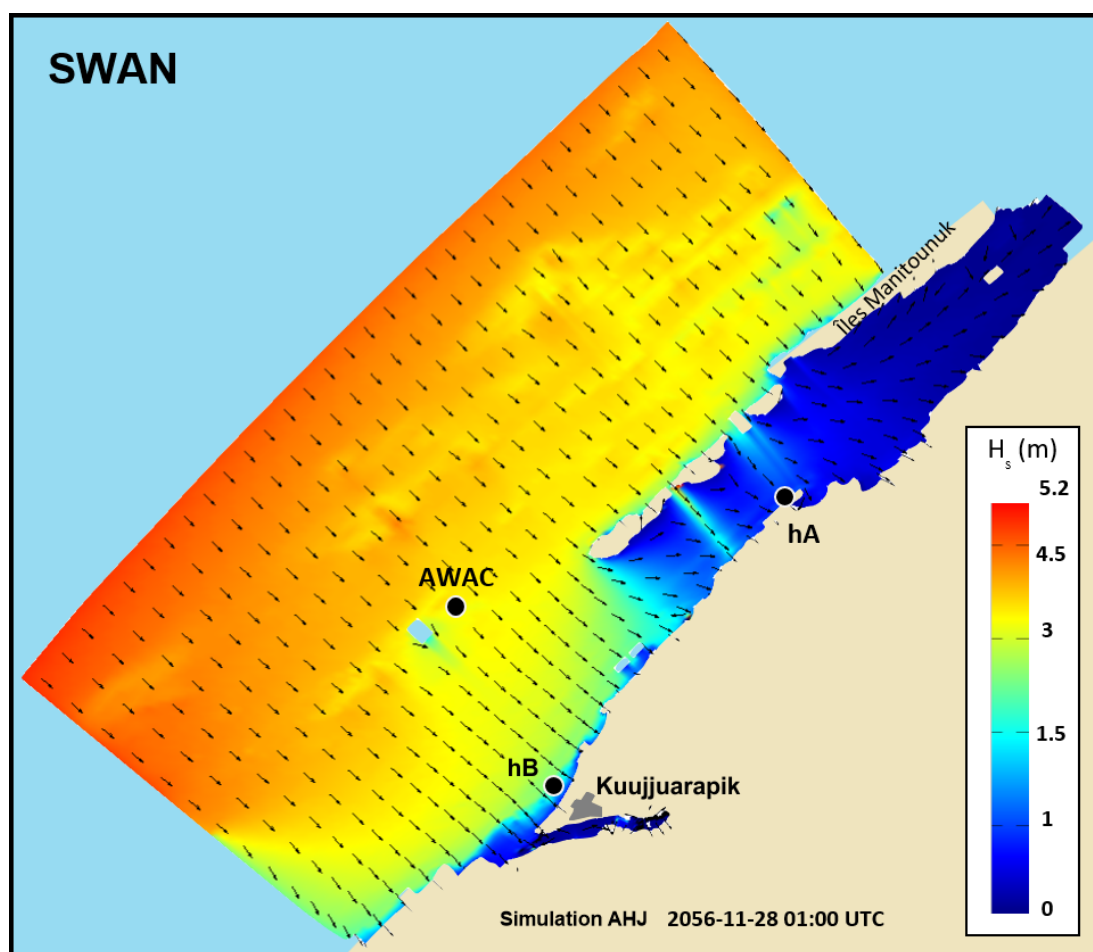


Figure 39. Tempête caractéristique du nord/nord-ouest pour le secteur de Kuujjuarapik. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points AWAC, hA et hB.

6.5.2. Distribution spatiale dans le secteur de Quaqtak

À Quaqtak, les tempêtes modélisées au large proviennent surtout du nord-est et du nord-ouest, avec les plus fortes étant celles en provenance du nord-est, comme indiqué par la modélisation avec SWAN forcée avec la simulation climatique AHJ (Figure 40). À noter que dans les mesures 2017-2021 de l'AWAC montrent seulement la direction nord-ouest (Figures 17 et 18), car le site du mouillage est partiellement abrité des tempêtes venant du nord-est (Figure 41).

Lors des plus fortes tempêtes, les vagues proviennent depuis la mer du Labrador et arrivent depuis le nord-est, alors que pour les tempêtes du nord-ouest le fetch dans le détroit d'Hudson est limité à 450 km.

Les figures 41 et 42 illustrent la distribution spatiale de ces deux types de tempêtes. Afin de mieux observer et étudier les vagues près de la côte lors d'événements extrêmes, trois points représentatifs ont été sélectionnés, qui correspondent au large de l'île Hearn (*Off*), entre l'île Hearn et la côte (*Mid-4*) et au milieu de l'anse de la Mission dans laquelle est située le village de Quaqtak (*Coast-5*).

Lors des tempêtes du nord-est, la région côtière de Quaqtak est abritée par le cap de Hope Advance et par son promontoire ouest, la pointe Short. De plus, des profondeurs d'eau moyennes (30-40 m) situées à 1-2 km devant la côte (Figure 29) contribuent à l'atténuation de l'énergie des vagues. Par contre la réfraction due à cette bathymétrie redirige les vagues aussi vers la côte. Les vagues de plus de 6 m au large sont déjà réduite à moins de 3,5 m devant la région côtière au large de Quaqtak, et elles ont un changement de direction, provenant dans cette région du nord ou nord-nord-est (Figure 41). L'anse de la Mission, au fond de laquelle est située le village et l'infrastructure maritime de Quaqtak, est encore plus abritée par le promontoire limitant cette anse vers le Nord, avec des vagues de moins de 1 m. Les autres anses à proximités de Quaqtak sont soit moins abritées dans ces conditions, soit plus étroites et très peu profondes comparées à l'anse de la Mission.

Lors des tempêtes du nord-ouest, les vagues viennent frapper plus directement la côte est de la baie de Diana, sauf à proximité de Quaqtak, où la côte est partiellement protégée par l'île Hearn (Figure 42). Toutefois, les vagues contournent l'île Hearn par diffraction, les vagues de 4,8 m au large étant réduite à 3 m entre l'île Hearn et la côte. Au milieu de l'anse de la Mission les vagues sont encore de 2 m. C'est dans ces conditions que l'infrastructure maritime a un rôle important de protection.

Les directions des vagues dominantes changent beaucoup entre le large représenté par le site *Off* (plus fortes vagues du nord-est et fortes vagues du nord et du nord-ouest), le site *Mid-4* situé devant la côte près de Quaqtak (plus fortes vagues du nord et du nord-ouest et forte vague de l'ouest) et le site *Coast-5* dans l'anse de la Mission (fortes vagues seulement de l'ouest-nord-ouest et ouest. Ces variations de directions sont produites par la protection des différents caps et de l'île Hearn ainsi que par la réfraction des vagues.

En conclusion, l'anse de la Mission au fond de laquelle se trouve le village Quaqtak est le site le mieux protéger des tempêtes qui offre aussi des bonnes conditions de navigation dans la région. Lors que les inuits se sont installés à Quaqtak vers 1940 (Dorais, 1997), ils ont sélectionné un bon endroit .

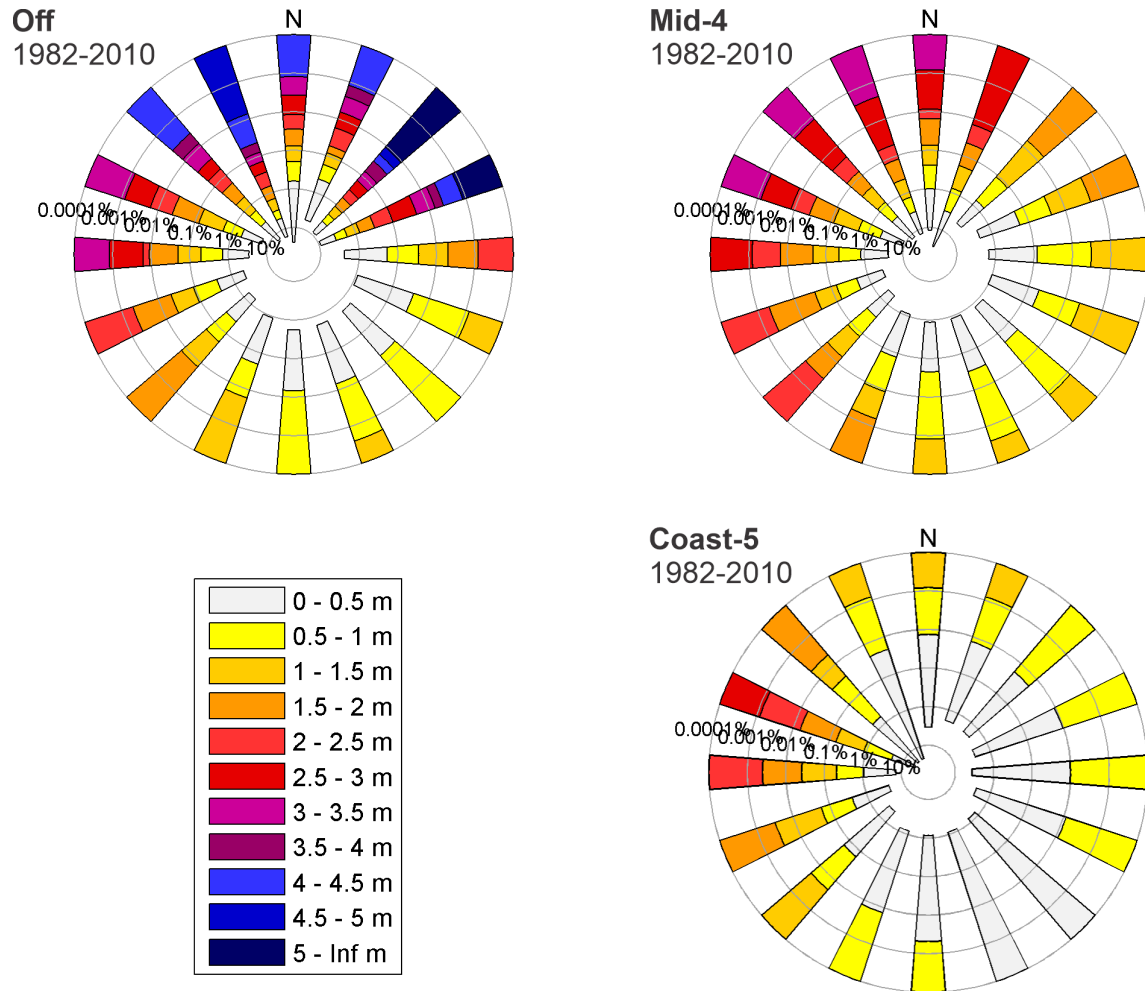


Figure 40. Roses de vagues aux points Off, Mid-4 et Coast-5 de la grille Quaqtac pour les résultats de SWAN 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100 avec la simulation climatique AHJ. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphasis 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

Simulation AHJ 2009-12-02 23:00:00

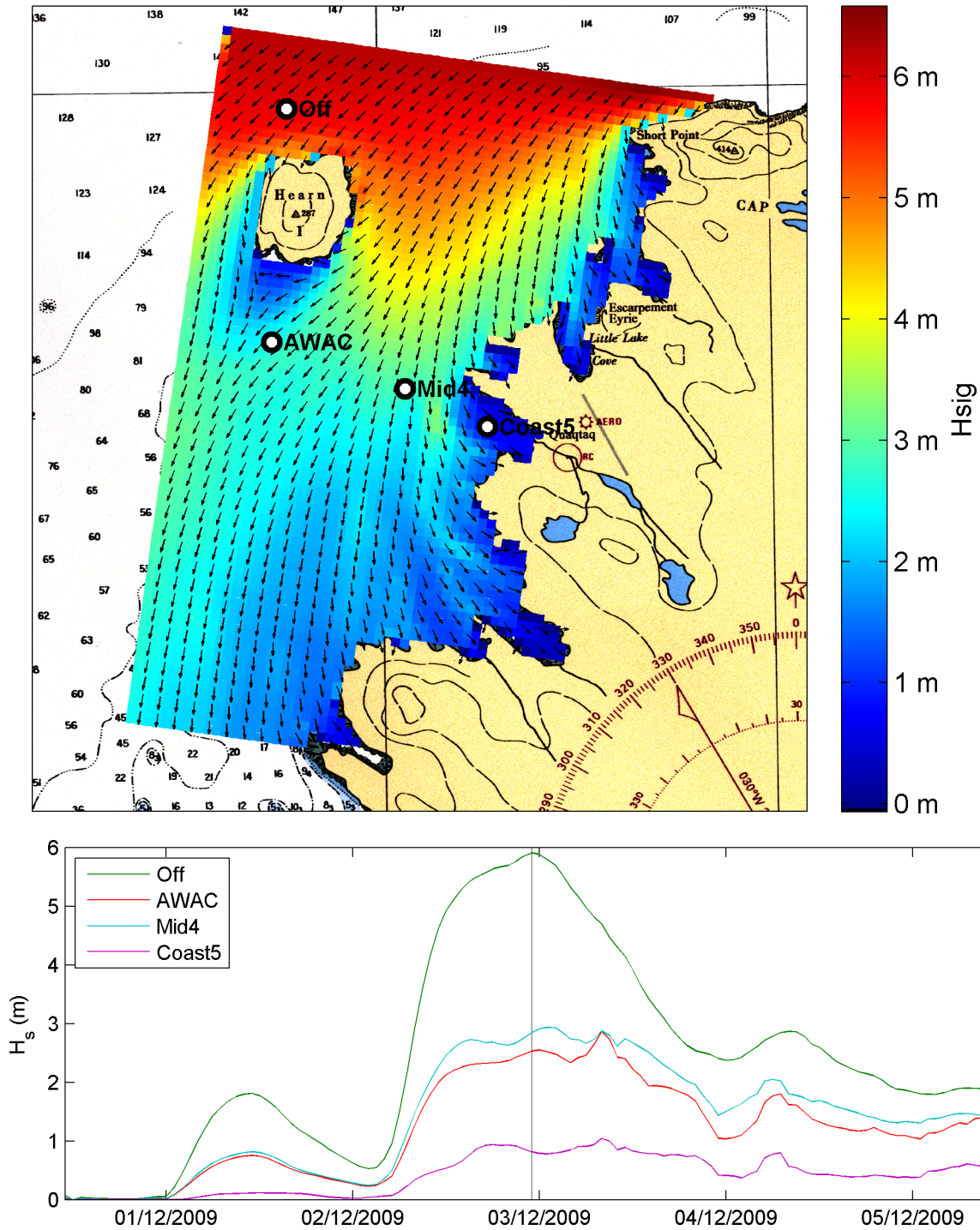


Figure 41. Tempête caractéristique du nord-est pour le secteur de Quaqtaq. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points Off, qAWAC, Mid-4 et Coast-5.

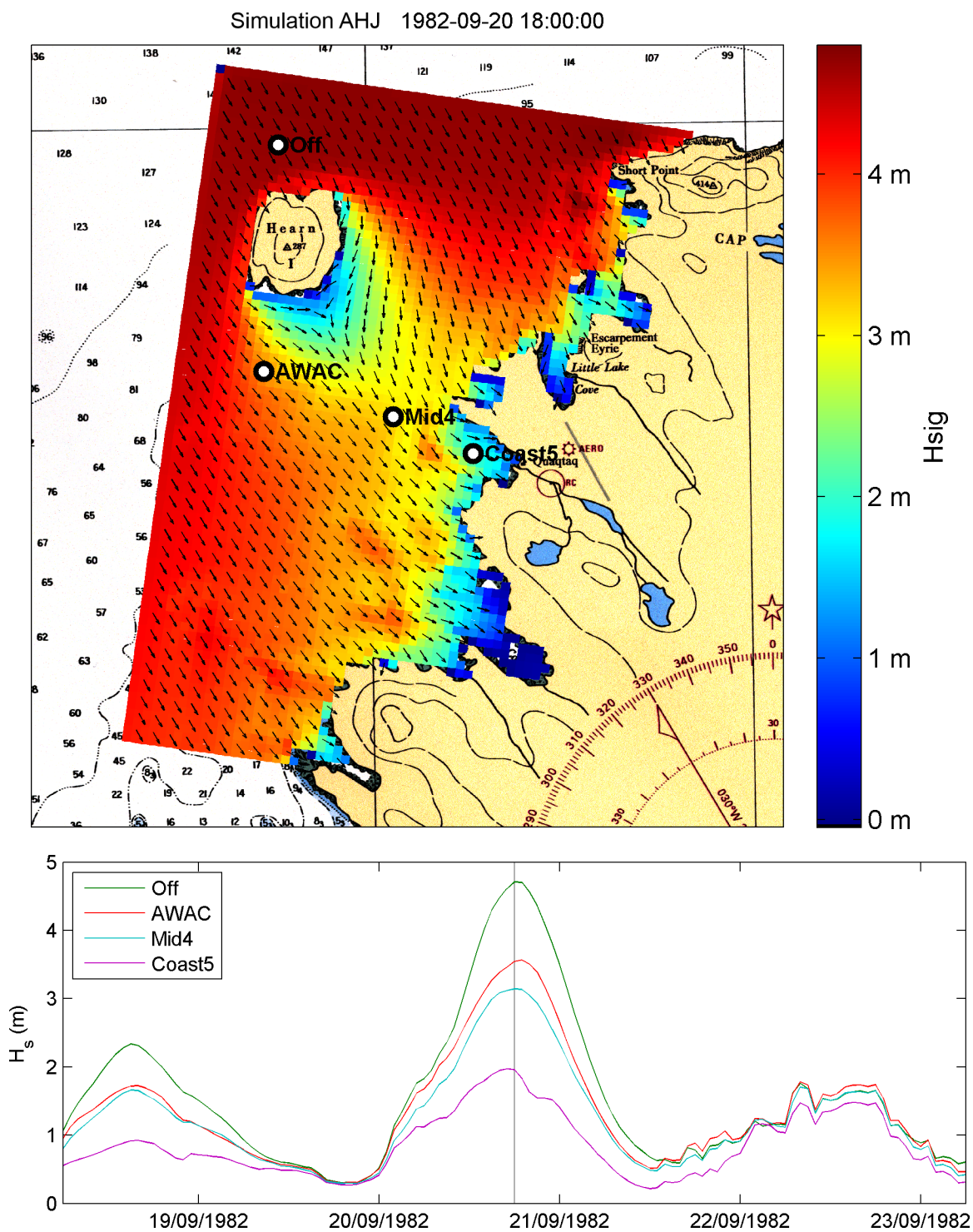


Figure 42. Tempête caractéristique du nord-ouest pour le secteur de Quaqtaq. Panneau du haut : Carte de distribution de la hauteur des vagues (échelle de couleur) et de leur direction (flèches). Panneau du bas : Séries temporelles des hauteurs significatives des vagues des points Off, AWAC, Mid-4 et Coast-5.

6.6. Comparaison du passé récent et du futur

La modélisation avec SWAN a été effectuée en utilisant les conditions de la simulation climatique AHJ du MRCC pour trois périodes d'environ 30 ans : 1982-2010, 2041-2070, 2071-2100. Pour évaluer l'impact des futurs changements climatiques, le climat de vague du passé récent (1982-2010) a été comparé aux climats de vagues du futur (2041-2070 et 2071-2100).

La principale différence entre ces trois périodes est l'augmentation de la température, ce qui entraîne un raccourcissement de la période d'englacement hivernale. Pour Kuujjuarapik, celle-ci va de novembre-décembre à juin-juillet en 1982-2010, puis seulement de janvier à avril-mai vers la fin du XXI^e siècle (Figure 43). Pour Quaqtaq, celle-ci commence entre mi-octobre et mi-novembre et se termine entre fin juin et début août en 1982-2010, puis commence seulement en décembre et se termine entre mi-mai et mi-juin vers la fin du XXI^e siècle (Figure 44). Cela entraîne une augmentation des périodes d'eaux libres pendant lesquelles les vagues peuvent se développer et atteindre la côte (Figures 45 et 46).

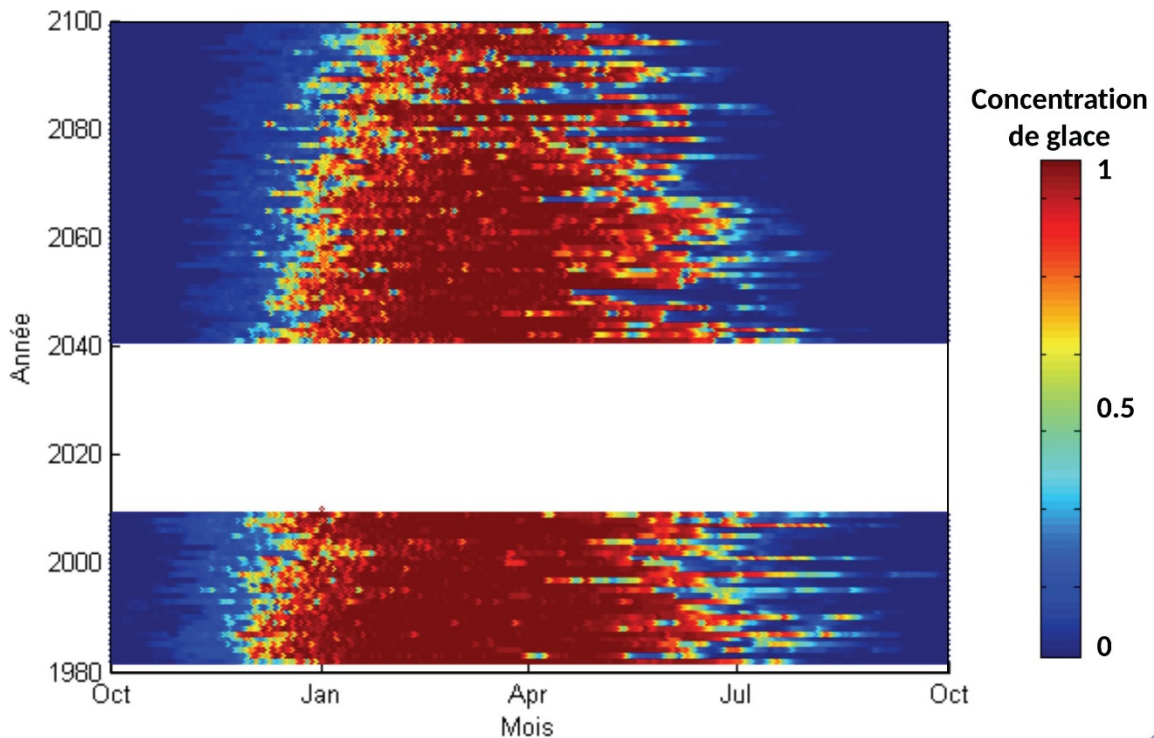


Figure 43. Évolution de la concentration saisonnière de glace de 1981 à 2100 dans la région de Kuujjuarapik avec la simulation climatique AHJ (Senneville, 2018).

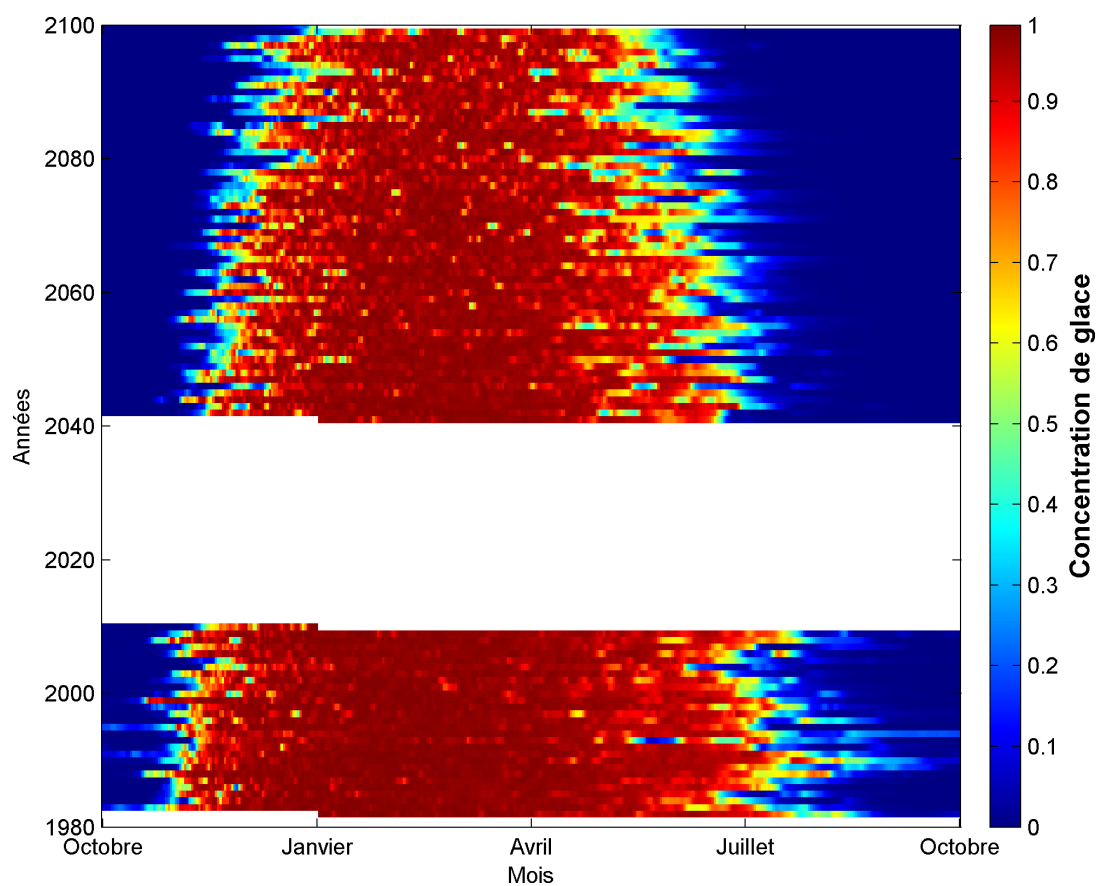


Figure 44. Évolution de la concentration saisonnière de glace de 1982 à 2099 sur la grille Dianabay (région de Quaqtqaq) avec la simulation climatique AHJ (données de Senneville, 2018).

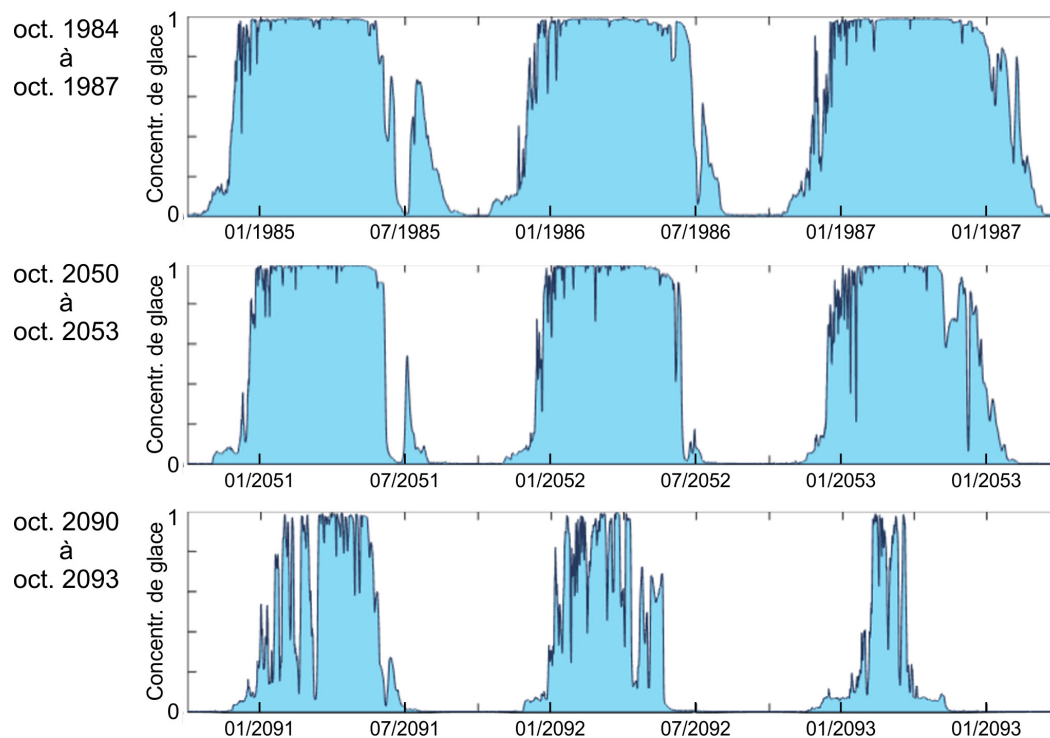


Figure 45. Exemples de la diminution de l'englacement de 1981 à 2100 d'après le scénario climatique AHJ : couverture moyenne de glace sur la grille de Kuujjuarapik pour trois hivers consécutifs caractéristiques pour chaque période de 30 ans.

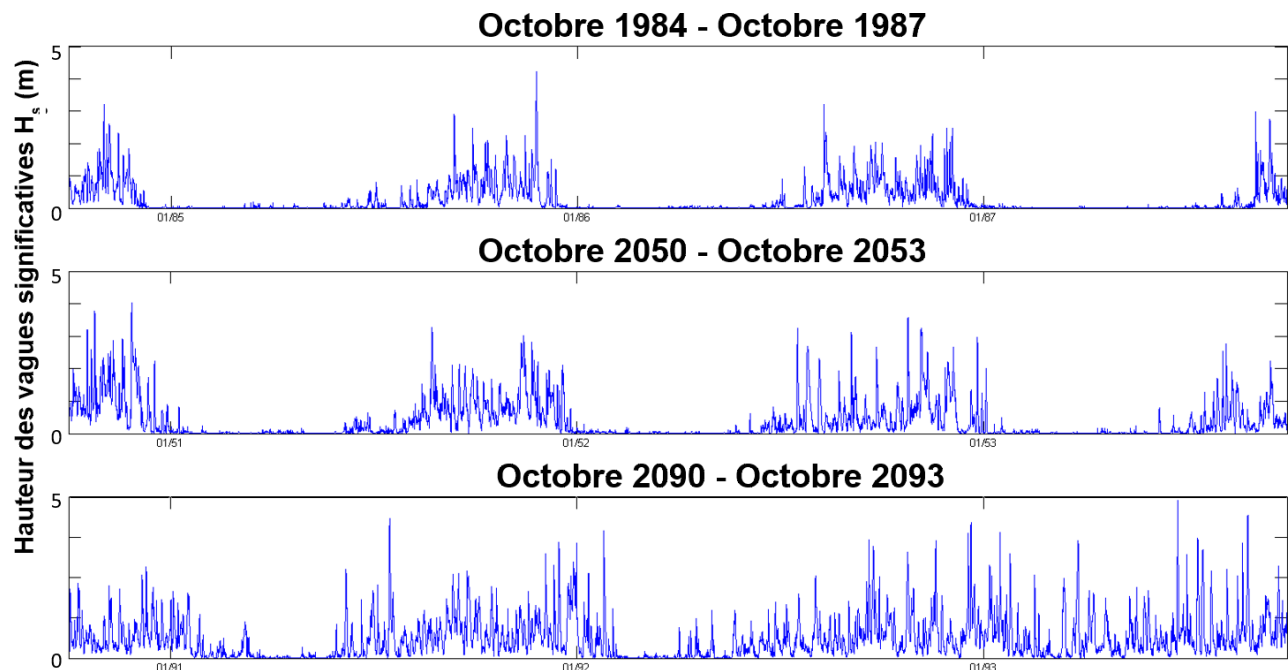


Figure 46. Séries temporelles des hauteurs des vagues modélisées par SWAN pour le point d'intérêt AWAC du secteur de Kuujjuarapik pour trois années consécutives pour chaque période de 30 ans d'après le scénario climatique AHJ (voir Figure 45 pour la couverture de glace pendant les mêmes périodes).

6.6.1. Future évolution pour le secteur de Kuujjuarapik

Les résultats de modélisation du secteur de Kuujjuarapik avec la simulation AHJ révèlent une augmentation de la hauteur des vagues pendant l'hiver de 1982 à 2100 (Figure 46) en raison de l'augmentation des périodes d'eaux libres à la fin du XXI^e siècle. Ceci est dû à la diminution de la durée de couvert de glace complet en hiver à la fin du siècle dans le scénario climatique AHJ (Figure 45). Comme la fin de l'automne et l'hiver sont aussi les saisons avec les vents les plus forts, cela entraîne une augmentation des événements de tempêtes aussi bien au large (point *AWAC*) que près de la côte devant le village (point *hB*) et dans le détroit de Manitounuk (point *hA*, Figure 47). L'analyse de la distribution des vagues pendant les périodes de transition indique que l'état des glaces serait plus critique pour la période de transition automnale que la période de transition printanière à cause de la saisonnalité des tempêtes (Figure 46).

Cette augmentation du climat de vague (la distribution des hauteurs des vagues) est progressive au cours du siècle, avec par exemple au point *AWAC* 1% des vagues dépassant le seuil de 2,42 m en 1982-2010, 2,64 m en 2041-2070 et 2,81 m en 2071-2100, alors que 0,1 % des vagues dépassent le seuil de 3,73 m, 3,88 et 4,09 m pour les même périodes (Figures 47 et 48). La même tendance existe près de la côte au point *hB* (0,1 % des vagues dépassent le seuil de 2,86 m, 2,96 m et 3,07 m pour les trois périodes) et au point *hA* (0,1 % des vagues dépassent le seuil de 1,02 m, 1,14 m et 1,19 m pour les trois périodes).

Cependant, on n'observe pas d'intensification des vagues des tempêtes extrêmes. Cette tendance s'explique par le fait que dans le scénario climatique AHJ, la tempête du siècle a eu lieu dans la période passée, à savoir le 16 octobre 2001 (Tableau 13). C'est la raison pour laquelle les courbes de dépassement se croisent pour des probabilités inférieures à 0,1 % (Figure 47). Si la tempête du siècle du 16 octobre 2001 est ignorée dans l'analyse, les hauteurs de vagues des plus fortes tempêtes augmentent progressivement durant les trois périodes et aux trois sites (Tableau 13).

La fréquence des tempêtes peut aussi être caractérisée avec les périodes de retour, c'est-à-dire la hauteur significative des vagues de la plus forte tempête qui se produit statistiquement toutes les X années. Pour cela, une distribution probabiliste théorique est ajustée à la distribution des tempêtes, puis les hauteurs de vagues sont déterminées pour différents points la distribution probabiliste théorique. Pour cette étude, trois distributions couramment utilisées pour les vagues de tempêtes ont été utilisées : la distribution de Pareto généralisée (GPD), la distribution (ou loi) de Gumbel et la distribution (ou loi) de Weibull. Les résultats varient d'une distribution à l'autre (Tableau 14) et déterminer quelle distribution est la plus adaptée pour un jeu de données nécessite souvent d'examiner visuellement les graphiques représentant les données des tempêtes et les distributions théoriques. Néanmoins, la distribution de Pareto généralisée est souvent utilisée de manière standard de nos jours (Hiles et al., 2019; Neary et al., 2020).

Les hauteurs significatives pour la période de retour de 50 ans varient, au point *AWAC* au large, entre 5,5 et 6,3 m, au point *hB* près de la côte devant le village encore, les hauteurs varient entre 4,0 et 4,5 m, mais seulement entre 2 et 3 m au point *hA* dans le détroit de Manitounuk (Tableau 14). L'évolution au cours du XXI^e siècle est similaire à celle décrite ci-dessus pour les tempêtes extrêmes. C'est-à-dire que les hauteurs significatives des périodes de retour de 10, 20 ou 50 ans sont plus élevées pour la première période 1982-

2010 que pour la deuxième période 2041-2070 à cause de la tempête exceptionnelle du 16 octobre 2001. Cependant les hauteurs significatives des différentes périodes de retour augmentent de nouveau pour la troisième période 2071-2100 (Tableau 14 et Figure 48).

L'examen de l'évolution des roses des vagues pour les trois périodes ne révèle pas de changement significatif pour les directions des vagues durant le XXI^e siècle (Figures 49 et 50). Il aurait été intéressant de déterminer les contributions respectives de la diminution du couvert de glace et de la modification du climat de vent, comme cela a déjà été effectué pour le golfe du Saint-Laurent (Ruest et al, 2016, Wang et al., 2018). Cela aurait nécessité d'opérer SWAN sans glace hivernale pour quantifier l'impact de l'évolution du climat de vent, mais il manquait les données correspondantes des vagues provenant du large, car la modélisation avec WW3 n'a pas été faite pour un tel scénario hypothétique.

À noter aussi que les plus fortes tempêtes dans le détroit de Manitounuk au site *hA* ne correspondent pas aux plus fortes tempêtes au large (point *AWAC*) ou près de la côte devant le village (point *hB*). Pour le site *hA*, l'orientation des tempêtes (plutôt du nord-ouest que de l'ouest) est plus importante que la hauteur des vagues au large pour permettre le passage d'énergie de vague significative entre les îles Manitounuk (voir aussi la section 6.5).

En résumé, les résultats de modélisation pour le secteur de Kuujjuarapik avec la simulation climatique AHJ montrent une augmentation progressive du climat de vague au cours du XXI^e siècle aussi bien au large que près de la côte devant le village et dans le détroit de Manitounuk (Figure 48). Comme la tempête du siècle s'est produite dans la période passée pour la simulation climatique AHJ (le 16 octobre 2001), cette augmentation des hauteurs des vagues est moins évidente pour les événements extrêmes, bien que présente si l'on ignore cette tempête exceptionnelle.

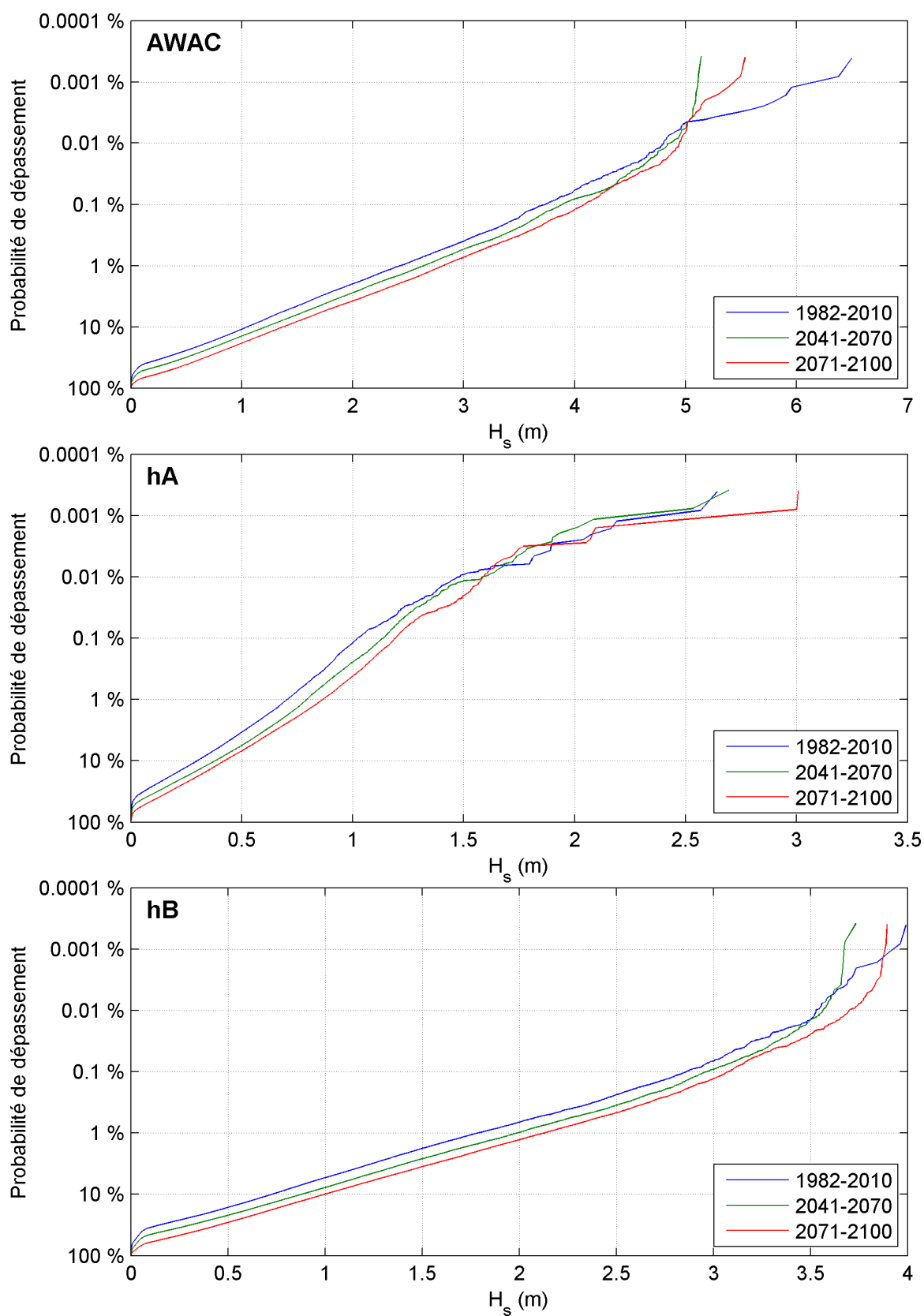


Figure 47. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives des vagues pour les trois points d'intérêt AWAC, hA et hB du secteur de Kuujjuarapik.

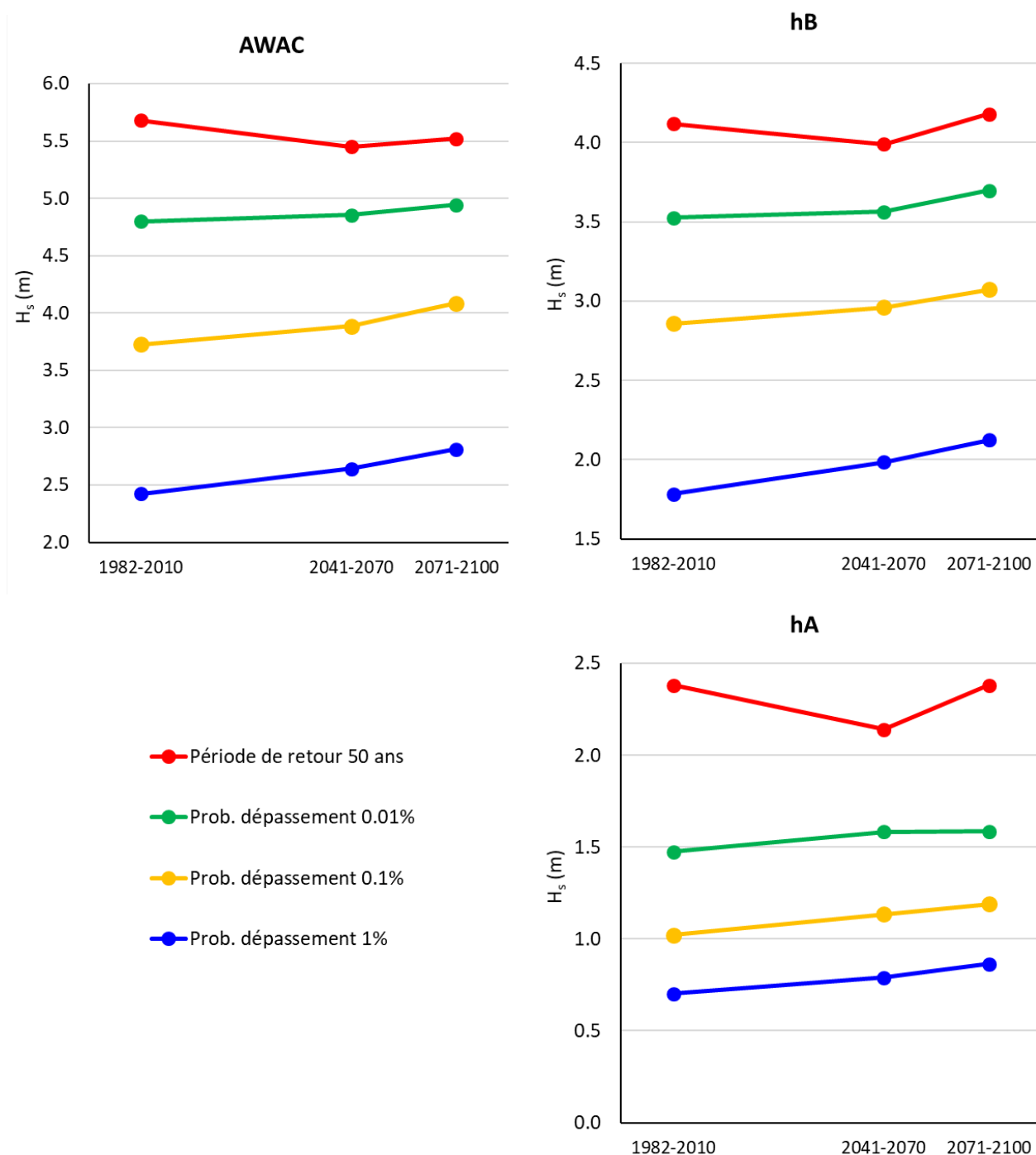


Figure 48. Évolution au cours du XXI^e siècle de plusieurs indicateurs d'événements extrêmes pour les points AWAC, hA et hB du secteur de Kuujjuarapik, à savoir les hauteurs significative (H_s) associées à la période de retour de 50 ans (calculée avec la distribution Pareto généralisée) et les probabilités de dépassement de 0,01 %, 0,1 % et 1 %.

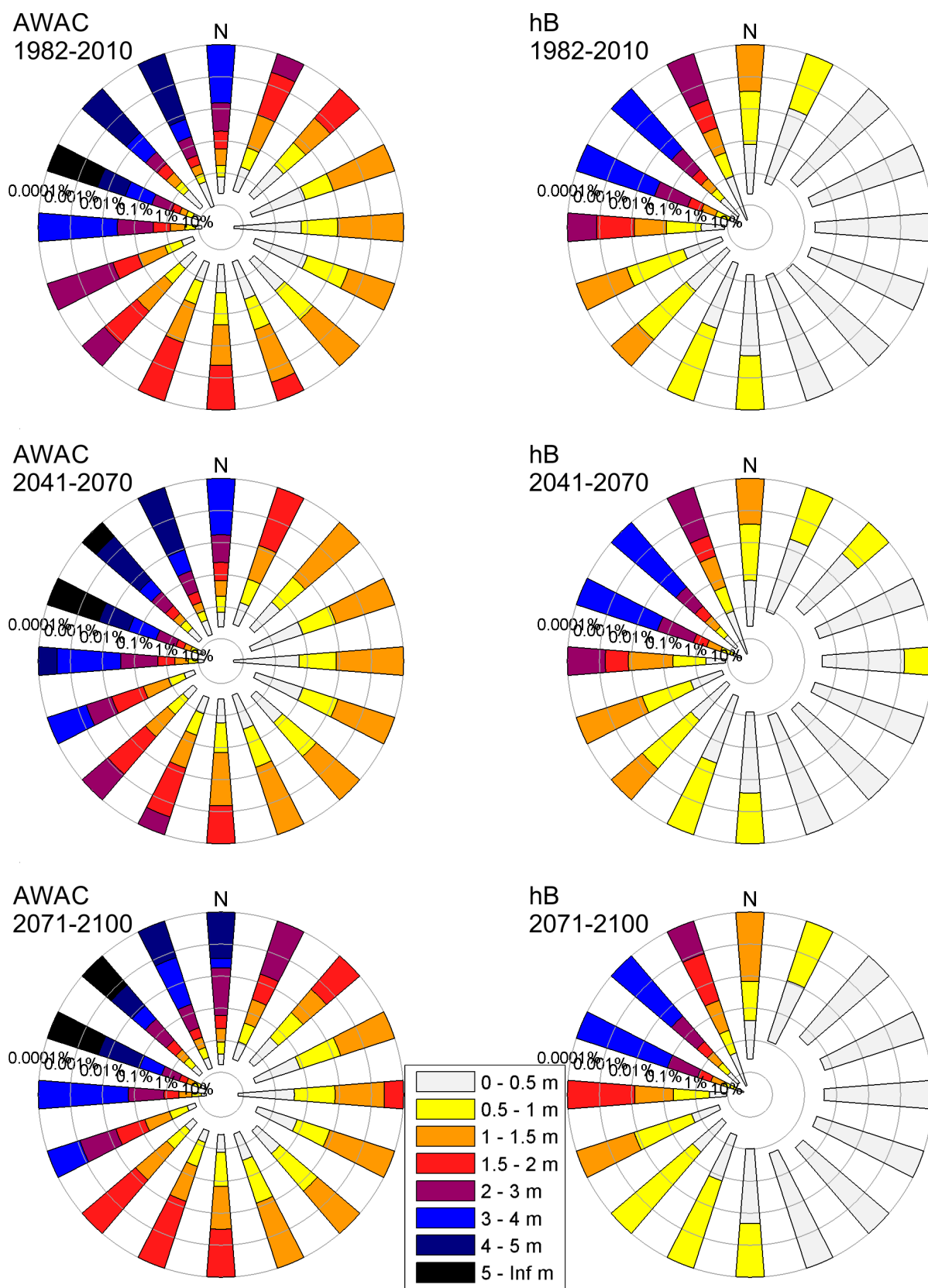


Figure 49. Roses de vagues aux points AWAC et hB (Secteur de Kuujjuarapik) pour les résultats de SWAN 1982-2010 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Voir la Figure 50 pour l'explication du graphique.

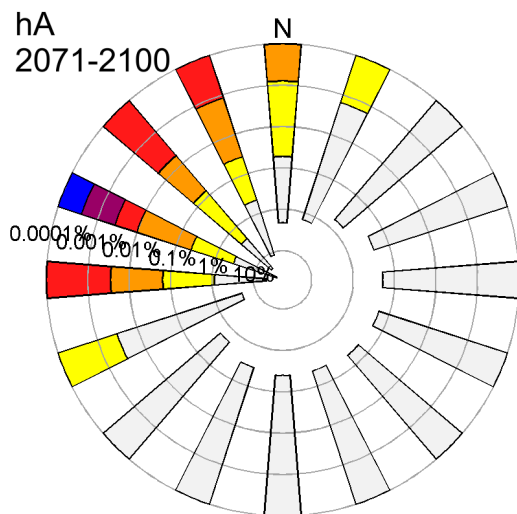
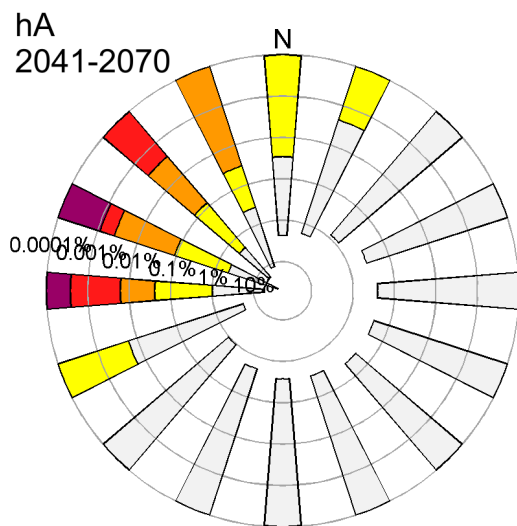
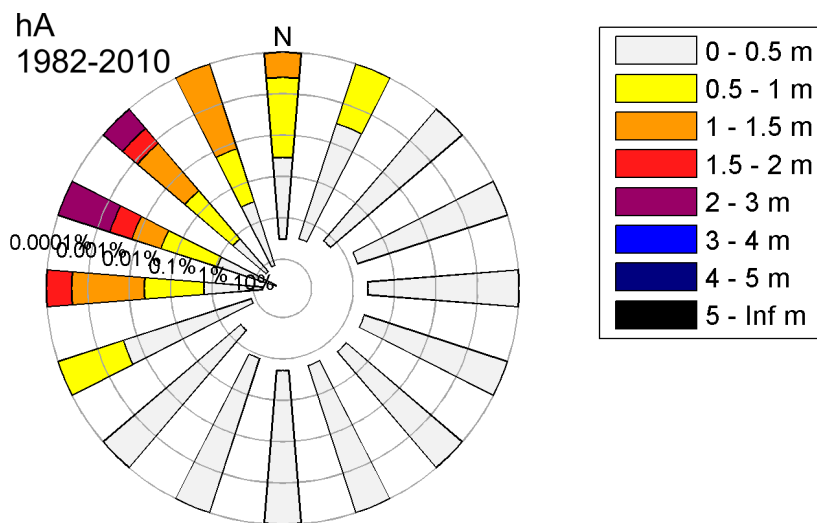


Figure 50. Roses de vagues au point hA du secteur de Kuujjuarapik pour les résultats de SWAN 1982-2010 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphasis 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. Plus fortes tempêtes pour les trois périodes du passé récent et du futur de la simulation AHJ et pour les trois sites d'intérêt à Kuujjuarapik. Les couleurs signalent les tempêtes figurant aussi bien pour le site AWAC au large que pour les sites côtiers hA et hB.

AWAC					hB					hA				
Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)		Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)		Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)	
2001-10-16	6.49	7.5	291		2001-10-16	3.99	8.9	302		2003-12-09	2.64	8.9	299	
2003-09-06	5.01	8.6	293		1999-09-18	3.72	8.6	302		2002-10-25	2.57	8.2	300	
2005-09-01	4.96	8.6	289		2004-11-12	3.72	7.7	320		1999-09-19	2.19	7.0	297	
1999-09-18	4.88	8.4	288		2003-09-06	3.60	8.7	304		2007-11-03	2.07	8.7	299	
2004-11-12	4.83	7.6	340		1989-10-20	3.59	7.9	313		2004-11-12	2.04	8.7	306	
2063-11-03	5.14	7.5	286		2063-11-03	3.73	7.8	300		2056-11-28	2.69	7.8	297	
2044-09-07	5.11	8.2	291		2044-09-07	3.68	8.2	304		2059-12-21	2.54	8.5	297	
2065-10-31	5.06	8.2	303		2065-10-31	3.67	8.7	303		2069-12-15	2.09	8.1	304	
2049-10-13	5.01	7.1	287		2049-10-13	3.67	7.0	301		2063-11-05	2.02	4.0	276	
2044-12-11	4.93	7.8	291		2069-12-17	3.66	7.0	312		2060-08-24	1.90	7.7	306	
2099-11-20	5.53	8.2	291		2099-11-20	3.89	9.1	302		2083-11-07	3.01	7.5	296	
2093-10-17	5.14	7.7	287		2097-08-23	3.88	7.3	312		2074-11-01	3.00	7.4	295	
2097-08-23	5.02	7.1	316		2093-10-17	3.87	7.4	301		2074-10-09	2.09	6.8	297	
2097-01-07	5.00	7.4	310		2083-11-10	3.87	8.5	306		2078-09-30	2.08	8.4	302	
2083-11-07	4.96	8.0	291		2083-11-07	3.73	8.4	304		2087-08-30	2.07	7.6	299	

Tableau 14. Hauteurs significatives des vagues en mètre pour différentes périodes de retour aux points AWAC, hB et hA à Kuujjuarapik pour les périodes 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les périodes de retour ont été calculées avec trois distributions : la distribution de Pareto généralisée (GPD) et les distributions probabilistes Gumbel et Weibull.

	ans	1982-2010			2041-2070			2071-2100		
		GPD	Gumbel	Weibull	GPD	Gumbel	Weibull	GPD	Gumbel	Weibull
AWAC	1	3.76	3.65	3.67	3.87	3.88	3.88	4.02	4.12	4.11
	2	4.19	4.13	4.12	4.24	4.25	4.26	4.38	4.41	4.42
	5	4.69	4.76	4.72	4.66	4.74	4.76	4.78	4.81	4.82
	10	5.03	5.23	5.18	4.94	5.11	5.12	5.04	5.11	5.11
	20	5.33	5.71	5.63	5.18	5.49	5.49	5.26	5.41	4.39
	50	5.68	6.34	6.24	5.45	5.98	5.96	5.52	5.80	5.74
hB	1	2.77	2.81	2.81	2.90	2.95	2.95	3.04	3.08	3.08
	2	3.08	3.09	3.10	3.17	3.19	3.20	3.31	3.31	3.32
	5	3.43	3.46	3.47	3.46	3.50	3.51	3.62	3.62	3.63
	10	3.67	3.74	3.75	3.65	3.73	3.73	3.81	3.86	3.85
	20	3.88	4.02	4.03	3.81	3.96	3.96	3.99	4.09	4.07
	50	4.12	4.39	4.39	3.99	4.27	4.24	4.18	4.40	4.35
hA	1	1.35	1.03	1.08	1.27	1.19	1.19	1.35	1.18	1.24
	2	1.53	1.40	1.39	1.43	1.48	1.44	1.53	1.56	1.54
	5	1.77	1.90	1.87	1.64	1.85	1.81	1.77	2.05	1.99
	10	1.96	2.27	2.29	1.80	2.14	2.11	1.96	2.42	2.36
	20	2.14	2.64	2.75	1.95	2.43	2.43	2.14	2.79	2.77
	50	2.38	3.14	3.44	2.14	2.80	2.88	2.38	3.28	3.35

6.6.2. Future évolution pour le secteur de Quaqtq

Les résultats de modélisation du secteur de Quaqtq avec la simulation AHJ révèlent une augmentation de la hauteur des vagues à la fin de l'automne et pendant l'hiver de 1982 à 2100 en raison de l'augmentation des périodes d'eaux libres à la fin du XXI^e siècle. Ainsi pour la période 1982-2010 les plus fortes tempêtes surviennent entre août et octobre, avec juste une tempête exceptionnelle au début décembre (Tableau 15), alors que pour la période 2041-2070 les très fortes tempêtes en novembre et mi-décembre sont courantes et que pour la période 2071-2100 les deux plus fortes tempêtes interviennent à la fin décembre et au début janvier. Ceci est dû à la diminution de la durée du couvert de glace hivernal à la fin du siècle dans le scénario climatique AHJ suite au réchauffement climatique (Figure 44). Comme la fin de l'automne et l'hiver sont aussi les saisons avec les vents les plus forts, cela entraîne une augmentation des événements de tempêtes aussi bien au large (point *Off*) que près de la côte (points *Mid-4* et *Coast-5*, Figure 51).

Cette augmentation du climat de vague (la distribution des hauteurs des vagues) est progressive au cours du XXI^e siècle, mais semble plus rapide pour les vagues moyenne à forte durant la première moitié du XXI^e siècle, c'est-à-dire entre 1982-2010 et 2041-2070

qu'entre 2041-2070 et 2071-2100, même en tenant compte de la différence d'intervalle (Figure 51). Par exemple, au large (point *Off*) 1% des vagues dépassant le seuil de 2,37 m en 1982-2010, 2,67 m en 2041-2070 et 2,74 m en 2071-2100, alors que 0,1 % des vagues dépassent le seuil de 3,93 m, 4,07 et 4,10 m pour les mêmes périodes (Figures 51 et 52). La même tendance existe plus près de la côte au point *Mid-4* (1 % des vagues dépassent le seuil de 1,56 m, 1,84 m et 1,88 m pour les trois périodes; 0,1 % des vagues dépassent le seuil de 2,52 m, 2,72 m et 2,86 m pour les trois périodes) et dans l'anse de la Mission au point *Coast-5* (1 % des vagues dépassent le seuil de 1,04 m, 1,25 m et 1,29 m pour les trois périodes; 0,1 % des vagues dépassent le seuil de 1,64 m, 1,87 m et 1,97 m pour les trois périodes).

Cependant, l'évolution est moins claire pour les vagues des tempêtes extrêmes. Au large (point *Off*), il y a deux tempêtes entre 5,4 et 5,9 m durant la période 1982-2010, puis seulement des tempêtes de moins de 5,4 m durant la période 2041-2070, puis deux tempêtes entre 6,0 et 6,3 m lors de la dernière période 2071-2100 (Tableau 15). Cela se remarque aussi sur la Figure 51 (panneau du haut), où les courbes de dépassement pour le point *Off* se croisent pour des probabilités inférieures à 0,1 %. Cette diminution des hauteurs de vagues lors des tempêtes extrêmes durant la période 2041-2070 est peut-être due à la distribution un peu aléatoire des tempêtes extrêmes à travers un siècle. Il est possible, que si tous les intrants avaient été disponibles pour une autre simulation climatique que la simulation AHJ du MRCC, cette tendance aurait été différente.

L'évolution des vagues de tempêtes extrêmes est un peu différente plus près de la côte, probablement car ces sites sont abrités partiellement des tempêtes venant du nord-est. Devant la côte au point *Mid-4*, il y a une tendance générale d'augmentation durant le XXI^e siècle, mais les deux plus fortes tempêtes ont eu lieu durant la période 2041-2070 (Tableau 15, Figure 51). De même, dans l'anse de la Mission au point *Coast-5*, les tempêtes extrêmes durant la période 2041-2070 (3,52 m, 3,12 m, 3,12 m, etc.) étaient plus fortes que durant la période 2071-2100 (3,13 m, 2,77 m, etc., Tableau 15). À noter, que le classement des plus fortes tempêtes diffère entre les points *Mid-4* et *Coast-5*, car des petites variations de la direction des tempêtes modifient la diffraction des vagues autour de l'île Hearn et la réfraction des vagues en milieu côtier.

Les hauteurs significatives des vagues pour différentes périodes de retour ont aussi été calculées (Tableau 16). Comme déjà indiqué pour le secteur de Kuujjuarapik, les résultats varient entre les trois distributions utilisées (Pareto généralisée (GPD), Gumbel et Weibull) et déterminer quelle distribution est la plus adaptée pour un jeu de données nécessite souvent d'examiner visuellement les graphiques représentant les données des tempêtes et les distributions théoriques. Néanmoins, la distribution de Pareto généralisée est souvent utilisée de manière standard de nos jours.

Les hauteurs significatives pour la période de retour de 50 ans varient, sur les 3 périodes d'analyse, entre 5,6 et 6,6 m, au point *Off* au large, mais ces hauteurs diminuent en se dirigeant vers la côte, entre 3,4 et 4,5 m au point *Mid-4* devant la côte, et entre 2,6 et 3,6 m au point *Coast-5* dans l'anse de la Mission (Tableau 16). L'évolution au cours du XXI^e siècle est similaire à celle décrite ci-dessus pour les tempêtes extrêmes. Les hauteurs significatives des vagues pour des périodes de retour de 20 et 50 ans augmentent généralement de 1982-2010 à 2071-2100, néanmoins il existe des disparités de tendance selon la proximité avec la côte : la zone au large (point *Off*) présente des hauteurs de vagues

moins élevées lors de la période 2040-2071 que lors du passé récent (1982-2010); alors que pour les zones plus côtières (*Mid-4* et *Coast-5*) les hauteurs de vagues atteintes sont plus élevées lors de la période 2040-2071 que lors de la période suivante (2071-2100) (Tableau 16, Figure 52).

L'examen de l'évolution des roses des vagues pour les trois périodes indique un changement dans la direction des plus fortes tempêtes durant le XXI^e siècle pour les vagues au large. Au point *Off*, elles venaient surtout du nord-est pendant la période du passé récent (1982-2010), alors que durant les deux périodes futures elles venaient aussi bien du nord-est que du nord-nord-ouest (Figure 53). Par contre, pour les points plus près de la côte (*Mid-4* et *Coast-5*) aucun changement significatif dans les directions n'a été noté (Figures 53 et 54). Toutefois, seulement les vagues venant au large du nord-ouest ont une influence importante sur ces sites à cause de la configuration de la côte et de la bathymétrie.

En résumé, les résultats de modélisation pour le secteur de Quaqtak avec la simulation climatique AHJ montrent une augmentation progressive au cours du XXI^e siècle, mais celle-ci semble plus rapide pour les vagues moyenne à forte durant la première moitié du XXI^e siècle, c'est-à-dire entre 1982-2010 et 2041-2070 qu'entre 2041-2070 et 2071-2100, aussi bien au large que plus près de la côte. Pour les vagues des tempêtes extrêmes, la tendance générale est aussi à l'augmentation des hauteurs de vagues entre 1982-2010 et 2071-2100. Toutefois, la période intermédiaire 2041-2070 présente des tempêtes extrêmes moins élevées que lors de la période 1982-2010 au large, alors que ces mêmes tempêtes lors de cette période intermédiaire génèrent, proche de la côte, des vagues plus fortes que lors de la période 2071-2100.

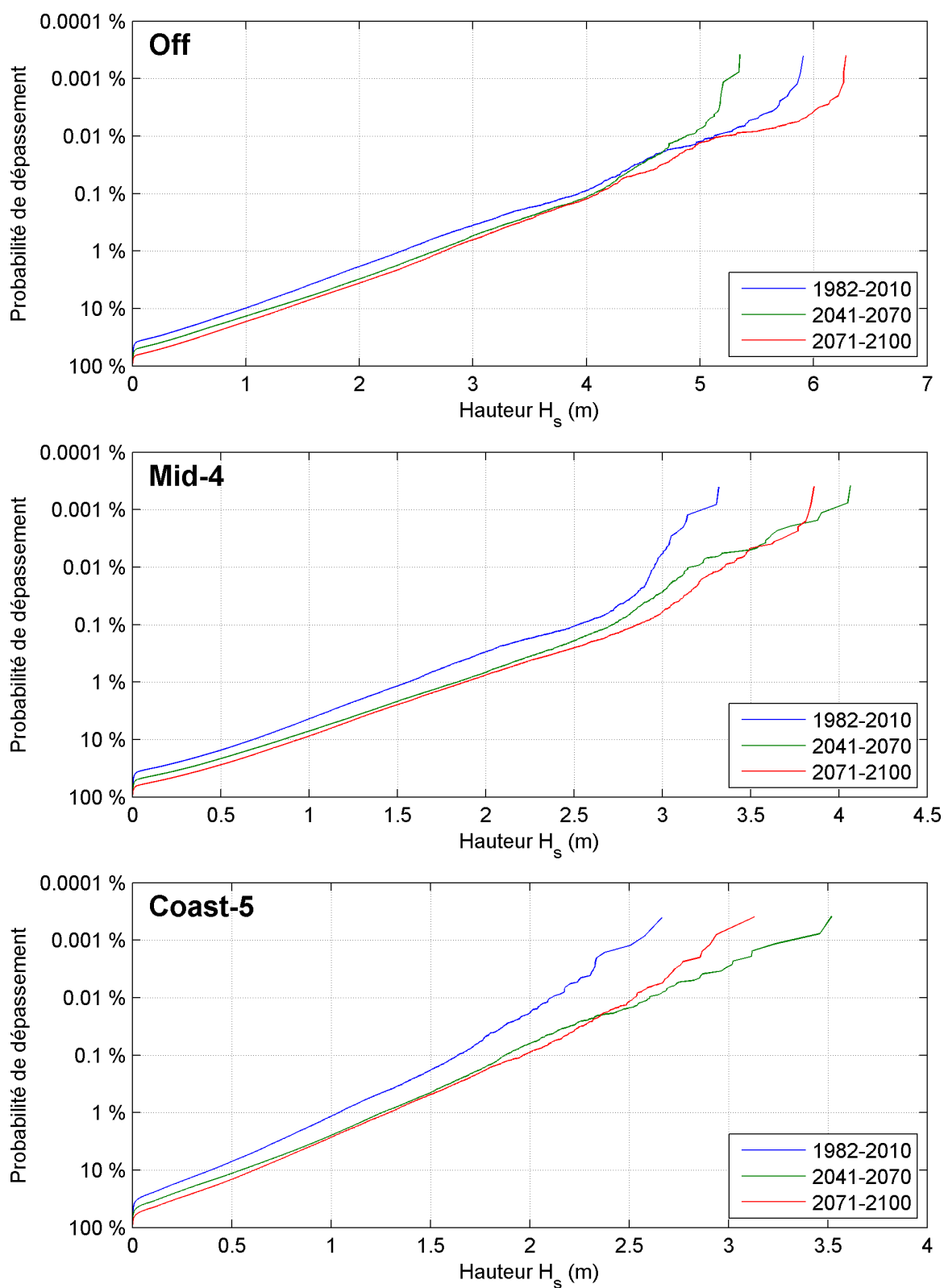


Figure 51. Courbes de probabilité de dépassement des hauteurs significatives des vagues pour les trois points d'intérêt Off, Mid-4 et Coast-5 du secteur de Quaqtaq.

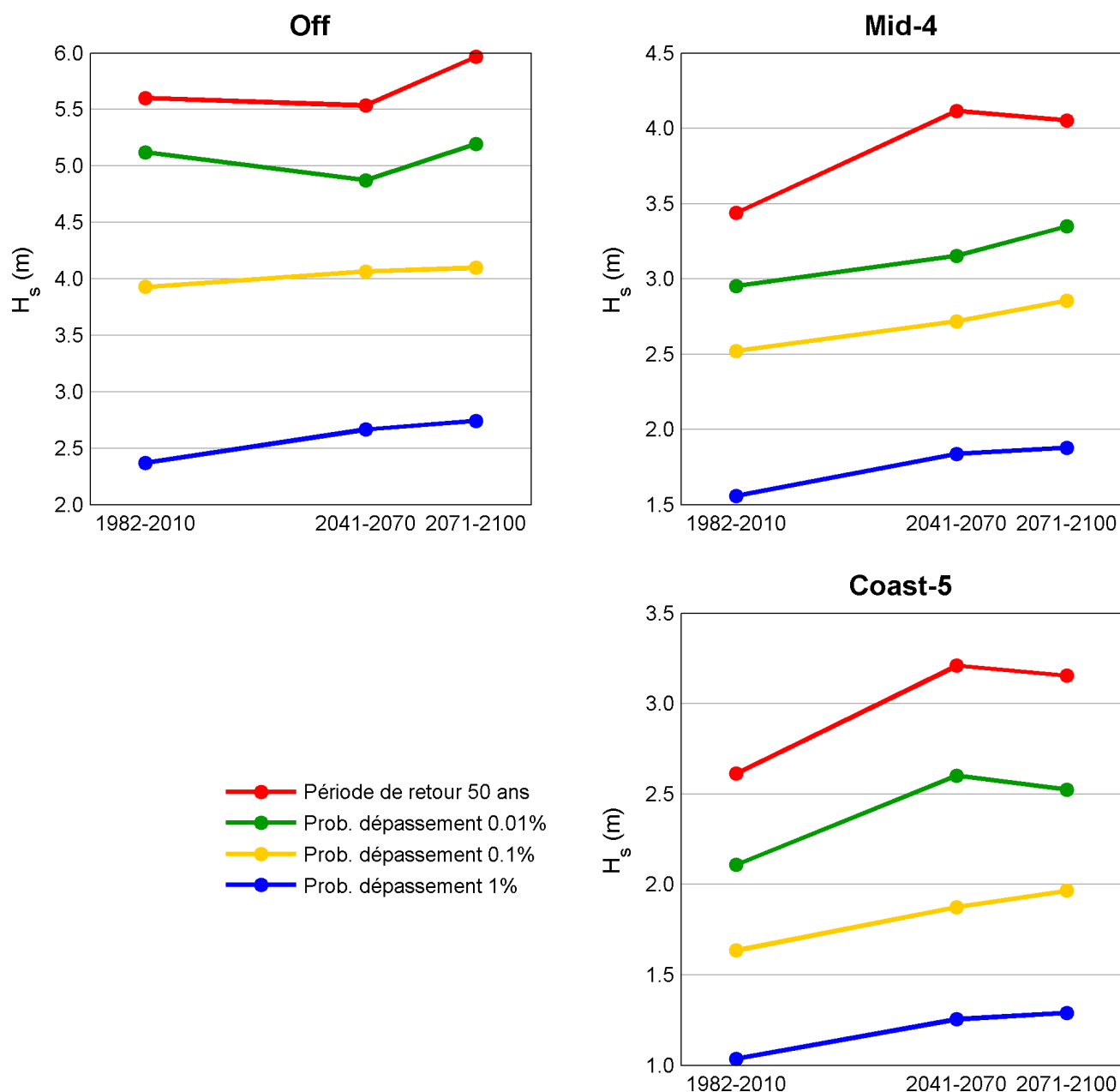


Figure 52. Évolution au cours du XXI^e siècle de plusieurs indicateurs d'événements extrêmes pour les points Off, Mid-4 et Coast-5 du secteur de Quaqtq, à savoir les hauteurs significative (H_s) associées à la période de retour de 50 ans (calculée avec la distribution Pareto généralisée) et les probabilités de dépassement de 0,01 %, 0,1 % et 1 %.

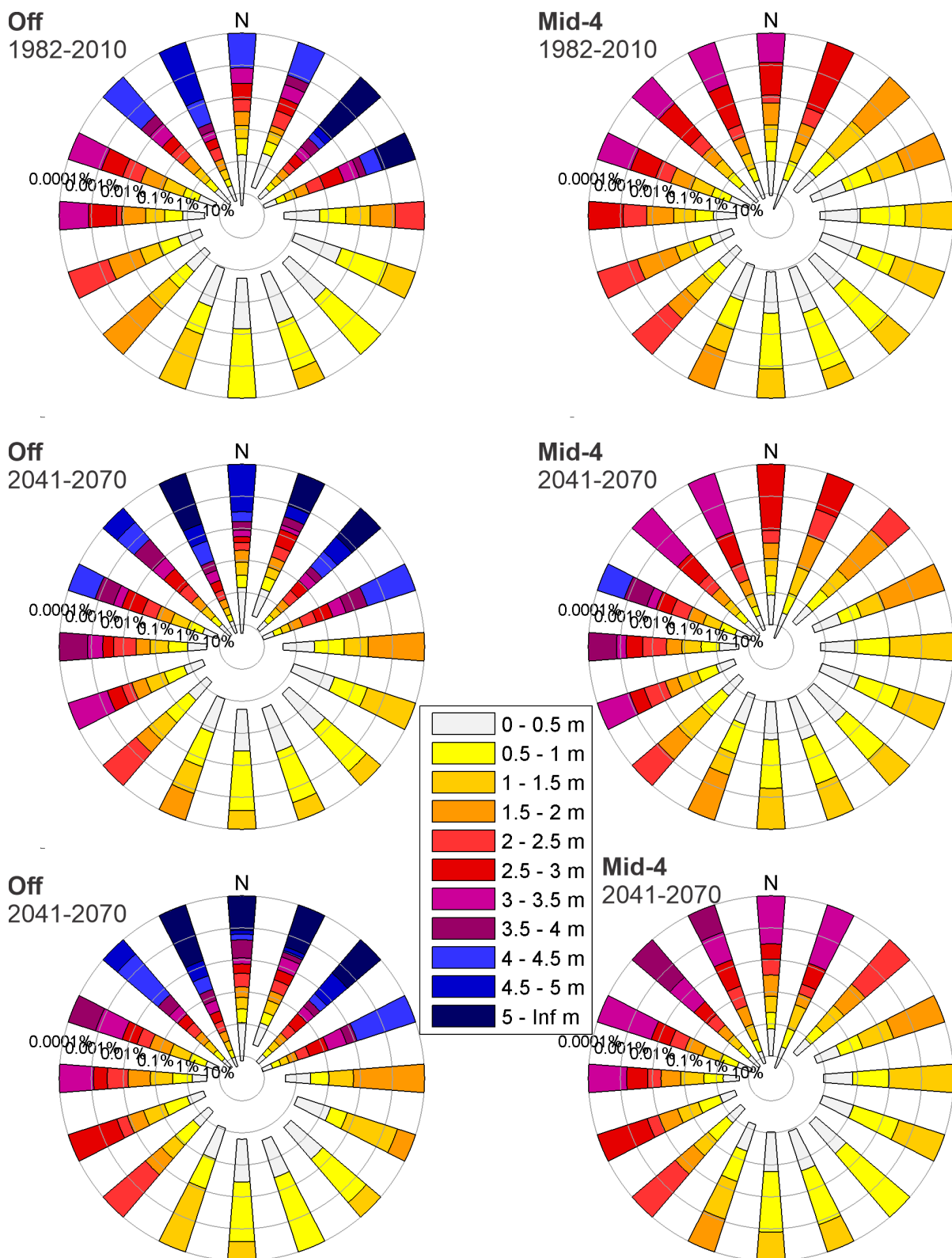
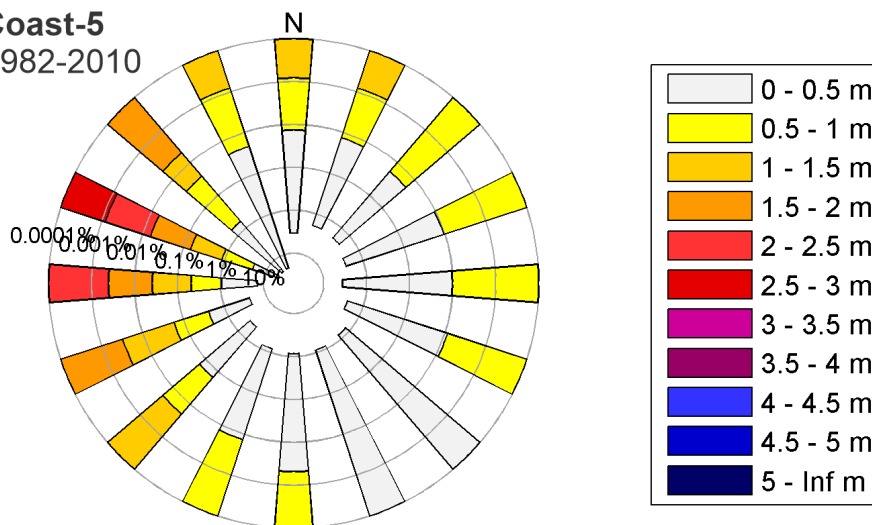
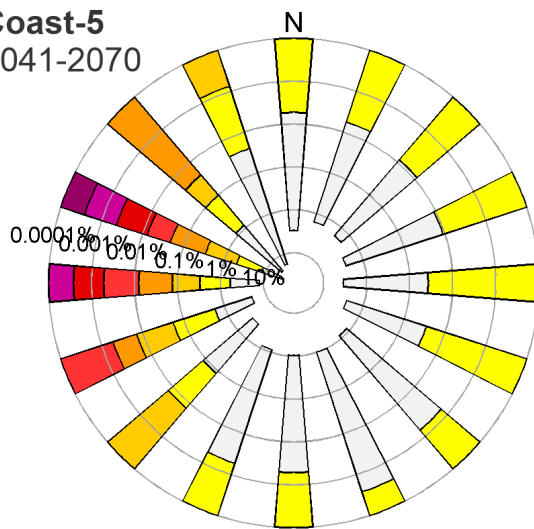


Figure 53. Roses de vagues aux points Off et Mid-5 du secteur de Quaqtak pour les résultats de SWAN 1982-2020 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Voir la Figure 54 pour l'explication du graphique.

Coast-5
1982-2010



Coast-5
2041-2070



Coast-5
2041-2070

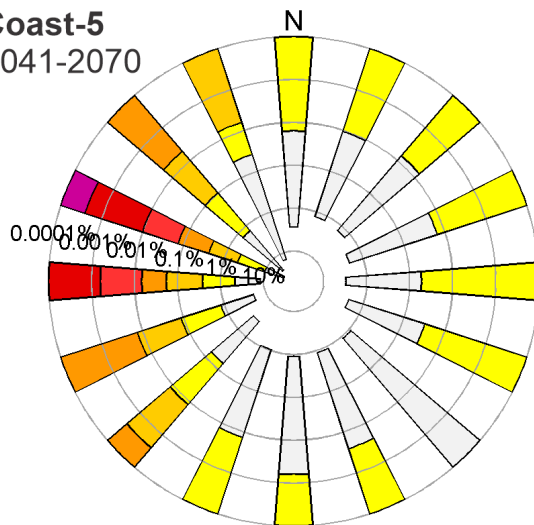


Figure 54. Roses de vagues au point Coast-5 du secteur de Quaqtq pour les résultats de SWAN 1982-2020 et 2041-2070 avec la simulation climatique AHJ. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphasis 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 15. Plus fortes tempêtes pour les trois périodes du passé récent et du futur de la simulation AHJ et pour les trois sites d'intérêt à Quaqtaq. Les couleurs signalent les tempêtes figurant aussi bien pour le site Off au large que pour le site intermédiaire Mid-4 et le site côtier Coast-5 près de Quaqtaq.

	Off				Mid-4				Coast-5			
	Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)	Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)	Date	H _s (m)	T ₀₂ (s)	Dir (°)
1982-2010	2009-12-02	5.91	9.1	45	1987-09-28	3.32	4.6	297	1987-09-28	2.66	4.1	293
	2001-10-06	5.43	8.4	57	1982-09-20	3.14	7.0	325	2001-08-23	2.38	4.1	298
	1982-09-20	4.71	7.7	330	1987-09-26	3.05	7.3	329	2004-10-31	2.33	4.2	277
	1994-08-08	4.66	7.9	331	2001-10-07	3.04	4.4	359	2008-10-18	2.33	4.2	268
	1992-10-25	4.65	8.4	46	1993-11-10	3.00	5.0	341	2003-09-09	2.18	3.8	300
2041-2070	2055-09-28	5.35	8.4	331	2066-10-15	4.06	5.3	282	2066-10-15	3.52	5.1	284
	2055-11-08	5.20	8.5	345	2048-10-26	3.90	5.2	290	2065-10-22	3.12	4.7	274
	2051-11-12	5.19	8.5	31	2065-10-22	3.73	5.1	264	2055-09-30	3.12	4.7	290
	2061-12-15	5.18	8.2	345	2055-09-30	3.60	4.9	290	2048-10-26	3.02	4.6	289
	2066-10-13	4.99	8.0	329	2055-09-28	3.34	8.0	325	2064-08-20	2.87	4.5	290
2071-2100	2094-01-02	6.28	8.4	330	2094-01-02	3.86	8.3	322	2075-10-20	3.13	4.7	282
	2091-12-23	6.01	8.6	15	2073-07-03	3.49	4.8	308	2092-09-20	2.77	4.6	285
	2092-10-24	5.18	7.8	45	2075-10-20	3.46	4.9	280	2089-10-09	2.75	4.3	291
	2078-11-24	5.09	9.3	50	2091-12-23	3.37	8.2	357	2073-07-03	2.73	4.2	294
	2077-11-30	4.98	7.5	330	2092-09-20	3.34	5.2	305	2077-09-09	2.62	4.0	299

Tableau 16. Hauteurs significatives des vagues en mètre pour différentes périodes de retour aux points Off, Mid-4 et Coast-5 à Quaqtq pour les périodes 1982-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les périodes de retour ont été calculées avec trois distributions : la distribution de Pareto généralisée (GPD) et les distributions probabilistes Gumbel et Weibull.

	ans	1982-2010			2041-2070			2071-2100		
		GPD	Gumbel	Weibull	GPD	Gumbel	Weibull	GPD	Gumbel	Weibull
Off	1	3.58	3.56	3.55	3.82	3.79	3.79	3.95	3.94	3.94
	2	4.01	4.07	4.07	4.21	4.24	4.26	4.38	4.39	4.39
	5	4.53	4.73	4.77	4.66	4.84	4.88	4.89	4.99	4.98
	10	4.88	5.24	5.31	4.96	5.29	5.35	5.24	5.44	5.42
	20	5.21	5.74	5.87	5.23	5.74	5.83	5.57	5.89	5.86
	50	5.60	6.41	6.61	5.54	6.33	6.46	5.97	6.49	6.45
Mid-4	1	2.29	2.29	2.28	2.64	2.65	2.65	2.66	2.68	2.69
	2	2.55	2.57	2.58	2.95	2.97	2.98	2.95	2.98	3.00
	5	2.85	2.95	2.97	3.32	3.39	3.41	3.30	3.38	3.41
	10	3.05	3.24	3.27	3.58	3.71	3.74	3.54	3.68	3.72
	20	3.23	3.53	3.57	3.82	4.03	4.07	3.77	3.99	4.03
	50	3.44	3.91	3.97	4.12	4.46	4.51	4.05	4.38	4.44
Coast-5	1	1.67	1.68	1.68	2.02	1.99	1.96	1.97	1.98	1.97
	2	1.88	1.89	1.89	2.27	2.28	2.26	2.21	2.23	2.23
	5	2.13	2.17	2.17	2.58	2.67	2.66	2.50	2.57	2.59
	10	2.29	2.38	2.39	2.78	2.96	2.97	2.71	2.82	2.87
	20	2.44	2.59	2.60	2.98	3.25	3.30	2.91	3.08	3.14
	50	2.61	2.87	2.89	3.21	3.64	3.73	3.16	3.42	3.52

6.7. Influence de la remontée du niveau marin global

Les changements climatiques ne produiront pas seulement un réchauffement global et une diminution de la couverture de glace de mer, mais aussi une hausse du niveau marin eustatique. L'IPCC (2021) estime une hausse probable entre 0,58 m et 1,07 m d'ici 2100 pour un scénario climatique RCP 8.5 (assez proche du scénario climatique SRES A2 utilisé pour la présente modélisation). Par contre, au Nunavik la croûte terrestre remonte encore suite à la fin de la dernière glaciation (ajustement isostatique), produisant actuellement une baisse du niveau marin relatif (Peltier, 2004). Ce réajustement isostatique compensera une grande partie de la hausse du niveau marin global.

Han et al. (2015) estiment que la variation du niveau marin relatif durant le XXI^e siècle serait de l'ordre de +0,1 m à Kuujjuarapik et de 0,0 m à Quaqtq en utilisant un scénario climatique SRES A2 et une hausse du niveau marin global de 0,55 m. Même si la hausse du niveau marin global est finalement plus proche du sommet de l'intervalle proposé par IPCC (2021), à savoir 1,07 m, la hausse du niveau marin relatif à Kuujjuarapik et Quaqtq ne devrait pas dépasser 0,5 m durant le XXI^e siècle.

La future hausse du niveau marin relatif n'a pas été incluse dans la modélisation des vagues avec SWAN pour les conditions AHJ pour les deux raisons suivantes. D'une part, la hausse estimée par Han et al. (2015) est très faible (+0,1 m/siècle à Kuujjuarapik, 0,0 m/siècle à Quaqtaq). D'autre part, les données de courants et niveaux d'eau nécessaires pour la modélisation avec SWAN proviennent des simulations de sous-domaines du modèle océanique MOR-HB (Senneville, 2018), qui ne sont pas disponibles avec des scénarios de hausse du niveau marin. Toutefois, une hausse significative du niveau marin modifierait les courants et les niveaux d'eau en milieu côtier peu profond.

Néanmoins, une étude de sensibilité a été effectuée pour déterminer l'influence d'une hausse du niveau marin sur les vagues pour chacun des deux secteurs en faisant varier le niveau marin par pas de 0,1 m pour différentes tempêtes. Pour Kuujjuarapik le niveau marin a été incrémenté de 0 à 1,5 m par rapport au niveau marin moyen; pour Quaqtaq la variation s'étendait de -4 à +4 m. En effet, la dissipation de l'énergie des vagues par friction sur le fond est réduite et la réfraction des vagues est modifiée avec l'augmentation de la profondeur d'eau. Généralement la variation des hauteurs significatives (dH_s) était relativement linéaire par rapport à la variation du niveau marin (dz). Le rapport de sensibilité dH_s / dz , soit l'augmentation des hauteurs de vagues en fonction de la hausse du niveau marin, a donc été calculée par régression linéaire sur l'intervalle dz 0,0 à 1,5 m pour Kuujjuarapik et sur l'intervalle dz -2 à +2 m pour Quaqtaq (Tableaux 17 et 18).

Pour le secteur de **Kuujjuarapik**, dH_s varie relativement linéairement par rapport à dz sur l'intervalle dz 0,0 à 1,5 m. Le Tableau 17 présente le rapport de sensibilité dH_s / dz pour les trois sites d'intérêt. L'influence du niveau marin est surtout importante pour les tempêtes majeures avec des vagues de plus de 4 m et des périodes supérieures à 6,5 s. Dans ces conditions, l'augmentation de la hauteur des vagues serait jusqu'à 6% de la hausse du niveau marin au large (point *AWAC*) et entre 7% et 25% près de la côte (point *hB*, Tableau 17). Pour des vagues inférieures ou égales à 3 m, l'influence de la hausse du niveau marin serait inférieure à 1% sur la hauteur des vagues au large (point *AWAC*) et seulement de 2% sur les vagues côtières (point *hA*). Par exemple, une hausse du niveau marin de 0,3 m entraînerait lors des tempêtes majeures une augmentation des hauteurs significatives de 0,017 m au large et entre 0,02 et 0,07 m près de la côte. À titre de comparaison, le seuil de hauteur significative, qui est dépassé 0,1 % du temps, augmentera durant le XXI^e siècle de 0,36 m au point *AWAC* et de 0,21 m au point *hB*.

Pour le secteur de Kuujjuarapik, le niveau marin a donc une influence non négligeable pour les vagues extrêmes près de la côte en cas d'une très forte hausse du niveau marin global. Toutefois, cette influence du niveau d'eau existe déjà lors de chaque tempête car le niveau d'eau varie tous les jours en fonction des marées (marnage de vive-eau 1,8 m) et des surcotes/décotes qui peuvent atteindre +1,0 m et -0,8 m. Ainsi lors de la tempête du siècle de la modélisation AHJ le 16 octobre 2001, le pic de la hauteur significative des vagues au large est survenu lors d'une marée basse de vive eau alors que près la côte (point *hB*), ce pic dans les hauteurs significatives est arrivé seulement 5 heures plus tard à marée haute avec un niveau d'eau 1,8 m plus haut. À ce moment-là, les vagues au large avaient déjà décréu de 7,97 m à 7,00 m. La hauteur des vagues près de la côte lors d'une tempête future dépendra donc plus du niveau de marée et de la surcote lors du pic de tempête que d'une possible hausse du niveau marin relatif moyen de 0,2 m ou 0,4 m.

Tableau 17. Étude de sensibilité des hauteurs significatives en fonction de la hausse du niveau marin pour différentes conditions de tempêtes au secteur de Kuujjuarapik. Les hauteurs et périodes des vagues sont indiquées à la frontière externe du domaine du modèle et au point AWAC, alors que le rapport de sensibilité dH_s / dz est indiqué pour les trois points AWAC, hB et hA.

Frontière externe		AWAC		AWAC	hB	hA
H_s	T_{01}	H_s	T_{02}	dH_s / dz	dH_s / dz	dH_s / dz
7,97 m	9,0 s	5,31 m	9,2 s	0,054	0,249	0,098
6,50 m	8,2 s	4,91 m	8,6 s	0,055	0,221	0,100
5,00 m	7,2 s	3,86 m	7,6 s	0,029	0,071	0,059
4,00 m	6,5 s	3,25 m	5,2 s	0,013	0,083	0,048
3,00 m	6,0 s	2,47 m	6,4 s	0,009	-0,004	0,019
2,00 m	5,0 s	1,65 m	5,3 s	0,004	0,006	0,007

Pour le secteur de **Quaqtaq**, le niveau d'eau influence très peu les vagues au point *Off* au nord de l'île Hearn, ce qui n'est pas étonnant vu que la profondeur y est encore de 200 m. Au point Mid-4 devant la côte, dH_s varie relativement linéairement par rapport à dz sur l'intervalle dz -4 à +4 m (Figure 55). Le rapport de sensibilité dH_s / dz pour ce point est de 0,023 pour les tempêtes venant du nord-est, qui sont déjà fortement atténuées à ce point, et d'environ 0,014 pour les tempêtes venant du nord-ouest (Tableau 18). Cette différence s'explique par la plus longue distance en eaux peu profondes que doivent parcourir les vagues venant du nord-est pour atteindre le point Mid-4, comparé aux vagues venant du nord-ouest.

Par contre, la relation entre dH_s et dz est plus complexe au point Coast-5 dans l'anse de la Mission. Pour des tempêtes venant du nord-est, la hauteur significative H_s diminue avec le niveau d'eau croissant. Dans ces conditions, le niveau d'eau semble avoir peu d'impact sur la dissipation de l'énergie des vagues, mais plus sur la réfraction des vagues, qui diminue avec la profondeur croissante, et ainsi moins d'énergie de vague est redirigée vers l'intérieur de l'anse de la Mission (Figure 55). Pour les tempêtes venant du nord-ouest, H_s augmente avec le niveau d'eau croissant, mais cette augmentation n'est pas linéaire, mais devient asymptotique pour les hauts niveaux d'eau (Figure 55); le rapport dH_s / dz est élevé pour des niveaux d'eau inférieurs à -2 m (environ 0,14), puis dH_s / dz décroît progressivement pour s'approcher ou passer sous zéro pour des niveaux d'eau supérieur à +2 m (0,006 à -0,008).

Seulement les tempêtes extrêmes ont été considérées dans cette étude de sensibilité. L'influence du niveau d'eau sur les vagues moyennes sera moindre, car elles sont moins affectées par la bathymétrie à cause de leur longueur d'onde plus courte (voir l'exemple de Kuujjuarapik, Tableau 17).

Le niveau marin a donc une influence pour les vagues extrêmes aussi dans le secteur de Quaqtaq. Devant la côte, une hausse du niveau marin relatif de 0,3 m ferait augmenter les

vagues de tempêtes extrêmes d'environ 0,007 m pour les tempêtes du nord-ouest et d'environ 0,004 m pour les tempêtes du nord-est. La relation est toutefois complexe dans l'anse de la Mission, où est située l'infrastructure maritime de Quaqtq. Pour des tempêtes du nord-ouest, quand des fortes vagues pénètrent dans l'anse de la Mission, l'augmentation de la hauteur des vagues sera jusqu'à 14% de la hausse du niveau marin à marée basse, alors que l'influence est minime ou même négative à marée haute. Cette influence dépendra donc du cycle la marée lors du pic de tempête. Mais l'influence du niveau de la marée est bien plus importante dans cet environnement macrotidal, caractérisé par un marnage de plus de 9 m en vive-eau et un peu moins de 4 m en morte-eau. Donc l'impact des futures tempêtes dépendra bien plus du niveau de la marée lors d'un pic de tempête que d'une possible hausse du niveau marin relatif de 0,0 à 0,5 m/siècle.

Tableau 18. Étude de sensibilité des hauteurs significatives en fonction de la hausse du niveau marin pour quatre tempêtes de la simulation AHJ 1982-2010 au secteur de Quaqtq. Les caractéristiques des vagues sont indiquées à la frontière externe de la grille Dianabay et pour le point Mid-4. Le rapport de sensibilité dH_s / dz est indiqué pour les points Mid-4 et Coast-5.

Rang tempête	Frontière externe				Mid-4		Mid-4	Mid-4
	H_s	T_{01}	Dir		dH_s / dz	T_{02}	dH_s / dz	dH_s / dz
2	7,29 m	8,8 s	79°	(NE)	2,72 m	4,3 s	0,023	0,000 à -0,022
3	5,64 m	7,4 s	322°	(NW)	3,02 m	7,3 s	0,015	0,123 à 0,006
12	5,20 m	7,9 s	72°	(NE)	2,04 m	4,4 s	0,023	-0,015
16	4,65 m	6,9 s	328°	(NW)	2,87 m	6,5 s	0,013	0,161 à -0,008

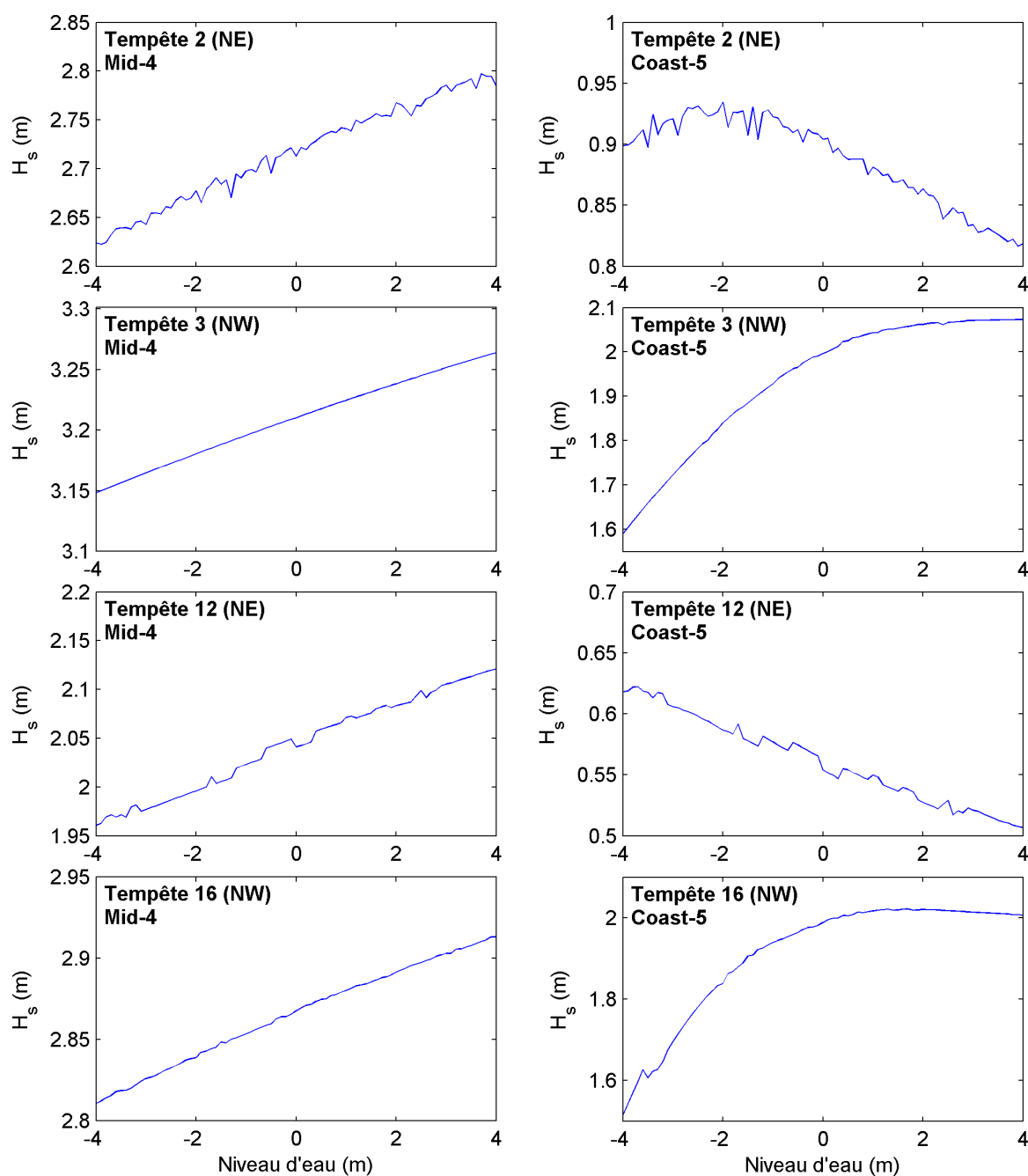


Figure 55. Relation entre le niveau d'eau et la hauteur des vagues (H_s) aux points Mid-4 et Coast-5 pour quatre tempêtes représentatives du secteur de Quaqtuaq.

7. SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Sur ces trois années (4 ans pour Quaqtq) de suivi des conditions maritimes, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes ont évolué d'une année à l'autre. Les tempêtes interviennent à l'automne de septembre à décembre et présentent une grande variabilité interannuelle : sur les trois années de données à Kuujjuarapik, si l'on recense les quinze plus fortes tempêtes, neuf sont intervenues le premier automne en 2017, quatre à l'automne 2018 et deux à l'automne 2019. À Quaqtq, sur les quinze plus fortes tempêtes, sept sont intervenues le premier automne en 2017, quatre à l'automne 2018, une seule à l'automne 2019 et trois le dernier automne en 2020. L'année 2017 a été la plus tempétueuse, phénomène observé aux deux sites malgré leur distance. Le site de Kuujjuarapik est exposé surtout aux fortes vagues de l'ouest et dans une moindre mesure à celles du nord-ouest à cause de la protection partielle des îles Belcher. La plus grosse tempête a généré des vagues de 5,75 m de hauteur significative avec une période de 6,64 s. Le site de Quaqtq est exposé aux fortes vagues du nord-ouest en provenance du détroit d'Hudson. La plus grosse tempête a généré des vagues de 5,70 m de hauteur significative avec une période de 7,14 s. Malgré ces hauteurs impressionnantes atteintes lors d'événements extrêmes, les données enregistrées aux deux sites montrent que les vagues ne dépassent pas 1 m de hauteur 90% du temps où l'eau est libre de glace. La saison de glace est très longue et s'étend de la fin décembre jusqu'au mois de juillet.

Les profileurs des courants ont échantillonné les courants sur la quasi-totalité de la colonne d'eau produisant ainsi des profils verticaux de courants aux vingt minutes pour Kuujjuarapik et aux heures pour Quaqtq. À Kuujjuarapik les courants sont très faibles et sont inférieurs à 0,2 m/s la plupart du temps, ils induisent un transport net vers le nord-est. Le signal de la marée y est très peu décelable. À Quaqtq, les courants mesurés sont plus forts et peuvent atteindre plus de 1 m/s. Ils engendrent un transport net vers le nord-est et l'est-nord-est.

À Kuujjuarapik, les surcotes et décotes de tempêtes sont relativement importantes et ont un effet certain sur le niveau d'eau à cause du faible marnage. Ces surcotes interviennent généralement à l'automne pendant les périodes libres de glace. La plus forte surcote était de 1,36 m. À Quaqtq par contre, les surcotes sont plus faibles, ne dépassant pas 0,53 m. C'est le signal de marée qui domine dans les variations du niveau d'eau. Plus de la moitié des dix-huit plus importantes surcotes sont intervenues lorsque l'englacement était présent. Il pourrait s'agir d'un effet lié au frottement de l'onde de marée avec le couvert de glace induisant un décalage temporel du niveau d'eau avec les marées astronomiques.

La modélisation des vagues effectuée avec le modèle SWAN en suivant la simulation climatique AHJ du Modèle régional canadien du climat (MRCC, scénario climatique SRES A2) montre une augmentation de la hauteur des vagues pendant l'hiver de 1982 à 2100 en raison de l'augmentation des périodes d'eaux libres au cours du XXI^e siècle. Ceci est dû à la diminution de la durée du couvert de glace suite au réchauffement climatique. L'analyse de la distribution des vagues pendant les périodes de transition indique que l'état des glaces serait plus critique pour la période de transition automnale que la période de transition printanière à cause de la saisonnalité des tempêtes.

La modélisation des vagues révèle une augmentation progressive du climat de vague au cours du XXI^e siècle aussi bien au large que près de la côte pour le secteur de Kuujjuarapik et pour le secteur de Quaqtaq. Ainsi à Kuujjuarapik, la hauteur des vagues survenant 0,1 % du temps augmente progressivement au large de 3,73 m (1982-2010) à 4,09 (2071-2100), près de la côte devant le village de 2,86 m à 3,07 m et dans le détroit de Manitounuk de 1,02 m à 1,19 m. Comme la tempête du siècle s'est produite à Kuujjuarapik dans la période passée pour la simulation climatique AHJ (le 16 octobre 2001 avec des vagues de 6,49 m au large et 3,99 m près de la côte), cette augmentation des hauteurs des vagues est moins évidente pour les événements extrêmes, bien que présente si l'on ignore cette tempête exceptionnelle. Les hauteurs des vagues pour la période de retour 50 ans sont d'environ 6 m au large de Kuujjuarapik et entre 4,0 et 4,5 m près de la côte.

Pour le secteur de Quaqtaq, la hauteur des vagues survenant 0,1 % du temps augmente progressivement au large de 3,93 m (1982-2010) à 4,10 m (2071-2100), devant la côte les hauteurs varient de 2,52 m à 2,86 m et dans l'anse de la Mission où est situé le village, elles varient de 1,02 m à 1,19 m. La hausse existe aussi pour les tempêtes extrêmes au cours du XXI^e siècle, mais elle n'est pas progressive entre les trois périodes modélisées et présente des disparités selon la proximité avec la côte. Les hauteurs des vagues pour la période de retour 50 ans sont d'environ 6 m au large et entre 2,6 et 3,6 dans l'anse de la Mission.

8. RÉFÉRENCES

- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions – 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104/C4, 7649-7666.
- Cavaleri, L., Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 86/C11, 10961–10973.
- Collin, S., Neumeier, U., Dumont, D., 2018. Distribution spatio-temporelle des vagues en milieu côtier arctique au Nunavik. Réunion scientifique annuelle de Québec-Océan, Rivière-du-Loup, 5-6 novembre 2018.
- Collin, S., Neumeier, U., Dumont, D., 2019. Spatio-temporal wave distribution in two sectors of Nunavik in a climate change context. In: 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, 8-18 July 2019, Montréal.
- Collins, C.O., Rogers, W.E., 2017. *A Source Term for Wave Attenuation by Sea ice in WAVEWATCH III: IC4*. U.S. Naval Research Laboratory, NRL Report NRL/MR/7320-17-9726, 25 p.
- Dorais, L.-J., 1997. Quaqtat: modernity and identity in an inuit community. University of Toronto Press, 160 p.
- Dumont, D., Kohout, A.L., Bertino, L., 2011. A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1–12.
- Dumont, D., 2022. Marginal ice zone dynamics: history, definitions and research perspectives. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 380, 20210253. doi:10.1098/rsta.2021.0253
- 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.
- 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
- Hanson, J.L., Tracy, B.A., Tolman, H.L., Scott, R.D., 2009. Pacific hindcast of three numerical wave models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 1614–1633.
- 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*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J.,

- Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803
- Hiles, C.E., Roberston, B., Buckham, B.J., 2019. Extreme wave statistical methods and implications for coastal analyses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 223, 50-60. doi:10.1016/j.ecss.2019.04.010
- 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. In Press.
- Meylan, M., Bennetts, L.G., Kohout, A.L., 2014. In situ measurements and analysis of ocean waves in the Antarctic marginal ice zone. *Geophysical Research Letter*, 41, 5046-5051. doi:10.1002/2014GL060809.
- Nakicenovic N, S Swart et al., 2000, *IPCC special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 p.
- Neary, V.S., Ahn, S., Seng, B.E., Allahdadi, M.N., Wang, T., Yang, Z., He, R., 2020. Characterization of Extreme Wave Conditions for Wave Energy Converter Design and Project Risk Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 289. doi:10.3390/jmse8040289
- 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., Collin, S., 2018. Full year waves records for two locations in Hudson Bay/Straight, Nunavik. ArticNet Annual Scientific Meeting 2018, Ottawa, 10-14 December 2018.
- 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., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 111-149. doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
- Ressources naturelles Canada, 2022. *Levés géodésiques du Canada*. Banque de données, <https://open.canada.ca/data/en/dataset/5a4e46fe-3e52-57ce-9335-832b5e79fecc>, accédé le 11 mars 2022.
- Rogers, W.E., 2019: *Implementation of sea ice in the wave model SWAN*. U.S. Naval Research Laboratory Memorandum Report NRL/MR/7322-19-9874, 25 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
- Senneville, S., 2018. *Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik en contexte des changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk*. Rapport final remis au Ministère des Transports, Mobilité durable et de l'Électrification des transports (projet CC05.1), Institut des sciences de la mer de Rimouski, 116 p.
- Sévigny, C., Dumont, D., Senneville, S., St-Onge-Drouin, S., Grenier, P., Ardhuin, F., 2017. *Projected changes in the wave and sea ice climate along the coastal Hudson Bay*. Arctic Change 2017, Québec, décembre 2017, présentation orale.
- Squire, V. A., 2007. Of ocean waves and sea-ice revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 49, 110-113. doi:10.1016/j.coldregions.2007.04.007
- Wang, L., Perrie, W., Long, Z.X., Blokhina, M., Zhang, G.S., Toulany, B., Zhang, M.H., 2018. The impact of climate change on the wave climate in the Gulf of St. Lawrence. *Ocean Modelling*, 128, 87-101. doi:10.1016/j.ocemod.2018.06.003

ANNEXE 1 : LISTE DES FICHIERS

Fuseau horaire : UTC

Pour les bursts de vagues, le temps indiqué est le milieu de la période échantillonnée qui durait 1024 s pour les AWACs et 8½ minutes pour les mouillages côtiers. Par contre, pour les profils de courants, le temps indiqué est le début de la période de mesure qui durait 60 s.

Les différents paramètres de vagues sont expliqués à l'annexe 3. Les codes du contrôle de qualité des vagues sont expliqués à l'annexe 4.

Le trépied de l'AWAC de Kuujjuarapik était renversé lors du premier déploiement 2017-2018 et seulement les données du capteur de pression sont utilisables pour cette période. Les paramètres de vagues ont été calculé avec les données de pression, mais cette méthode produit des résultats imprécis lorsque le capteur de pression est à 30 m de profondeur. Les résultats usuels de l'AWAC (spectres de vague, courants, glace) ne sont pas disponibles pour ce déploiement.

Données de vagues

KUJ17-19_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage AWAC Kuujjuarapik (septembre 2018 - juillet 2020).
QUA17-19_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage AWAC Quaqtaq (août 2017 - septembre 2021).
Kuuj_rbrA18_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage RBR TWR-2050 Kuujjuarapik A (août 2018 - septembre 2018)
Kuuj_rbrB18_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage RBR TWR-2050 Kuujjuarapik B (août 2018 - septembre 2018)
Qua_rbr18_vagues.xlsx	Paramètres de vagues du mouillage RBR TWR-2050 Quaqtaq (août 2018 - novembre 2018)

Ces fichiers Excel contiennent 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 3);
- 2) seulement les résultats bons ou douteux, les résultats mauvais ayant été remplacés par -999;
- 3) seulement les résultats bons, les résultats douteux ou mauvais ayant été remplacés par -999.

KUJQUA_spectre.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres non directionnels des vagues :
KUJ18.spectre	mouillage Kuujjuarapik, septembre 2018 - septembre 2019
KUJ19.spectre	mouillage Kuujjuarapik, septembre 2019 - juillet 2020
QUA17.spectre	mouillage Quaqtaq, août 2017 - août 2018
QUA18.spectre	mouillage Quaqtaq, août 2018 - août 2019

QUA19.spectre mouillage Quaqtak, août 2019 - septembre 2021

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

KUJ_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues du mouillage Kuujjuarapik : KUJ18.spectredir septembre 2018 - septembre 2019 KUJ19.spectredir septembre 2019 - juillet 2020
QUA_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues du mouillage Quaqtak : QUA17.spectredir août 2017 - août 2018 QUA17.spectredir août 2018 - août 2019 QUA17.spectredir août 2019 - septembre 2021

Données de courants

KUJ18_profil.xlsx	Profils de vitesse, mouillage Kuujjuarapik, septembre 2018 - septembre 2019.
KUJ19_profil.xlsx	Profils de vitesse, mouillage Kuujjuarapik, septembre 2019 - juillet 2020.
QUA17_profil.xlsx	Profils de vitesse, mouillage Quaqtak, août 2017 à août 2018.
QUA18_profil.xlsx	Profils de vitesse, mouillage Quaqtak, août 2018 à août 2019.
QUA19_profil.xlsx	Profils de vitesse, mouillage Quaqtak, août 2019 à septembre 2021.

Ces fichiers Excel contiennent 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.

Données de glaces

KUJ_glace.xls	Fichier Excel avec les statistiques de glace à Kuujjuarapik, avec une feuille de calcul par déploiement.
---------------	--

QUA_glance.xls

Fichier Excel avec les statistiques de glace à Quaqtaq, avec une feuille de calcul par déploiement.

Niveaux d'eau

Maregraphe_Kuuj_17-19.xlsx Fichier avec les données de niveaux d'eau du mouillage avec AWAC à Kuujjarpik (août 2017 - juin 2021).

Maregraphe_Qua_17-19.xlsx Fichier avec les données de niveaux d'eau du mouillage avec AWAC à Quaqtaq (août 2017 - octobre 2020).

Ces fichiers Excel contiennent deux feuilles, l'une avec les données du marégraphe TGR-2050 avec le niveau d'eau par rapport au niveau marin moyen, les prédictions avec T_TIDE et les surcotes/décotes par rapport à ces prédictions, l'autre avec la liste de 20 plus hauts niveaux d'eau, les 20 plus fortes surcotes et les 20 plus fortes décotes.

Bathymétrie

Data_bathy_Kuuj-Quaq.zip Fichier compressé contenant les résultats des relevés bathymétriques effectués par le CIDCO à Kuujjuarapik et à Quaqtaq. La liste des fichiers et leur contenu est décrite à la section 2.3 (page 1).

ANNEXE 2 : LEXIQUE

Les différents paramètres de vagues (H_{m0} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, H_{max} , H_m , H_{rms} , T_p , T_{02} , T_{01} , T_z , $T_{1/3}$, $T_{1/10}$, T_{max} , T_p , Dir_m , Dir_p , Dir_{Spread}) sont décrits dans l'annexe 3.

AST	<i>Acoustic Surface Tracking</i> , le faisceau vertical de l'AWAC qui mesure la distance jusqu'à la surface de l'eau ou de l'interface eau-glace.
AWAC	Profileur de courant avec options vagues et glaces, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek.
Burst	période d'échantillonnage à haute fréquence pour la mesure des vagues, entre deux bursts l'instrument est au repos et n'enregistre pas de données.
CGVD28	Système canadien de référence altimétrique de 1928 (<i>Canadian Geodetic Vertical Datum</i>) correspondant au niveau marin moyen mesuré à Pointe-au-Père.
Décote	Quand le niveau d'eau réel est plus bas que le niveau d'eau prédit selon les marées astronomiques, aussi le nom donné à la différence verticale entre ces deux niveaux.
Delft3D	Modèle pour milieux côtiers, milieux estuariens, lacs et rivières, qui reproduit les courants, les marées, les vagues et le transport sédimentaire. Delft3D est développé par Deltares, un centre de recherche néerlandais. Ce projet a utilisé au début le module <i>Delft3D-WAVE</i> , qui est un modèle vent-vague spectral de troisième génération avec le même code de calcul que le modèle SWAN.
Flag de qualité	Code ajouté à chaque donnée lors du contrôle de qualité pour décrire la validité des valeurs (non vérifié, bon, douteux, erroné).
Grille de calcul curvilinéaire	Grille constituée de quadrilatères irréguliers qui permettent à la grille de s'adapter à la bathymétrie et la morphologie côtière. Cela ressemble à une grille régulière ayant subi plusieurs distorsions locales et générales.
Harmoniques de marée	Paramètres d'amplitude et de phase pour les différentes composantes des marées astronomiques. Les harmoniques de marées sont utilisées pour calculer les prédictions de marée.
Surcote	Quand le niveau d'eau réel est plus haut que le niveau d'eau prédit selon les marées astronomiques, aussi le nom donné à la différence verticale entre ces deux niveaux.
SWAN	Modèle numérique vent-vague spectral de troisième génération, qui est utilisé dans le présent projet.

- TGR-2050 Marégraphe de la firme RBR.
- TWR-2050 Houlographe non-directionnel à capteur de pression de la firme RBR.
- Wavewatch III Modèle numérique vent-vague spectral de troisième génération, qui a été utilisé par Dany Dumont et Alain Mailhot pour simuler la baie d'Hudson à 10 km de résolution (abréviation WW3).

ANNEXE 3 : LISTE DES PARAMÈTRES DE VAGUES

Les vagues naturelles sont complexes, avec une grande variabilité temporelle des hauteurs, des périodes et des directions. Pour néanmoins les caractériser avec quelques valeurs, des paramètres statistiques des vagues sont calculés à partir de chaque enregistrement de vagues (série temporelle de 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 du houllographe et du logiciel utilisé pour le traitement. Voici un résumé des plus importants :

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

Symbol unitédescription

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_s	m	hauteur significative des vagues sans que soit spécifié la méthode de calcul (dans le contexte de la modélisation correspond généralement à H_{m0})
$H_{1/10}$	m	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
$H_{\max}$	m	hauteur de la plus grande vague (méthode zero-crossing)
H_m	m	hauteur moyenne (méthode zero-crossing)
H_{rms}	s	hauteur <i>root-mean-square</i> (racine de la moyenne des carrés des hauteurs, méthode zero-crossing)
T_p	s	période du pic d'énergie du spectre des vagues
T_{02}	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme $(m_0/m_2)^{0.5}$
T_{01}	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme m_0/m_1
T_z	s	période moyenne des vagues (calcul par zero-crossing)
$T_{1/3}$	s	période moyenne du tiers des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)

$T_{1/10}$	s	période moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
$T_{\max}$	s	période de la vague la plus grande ($H_{\max}$) du burst (méthode zero-crossing)
T_p	s	période calculée du pic d'énergie, définie comme $m_2 m_1 m_0^{-2}$
Dir_m	°	direction moyenne (direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)
Dir_p	°	direction du pic d'énergie (direction moyenne de la bande de fréquence de T_p , direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)
Dir_{Spread}	°	Dispersion directionnelle des vagues ($\pm$ variance) calculée pour le pic de fréquence
UI		Index d'unidirecticité (<i>Unidirectivity index</i>)
U	m/s	vitesse moyenne dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP (près de la surface pour AWAC-AST, près du fond pour Aquadopp Profiler)
Udir	°	direction du courant moyen dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP
$QW_{\text{usedspectrum}}$		Méthode utilisée pour calculer les vagues non-directionnelles : 0 = pression, 1 = vitesses orbitales, 3 = AST (faisceau acoustique de l'AWAC, Acoustic Surface Track). Si c'est un chiffre à virgule, le chiffre après la virgule indique pour l'AST la fraction du burst utilisé (par exemple, 3,78 pour un calcul à partir des données AST sur 78 % du burst), et pour la pression le facteur maximal utiliser pour corriger l'atténuation des variations de pression avec la profondeur (par exemple, 0,15 pour un calcul à partir des données de pression avec un facteur maximal de correction de 15).

ice-coverage_% Pourcentage du burst avec présence de glace

Les fichiers d'AWAC traités par Quickwave contiennent plusieurs autres paramètres (IceDistance, QW_nodetects, QW_baddetects, nbZC, QW_error) qui correspondent à des résultats intermédiaires ou des informations pour le contrôle de qualité.

ANNEXE 4 : 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 19.

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 20. 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 19. 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 20. Codes explicatifs du contrôle de qualité.

bit	Valeur hexadécimale	Pour paramètres	tests manqués
1	01	tous	valeur trop basse
		Dir _m , Dir _{Tp}	direction venant de la côte
2	02	tous	valeur trop grande
3	04	tous	test de continuité temporelle
4	08	H _{max} , H _{1/10} , H _{1/3}	comparaison de H _{m0} avec H _{max} , H _{1/10} ou H _{1/3} (flag de ces derniers)
		T ₀₁ , T ₀₂ , T _z , T _{1/10} , T _{1/3}	comparaison de T ₀₁ , T ₀₂ , T _z , T _{1/10} , T _{1/3} (flag si différence à la médiane des T trop grandes)
		T _p , T _{pc}	comparaison de T _p et T _{pc} avec T ₀₂
		Dir _m , Dir _{Tp}	comparaison de Dir _m et Dir _{Tp}
		h _{PT} , h _{AST}	comparaison de h _{PT} et h _{AST} (flag de h _{AST})
5*	10	h	valeur trop basse par rapport aux prédictions de marée
		Dir _m , Dir _{Tp} , Spr _{Dir} , UDI	période trop courte pour déterminer la direction (dans QuickWave)
6	20	T ₀₂ , T _{0/10}	pente des vagues, T ₀₂ avec H _{m0} , et T _{1/10} avec H _{1/10}
		h	valeur trop grande par rapport aux prédictions de marée
7	40	tous	marqué erroné dans QuickWave
8	80	tous	burst déficient, problématique ou présence de glace de mer

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

ANNEXE 5 : VENTS AU LARGE DE KUUJJUARAPIK ET QUAQTAQ DURANT LES DÉPLOIEMENTS

Les vents à 10 m pour deux points au large de Kuujjuarapik et de Quaqtac ont été obtenus du modèle météorologique de réanalyse ERA5 (Hersbach et al., 2020) pour les années 2017 à 2021. Pour Kuujjuarapik, il s'agit du point de grille 55,5°N / 78,75°W, situé à 60 km au ouest-nord-ouest du mouillage avec AWAC. Pour Quaqtac, il s'agit du point de grille 61,5°N / 69,75°W, situé à 50 km au nord-nord-ouest du mouillage avec AWAC. Les figures 56 et 57 présentent les roses de vents pour les périodes de début août à mi-décembre, ce qui correspond environ aux périodes libres de glace quand les AWACs ont enregistré des vagues.

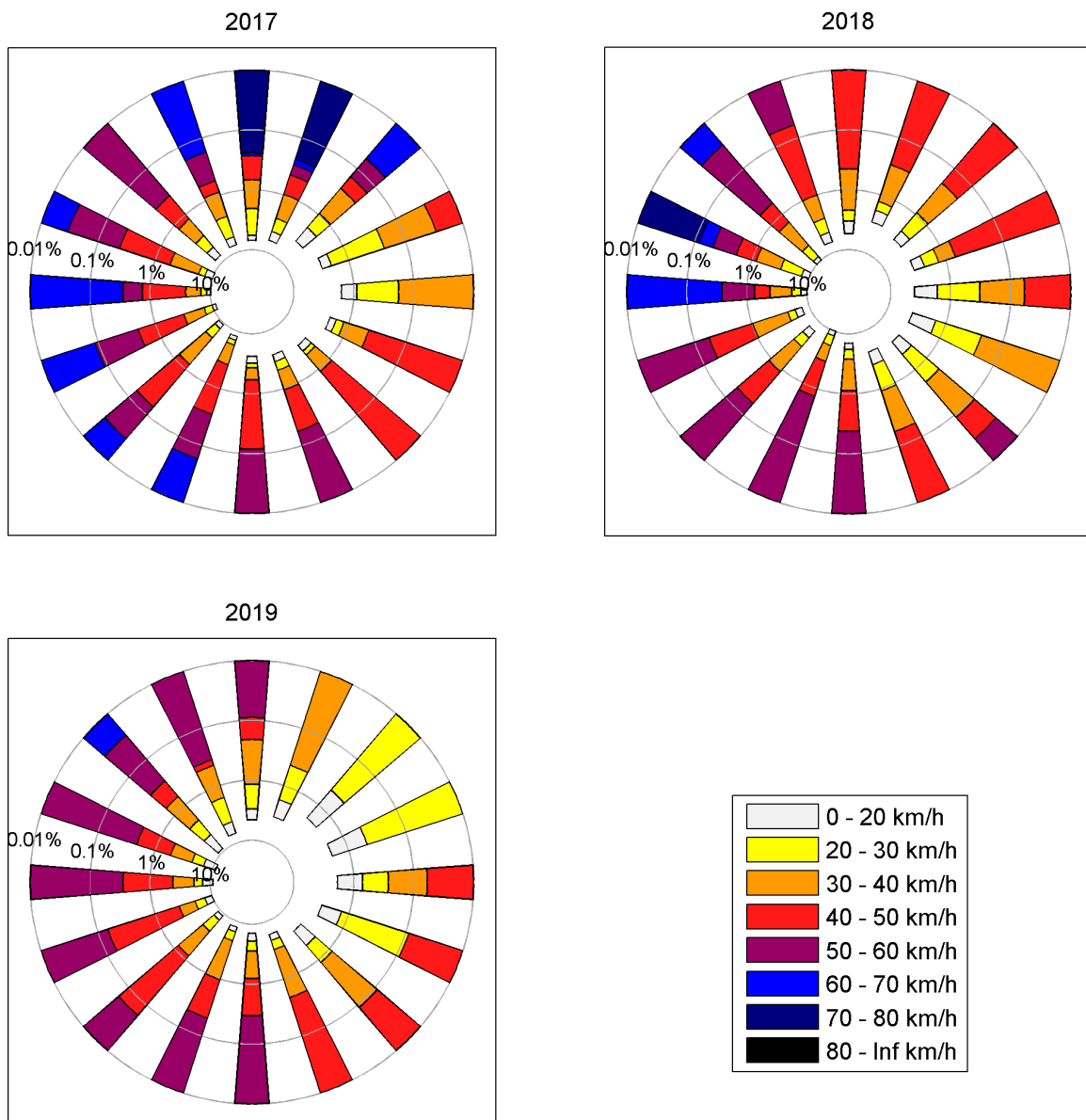


Figure 56. Roses des vents au large de Kuujjuarapik (55,5°N / 78,75°) pour les périodes du 1^{er} août au 19 décembre des années 2017 à 2019 selon les sorties de ERA5.

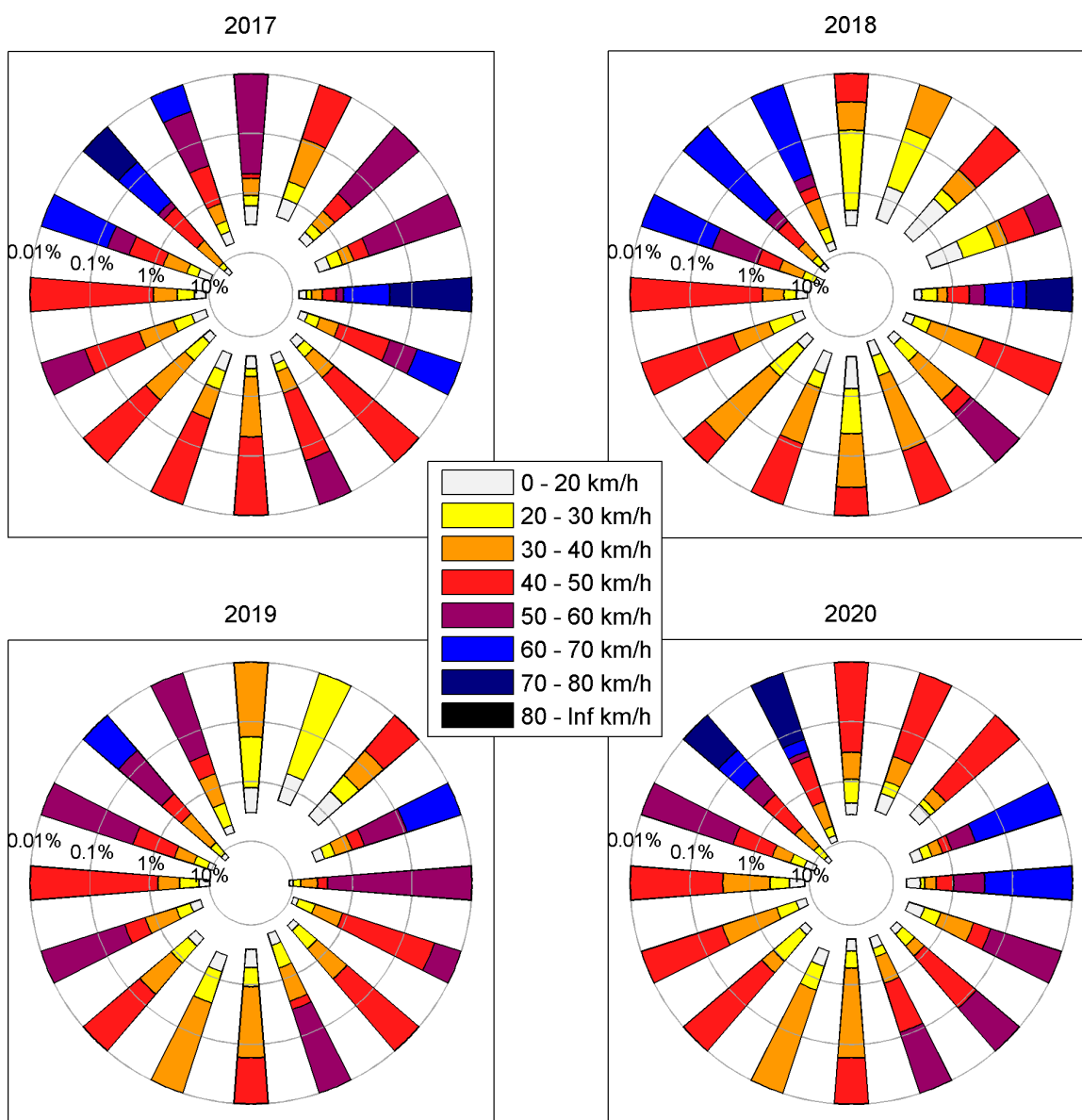


Figure 57. Roses des vents au large de Quaqtaq (61,5°N / 69,75°) pour les périodes du 1^{er} août au 14 décembre des années 2017 à 2020 selon les sorties de ERA5.

ANNEXE 6 : RAPPORT DU CIDCO SUR L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DES DONNÉES DE BATHYMÉTRIE À KUUJJUARAPIK

1718-404 Traitement données monofaisceau – Kuujjuarapik

Rapport Final V.4

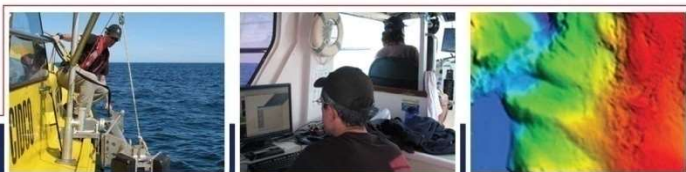
Client / partenaire

Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER)

Référence : 1718-404

Date

Mai 2018



310, allée des Ursulines
C.P. 3300, Rimouski (Québec) Canada G5L 3A1
Téléphone : 418 725-1732 | Télécopieur : 418 724-1401

www.cidco.ca

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX.....	3
INFORMATIONS GÉNÉRALES.....	5
CLIENT.....	5
CIDCO	5
LIVRABLES (LISTES DES FICHIERS)	5
1. INTRODUCTION.....	7
2. DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS	7
2.1. SYSTÈME D'ACQUISITION	8
2.2. ACQUISITION DES DONNÉES	9
2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES	12
2.3.1. <i>Post-traitement des données de navigation (PPK) et niveau d'eau</i>	<i>12</i>
2.3.2. <i>Traitement des données monofaisceau</i>	<i>18</i>
2.4. QUALIFICATION DES DONNÉES MONOFAISCEAU	18
3. PRODUITS.....	26
ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU FORMAT DES PRODUITS	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des secteurs K1, K2, K3, K4 et K5. Source : SHC.	7
Figure 2 : Qualité du positionnement GNSS pour les zones K1 et K2.....	13
Figure 3 : Qualité du positionnement GNSS pour les zones K3 et K4.....	14
Figure 4 : Qualité du positionnement GNSS pour la zone K5.....	15
Figure 5: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	19



Figure 6: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	19
Figure 7 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	20
Figure 8: Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	20
Figure 9: Intersections 5 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	21
Figure 10 : Intersections 6 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2.....	21
Figure 11 : Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3	22
Figure 12: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3	22
Figure 13 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3	23
Figure 14 : Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3	23
Figure 15: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5	24
Figure 16: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5	24
Figure 17: Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5	25
Figure 18: Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5	25
Figure 19 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones K1 et K2 à Kuujuarapik. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.	27
Figure 20 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones K3 et K4 à Kuujuarapik. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.	28
Figure 21 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour la zone K5 à Kuujuarapik. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résumé des activités à Kuujjuaraapik pour la phase 1 (2017/07/17 au 2017/08/22). 10
--



Tableau 2: Résumé des activités à Kuujjuaraapik pour la phase2 (2017/10/26 au 2017/11/03)..	12
Tableau 3 : Coordonnées de la station de base GNSS KUJJ.....	13

INFORMATIONS GÉNÉRALES

CLIENT

Compagnie/ministère	Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), Université du Québec à Rimouski (UQAR)
Nom du responsable	Urs Neumeier
Coordonnées	ISMER 310 allée des Ursulines Rimouski, Québec, G5L 3A1

CIDCO

Chargé de projet	Mathieu Rondeau
Acquisition	Julien Desrochers/ Jean-Remy Marchand
CEN	Maxime Saunier/ Evelyne Sigouin
Capitaines	Jimmy-Paul Angatookalook (Inuit) Charlie Angatookalook (Inuit) Richard Petagumskum (Cris) Jordan Kronenburg (Inuit)
Équipiers	Caleb Noura Jr. (Inuit) Moses (jeune de 16 ans) (inuit)
Traitement	Julien Desrochers et Mathieu Rondeau
Rédaction du rapport final	Julien Desrochers
Relecture	Mathieu Rondeau

LIVRABLES (FICHIERS)

Kuujjuarapik zones K1 à K4 (surfaces bathymétriques)	Kuujj_ERS-CGG2013_25m.csar Kuujj_ERS-CGG2013_25m.csar0 Kuujj_ERS-CGG2013_25m.tiff
---	---



	Kuujj_ERS-CGG2013_25m.txt Kuujj_ERS-CGG2013_5m.csar Kuujj_ERS-CGG2013_5m.csar0 Kuujj_ERS-CGG2013_5m.tiff Kuujj_ERS-CGG2013_5m.txt
Kuujjuarapik zone K5 (surfaces bathymétriques)	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.csar Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.csar0 Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.tiff Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m.txt Kuujj_K5_ERS-CGG2013_25m_dms.txt Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.csar Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.csar0 Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.tiff Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m.txt
Kuujjuarapik zones K1 à K4 (données bathymétriques)	Kuujj_K1-K4_ERS-CGG2013_filtered_id.txt Kuujj_K1-K4_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt
Kuujjuarapik zone K5 (données bathymétriques)	Kuujj_K5_ERS-CGG2013_filtered_id.txt Kuujj_K5_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt

NB. - Le contenu des fichiers est décrit à l'annexe 1.

1. INTRODUCTION

Le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) a été sollicité par le chercheur de l'ISMER Urs Neumeier pour réaliser la bathymétrie des secteurs K1, K2, K3, K4 et K5 dans la région de Kuujjuarapik (Figure 1). Ce projet est financé indirectement par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transport du Québec (MTMDET) dans le cadre du Fonds vert et du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2013-2020 du Gouvernement du Québec.

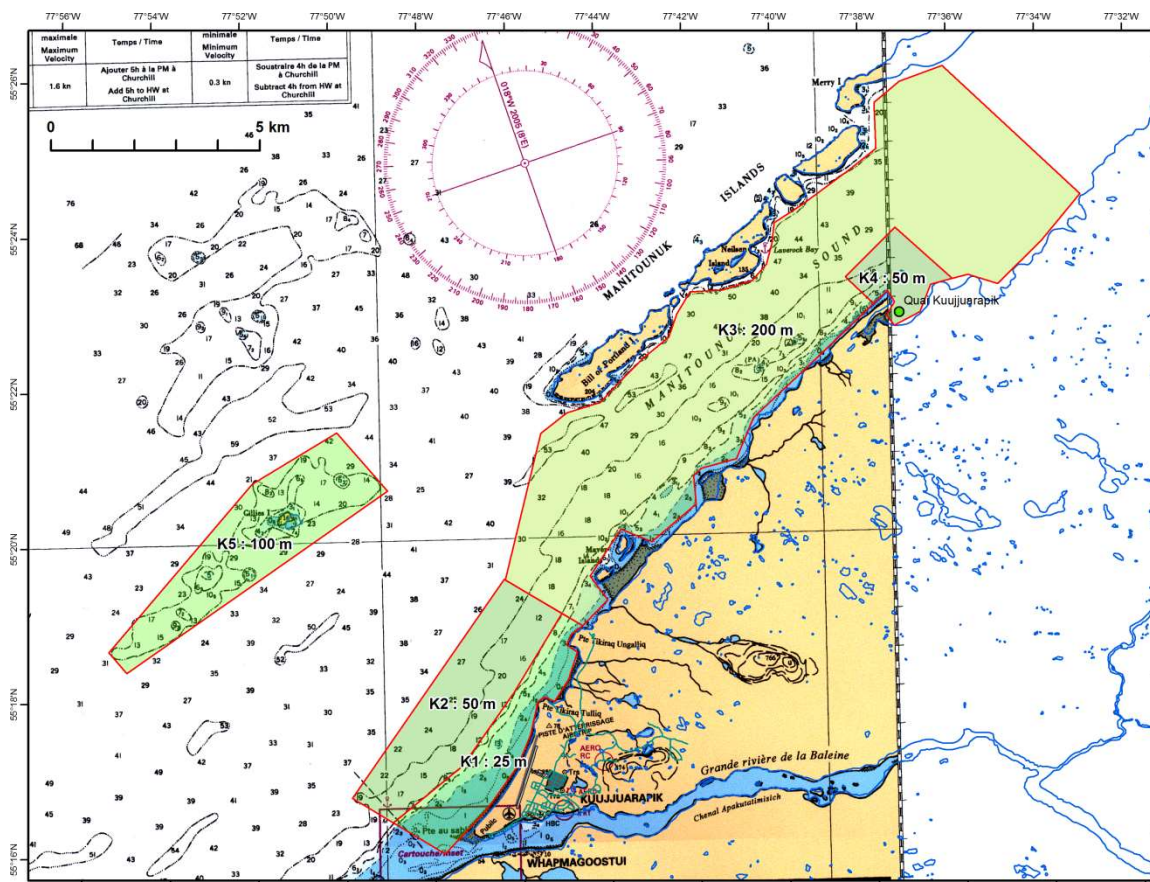


Figure 1 : Localisation des secteurs K1, K2, K3, K4 et K5. Source : SHC.

2. DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS

Les sections décrivant le matériel et les méthodologies utilisées ainsi que la calibration des équipements et l'acquisition des données sont décrites en détail dans le rapport 1718-404-HydroBall-Kuujj_RapportMissionTerrain_V1-1.pdf.

2.1. SYSTÈME D'ACQUISITION

Les données bathymétriques ont été acquises à l'aide de quatres bouées HydroBall® et deux HydroBox.

La bouée HydroBall® est une solution autonome d'acquisition de données bathymétriques particulièrement efficace en milieux non traditionnels (rivière, canyon, réservoir, zone ultra-côtière). La coque de forme sphérique (40cm de diamètre) renferme un récepteur GPS, un inclinomètre et un sondeur monofaisceau.

Spécifications HydroBall	
Dimension	40cm de diamètre
Poids	13kg
Autonomie	24h
Récepteur GPS	Standalone mode 2.5m (95%) DGPS (SBAS) mode 0.6m (95%) Post-Processed (PPK) mode 0.02m (95%) Update Rate: 1Hz -> 10Hz
Inclinomètre	Heading Tilt < $\pm 20^\circ$: 0.5 Pitch, Roll Tilt < 20° : 0.4° Tilt > 20° : 0.6° Update rate: 10Hz
Sondeur monofaisceau (Imagenex) - MTE-HB-201407-002 - MTE-HB-201706-009 - MTE-HB-201706-010	Frequency: 675kHz Beam width: 10° Range: 0.3m -> 50m Range Resolution: 20mm Update rate: 1Hz -> 10Hz
Sondeur monofaisceau (PA500) - MTE-HB-201504-004 - MTE-HBE-201706-006 - MTE-HBE-201706-007	Frequency: 500kHz Beam width: 6° Range: 0.3m -> 50m Range Resolution: 20mm Update rate: 10Hz

La HydroBox contient les mêmes composantes que la bouée HydroBall® à l'exception du sondeur et de la batterie d'alimentation qui sont externe au système. La HydroBox renferme un récepteur GPS et un inclinomètre. Le sondeur est quant à lui monté sur une perche. L'ensemble est alimenté sur la batterie de bord de l'embarcation.

Les quatres bouées ont chacune été montées sur un catamaran et tractées en arrière d'un canoë sur les zones à relever. Les HydroBox ont été montées sur perche et installées sur le franc bord d'un canoë.

Les bouées HydroBall® déployées portent les numéros de série :

- MTE-HB-201407-002



- MTE-HB-201504-004
- MTE-HB-201706-009
- MTE-HB-201706-010

Les HydroBox déployées portent les numéros de série :

- MTE-HBE-201706-006
- MTE-HBE-201706-007

2.2. ACQUISITION DES DONNÉES

Le levé s'est déroulé selon le calendrier suivant :

Tableau 1: Résumé des activités à Kuujuaaraapik pour la phase 1 (2017/07/17 au 2017/08/22)

Travail effectué à Kuujuaaraapik (partie 1: 2017/07/17 au 2017/08/22)					
Jour	Date	Zone	Équipements	Productivité	Commentaires
1	17/07/2017	N/A	N/A	N/A	préparation des équipements
		N/A	N/A	N/A	préparation des équipements
2	18/07/2017	rivière	Hbox006, Hball-002	N/A	tests en mer + analyse des résultats
		N/A	N/A	N/A	tests en mer + analyse des résultats
3	19/07/2017	K1	Hbox006	A	
		K1, K2	Hball-002	A	
4	20/07/2017	K1	Hbox006	A,B	vent du NW important en fin AM
		N/A	Hbox007	B,C	problème sonar + vent du NW important
5	21/07/2017	N/A	N/A	B	vent du NW important
		N/A	N/A	B	vent du NW important
6	22/07/2017	N/A	N/A	B	vent du NW important
		N/A	N/A	B	vent du NW important
7	23/07/2017	K1,K2	Hball-002, Hbox006	A	
		N/A	N/A	D	problème ressources humaines
8	24/07/2017	K5	Hbox006	A	
		K5	Hball-002	C	Hball-002 = problème GNSS
9	25/07/2017	K1,K2	Hbox006	A	
		N/A	N/A	C	Pas d'équipement fonctionnel
10	26/07/2017	K1	Hbox006 + Hbox007 (test)	A	Hbox007 testée en parallèle de Hbox006
		N/A	N/A	C	Pas d'équipement fonctionnel disponible
11	27/07/2017	N/A	N/A	B	vent du NW important
		N/A	N/A	B	vent du NW important
12	28/07/2017	test	N/A	C	tentative de régler problèmes technique
		N/A	N/A	C	tentative de régler problèmes technique
13	29/07/2017	K1,K2	Hbox006, Hbox007 (test)	A	Hbox007 testée en parallèle de Hbox006
		N/A	N/A	C	Pas d'équipement fonctionnel
14	30/07/2017	N/A	N/A	B	vent du N-NW important
		N/A	N/A	B	vent du N-NW important
15	31/07/2017	K3	Hbox007 avec PA500 (006)	A	
		K3	Hbox006 avec PA500 (007)	C	problèmes GNSS
16	01/08/2017	N/A	N/A	B	vent du S, tournant vers W
		N/A	N/A	B	vent du S, tournant vers W
17	02/08/2017	N/A	N/A	B	vent de W important
		N/A	N/A	B	vent de W important
18	03/08/2017	N/A	N/A	B	vent de SW-W important
		N/A	N/A	B	vent de SW-W important

19	04/08/2017	K1,K2	Hbox007 avec PA500 (006)	A	
		K1,K2	Hbox006 avec PA500 (007)	A	
20	05/08/2017	N/A	N/A	C,D	difficulté de recrutement
		N/A	N/A	C,D	difficulté de recrutement
21	06/08/2017	K1,K2	Hbox006	A,B	Conditions météo trop difficile vers 13h
		K1,K2	Hball-004	A,B	Conditions météo trop difficile vers 13h
22	07/08/2017	K1,K2	Hbox006	A	
		K1,K2	Hball-004, Hbox007	A	
23	08/08/2017	K1,K2	Hbox006	A,B	Conditions météo trop difficile vers 14h30
		K1,K2	Hball-004, Hbox007	A,B	Conditions météo trop difficile vers 14h30
24	09/08/2017	K1,K2	Hbox006	A	levé arrêter vers 15h à cause de pluie forte
		K1,K2	Hball-004	A	levé arrêter vers 15h à cause de pluie forte
25	10/08/2017	K3	Hbox006	A	
		K3	Hball-004	A	
26	11/08/2017	K5	Hbox006	A	
		K5	Hball-004	A	
27	12/08/2017	N/A	Hball-004	B,D	difficulté recrutement + vents du N
		N/A	N/A	D	problèmes ressources humaines
28	13/08/2017	N/A	N/A	B	vent de W important
		N/A	N/A	B	vent de W important
29	14/08/2017	K4	Hbox006	A	
		K4	Hball-004	A	
30	15/08/2017	N/A	N/A	B	vent de N important
		N/A	N/A	B	vent de N important
31	16/08/2017	N/A	N/A	D	capitaine non disponible
		K1,K2	N/A	C	problème de moteur
32	17/08/2017	K5	Hbox006	C	problèmes équipements
		N/A	N/A	D	problèmes ressources humaines
33	18/08/2017	K5	Hbox006, Hbox007 (test)	C	problèmes d'équipements (disque corrompu)
		N/A	N/A	C	Pas d'équipement fonctionnel
34	19/08/2017	N/A	N/A	C	tentative de régler problèmes d'équipements
		N/A	N/A	C	tentative de régler problèmes d'équipements
35	20/08/2017	K5	Hball-010	C	problèmes techniques (équipements)
		N/A	N/A	C	problèmes techniques (équipements)
36	21/08/2017	N/A	N/A	N/A	ramassage du matériel
		N/A	N/A	N/A	ramassage du matériel
37	22/08/2017	N/A	N/A	N/A	départ vers MTL
		N/A	N/A	N/A	départ vers MTL

A : journée productive

B : journée non-productive (problèmes météo)

C : journée non-productive (problèmes techniques)

D : journée non-productive (problèmes ressources humaines)



Tableau 2: Résumé des activités à Kuujjuaraapik pour la phase2 (2017/10/26 au 2017/11/03)

Travail effectué à Kuujjuaraapik (partie 2: 2017/10/26 au 2017/11/03)					
Jour	Date	Zone	Équipements	Productivité	Commentaires
1	26/10/2017	K1,K2	Hball-010	A	levé en PM sur la zone K1,K2
		N/A	N/A	N/A	formation hydrographe
2	27/10/2017	N/A	N/A	B	vent du NW important= rafale à 40km/h
		N/A	N/A	B	vent du NW important= rafale à 40km/h
3	28/10/2017	K1,K2, K3	Hball-009	A	
		K1,K2, K3	Hball -010	A	
4	29/10/2017	N/A	N/A	B	vent du NW avec rafales à 30km/h +
		N/A	N/A	B	vent du NW avec rafales à 30km/h +
5	30/10/2017	K3	N/A	B	vent du NE avec rafales à 30km/h +
		K3	N/A	B	vent du NE avec rafales à 30km/h +
6	31/10/2017	N/A	N/A	B	blizzard (vent de 80km/h et +)
		N/A	N/A	B	blizzard (vent de 80km/h et +)
7	01/11/2017	K3	Hball-010	A	restant du blizzard= débute à 13h
		N/A	N/A	D	problèmes ressources humaines
8	02/11/2017	K3, K4	Hball-009	A	
		K3, K4	Hball-010	A	
9	03/11/2017	N/A	N/A	N/A	retour Montreal
		N/A	N/A	N/A	retour Montreal

A : journée productive

B : journée non-productive (problèmes météo)

C : journée non-productive (problèmes techniques)

D : journée non-productive (problèmes ressources humaines)

2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.3.1. POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE NAVIGATION (PPK) ET NIVEAU D'EAU

Pour les levés bathymétriques, le post-traitement des données de navigation a été réalisé à l'aide du logiciel RTK-Lib et Trimble Business Center (TBC).

Le calcul de la solution PPK pour le secteur de Kuujjuarapik a été fait en référence au point KUJJ qui fait partie du Système canadien de contrôle actif (CACS) de Ressources naturelles Canada (RNCAN). Il s'agit donc d'une station de base GNSS permanente. Pour plus de détail vous pouvez consulter le rapport : 1718-404-HydroBall-Kuujj_RapportMissionTerrain_V1-1.pdf.

Nad83 (SCRS) époque 1997			
Id	Lat	Lng	Hauteur ellipsoïdale
KUJJ	55°16'42.062248	-77°44'43.542737"	0.204m
	Nord (UTM18N)	Est (UTM18N)	
	6 129 201.701m	325 620.255m	



Tableau 3 : Coordonnées de la station de base GNSS KUJJ.

Les cartes suivantes montrent la qualité du positionnement GNSS sur les différentes zones. Les lignes vertes correspondent aux endroits où les ambiguïtés de phase sont fixées (positionnement en $Z < 0.10\text{m}$), donc un bon positionnement. Les zones en noir correspondent aux endroits où les ambiguïtés de phase ne sont pas fixées (position GNSS flottante), donc un positionnement avec une plus grande incertitude.

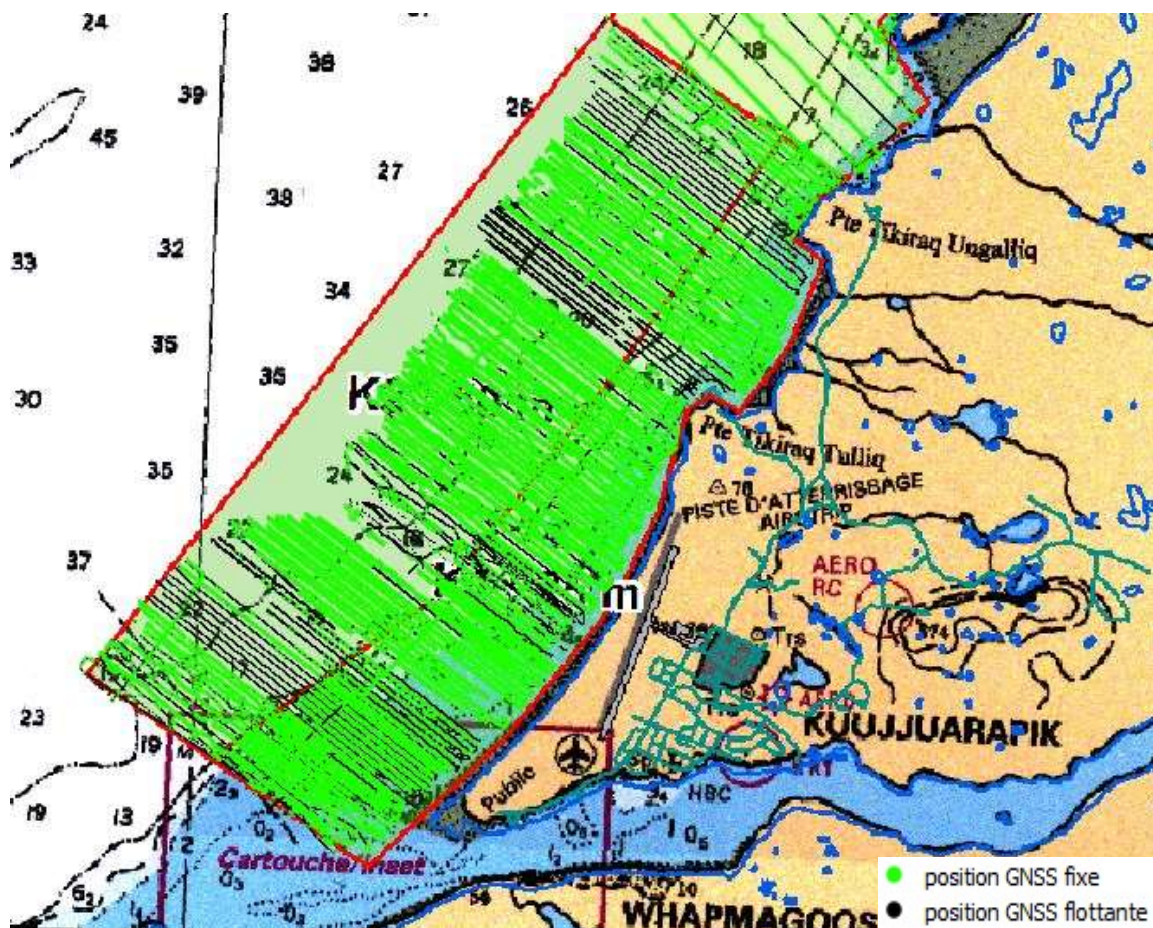


Figure 2 : Qualité du positionnement GNSS pour les zones K1 et K2.

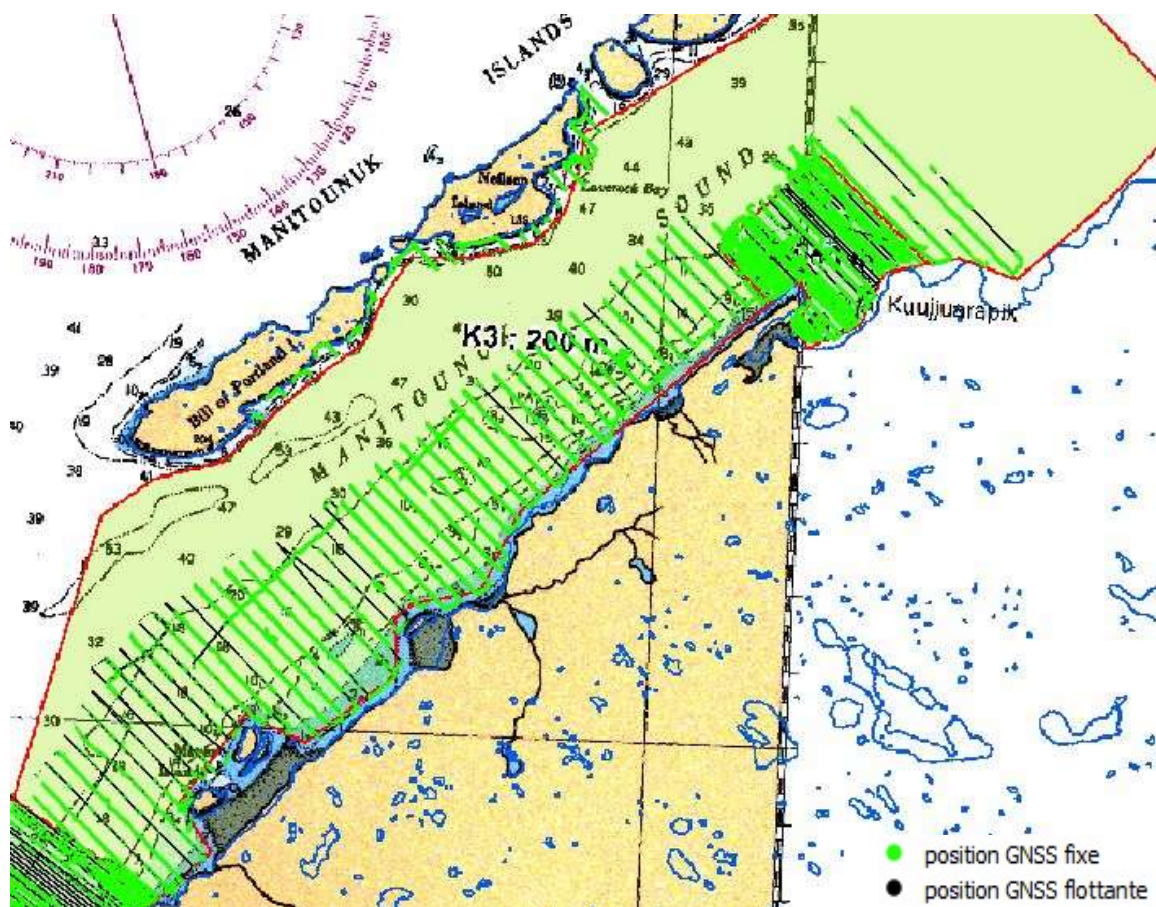


Figure 3 : Qualité du positionnement GNSS pour les zones K3 et K4.

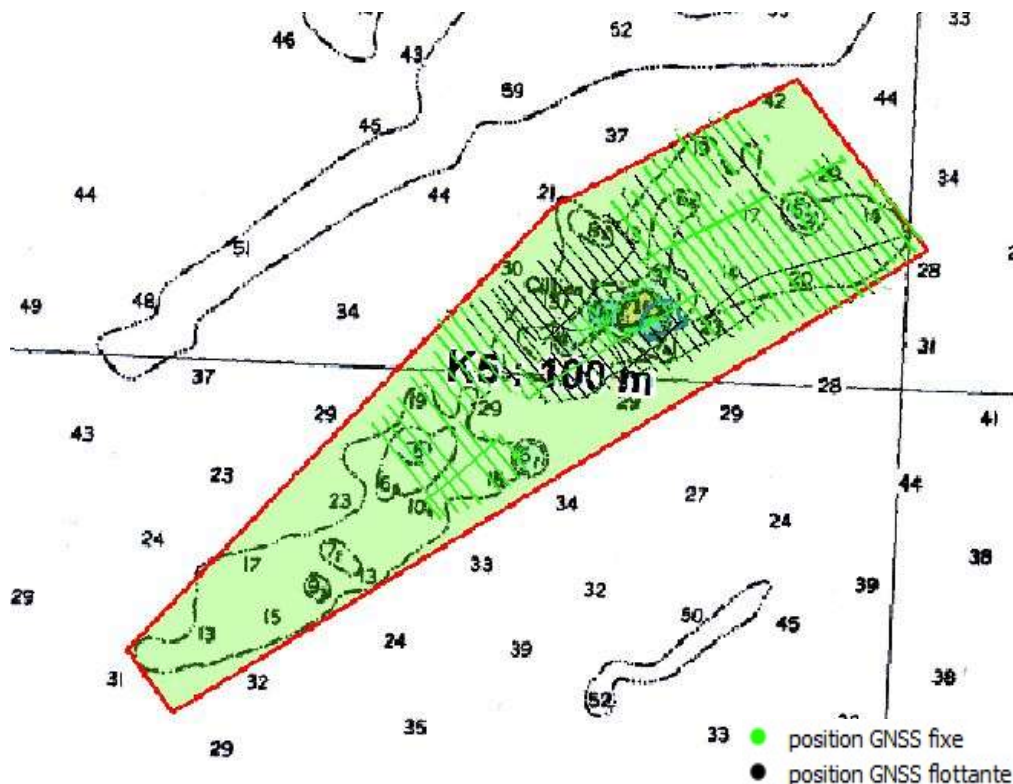


Figure 4 : Qualité du positionnement GNSS pour la zone K5.

Étant donné la qualité du positionnement GNSS pour certaines portions de levé, deux méthodes ont été utilisées pour la réduction des sondes bathymétriques :

- WLRS (water level referenced survey)
- ERS (ellipsoid referenced survey)

Définitions utiles:

Une sonde : est définie par la position (longitude, latitude) et une profondeur d'eau *en référence* à une référence verticale fixe. Dans les cartes marines, cette référence est le ZC qui est définie par rapport à un niveau de référence (exemple : la plus basse marée astronomique (LAT)).

Mesure de profondeur : Une mesure relative de la profondeur de l'eau, ne tenant pas compte des effets de la marée, et qui est non référencée à une référence verticale fixe.

Réduction des sondes : La *transformation* de mesure de profondeur en sondages.

CGVD2013: Le CGVD2013 est défini par la surface équipotentielle qui représente le niveau moyen des mers. Ce datum vertical est matérialisé par le modèle de géoïde CGG2013 qui fournit la séparation entre l'ellipsoïde utilisée par le système géodésique NAD83(SCRS) et la surface CGVD2013.

ZC : Le zéro des cartes (ZC) ou zéro hydrographique est une référence verticale à partir duquel la profondeur est donnée sur les cartes marines. Au Canada, le SHC (Service Hydrographique du Canada) utilise la basse mer inférieure, grande marée ou la marée normale la plus basse comme niveau de référence. Simplement, cela signifie que le ZC se situe au niveau où la marée est le plus basse.

2.2.1.1 MÉTHODE DE RÉDUCTION ERS

La réduction des sondes au modèle de géoïde CGG2013 (datum vertical) en mode ERS est basée sur l'utilisation des observations GNSS. La solution PPK est calculée directement dans le datum horizontal **NAD83(SCRS) époque 1997**. Pour réduire les sondes au CGG2013, le modèle de géoïde CGG2013 est utilisé. Ce modèle donne la différence entre la hauteur ellipsoïdale et l'altitude orthométrique du géoïde. Le traitement est effectué à l'aide du logiciel CARIS HIPS/SIPS.

L'altitude des sondes par rapport au CGG2013 est obtenue selon la relation suivante :

$$H_{CGG2013} = h_{NAD83} - N_{CGG2013} \quad (\mathbf{Z \text{ positif vers le haut}})$$

$H_{CGG2013}$ = hauteur orthométrique du modèle de géoïde CGG2013

h_{NAD83} = hauteur ellipsoïdale dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997

$N_{CGG2013}$ = ondulation du modèle de géoïde CGG2013

Pour les données réduites au CGG2013, le modèle de géoïde est appliqué dans Caris HIPS/SIPS directement lors du géo-référencement des sondes.

2.2.1.2 MÉTHODE DE RÉDUCTION WLRS

La réduction des sondes au CGG2013 en mode WLRS est basée sur l'utilisation des prédictions de marées. Les prédictions de marées sont calculées par le SHC pour le site de Kuujuarapik. Les prédictions couvrent l'ensemble des secteurs K1 à K5.

Pour le positionnement horizontal, la solution PPK est calculée directement dans le datum horizontal **NAD83(SCRS) époque 1997** et si aucune solution PPK n'existe la GGA (positionnement GPS standalone) est utilisé. Dans le deuxième cas (GPS standalone), la précision horizontale est de 1-3m. Pour le positionnement vertical, on utilise les données de prédiction de marées en référence au zéro des cartes (ZC). Voici la procédure de traitement :

- Importation des données de prédiction de marées dans Caris HIPS/SIPS
- Réduction des sondes par rapport aux données de prédiction de marées (référence= ZC)
- Exportation de données traitées en appliquant la séparation ZC-ellipsoïde(système géodésique NAD83(SCRS)) à l'ensemble des données. Cette valeur de séparation



déterminée par le Service Hydrographique du Canada (SHC) est considérée constante pour les 5 secteurs (K1 à K5).

La hauteur des sondes par rapport au système géodésique NAD83(SCRS) est donnée par la relation suivante :

$$h_{NAD83} = H_{ZC} + N_{ZC_NAD83}$$

H_{ZC} = hauteur par rapport au zéro des cartes (ZC)

h_{NAD83} = hauteur ellipsoïdale dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997

N_{ZC_NAD83} = séparation entre ZC et ellipsoïde (système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

- La valeur $N_{ZC_NAD83} = -44.214m$ (déterminée par le SHC)
- Application du modèle de géoïde CGG2013 à l'aide de l'outil GPS-H de RNCAN aux données exportées (référence = ellipsoïde).

L'altitude des sondes par rapport au CGG2013 est obtenue selon la relation suivante :

$$H_{CGG2013} = h_{NAD83} - N_{CGG2013} \quad (\mathbf{Z \text{ positif vers le haut}})$$

- Il est à noter qu'il faut être prudent avec l'utilisation des données traitées selon la méthode de réduction WLRS. Il existe plusieurs incertitudes liées à cette méthode :
 - La connaissance du ZC et de la séparation ellipsoïde-ZC : le SHC ne peut valider la détermination du ZC. Il n'est pas possible de connaître la précision associée à la valeur de séparation fournie par le SHC.
 - Les prédictions de marées ne reflètent pas nécessairement la réalité. Des facteurs comme la météo peuvent avoir une incidence importante sur la marée observée ce dont ne tient pas compte la marée prédite. Il est aussi possible que les harmoniques utilisées pour prédire la marée à Kuujuarapik ne soient pas exactes.
 - L'HydroBall n'a pas de capteur de pilonnement. Cela veut dire que les vagues ne sont pas mesurées lors d'une réduction WLRS et s'ajoutent à l'incertitude lors du géo-référencement des sondes.
 - Les erreurs dues aux vagues sont de l'ordre de l'amplitude des vagues. Dans le cas de vents importants ces amplitudes peuvent atteindre 0.5-0.75m. Se référer à la section 2.2 pour connaître les moments de vents importants.
 - Il faut noter également que ce problème pourrait créer des artefacts de dunes sous-marines dans les données réduites avec la méthode WLRS. Les impacts de ces artefacts seront moins importants sur les surfaces à 25m de résolution comparativement à ceux à 5m de résolution.



2.3.2. TRAITEMENT DES DONNÉES MONOFAISCEAU

Le processus de traitement a pour but de combiner les données acquises de manière indépendante par les différents capteurs :

- 1) sonar monofaisceau;
- 2) inclinomètre;
- 3) GNSS / marées;
- 4) profileur de vitesse du son dans l'eau.

Les traitements subséquents visent à s'assurer de la qualité de ces données ainsi que d'éliminer les points de sonde erronés. Le traitement des données bathymétriques a été réalisé à l'aide du logiciel HIPS/SIPS 10.3 de la compagnie Caris.

Plus spécifiquement, les données ont été:

- 1) corrigées dès l'importation pour la vitesse du son dans l'eau :
 - une valeur de célérité moyenne est appliquée aux valeurs de profondeur mesurée par le sonar.
 - les profils de célérité sélectionnés sont espacés dans le temps et dans l'espace. Généralement les profils étaient effectués aux 3-4h dans des endroits espacés sur la zone de levé.
- 2) corrigées pour le niveau d'eau :
 - méthode ERS ou WLRS, voir section 2.3 pour plus de détail.
- 3) fusionnées, étape qui consiste à repositionner les sondes horizontalement dans un système de coordonnées projetées et de les positionner verticalement par rapport au datum vertical choisi. Les corrections par rapport à l'attitude du système hydrographique sont faites à ce moment.
- 4) nettoyées manuellement (suppression des sondes aberrantes)
- 5) les points de sonde ont ensuite été moyennés sur deux grilles matricielles, à 5m et 25m de résolution, à l'aide de l'algorithme SwathAngle implémenté dans Caris.
 - a. L'attribut "depth" pour les surfaces crée représente la moyenne pondérée en fonction de l'angle de tir du sonar. C'est cet attribut qui est utilisé pour la représentation de la profondeur pour les surfaces au format .txt et .tiff.
 - i. La description du format de fichier est disponible en annexe.
- 6) les points de sonde ont enfin été exportés en format ASCII
 - i. La description du format de fichier est disponible en annexe.

2.4. QUALIFICATION DES DONNÉES MONOFAISCEAU

Pour qualifier les données acquises à l'aide des bouées HydroBall et HydroBox nous avons évalué la cohérence des profondeurs mesurées aux points d'intersection des lignes de sondages.



L'évaluation de la précision relative des points de sondage par l'analyse de l'écart de profondeur mesuré aux intersections des lignes de sondage a été faite avec l'outil subset editor de CARIS.

Les écarts de profondeur mesurés aux intersections sont montrés dans les figures 5 à 18.

Zone K1-K2 :

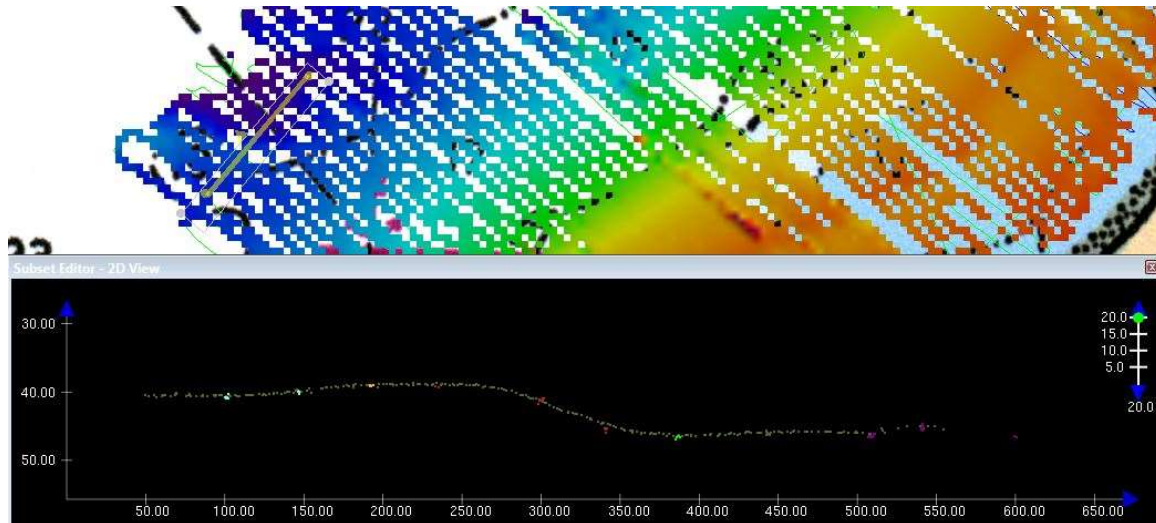


Figure 5: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 9 intersections est de 0.24m. Une des intersections à un écart de 0.60m (rouge). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

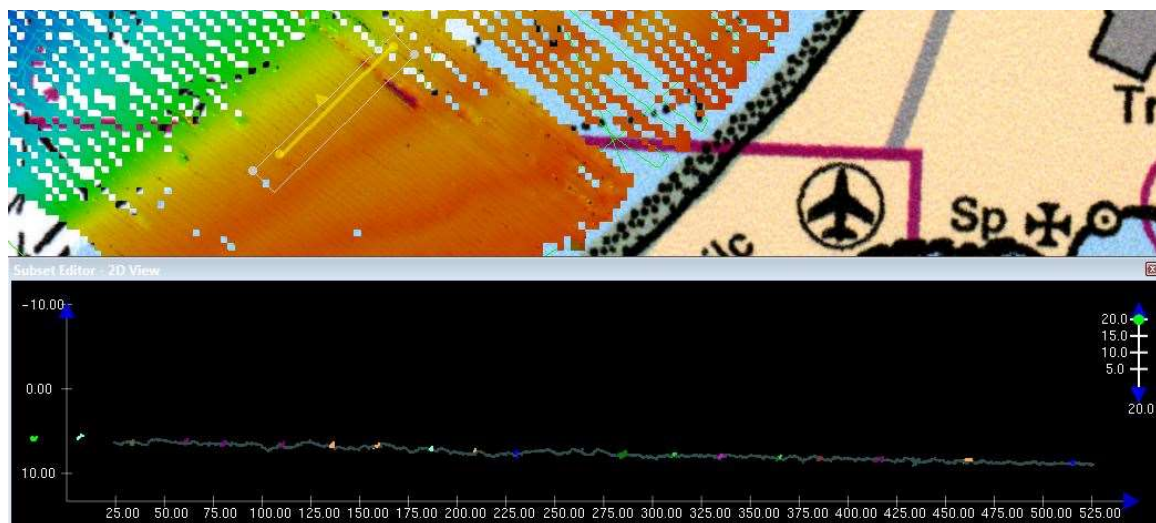


Figure 6: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 17 intersections est de 0.10m.

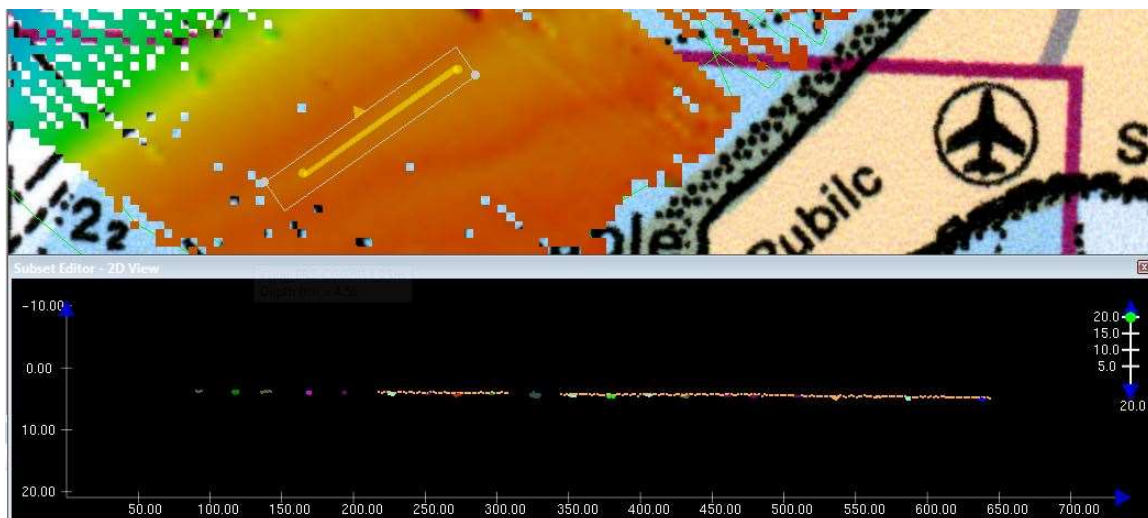


Figure 7 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 17 intersections est de 0.16m. Une des intersections à un écart de 0.29m (gris). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

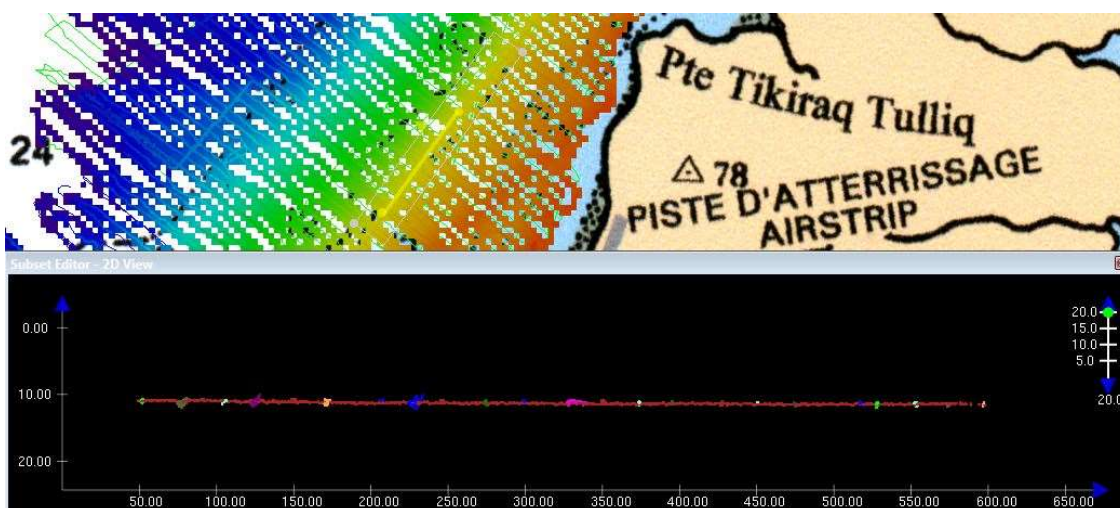


Figure 8: Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 23 intersections est de 0.16m. Une des intersections à un écart de 0.35m (rouge) et une autre à un écart de 0.36m (bleu). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

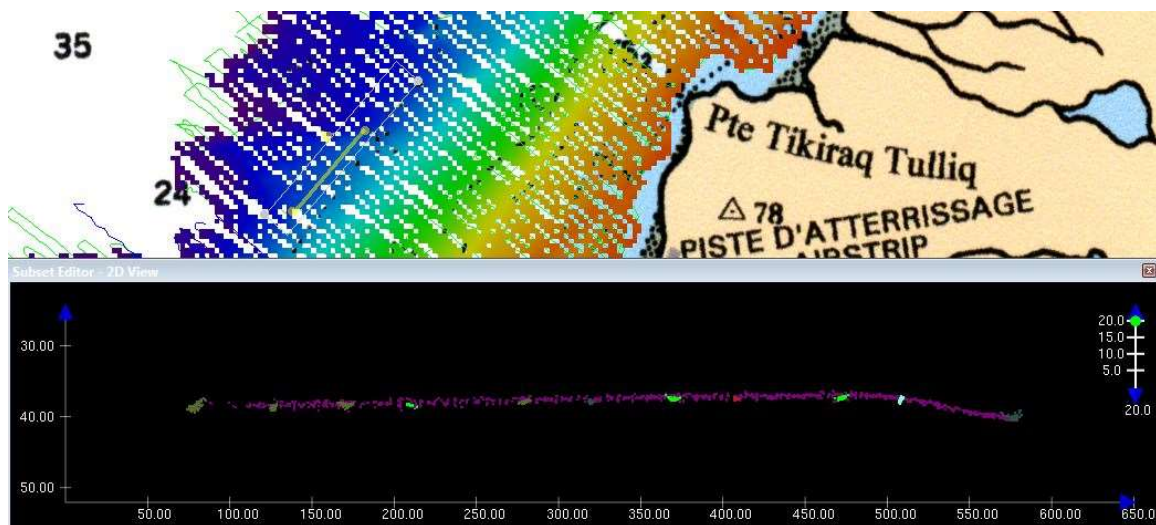


Figure 9: Intersections 5 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 10 intersections est de 0.22m.

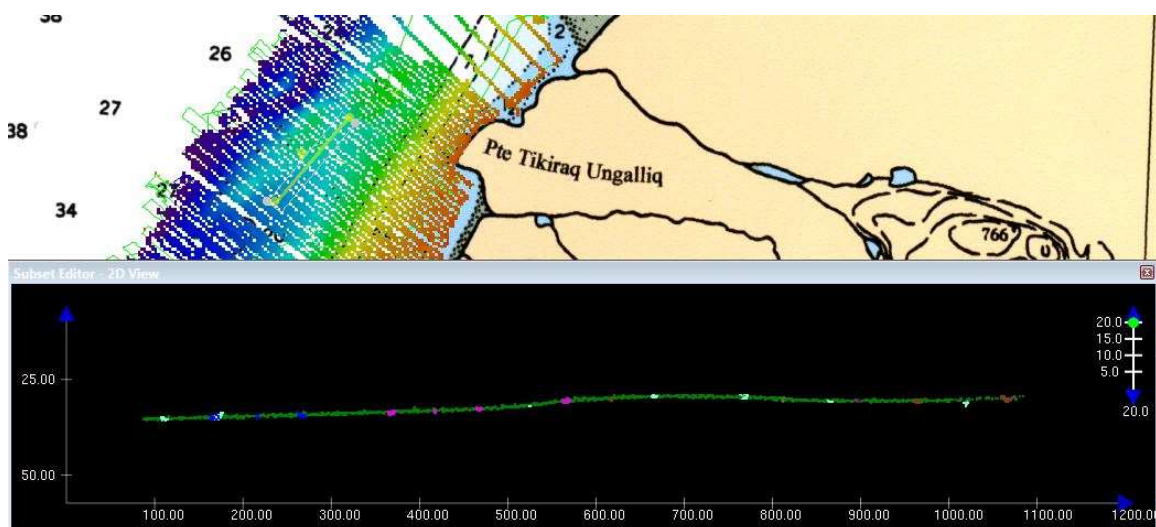


Figure 10 : Intersections 6 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zones K1-K2

La moyenne de l'écart des différences pour les 20 intersections est de 0.17m. Une des intersections à un écart de 0.57m (bleu poudre (l'avant dernière)).

Zone K3 :

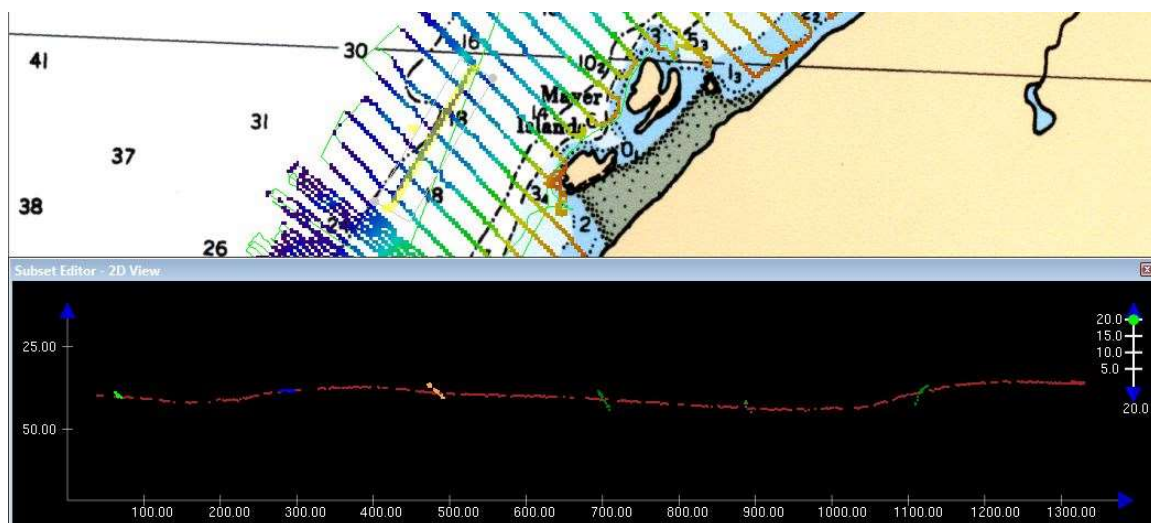


Figure 11 : Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3

La moyenne de l'écart des différences pour les 7 intersections est de 0.45m. Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS sur la ligne parallèle à la côte (ligne de croisement).

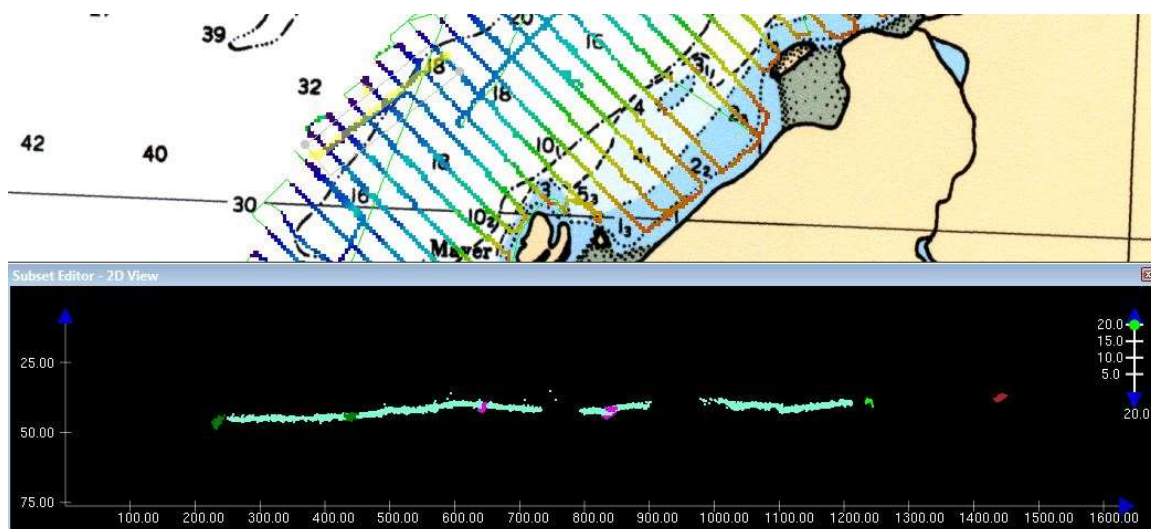


Figure 12: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3

La moyenne de l'écart des différences pour les 5 intersections est de 0.14m.

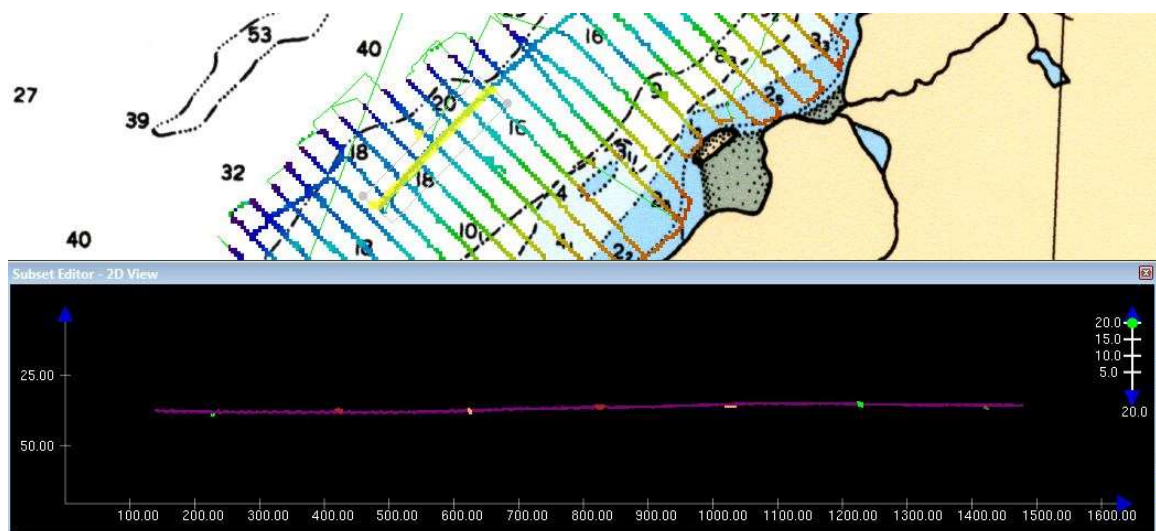


Figure 13 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3

La moyenne de l'écart des différences pour les 7 intersections est de 0.31m. Une des intersections à un écart de 0.75m (beige (3^{ème} à partir de la droite)). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS sur la ligne beige.

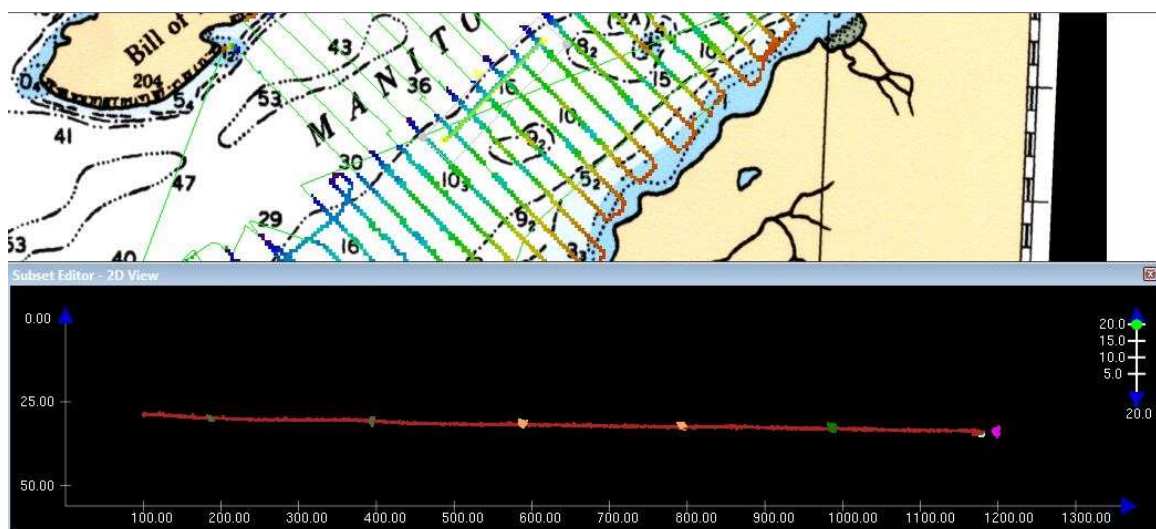


Figure 14 : Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K3

La moyenne de l'écart des différences pour les 5 intersections est de 0.17m.

Zone K5 :

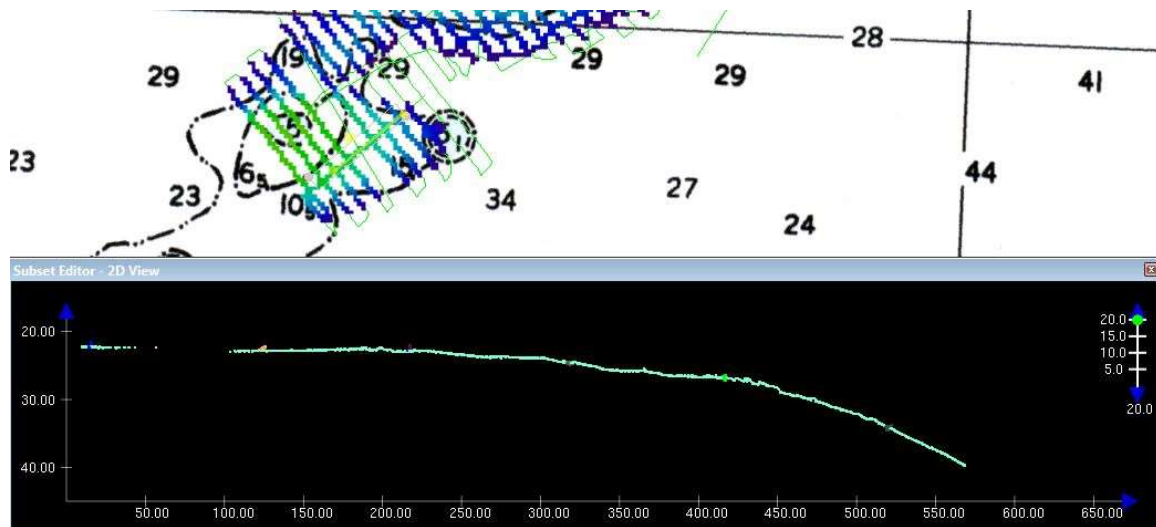


Figure 15: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5

La moyenne de l'écart des différences pour les 6 intersections est de 0.12m.

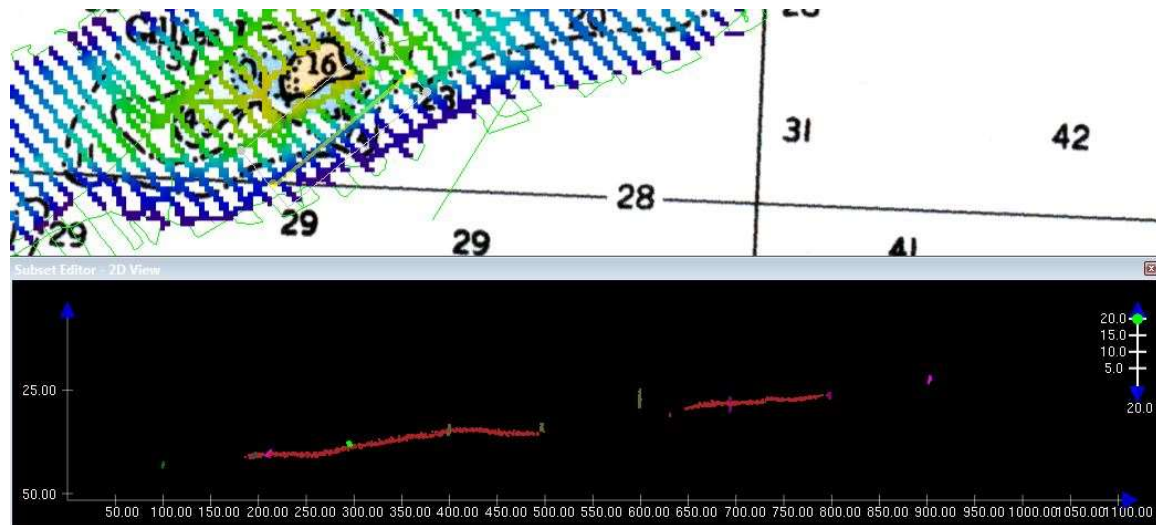


Figure 16: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5

La moyenne de l'écart des différences pour les 8 intersections est de 0.24m.

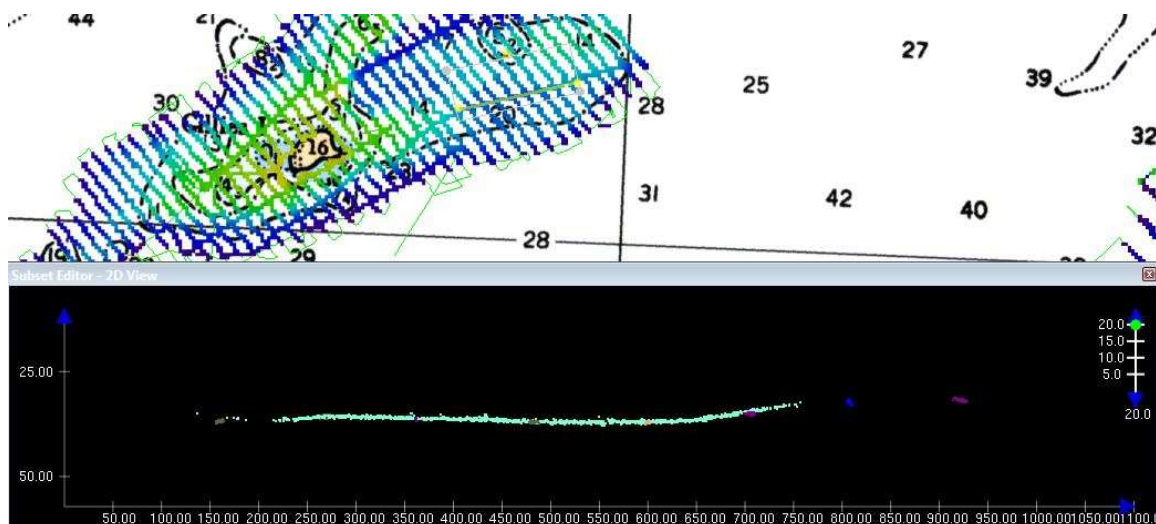


Figure 17: Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5

La moyenne de l'écart des différences pour les 8 intersections est de 0.14m.

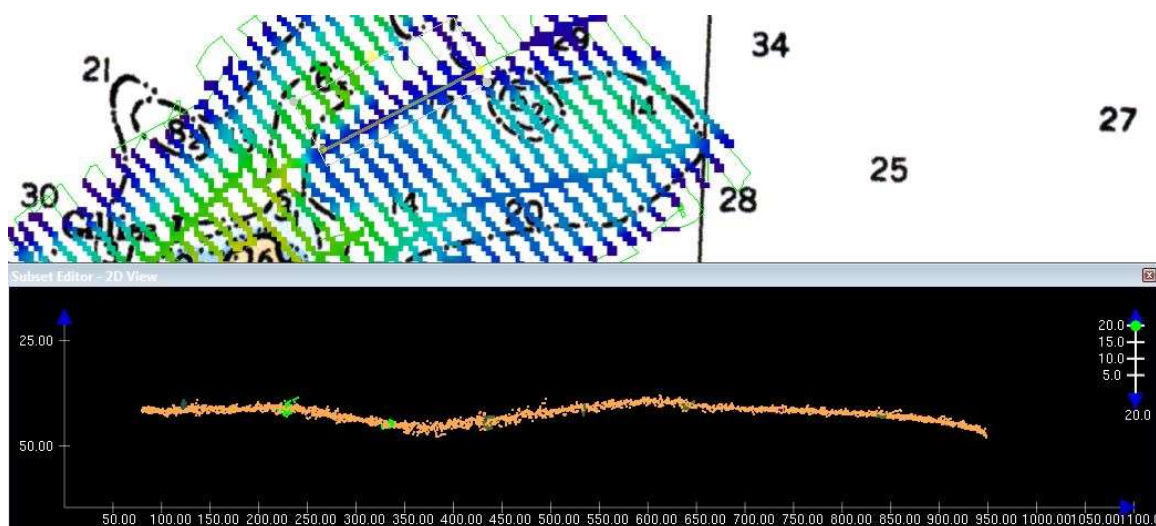


Figure 18: Intersections 4 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone K5

La moyenne de l'écart des différences pour les 8 intersections est de 0.20m.

Généralement, il est possible de constater qu'aux endroits où les données ont été vérifiées les écarts entre les lignes qui se croisent sont inférieurs à l'Ordre Spécial des Normes minimales pour les levés hydrographiques (SHC).

profondeur	incertitude
(m)	(m)
10	0.26
20	0.29
30	0.34
40	0.39
50	0.45

Lorsque cet écart est supérieur à l'Ordre Spécial, cela s'explique généralement par le mauvais positionnement GNSS des données bathymétriques.

3. PRODUITS

Les figures suivantes montrent les modèles numériques de terrain (MNT) réalisés pour chacune des zones. Les MNT sont projetés dans la projection UTM18N avec le système géodésique NAD83(SCRS) ep.1997. La description détaillée de l'ensemble des produits est faite en annexe.

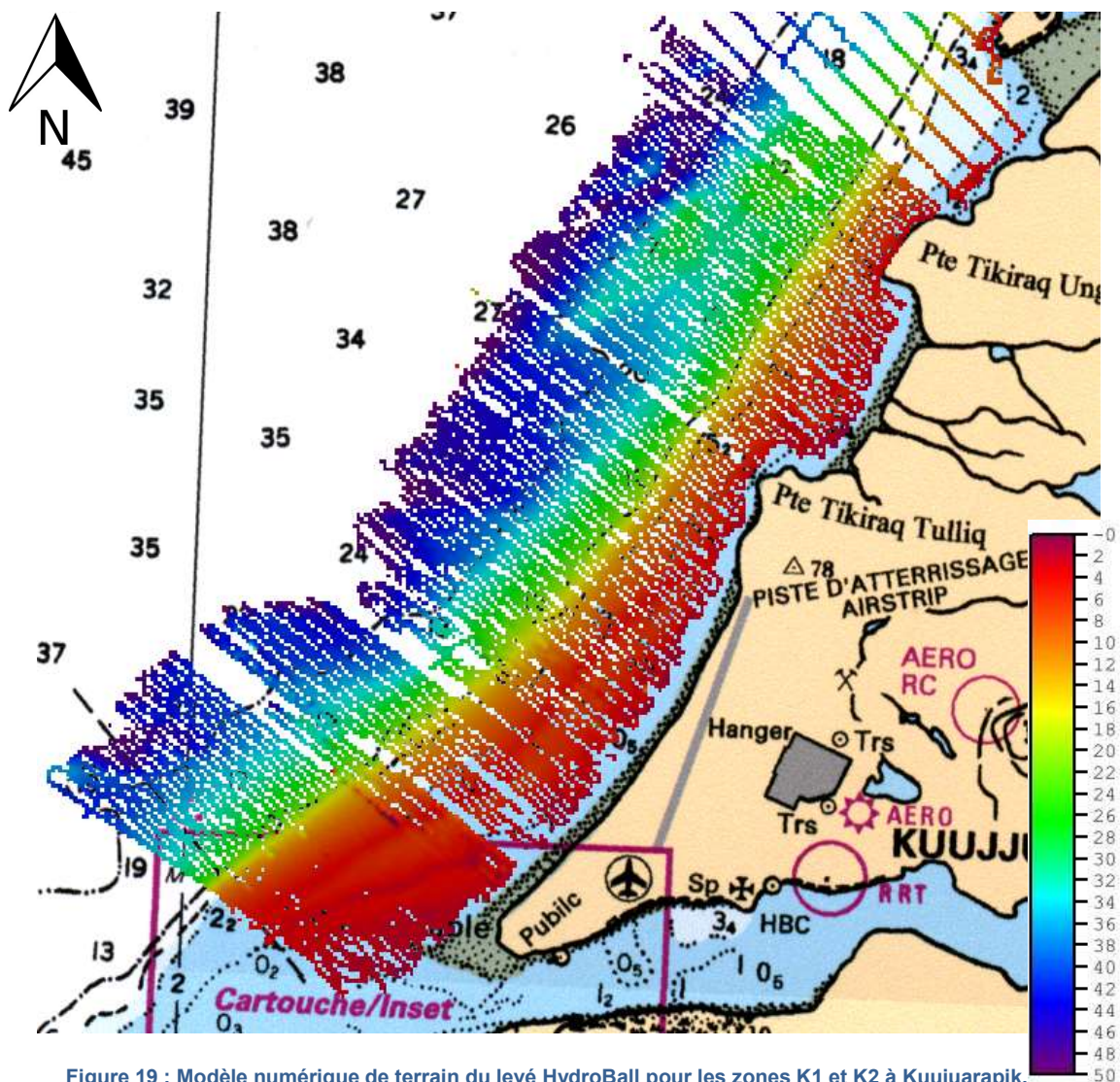


Figure 19 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones K1 et K2 à Kuujuaq. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.

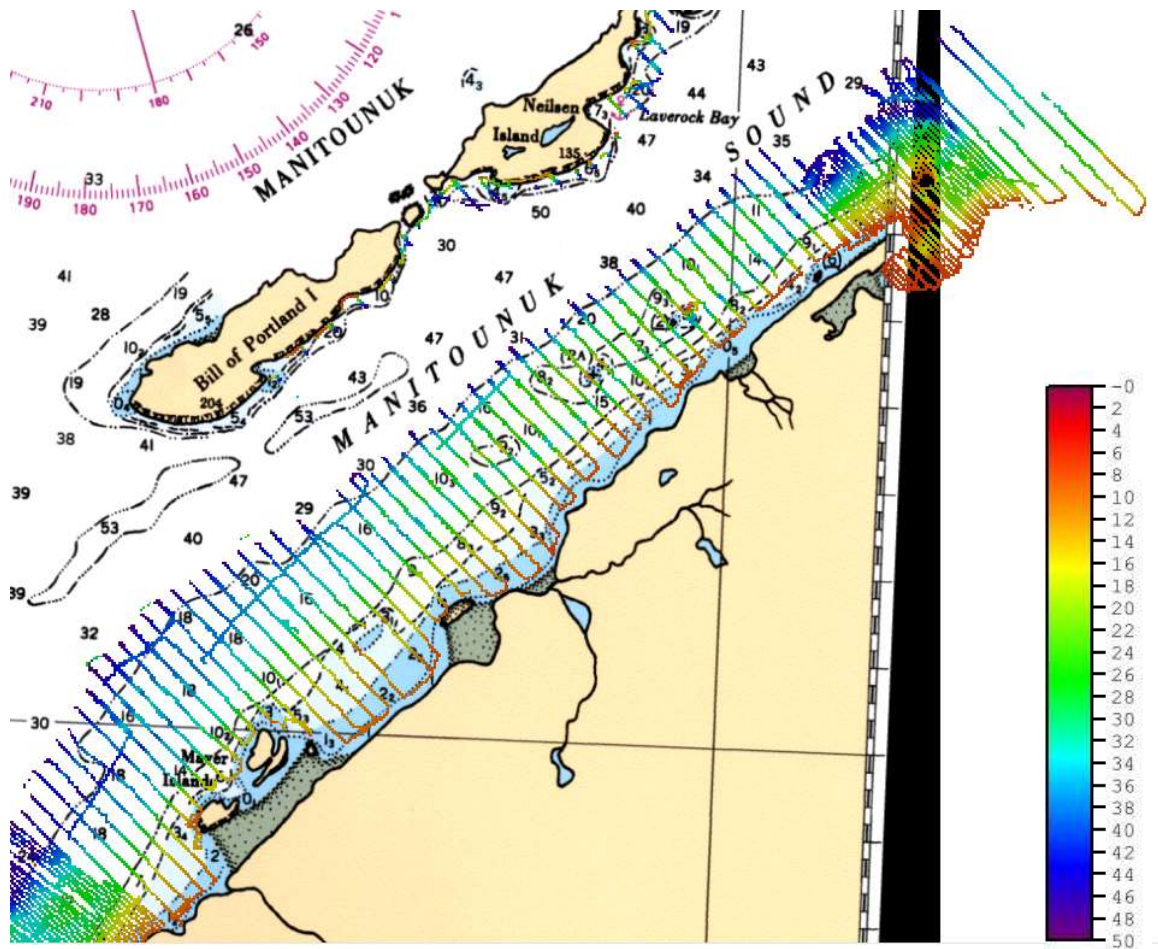


Figure 20 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones K3 et K4 à Kuujuarapik. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.

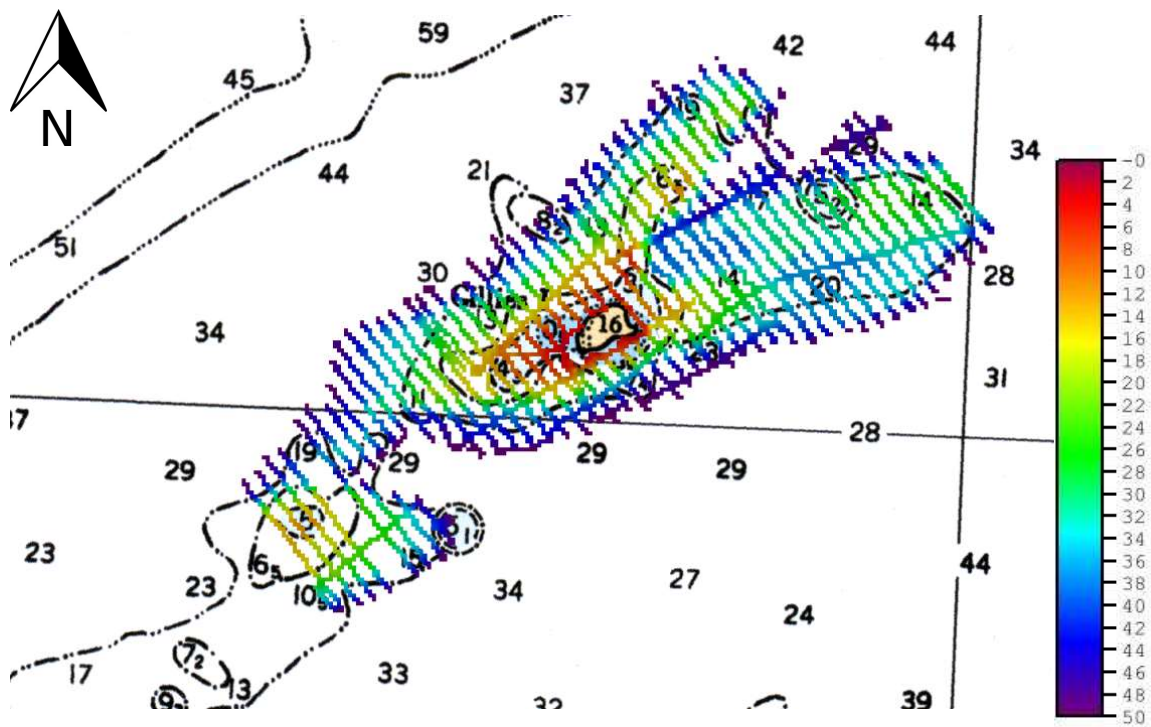


Figure 21 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour la zone K5 à Kuujuaupik. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU FORMAT DES PRODUITS

Nomenclature des fichiers de données bathymétriques :

Village_Zone(s)_Réduction-RefVertical_filtered_id

Village: Fait référence au village où les données ont été acquises. Dans le cas présent, le village est Kuujuarapik et l'acronyme utilisé est Kuujj.

Zone(s): Indique la ou les zones où les données ont été acquises.

Réduction: Fait référence à la méthode de réduction utilisée pour géo-référencer les données bathymétriques. La méthode de réduction est soit ERS (réduction p/r à l'ellipsoïde) ou WLRS (réduction p/r au niveau d'eau)

RefVertical: Indique la surface de référence verticale à partir duquel les données bathymétriques sont référencées. Pour les données bathymétriques la surface de référence est toujours le modèle de géoïde CGG2013.

filtered_id: Indique que les données ont été filtrées pour la qualité du positionnement GNSS.

Par exemple: *Kuujj_K1-K4_ERS-CGG2013_filtered_id* veut dire que les données ont été acquises à Kuujuarapik dans les zones K1 à K4. La méthode de réduction utilisée est ERS et la surface de référence verticale est CGG2013. Les données ont également été filtrées pour indiquer la qualité du positionnement GNSS.

Format des fichiers de données bathymétriques :

Format ASCII (.txt) :

Pour les méthodes de réductions WLRS et ERS, le format du fichier est le même.

```
15:04:38.068 2017 301 55.3088968 -077.7484667 -4.667 1
15:04:39.068 2017 301 55.3088956 -077.7484682 -4.453 1
15:04:41.068 2017 301 55.3088927 -077.7484729 -4.322 1
15:04:42.068 2017 301 55.3088922 -077.7484757 -4.345 1
15:04:43.068 2017 301 55.3088912 -077.7484786 -4.364 1
15:04:44.068 2017 301 55.3088909 -077.7484790 -4.326 1
15:04:45.068 2017 301 55.3088913 -077.7484753 -4.192 1
15:04:46.068 2017 301 55.3088911 -077.7484751 -4.201 1
15:04:47.068 2017 301 55.3088909 -077.7484760 -4.330 1
15:04:48.068 2017 301 55.3088905 -077.7484765 -4.331 1
15:04:49.068 2017 301 55.3088898 -077.7484761 -4.358 1
```

Colonne 1 : temps UTC

Colonne 2 : année

Colonne 3 : jour (jour Julien)

Colonne 4 : latitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 5 : longitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 6 : altitude de la sonde (p/r au modèle de géoïde CGG2013), **Z positif vers le haut**

Colonne 7 : indicateur de qualité GNSS

- 0 : positionnement GNSS avec écart-type en Z >0.05m et/ou positionnement GNSS flottant.
- 1 : positionnement GNSS fixe et écart-type en Z>0.05m
- Pour la dernière colonne, on indique la qualité du positionnement GNSS. Lorsqu'un positionnement GNSS est flottant cela indique que la résolution des ambiguïtés de phase GNSS ne sont pas fixés et que l'incertitude du positionnement GNSS peut-être > 1m.



Lorsque le positionnement GNSS est fixé (indicateur de qualité GNSS = 1) l'incertitude du positionnement GNSS est <0.10m.

Nb .: Pour l'utilisation des données bathymétriques il est suggéré de seulement utiliser les données avec la méthode de réduction ERS et avec des positions GNSS fixe (indicateur de qualité GNSS = 1).

Les données GNSS flottantes (indicateur de qualité GNSS = 0) n'offre pas une précision adéquate (peut être >1m).

De nombreuses sources d'erreurs peuvent affecter les données traitées avec la méthode de réduction WLRs. Il est suggéré d'utiliser ces données avec prudence.

Nomenclature des fichiers de surface bathymétriques :

Village_Zone(s)_Reduction-RefVertical_Resolution

Village: Fait référence au village où les données ont été acquises. Dans le cas présent, le village est Kuujjuarapik et l'acronyme utilisé est Kuujj.

Zone(s) : Indique la ou les zones où les données ont été acquises.

Reduction : Fait référence à la méthode de réduction utilisée pour géo-référencer les données bathymétriques. La méthode de réduction est soit ERS (réduction p/r à l'ellipsoïde) ou WLRs (réduction p/r au niveau d'eau)

RefVertical : Indique la surface de référence verticale à partir duquel les données bathymétriques sont référencées. Pour les données bathymétriques la surface de référence est toujours le modèle de géoïde CGG2013.

Resolution: Indique la résolution de la surface bathymétrique.

Par exemple: *Kuujj_K5_ERS-CGG2013_5m* indique que les données ont été acquises à Kuujjuarapik dans la zone K5. La méthode de réduction utilisée est ERS et la surface de référence verticale est CGG2013. Pour la surface, la résolution est de 5m.

Formats des fichiers de surface bathymétriques :

Format ASCII (.txt) :

```
55.26651346 -077.80082032 -3.205
55.26672882 -077.80122908 -2.888
55.26673784 -077.80083612 -3.084
55.26674686 -077.80044316 -2.384
55.26683700 -077.79651353 -1.596
55.26694418 -077.80163784 -2.652
55.26695320 -077.80124488 -2.798
55.26705237 -077.79692227 -1.741
55.26706138 -077.79652931 -1.256
55.26715953 -077.80204661 -2.557
55.26716856 -077.80165365 -2.575
```

Colonne 1 : latitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 2 : longitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 3 : altitude (p/r au modèle de géoïde CGG2013), **Z positif vers le haut**



Format geotiff (.tiff) :

Le fichier de format geotiff est une image de type raster où chaque pixel représente l'altitude de la sonde p/r au CGG2013.

Format CARIS HIPS (.csar et .csar0) :

Le format .csar est un fichier de surface qui peut-être visualisé à l'aide du logiciel Caris Easy View. Ce logiciel est disponible à l'adresse web suivante : <http://www.caris.com/products/easy-view/index.cfm>

Les fichiers .csar sont toujours accompagnés d'un second fichier .csar0 qui contient la majeure partie des données.

Pour chaque surface il est possible de visualiser les attributs suivants :

Depth : donne la profondeur associée à une cellule. L'algorithme utilisé pour la détermination de profondeur est SwathAngle.

Density : donne la densité de point pour chaque cellule.

Mean : donne la profondeur associée à une cellule en fonction de la moyenne de sondes situées dans la cellule.

Standard deviation : donne l'écart-type de chaque cellule en fonction de la moyenne des sondes.

Shoal : donne la profondeur minimale des sondes de chaque cellule

Deep : donne la profondeur maximale des sondes de chaque cellule

ANNEXE 7 : RAPPORT DU CIDCO SUR L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DES DONNÉES DE BATHYMÉTRIE À QUAQTAQ

1718-404 Traitement données monofaisceau–Quaqtaq

Rapport Final V.4

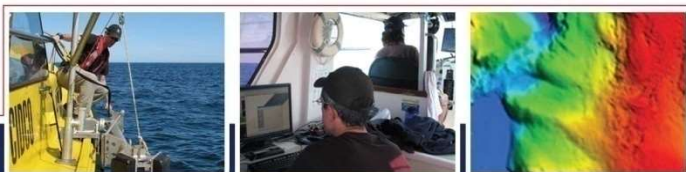
Client / partenaire

Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER)

Référence : 1718-404

Date

Mai 2018



310, allée des Ursulines
C.P. 3300, Rimouski (Québec) Canada G5L 3A1
Téléphone : 418 725-1732 | Télécopieur : 418 724-1401

www.cidco.ca

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX.....	3
INFORMATIONS GÉNÉRALES.....	4
CLIENT	4
CIDCO	4
LIVRABLES	4
1. INTRODUCTION.....	5
2. DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS	7
2.1. SYSTÈME D'ACQUISITION	7
2.2. ACQUISITION DES DONNÉES	8
2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES	8
2.3.1. <i>Post-traitement des données de navigation (PPK) et niveau d'eau</i>	<i>8</i>
2.3.2. <i>Traitement des données monofaisceau</i>	<i>14</i>
2.4. QUALIFICATION DES DONNÉES MONOFAISCEAU	14
3. PRODUITS	18
ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU FORMAT DES PRODUITS	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des secteurs Q1, Q2 et Q3. Source : SHC.	6
Figure 2: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q1.	9
Figure 3: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q2.	10
Figure 4: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q3.	11
Figure 5: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q1	15



Figure 6: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q1.....	15
Figure 7: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q2.....	16
Figure 8: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3.....	16
Figure 9: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3.....	17
Figure 10 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3.....	17
Figure 11 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones Q1 et Q2 à Quaqtq. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.	18
Figure 12 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour la zone Q3 a Quaqtq. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.	19

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résumé des activités à Quaqtq	8
Tableau 2 : Coordonnées de la station de base GNSS à Quaqtq.	9
Tableau 3 : Incertitude en fonction de la profondeur pour l'Ordre Spécial (SHC).....	18

INFORMATIONS GÉNÉRALES

CLIENT

Compagnie/ministère	Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), Université du Québec à Rimouski (UQAR)
Nom du responsable	Urs Neumeier
Coordonnées	ISMER 310 allée des Ursulines Rimouski, Québec, G5L 3A1

CIDCO

Chargé de projet	Mathieu Rondeau
Acquisition	Julien Desrochers/Mathieu Rondeau
Capitaines	Paul Angnatuk (Inuit) Tuniq Ningiuruvik (Inuit) Adamie Kalui (Inuit)
Traitement	Julien Desrochers / Mathieu Rondeau
Rédaction du rapport final	Julien Desrochers
Relecture	Mathieu Rondeau

LIVRABLES (FICHIERS)

Quaqtaq zone Q1 (surfaces bathymétriques)	Quaq_Q1_ERS-CGG2013_25m.txt Quaq_Q1_ERS-CGG2013_5m.txt Quaq_Q1_ERS_CGG2013_25m.csar Quaq_Q1_ERS_CGG2013_25m.csar0 Quaq_Q1_ERS_CGG2013_25m.tiff Quaq_Q1_ERS_CGG2013_5m.csar Quaq_Q1_ERS_CGG2013_5m.csar0 Quaq_Q1_ERS_CGG2013_5m.tiff Quaq_Q1_WLRS_ZC_25m.csar
---	--



	Quaq_Q1_WLRS_ZC_25m.csar0
Quaqtaq zone Q2 (surfaces bathymétriques)	Quaq_Q2_ERS-CGG2013_25m.txt Quaq_Q2_ERS-CGG2013_5m.txt Quaq_Q2_ERS_CGG2013_25m.csar Quaq_Q2_ERS_CGG2013_25m.csar0 Quaq_Q2_ERS_CGG2013_25m.tiff Quaq_Q2_ERS_CGG2013_5m.csar Quaq_Q2_ERS_CGG2013_5m.csar0 Quaq_Q2_ERS_CGG2013_5m.tiff Quaq_Q2_WLRS_ZC_25m.csar Quaq_Q2_WLRS_ZC_25m.csar0
Quaqtaq zone Q3 (surfaces bathymétriques)	Quaq_Q3_ERS-CGG2013_25m.txt Quaq_Q3_ERS-CGG2013_5m.txt Quaq_Q3_ERS_CGG2013_25m.csar Quaq_Q3_ERS_CGG2013_25m.csar0 Quaq_Q3_ERS_CGG2013_25m.tiff Quaq_Q3_ERS_CGG2013_5m.csar Quaq_Q3_ERS_CGG2013_5m.csar0 Quaq_Q3_ERS_CGG2013_5m.tiff Quaq_Q3_WLRS_ZC_25m.csar Quaq_Q3_WLRS_ZC_25m.csar0
Quaqtaq zones Q1 à Q3 (données bathymétriques)	Quaq_Q1_ERS-CGG2013_filtered_id.txt Quaq_Q1_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt Quaq_Q2_ERS-CGG2013_filtered_id.txt Quaq_Q2_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt Quaq_Q3_ERS-CGG2013_filtered_id.txt Quaq_Q3_WLRS-CGG2013_filtered_id.txt

NB. - Le contenu des fichiers est décrit à l'annexe 1.



1. INTRODUCTION

Le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) a été sollicité par le chercheur de l'ISMER Urs Neumeier pour réaliser la bathymétrie des secteurs Q1, Q2 et Q3 dans région de Quaqaq (Figure 1). Ce projet est financé indirectement par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transport du Québec (MTMDET) dans le cadre du Fonds vert et du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2013-2020 du Gouvernement du Québec.

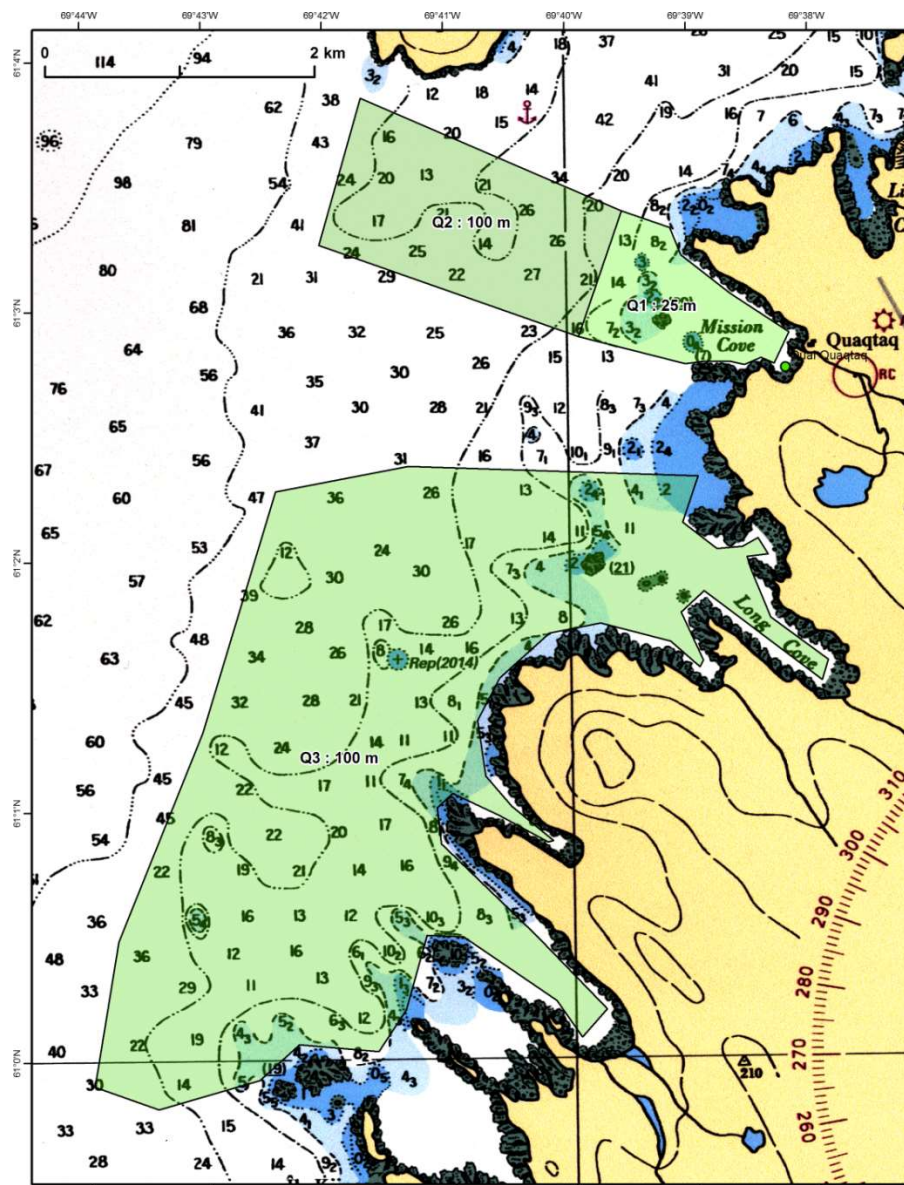


Figure 1 : Localisation des secteurs Q1, Q2 et Q3. Source : SHC.

2. DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS

Les sections décrivant le matériel et les méthodologies utilisées ainsi que la calibration des équipements et l'acquisition des données sont décrites en détail dans le rapport 1718-404-HydroBall-Quaqtaq_RapportMissionTerrain_V1-1.pdf.

2.1. SYSTÈME D'ACQUISITION

Les données bathymétriques ont été acquises à l'aide de deux bouées HydroBall®.

La bouée HydroBall® est une solution autonome d'acquisition de données bathymétriques particulièrement efficace en milieux non traditionnels (rivière, canyon, réservoir, zone ultra-côtière). La coque de forme sphérique (40cm de diamètre) renferme un récepteur GPS, un inclinomètre et un sondeur monofaisceau.

Spécifications HydroBall	
Dimension	40cm de diamètre
Poids	13kg
Autonomie	24h
Récepteur GPS	Standalone mode 2.5m (95%) DGPS (SBAS) mode 0.6m (95%) Post-Processed (PPK) mode 0.02m (95%) Update Rate: 1Hz -> 10Hz
Inclinomètre	Heading Tilt < $\pm 20^\circ$: 0.5 Pitch, Roll Tilt < 20° : 0.4° Tilt > 20° : 0.6° Update rate: 10Hz
Sondeur monofaisceau (Imagenex)	Frequency: 675kHz Beam width: 10° Range: 0.3m -> 50m Range Resolution: 20mm Update rate: 1Hz -> 10Hz

2.2. ACQUISITION DES DONNÉES

Le levé s'est déroulé selon le calendrier suivant :

Tableau 1: Résumé des activités à Quaqtq

Travail effectué à Quaqtq (partie 1: 2017/09/21 au 2017/10/01)					
Jour	Date	Zone	Équipements	Productivité	Commentaires
1	21/09/2017	Q1	Hball-010	A	
		Q1	Hball-011	A	
2	22/09/2017	Q3	Hball-010	A	
		Q3	Hball-011	A	
3	23/09/2017	Q3	Hball-010	A,B	Vent W forçant en fin de journée
		Q3	Hball-011	A,B	Vent W forçant en fin de journée
4	24/09/2017	N/A	N/A	B	Vent NW important
		N/A	N/A	B	Vent NW important
5	25/09/2017	N/A	N/A	B	Vent NW important
		N/A	N/A	B	Vent NW important
6	26/09/2017	N/A	N/A	B	Vent NW important
		N/A	N/A	B	Vent NW important
7	27/09/2017	N/A	N/A	B	Vent NW important
		N/A	N/A	B	Vent NW important
8	28/09/2017	Q2	Hball-010	A,B	levé AM seulement (vent NW important)
		Q2	Hball-011	A,B	levé AM seulement (vent NW important)
9	29/09/2017	N/A	N/A	N/A	Vent NW important
		N/A	N/A	N/A	Vent NW important
10	30/09/2017	N/A	N/A	N/A	tentative sur Q3 (vent S trop important)
		N/A	N/A	N/A	tentative sur Q3 (vent S trop important)
11	01/10/2017	N/A	N/A	N/A	Vent N important
		N/A	N/A	N/A	Vent N important

A : journée productive

B : journée non-productive (problèmes météo)

C : journée non-productive (problèmes techniques)

D : journée non-productive (problèmes ressources humaines)

2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.3.1. POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE NAVIGATION (PPK) ET NIVEAU D'EAU

Pour les levés bathymétriques, le post-traitement des données de navigation a été réalisé à l'aide du logiciel RTK-Lib.

Le calcul de la solution PPK pour le secteur de Quaqtq a été fait en référence au point 72KP086 du réseau géodésique du Québec. Les coordonnées utilisées sont les moyennes de 3 traitements PPP effectués sur le point 72KP086 à l'aide d'une station de base GNSS installé par l'équipe du



CIDCO. Les détails de ce traitement sont disponible dans le rapport terrain : *1718-404-HydroBall-Quaqtaq_RapportMissionTerrain_V1-1.pdf*.

	Nad83 (SCRS) époque 1997		
Id	Lat	Lng	Hauteur ellipsoïdale
72KP086	61.04485823°	-69.6389537°	0.400m
	Nord (UTM19)	Est (UTM19)	

Tableau 2 : Coordonnées de la station de base GNSS à Quaqtq.

Les cartes suivantes montrent la qualité du positionnement GNSS sur les différentes zones. Les lignes vertes correspondent aux endroits où les ambiguïtés de phase sont fixées et l'écart-type en Z est $<0.05\text{m}$, donc un positionnement GNSS de bonne qualité. Les zones en noir correspondent aux endroits où l'écart-type en Z est $>0.05\text{m}$ et où les ambiguïtés de phase ne sont pas fixées (position GNSS flottante), donc un positionnement GNSS avec une plus grande incertitude.

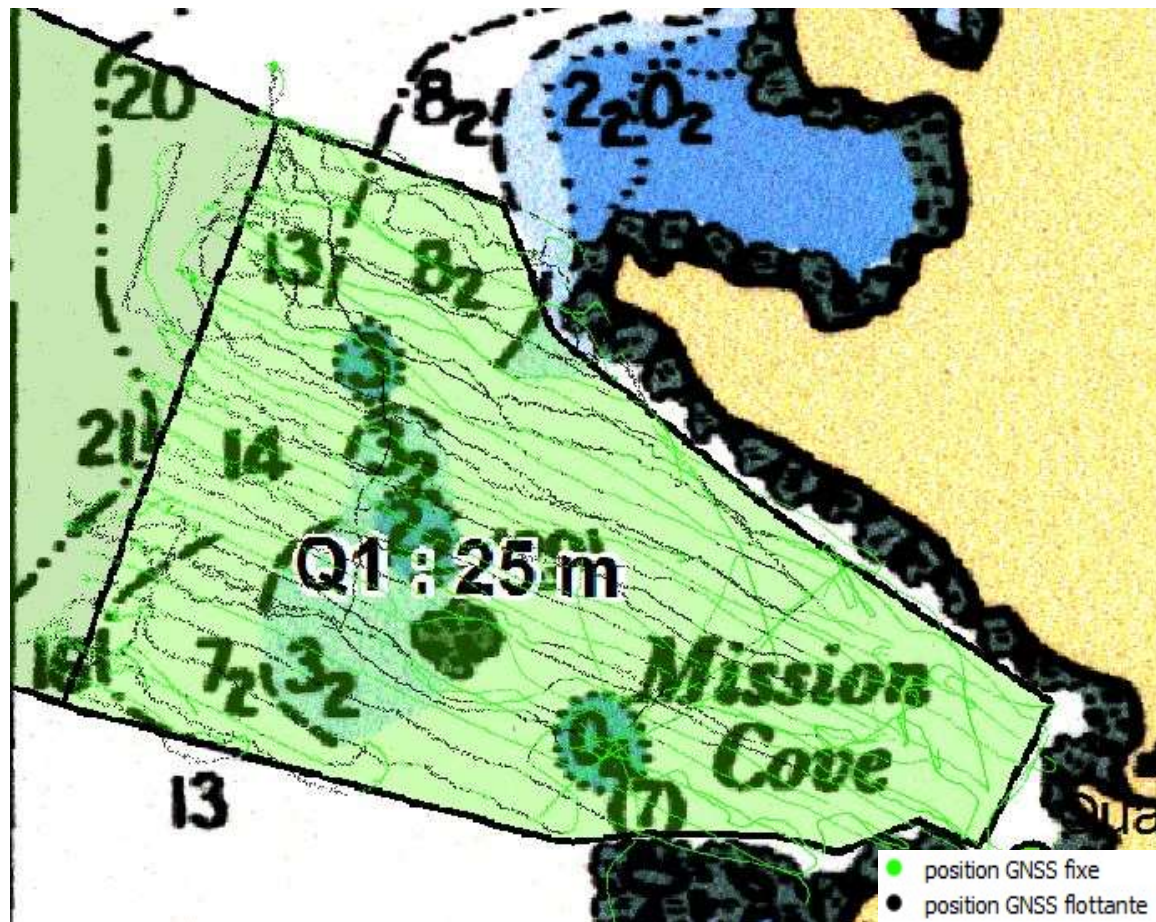


Figure 2: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q1.

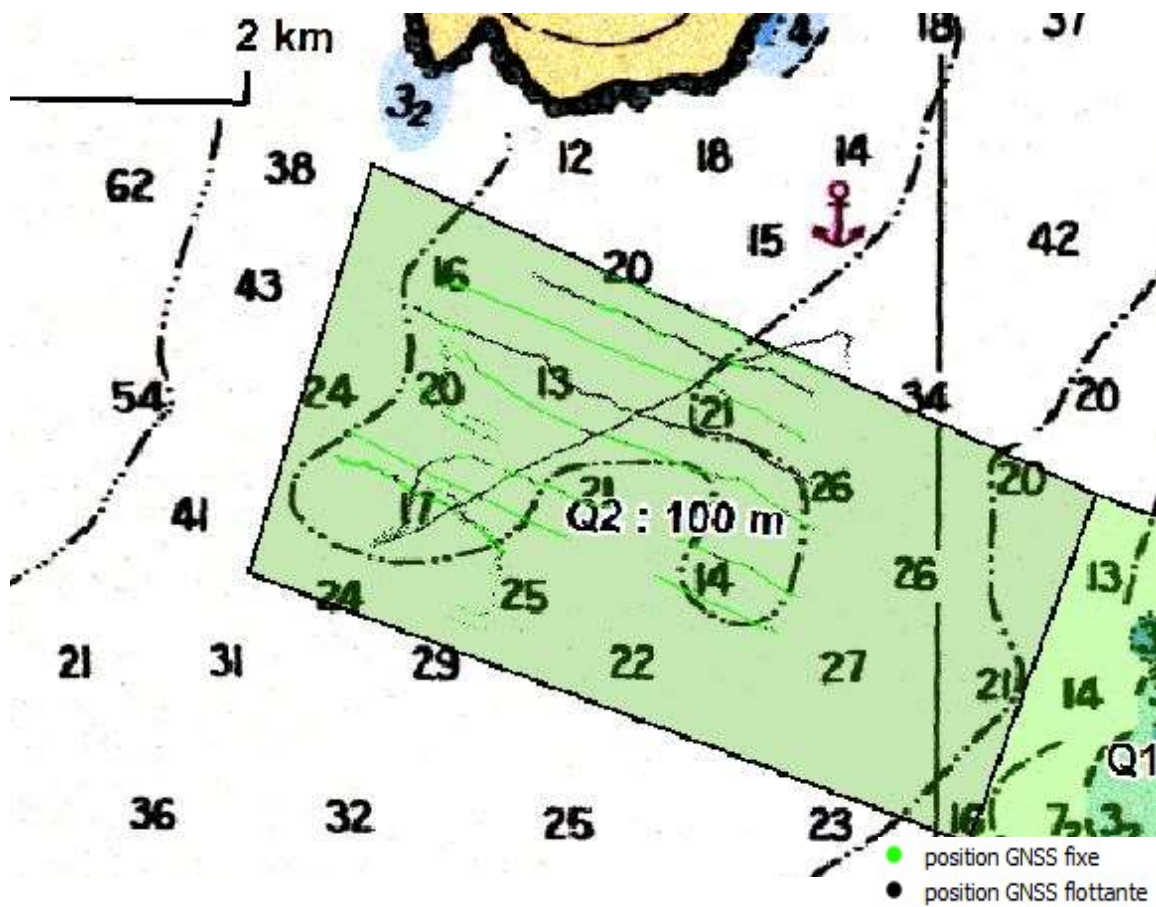


Figure 3: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q2.

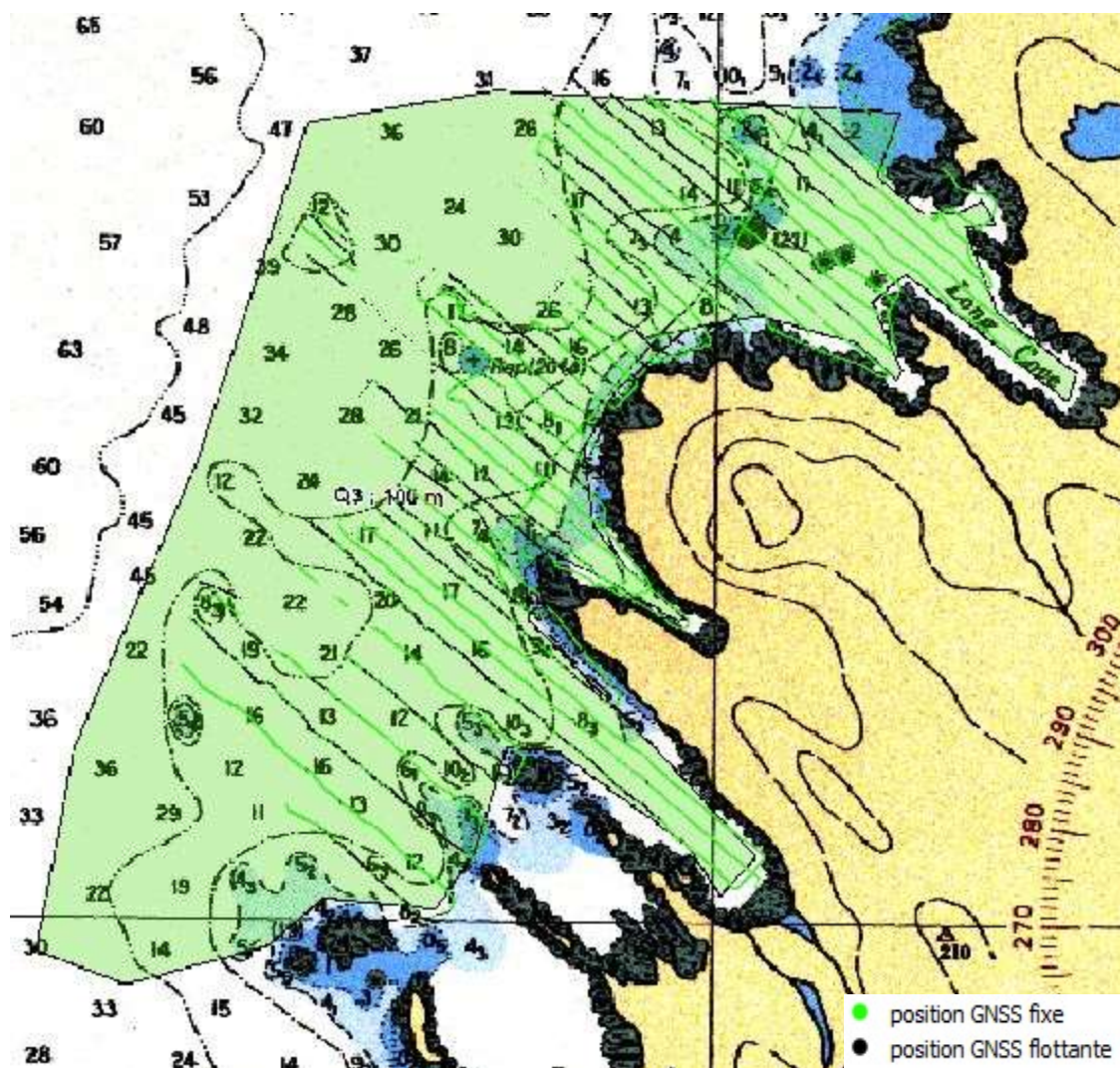


Figure 4: Qualité du positionnement GNSS pour la zone Q3.

Étant donné la qualité du positionnement GNSS pour certaines portions de levé, deux méthodes ont été utilisées pour la réduction des sondes bathymétriques :

- WLRS (water level referenced survey)
- ERS (ellipsoid referenced survey)

Définitions utiles:

Une sonde : est définie par la position (longitude, latitude), et une profondeur d'eau *en référence* à une référence verticale fixe. Dans les cartes marines, cette référence est le ZC qui est définie par rapport à un niveau de référence (exemple : la plus basse marée astronomique (LAT))

Mesure de profondeur : Une mesure relative de la profondeur de l'eau, ne tenant pas compte des effets de la marée, et qui est non référencée à une référence verticale fixe.

Réduction des sondes : La *transformation* de mesure de profondeur en sondages.



CGVD2013: Le CGVD2013 est défini par la surface équipotentielle qui représente le niveau moyen des mers. Ce datum vertical est matérialisé par le modèle de géoïde CGG2013 qui fournit la séparation entre l'ellipsoïde utilisée par le système géodésique NAD83(SCRS) et la surface CGVD2013.

ZC : Le zéro des cartes (ZC) ou zéro hydrographique est une référence verticale à partir duquel la profondeur est donnée sur les cartes marines. Au Canada, le SHC (Service Hydrographique du Canada) utilise la basse mer inférieure, grande marée ou la marée normale la plus basse comme niveau de référence. Simplement, cela signifie que le ZC se situe au niveau où la marée est la plus basse.

2.3.1.1 MÉTHODE DE RÉDUCTION ERS

La réduction des sondes au modèle de géoïde CGG2013 (datum vertical) en mode ERS est basée sur l'utilisation des observations GNSS. La solution PPK est calculée directement dans le datum horizontal **NAD83(SCRS) époque 1997**. Pour réduire les sondes au CGG2013, le modèle de géoïde CGG2013 est utilisé. Ce modèle donne la différence entre la hauteur ellipsoïdale et l'altitude orthométrique du géoïde. Le traitement est effectué à l'aide du logiciel CARIS HIPS/SIPS.

L'altitude des sondes par rapport au CGG2013 est obtenue selon la relation suivante :

$$H_{CGG2013} = h_{NAD83} - N_{CGG2013} \quad (\mathbf{Z \text{ positif vers le haut}})$$

$H_{CGG2013}$ = hauteur orthométrique du modèle de géoïde CGG2013

h_{NAD83} = hauteur ellipsoïdale dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997

$N_{CGG2013}$ = ondulation du modèle de géoïde CGG2013

Pour les données réduites au CGG2013, le modèle de géoïde est appliqué dans Caris HIPS/SIPS directement lors du géo-référencement des sondes.

2.3.1.2. MÉTHODE DE RÉDUCTION WLRS

La réduction des sondes au CGG2013 en mode WLRS est basée sur l'utilisation des prédictions de marées. Les prédictions de marées sont calculées par le SHC pour le site de Quaqtaq. Les prédictions couvrent l'ensemble des secteurs Q1 à Q3.

Pour le positionnement horizontal, la solution PPK est calculée directement dans le datum horizontal **NAD83(SCRS) époque 1997** et si aucune solution PPK n'existe la GGA (positionnement GPS standalone) est utilisé. Dans le deuxième cas (GPS standalone), la précision horizontale est de 1-3m. Pour le positionnement vertical, on utilise les données de prédiction de marées en référence au zéro des cartes (ZC). Voici la procédure de traitement :



- Importation des données de prédiction de marées dans Caris HIPS/SIPS
- Réduction des sondes par rapport aux données de prédiction de marées (référence= ZC)
- Exportation de données traitées en appliquant la séparation ZC-ellipsoïde(système géodésique NAD83(SCRS)) à l'ensemble des données. Cette valeur de séparation déterminée par le Service Hydrographique du Canada (SHC) est considérée constante pour les 3 secteurs (Q1 à Q3).

La hauteur des sondes par rapport au système géodésique NAD83(SCRS) est donnée par la relation suivante :

$$h_{NAD83} = H_{ZC} + N_{ZC_NAD83}$$

H_{ZC} = hauteur par rapport au zéro des cartes (ZC)

h_{NAD83} = hauteur ellipsoïdale dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997

N_{ZC_NAD83} = séparation entre ZC et ellipsoïde (système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

- La valeur $N_{ZC_NAD83} = -25.352m$ (déterminée par le SHC)

- Application du modèle de géoïde CGG2013 à l'aide de l'outil GPS-H de RNCAN aux données exportés (référence = ellipsoïde).

L'altitude des sondes par rapport au CGG2013 est obtenue selon la relation suivante :

$$H_{CGG2013} = h_{NAD83} - N_{CGG2013} \quad (\text{Z positif vers le haut})$$

- Il est à noter qu'il faut être prudent avec l'utilisation des données traitées selon la méthode de réduction WLRS. Il existe plusieurs incertitudes liées à cette méthode :
 - La connaissance du ZC et de la séparation ellipsoïde-ZC : le SHC ne peut valider la détermination du ZC. Il n'est pas possible de connaître la précision associée à la valeur de séparation fournie par le SHC.
 - Les prédictions de marées ne reflètent pas nécessairement la réalité. Des facteurs comme la météo peut avoir une incidence importante sur la marée observée ce dont ne tient pas compte la marée prédite. Il est aussi possible que les harmoniques utilisées pour prédire la marée à Quaqtaq ne soient pas exactes.
 - L'HydroBall n'a pas de capteur de pilonnement. Cela veut dire que les vagues ne sont pas mesurées lors d'une réduction WLRS et s'ajoutent à l'incertitude lors du géo-référencement des sondes.
 - Les erreurs dues aux vagues sont de l'ordre de l'amplitude des vagues. Dans le cas de vents importants ces amplitudes peuvent atteindre 0.5-0.75m. Se référer à la section 2.2 pour connaître les moments de vents importants.
 - Il faut noter également que ce problème pourrait créer des artefacts de dunes sous-marines dans les données réduites avec la méthode WLRS. Les impacts de ces artefacts seront moins importants sur les surfaces à 25m de résolution comparativement à ceux à 5m de résolution.



2.3.2. TRAITEMENT DES DONNÉES MONOFAISCEAU

Le processus de traitement a pour but de combiner les données acquises de manière indépendante par les différents capteurs :

- 1) sonar monofaisceau;
- 2) inclinomètre;
- 3) GNSS / marées;
- 4) profileur de vitesse du son dans l'eau.

Les traitements subséquents visent à s'assurer de la qualité de ces données ainsi que d'éliminer les points de sonde erronés. Le traitement des données bathymétriques a été réalisé à l'aide du logiciel HIPS/SIPS 10.3 de la compagnie Caris.

Plus spécifiquement, les données ont été:

- 1) corrigées dès l'importation pour la vitesse du son dans l'eau :
 - une valeur de célérité moyenne est appliquée aux valeurs de profondeur mesurée par le sonar.
 - les profils de célérité sélectionnés sont espacés dans le temps et dans l'espace. Généralement les profils étaient effectués aux 3-4h dans des endroits espacés sur la zone de levé.
- 2) corrigées pour le niveau d'eau :
 - méthode ERS ou WLRS, voir section 2.3 pour plus de détail.
- 3) fusionnées, étape qui consiste à repositionner les sondes horizontalement dans un système de coordonnées projetées et de les positionner verticalement par rapport au datum vertical choisi. Les corrections par rapport à l'attitude du système hydrographique sont faites à ce moment.
- 4) nettoyées manuellement (suppression des sondes aberrantes)
- 5) les points de sonde ont ensuite été moyennés sur deux grilles matricielles, à 5m et 25m de résolution, à l'aide de l'algorithme SwathAngle implémenté dans Caris.
 - a. L'attribut "depth" pour les surfaces crée représente la moyenne pondérée en fonction de l'angle de tir du sonar. C'est cet attribut qui est utilisé pour la représentation de la profondeur pour les surfaces au format .txt et .tiff.
 - i. La description du format de fichier est disponible en annexe.
- 6) les points de sonde ont enfin été exportés en format ASCII
 - i. La description du format de fichier est disponible en annexe.

2.4. QUALIFICATION DES DONNÉES MONOFAISCEAU

Pour qualifier les données acquises à l'aide des bouées HydroBall et HydroBox nous avons évalué la cohérence des profondeurs mesurées aux points d'intersection des lignes de sondages.



L'évaluation de la précision relative des points de sonde par l'analyse de l'écart de profondeur mesuré aux intersections des lignes de sondage a été faite avec l'outil subset editor de CARIS.

Les écarts de profondeur mesurés aux intersections sont montrés dans les figures 5 à 10.

Zone Q1 :

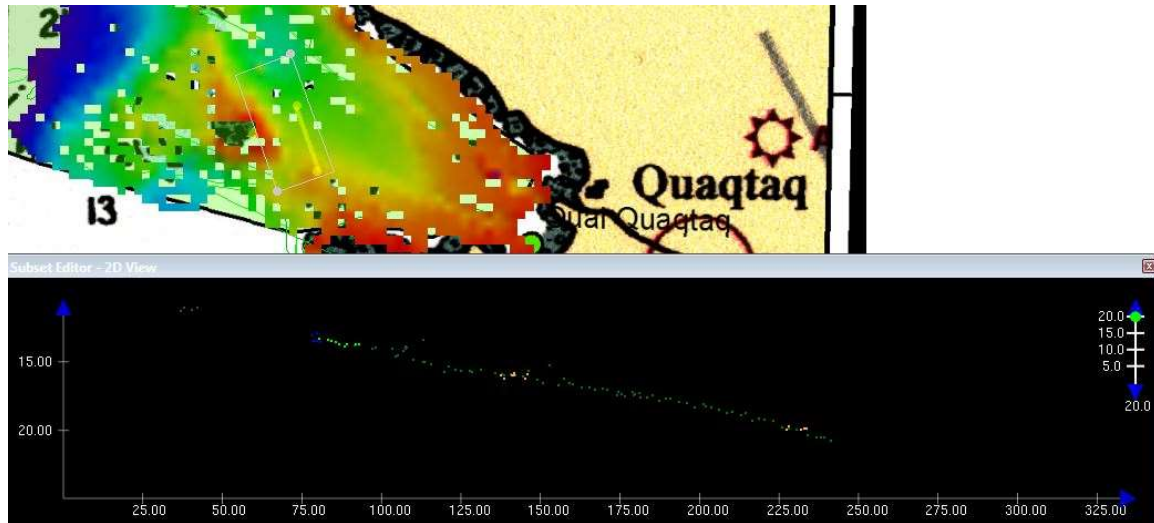


Figure 5: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q1

La moyenne de l'écart des différences pour les 5 intersections est de 0.20m.

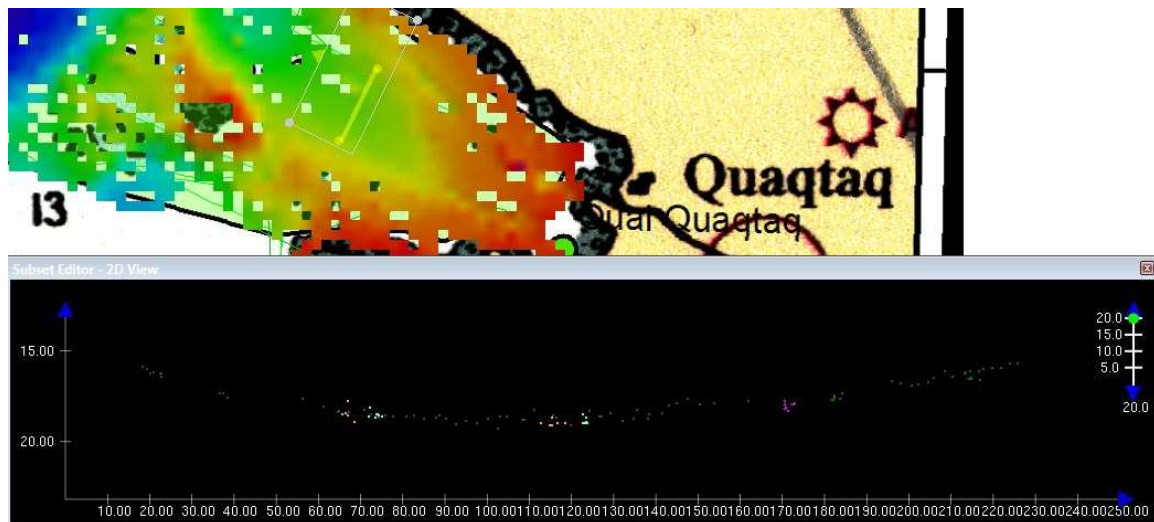


Figure 6: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q1

La moyenne de l'écart des différences pour les 6 intersections est de 0.17m.

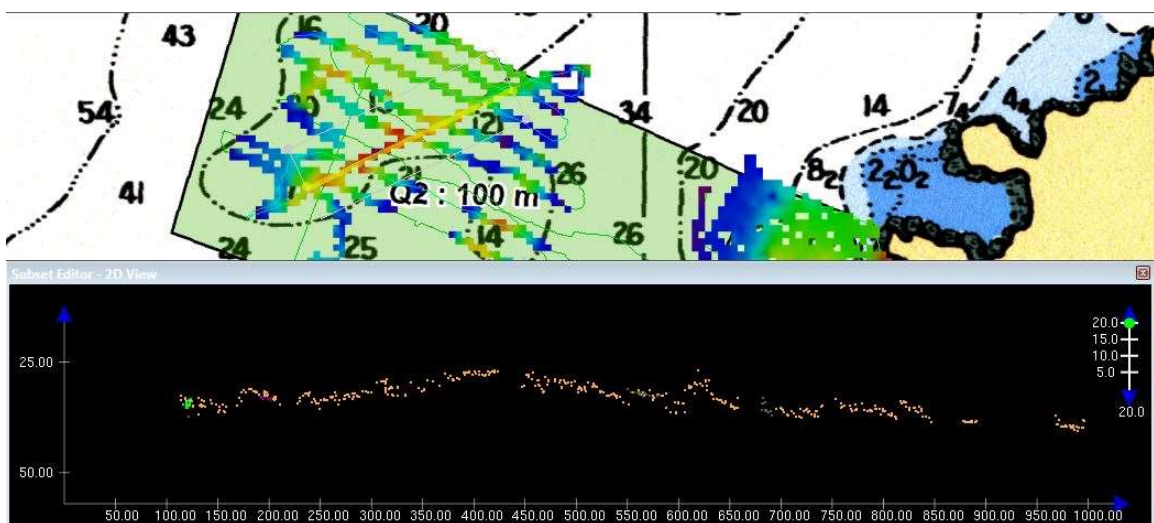


Figure 7: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q2

La moyenne de l'écart des différences pour les 4 intersections est de 0.19m.

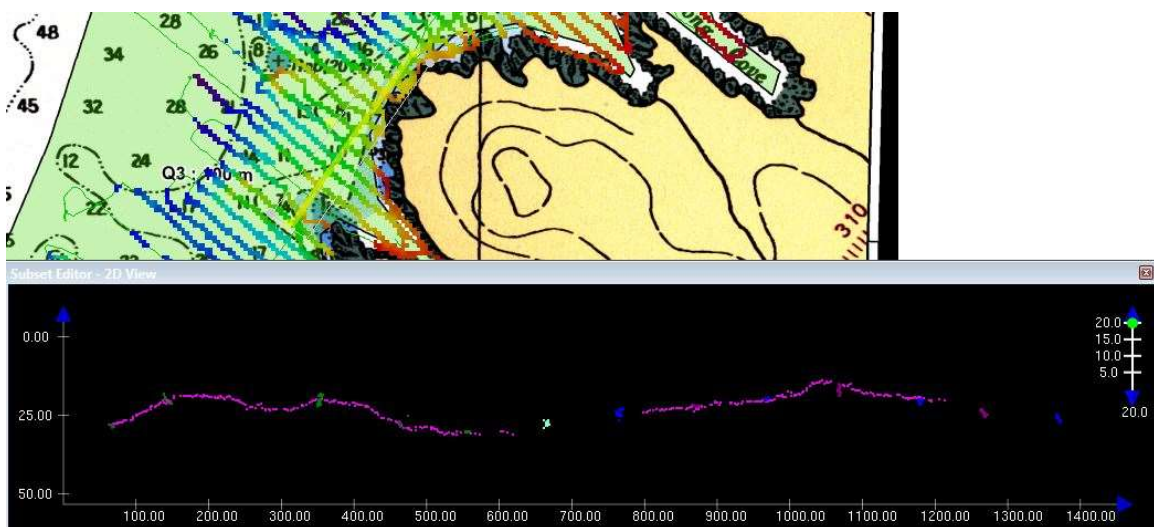


Figure 8: Intersections 1 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3

La moyenne de l'écart des différences pour les 11 intersections est de 0.26m. Deux des intersections ont des écarts de 0.40m et 0.50m. Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

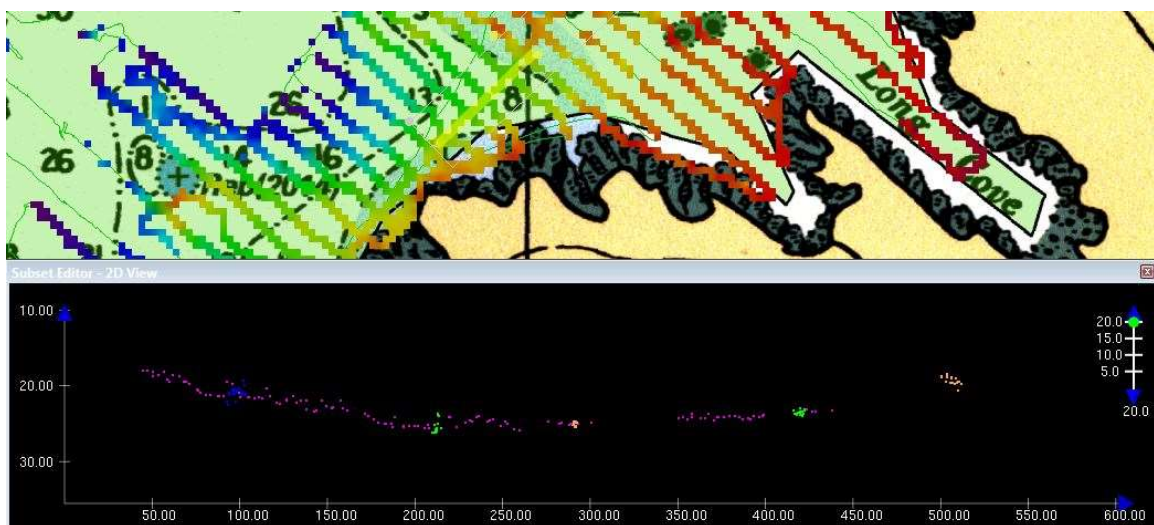


Figure 9: Intersections 2 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3

La moyenne de l'écart des différences pour les 4 intersections est de 0.18m. Une des intersections à un écart de 0.33m (bleu). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

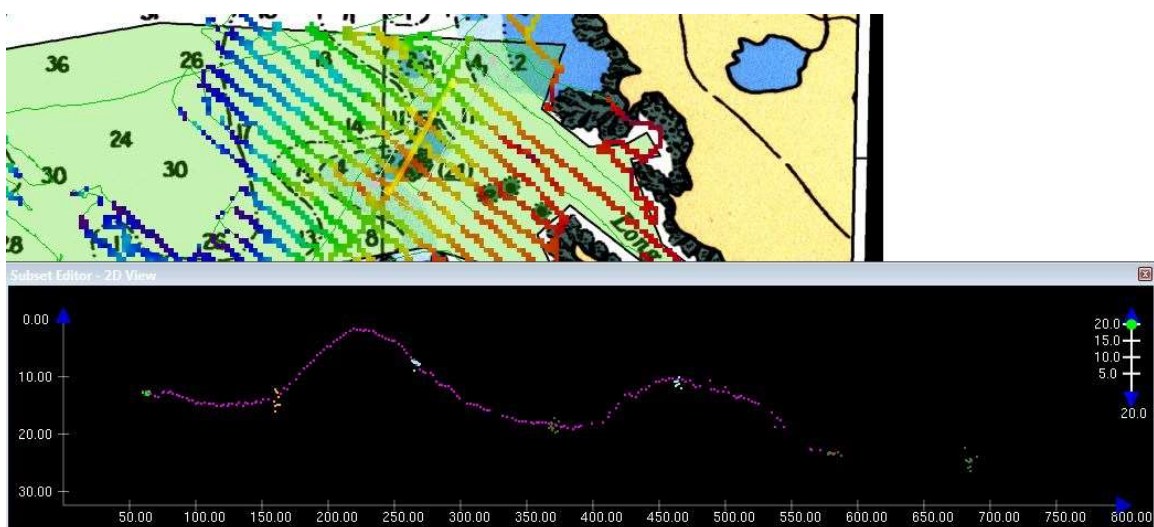


Figure 10 : Intersections 3 auxquelles les écarts entre 1 ligne parallèle à la côte et plusieurs lignes perpendiculaires à la côte ont été vérifiés. Zone Q3

La moyenne de l'écart des différences pour les 6 intersections est de 0.26m. Deux des intersections ont des écarts de 0.60m (beige) et 0.28m (bleu poudre). Cela s'explique par le mauvais positionnement GNSS.

Généralement, il est possible de constater qu'aux endroits où les données ont été vérifiées les écarts entre les lignes qui se croisent sont inférieurs à l'Ordre Spécial des Normes minimales pour les levés hydrographiques (SHC).

profondeur	incertitude
(m)	(m)
10	0.26
20	0.29
30	0.34
40	0.39
50	0.45

Tableau 3 : Incertitude en fonction de la profondeur pour l'Ordre Spécial (SHC)

Lorsque cet écart est supérieur à l'Ordre Spécial, cela s'explique généralement par le mauvais positionnement GNSS des données bathymétriques.

3. PRODUITS

Les figures suivantes montrent les modèles numériques de terrain (MNT) réalisés pour chacune des zones. Les MNT sont projetés dans la projection UTM19N avec le système géodésique NAD83(SCRS) ep.1997. La description détaillée de l'ensemble des produits est faite en annexe.

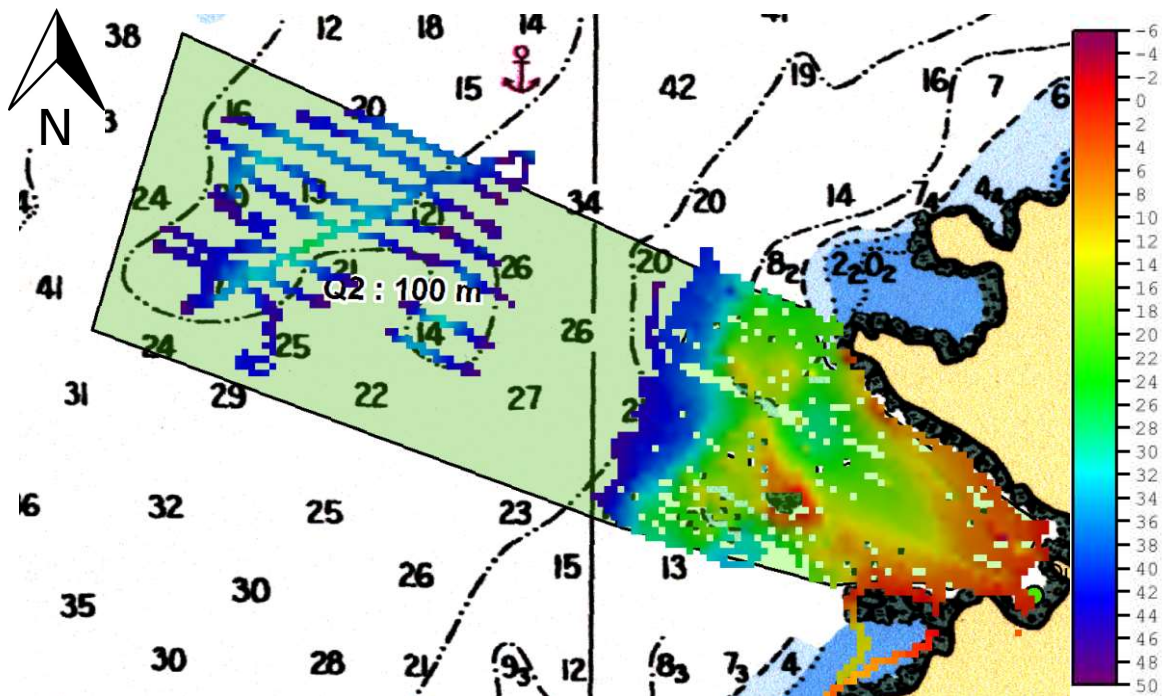


Figure 11 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour les zones Q1 et Q2 à Quaqtaq. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.

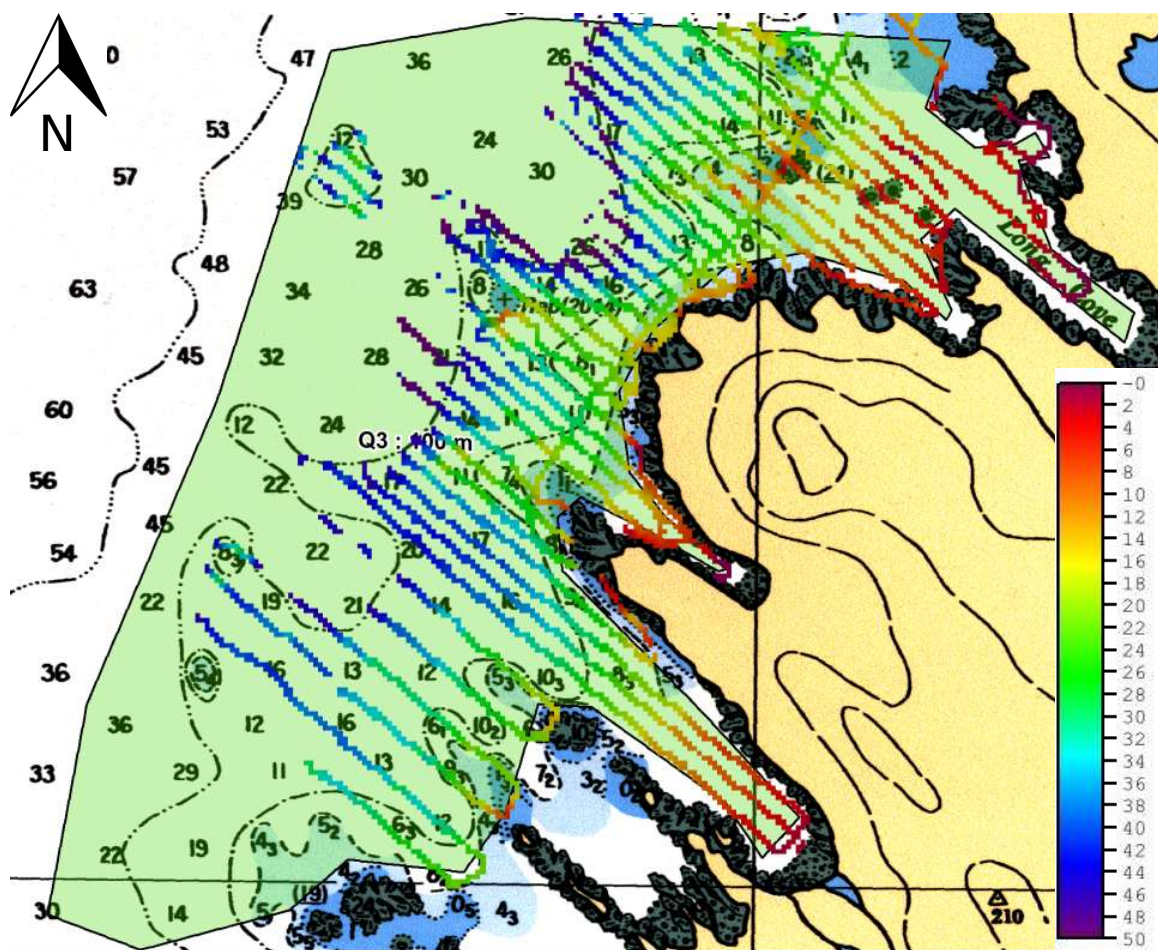


Figure 12 : Modèle numérique de terrain du levé HydroBall pour la zone Q3 à Quaqtq. Les profondeurs affichées sont en mètres. La référence verticale est le CGG2013.

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU FORMAT DES PRODUITS

Nomenclature des fichiers de données bathymétriques :

Village_Zone(s)_Réduction-RefVertical_filtered_id

Village: Fait référence au village où les données ont été acquises. Dans le cas présent, le village est Quaqa et l'acronyme utilisé est Qua.

Zone(s) : Indique la ou les zones où les données ont été acquises.

Réduction : Fait référence à la méthode de réduction utilisée pour géo-référencer les données bathymétriques. La méthode de réduction est soit ERS (réduction p/r à l'ellipsoïde) ou WLRS (réduction p/r au niveau d'eau)

RefVertical : Indique la surface de référence verticale à partir duquel les données bathymétriques sont référencées. Pour les données bathymétriques la surface de référence est toujours le modèle de géoïde CGG2013.

filtered_id: Indique que les données ont été filtrées pour la qualité du positionnement GNSS.

Par exemple: *Qua_Q2_ERS-CGG2013_filtered_id* veut dire que les données ont été acquises à Quaqa dans la zone Q2. La méthode de réduction utilisée est ERS et la surface de référence verticale est CGG2013. Les données ont également été filtrées pour indiquer la qualité du positionnement GNSS.

Format des fichiers de données bathymétriques :

Format ASCII (.txt) :

Pour les méthodes de réductions WLRS et ERS, le format du fichier est le même.

```
15:04:38.068 2017 301 55.3088968 -077.7484667 -4.667 1
15:04:39.068 2017 301 55.3088956 -077.7484682 -4.453 1
15:04:41.068 2017 301 55.3088927 -077.7484729 -4.322 1
15:04:42.068 2017 301 55.3088922 -077.7484757 -4.345 1
15:04:43.068 2017 301 55.3088912 -077.7484786 -4.364 1
15:04:44.068 2017 301 55.3088909 -077.7484790 -4.326 1
15:04:45.068 2017 301 55.3088913 -077.7484753 -4.192 1
15:04:46.068 2017 301 55.3088911 -077.7484751 -4.201 1
15:04:47.068 2017 301 55.3088909 -077.7484760 -4.330 1
15:04:48.068 2017 301 55.3088905 -077.7484765 -4.331 1
15:04:49.068 2017 301 55.3088898 -077.7484761 -4.358 1
```

Colonne 1 : temps UTC

Colonne 2 : année

Colonne 3 : jour (jour Julien)

Colonne 4 : latitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 5 : longitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 6 : altitude de la sonde (p/r au modèle de géoïde CGG2013), **Z positif vers le haut**

Colonne 7 : indicateur de qualité GNSS

- 0 : positionnement GNSS avec écart-type en Z >0.05m et/ou positionnement GNSS flottant.
- 1 : positionnement GNSS fixe et écart-type en Z>0.05m
- Pour la dernière colonne, on indique la qualité du positionnement GNSS. Lorsqu'un positionnement GNSS est flottant cela indique que la résolution des ambiguïtés de phase GNSS ne sont pas fixés et que l'incertitude du positionnement GNSS peut-être > 1m.



Lorsque le positionnement GNSS est fixé (indicateur de qualité GNSS = 1) l'incertitude du positionnement GNSS est <0.10m.

Nb .: Pour l'utilisation des données bathymétriques il est suggéré de seulement utiliser les données avec la méthode de réduction ERS et avec des positions GNSS fixe (indicateur de qualité GNSS = 1).

Les données GNSS flottantes (indicateur de qualité GNSS = 0) n'offre pas une précision adéquate (peut être >1m).

De nombreuses sources d'erreurs peuvent affecter les données traitées avec la méthode de réduction WLRS. Il est suggéré d'utiliser ces données avec prudence.

Nomenclature des fichiers de surface bathymétriques :

Village_Zone(s)_Reduction-RefVertical_Resolution

Village: Fait référence au village où les données ont été acquises. Dans le cas présent, le village est Quaqtaq et l'acronyme utilisé est Quaq.

Zone(s) : Indique la ou les zones où les données ont été acquises.

Reduction : Fait référence à la méthode de réduction utilisée pour géo-référencer les données bathymétriques. La méthode de réduction est soit ERS (réduction p/r à l'ellipsoïde) ou WLRS (réduction p/r au niveau d'eau)

RefVertical : Indique la surface de référence verticale à partir duquel les données bathymétriques sont référencées. Pour les données bathymétriques la surface de référence est toujours le modèle de géoïde CGG2013.

Resolution: Indique la résolution de la surface bathymétrique.

Par exemple: *Quaq_Q3_ERS-CGG2013_5m* indique que les données ont été acquises à Quaqtaq dans la zone Q3. La méthode de réduction utilisée est ERS et la surface de référence verticale est CGG2013. Pour la surface, la résolution est de 5m.

Formats des fichiers de surface bathymétriques :

Format ASCII (.txt) :

```
55.26651346 -077.80082032 -3.205
55.26672882 -077.80122908 -2.888
55.26673784 -077.80083612 -3.084
55.26674686 -077.80044316 -2.384
55.26683700 -077.79651353 -1.596
55.26694418 -077.80163784 -2.652
55.26695320 -077.80124488 -2.798
55.26705237 -077.79692227 -1.741
55.26706138 -077.79652931 -1.256
55.26715953 -077.80204661 -2.557
55.26716856 -077.80165365 -2.575
```

Colonne 1 : latitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 2 : longitude (degrés décimaux dans le système de référence NAD83(SCRS) ep.1997)

Colonne 3 : altitude (p/r au modèle de géoïde CGG2013), **Z positif vers le haut**



Format geotiff (.tiff) :

Le fichier de format geotiff est une image de type raster où chaque pixel représente l'altitude de la sonde p/r au CGG2013.

Format CARIS HIPS (.csar et .csar0) :

Le format .csar est un fichier de surface qui peut-être visualisé à l'aide du logiciel Caris Easy View. Ce logiciel est disponible à l'adresse web suivante : <http://www.caris.com/products/easy-view/index.cfm>

Les fichiers .csar sont toujours accompagnés d'un second fichier .csar0 qui contient la majeure partie des données.

Pour chaque surface il est possible de visualiser les attributs suivants :

Depth : donne la profondeur associée à une cellule. L'algorithme utilisé pour la détermination de profondeur est SwathAngle.

Density : donne la densité de point pour chaque cellule.

Mean : donne la profondeur associée à une cellule en fonction de la moyenne de sondes situées dans la cellule.

Standard deviation : donne l'écart-type de chaque cellule en fonction de la moyenne des sondes.

Shoal : donne la profondeur minimale des sondes de chaque cellule

Deep : donne la profondeur maximale des sondes de chaque cellule