



Université du Québec
à Rimouski

Caractérisation et analyse de l'évolution spatio-temporelle du littoral de Whapmagoostui-Kuujuarapik à Umiujaq (Nunavik)

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© **JULIE MAJOR**

Juin 2024

Composition du jury :

Pascal Bernatchez, président du jury, Université du Québec à Rimouski

David Didier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Simon Bélanger, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Sonia Laforest, examinatrice externe, cheffe de l'unité des Rives, Section des urgences
science et technologie, Environnement et Changement Climatique Canada**

Dépôt initial le 14 janvier 2024

Dépôt final le 10 juin 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, j'aimerais remercier mon directeur de maîtrise, David Didier, de m'avoir donné ma chance dans ce tout nouveau labo et de m'avoir permis de vivre des expériences inoubliables à travers mon parcours au 2^e cycle. Merci pour les nombreuses opportunités qui m'ont permis de rencontrer des communautés exceptionnelles et qui m'ont ouvert les yeux sur des enjeux qui m'étaient méconnus. Ta confiance m'a permis de développer des compétences tellement plus larges que simplement mon projet de maîtrise, et pour ça, je t'en remercie.

J'aimerais remercier Simon Bélanger, mon co-directeur, pour avoir eu un impact indéniable dans mon parcours en géographie. Simon, tu as vu en moi une petite étincelle et une soif d'apprendre dès les premiers mois de mes études à l'UQAR. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir donné ma première opportunité nordique qui m'a donné la piqûre et la fougue de vouloir y retourner. Ta confiance et ton soutien m'ont gardé motivée tout au long de mon parcours à l'UQAR.

J'aimerais aussi offrir mes meilleurs remerciements aux communautés de Whapmagoostui-Kuujuarapik et Umiujaq pour nous avoir accueilli si chaleureusement et pour avoir été ouverts au projet. Votre hospitalité et nos échanges m'ont permis de garder le cap sur la raison d'être derrière ce projet.

Je tiens à remercier mes deux assistantes de terrain, Camille et Béatrice N., sans qui je n'aurais pas eu les données de validation essentielles à mon projet, mais surtout sans qui, je n'aurais jamais eu autant de plaisir à me lever aux aurores pour installer le DGPS dans le noir pour être certaines de voler le drone à la parfaite (et parfois unique) marée basse sans vent. Vous avez rendu mes expériences sur le terrain inoubliables, merci !

Un merci tout spécial aussi à l'équipe de Grise Fiord 2021 qui m'ont initié au terrain en côtier et qui m'ont préparé à leader mon premier terrain. Je tiens à remercier Maya Bhatia pour son dynamisme et pour m'avoir montré comment monter les meilleurs cartables de terrain. Son leadership me suivra toujours dans mes pratiques de recherche. Merci Denys pour les entraînements de drone et pour m'avoir outillé à installer mes premières caméras Reconyx. Charles, merci pour tous nos échanges sur les défis de la recherche en milieux isolés et avec les communautés. Ils ont marqué, pour moi, cette première campagne de terrain.

Faten, ma partenaire de maîtrise, avec qui tout ça a commencé ! Je tiens à t'offrir mes remerciements les plus doux parce que sans toi, cette expérience au 2^e cycle aurait été beaucoup plus solitaire. Malgré la distance, nos échanges aux petites heures du soir m'ont gardé motivée jusqu'aux dernières heures de rédaction de ce mémoire.

Merci à l'équipe du LDGIZC pour l'aide tout au long de ce projet. Charles C. et Sébastien, merci pour l'aide dans la programmation et le traitement de données hydrodynamiques. Merci Mathieu pour les nombreuses heures de formation et de résolution de problèmes en géomatique.

J'aimerais remercier toute l'équipe de LNAR pour votre support et vos encouragements au cours des trois dernières années. L'énergie débordante du D-515 sera toujours pour moi un souvenir chaleureux de mon parcours à la maîtrise. Merci Benoît, Dahlia et Béatrice R. pour votre aide dans le traitement de mes données. Merci Antoine pour l'aide dans la recherche de données et d'articles pour soutenir mon projet. Grâce à toi, la team Nunavik va aller loin! *Thank you, Daniela, for the many enriching conversations about the future of science and the place of women in this field. Our many chats shaped the scientist I am becoming, and for that, I am forever grateful.*

Je tiens à remercier mes amis pour m'avoir soutenue tout au long de ce parcours rempli de hauts et de bas. Étienne et Jean-Gab, merci pour l'hébergement, les cafés et les bières qui continuent d'ancrer une partie de mon cœur à Rimouski. Du bac à la maîtrise, votre amitié

aura rendu toutes les étapes tellement plus agréables. Les copains du CEN, Tabatha, Rose-Marie, Lucas et Madeleine, merci pour votre support et votre compagnie lors de ces longues journées de traitement et de rédaction. Sans vous, tout ça aurait été beaucoup moins drôle !

Je tiens à offrir un merci tout spécial à ma famille et à mes proches. À mes parents pour m'avoir encouragé, depuis toujours, à foncer vers mes rêves et pour m'avoir convaincu que rien n'est impossible si on y met les efforts. À Béatrice et Mathilde, pour m'avoir écouté et motivé, mais surtout pour m'avoir changé les idées quand j'en avais besoin. À Philippe, pour avoir donné ton 90% quand je n'avais que 10% à offrir, pour avoir gardé le cap et avoir toujours su me ramener à l'essentiel. Si j'arrive au fil d'arrivée de ce marathon, c'est grâce à vous !

Pour terminer, merci à Pascal Bernatchez et Sonia Laforest d'avoir accepté d'être sur mon comité d'évaluation et pour votre rétroaction enrichissante. Merci au CEGRIM et au CRSNG pour la contribution financière m'ayant permis de réaliser ce projet. Merci au PFSN, à la SGRC, au CEN et à Québec-Océan pour le soutien financier m'ayant permis de réaliser deux campagnes de terrain et de participer à trois conférences scientifiques.

RÉSUMÉ

La région du Nunavik est encore sous l'effet du relèvement isostatique suite à la déglaciation laurentienne à des taux parmi les plus élevés au Canada, provoquant une baisse relative du niveau de la mer, et ce, même combiné aux scénarios d'émissions de GES les plus élevés. Ainsi, certains auteurs ont soulevé l'hypothèse que l'ensemble des côtes du Nunavik peut être considéré comme stable, voire même en progression. Pourtant, des études antérieures ont mis en évidence une importante variabilité dans l'évolution de la côte de cette région du Québec en montrant des taux d'érosion marqués dans certaines communautés inuites, bien que peu d'informations soient disponibles sur les facteurs à l'origine de ces différences. Cette étude décrit la variabilité spatio-temporelle de l'évolution côtière le long d'un gradient latitudinal de 340 km entre Whapmagoostui-Kuujuarapik et Umiujaq à l'est de la baie d'Hudson au Nunavik. Le contexte géologique et géomorphologique, la présence de pergélisol et les conditions hydrodynamiques sont analysés comme les facteurs explicatifs potentiels de cette variabilité régionale. Une quantification de l'évolution du littoral de 1954 à 2022 a été réalisée. Les caractéristiques géomorphologiques ont été décrites et cartographiées par photo-interprétation et validées sur le terrain. Des statistiques de vagues modélisées au large (WAVEWATCH III) ont permis d'analyser les conditions hydrodynamiques de 1982 à 2023.

Les résultats montrent une variabilité latitudinale de la géomorphologie côtière, où les côtes meubles dominent les secteurs sud et transitionnent vers une majorité de côtes rocheuses pour les secteurs nord. Ce gradient latitudinal s'observe aussi au niveau des conditions hydrodynamiques. Selon la modélisation WW3, les vagues sont graduellement plus énergétiques vers le nord, tandis que les niveaux d'eau sont supérieurs au sud. L'évolution côtière ne présente pas cette même variabilité latitudinale. Les secteurs plus dynamiques sont le détroit de Manitounuk au sud, secteur protégé par une barrière d'îles, et Umiujaq au nord. Ainsi, la variabilité spatiale et interannuelle des conditions hydrodynamiques le long de ce gradient latitudinal n'est pas toujours le moteur principal du changement côtier. D'autres variables, telles que la géomorphologie et les conditions de pergélisol, semblent jouer un rôle tout aussi important et, à certains endroits, dominant. Une meilleure compréhension de la dynamique côtière du Nunavik, tant au niveau communautaire qu'entre les communautés, est essentielle afin de fournir un cadre solide pour la mise en place de futures infrastructures maritimes qui assureront la sécurité alimentaire, la durabilité des activités traditionnelles et la protection des infrastructures communautaires face au changement climatique.

Mots clés : Évolution du littoral, hydrodynamisme côtier, géomorphologie littorale, pergélisol, conditions climatiques, variabilité spatio-temporelle.

ABSTRACT

The Nunavik region, located in northern Quebec, is still undergoing post-glacial uplift from the Laurentide glaciation at some of the highest rates in Canada, especially in eastern Hudson Bay. Even combined with the highest emission scenarios, this area of Nunavik expects a relative sea level drop until 2100. As a result, some authors hypothesized that all of Nunavik's coast can be considered stable, or even prograding. Recent studies, however, outline important variability in coastal evolution by showing significant rates of erosion in some of Nunavik's Inuit communities, although little information is available about the drivers behind those differences. This study describes the spatiotemporal variability in coastal evolution along a 340 km long latitudinal gradient between Whapmagoostui-Kuujuarapik and Umiujaq in eastern Hudson Bay. Additionally, potential drivers like geomorphological variability, and permafrost and hydrodynamic conditions are explored. A quantification of coastline evolution from 1954 to 2022 was accomplished by using historical aerial photos, recent high-resolution satellite and drone-derived imagery. Present geomorphological features were described and mapped using photo-interpretation and validated in the field. Modeled offshore wave statistics (WAVEWATCH III) were performed to gain a better understanding of the hydrodynamic conditions and the trends over the 1982 to 2023 period.

The results show a latitudinal variability in coastal geomorphology, with sedimentary coasts dominating the southern sectors and transitioning to a majority of rocky coasts for the northern sectors. This latitudinal gradient can also be observed in hydrodynamic conditions. According to the WW3 modelling, waves are gradually more energetic towards the north, while water levels are higher in the south of the region. Coastal evolution does not show the same latitudinal variability. The most dynamic areas are the Manitounuk Strait to the south, protected by a barrier of islands, and Umiujaq to the north. Therefore, the spatial and interannual variability of hydrodynamic conditions along this latitudinal gradient is not always the dominant driver of coastal change. Other variables, such as geomorphology and permafrost conditions, appear to play an equally important, and in some places, dominant role. A better understanding of Nunavik's coastal dynamics, both at community level and between communities, is essential in order to provide a sound framework for the implementation of future maritime infrastructures that will ensure food security, the sustainability of traditional activities and the protection of community infrastructures in the face of climate change.

Keywords: Coastal evolution, coastal hydrodynamics, coastal geomorphology, permafrost, climatic conditions, spatio-temporal variability.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT	xii
TABLE DES MATIÈRES	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PROBLÉMATIQUE	1
OBJECTIFS.....	7
CHAPITRE 1 Région d'étude.....	8
1.1 GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE	8
1.2 RELÈVEMENT ISOSTATIQUE ET CONTEXTE POST-GLACIAIRE	11
1.3 DYNAMIQUE LITTORALE.....	13
1.4 CLIMAT	13
1.5 DIVISIONS DE LA RÉGION D'ÉTUDE	15
CHAPITRE 2 Méthodologie.....	19
2.1 PRÉ-TRAITEMENTS	20
2.1.1 Données utilisées	20
2.1.2 Orthorectification et géoréférencement	23
2.1.3 Délimitations de la zone côtière.....	24
2.1.4 Numérisation du trait de côte.....	26

2.2	CARACTÉRISATION GÉOMORPHOLOGIQUE.....	29
2.2.1	Variables.....	29
2.2.2	Validation	32
2.3	CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES MODÉLISÉES.....	35
2.3.1	Glace de mer.....	36
2.3.2	Climat de vagues	38
2.3.3	Niveau d'eau.....	39
2.3.4	Régime de tempête	40
2.4	ÉVOLUTION DIACHRONIQUE DU TRAIT DE CÔTE	41
2.4.1	Outil d'analyse.....	41
2.4.2	Méthode des extrémités.....	42
2.4.3	Régression linéaire pondérée.....	43
2.4.4	Variabilité à court terme.....	44
CHAPITRE 3 Résultats		45
3.1	VARIABILITÉ GÉOMORPHOLOGIQUE	45
3.1.1	Type de côte	46
3.1.2	Type de zone intertidale	49
3.1.3	Type de zone supratidale (haut de plage)	52
3.1.4	Type d'arrière-plage	56
3.2	VARIABILITÉ DE LA GLACE DE MER ET DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES	60
3.2.1	Glace de mer.....	60
3.2.2	Climat de vagues	62
3.2.3	Niveau d'eau.....	70
3.2.4	Tempêtes.....	76
3.3	ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE	80
3.3.1	Secteur Whapmagoostui-Kuujuarapik	80
3.3.2	Secteur Détroit de Manitounuk	87
3.3.3	Secteur Lac Tasiujaq	90
3.3.4	Secteur Umiujaq	95
CHAPITRE 4 Discussion		100
4.1	TENDANCE GÉNÉRALE DE L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE	100
4.2	VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES	102

4.2.1 Climat de vagues	102
4.2.2 Régime de tempêtes	105
4.2.3 Variations du niveau d'eau en conditions énergétiques.....	109
4.3 INFLUENCE POTENTIELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET HYDRODYNAMIQUES SUR L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE	111
4.4 VARIABLES DOMINANTES POUR L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE DE CHAQUE SECTEUR À L'ÉTUDE	114
4.5 LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS	118
4.5.1 Manque de données historiques	118
4.5.2 Manque de données en zone côtière	119
CONCLUSION GÉNÉRALE	121
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	124
ANNEXE-A	139
ANNEXE-B	142
ANNEXE-C	152
ANNEXE-D	168
ANNEXE-E.....	175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Moyennes mensuelles et écarts-types de la température de l'air journalière (de 8h à 18h) pour les communautés de W-K et d'Umiujaq (source des données : ECCC (2023))	14
Tableau 2. Longueur de chaque secteur (km) et leur pourcentage de la région d'étude	16
Tableau 3. Images satellitaires couvrant la région d'étude selon chaque secteur	20
Tableau 4. Caractéristiques des images utilisées pour l'analyse de l'évolution côtière selon chaque secteur, où E_r est la résolution spatiale de la donnée, EQM est l'erreur quadratique moyenne de l'orthorectification et du géoréférencement et ET est l'erreur totale de numérisation	22
Tableau 5. Méthodologie du tracé de la côte pour différents environnements côtiers	27
Tableau 6. Longueur et proportion de chaque type de côte pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)	49
Tableau 7. Longueur et proportion de chaque type de zone intertidale pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)	52
Tableau 8. Longueur et proportion de chaque type de zone supratidale pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)	55
Tableau 9. Longueur et proportion de chaque type d'arrière-plage pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)	59
Tableau 10. Hauteurs maximales de vagues du secteur Umiujaq et des secteurs sud (moyenne W-K et DM)	67
Tableau 11. Résumé des taux d'évolution diachroniques des sous-secteurs du secteur W-K	83
Tableau 12. Résumé des taux d'évolution diachroniques des sous-secteurs du secteur DM	87

Tableau 13. Résumé des taux d'évolution diachroniques pour les sous-secteurs du secteur LT	91
Tableau 14. Résumé des taux d'évolution diachroniques pour le secteur Umiujaq	96
Tableau 15. Périodes de faible englacement, de vagues hautement énergétiques, de tempêtes nombreuses, ainsi que périodes clés d'érosion et d'accrétion (suite à la prochaine page)	113

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Région à l'étude et secteurs d'analyse entre W-K et Umiujaq. Les encarts représentent chaque secteur d'analyse, en ordre alphabétique du sud vers le nord, à l'aide de photographies obliques acquises en 2021 (b, c, d) et 2022 (a, e) par hélicoptère (c, d) et par drone (a, b, e) dans le cadre de deux campagnes de terrain.....9
- Figure 2. Distribution du pergélisol au Nunavik où l'encadré rouge cible la région d'étude (Boisson, 2019; adapté de L'Hérault *et al.*, 2018)..... 10
- Figure 3. Glissement de terrain au sud du détroit de Manitousuk visible entre la photographie aérienne de 1990 et l'image satellitaire WorldView-4 de 2017..... 11
- Figure 4. Projections du niveau marin relatif d'ici 2100 par rapport aux niveaux moyens de 1986 à 2005 au Canada selon le scénario rehaussé (James *et al.*, 2021)..... 12
- Figure 5. Organigramme méthodologique. Les parallélogrammes représentent les données sources utilisées, les rectangles sont les étapes méthodologiques, les polygones pointillés sont les logiciels utilisés et les rectangles aux coins arrondis sont les données résultantes.**Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 6. Délimitations de la zone côtière utilisées pour le projet (A) pour une côte meuble sans falaise, (B) pour une côte meuble à falaise basse et (C) pour une côte à marais maritime.....25
- Figure 7. Numérisation de la côte selon différents types de côte et différents indicateurs. (A) La limite de la végétation dense comme indicateur pour une terrasse de plage, (B) la rupture de pente comme indicateur pour une falaise meuble, (C) la ligne d'eau comme indicateur pour une plateforme rocheuse, (D) le changement de couleur comme indicateur pour une plateforme rocheuse, (E) le front du marais comme indicateur pour un marais maritime et (F) la limite entre le schorre supérieur et inférieur comme indicateur pour un marais maritime.....28
- Figure 8. Photographies obliques acquises par hélicoptère en A) 2015 à marée haute, et en B) 2021 à marée basse32

Figure 9. Localisation des données récoltées sur le terrain lors des campagnes de 2021 et 2022	34
Figure 10. Position, profondeur et distance à la côte des points de grille du modèle WW3 sélectionnés. La position des points de grille est indiquée, tout comme le gradient de couleur représentant la latitude.	36
Figure 11. Localisation des points de grille de données d'observations de glace sélectionnés (A) et le nombre de jours d'observation enregistré par le CMEMS OSI TAC pour la période de 1982 à 2020 (B)	37
Figure 12. Exemple du fonctionnement de l'outil DSAS	42
Figure 13. Exemple schématique du calcul de taux d'évolution pour un transect donné à partir de la méthode de régression linéaire pondérée, où la valeur de la pente de la droite de régression correspond au taux d'évolution (WLR) (adaptée de Himmelstoss <i>et al.</i> , 2021).....	43
Figure 14. Histogramme de fréquence de la longueur des segments créés lors de la caractérisation linéaire	46
Figure 15. Proportions des types de côte pour l'entièreté de la région d'étude (haut-gauche : graphique beige) et pour chaque secteur d'étude (bas-droite) ordonné du sud vers le nord (du bas vers le haut) en débutant par Whapmagoostui-Kuujjuarapik (WK), le détroit de Manitounuk (DM), la côte hudsonnienne du détroit de Manitounuk (CHM), la Petite-Rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur bordant le lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM).....	48
Figure 16. Proportions des types de zone intertidale pour l'entièreté de la région d'étude (haut-gauche : graphique beige) et pour chaque secteur d'étude (bas-droite) ordonné du sud vers le nord (du bas vers le haut) en débutant par Whapmagoostui-Kuujjuarapik (WK), le détroit de Manitounuk (DM), la côte hudsonnienne du détroit de Manitounuk (CHM), la Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur bordant le lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM).....	51
Figure 17. Proportions des types de zone supratidale pour l'entièreté de la région d'étude (haut-gauche : graphique beige) et pour chaque secteur d'étude (bas-droite) ordonné du sud vers le nord (du bas vers le haut) en débutant par Whapmagoostui-Kuujjuarapik (WK), le détroit de Manitounuk (DM), la côte hudsonnienne du détroit de Manitounuk (CHM), la Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur bordant le lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM).....	54
Figure 18. Proportions des types d'arrière-plage pour l'entièreté de la région d'étude (haut-gauche : graphique beige) et pour chaque secteur d'étude (bas-droite) ordonné du sud vers le nord (du bas vers le haut) en débutant par Whapmagoostui-Kuujjuarapik (WK), le détroit de Manitounuk (DM), la	

côte hudsonnienne du détroit de Manitounuk (CHM), la Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur bordant le lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM) **Erreur ! Signet non défini.**

- Figure 19. Variations spatio-temporelles de la concentration de glace de mer. A) Évolution du nombre de jours de glace par année pour la période de 1991 à 2020 ; B) Distribution du nombre de jours de glace annuel pour les secteurs de W-K et d'Umiujaq ; C) Dates de prise et de fonte de glace annuelles pour les secteurs de W-K et d'Umiujaq.....61
- Figure 20. Distribution des valeurs horaires de hauteur significative (H_s), de direction et de période (T_{02}) de vagues lorsque la concentration de glace est inférieure à 20 % pour chaque point de grille du modèle WW3 sélectionné. Les points de couleurs représentent les valeurs moyennes en bleu pour le secteur W-K, en vert pour le secteur DM, en jaune pour le secteur PRB, en orange pour le secteur LT et en rouge pour le secteur UM.....63
- Figure 21. Variations mensuelles des valeurs moyennes (cercles), minimales et maximales (barres) de la A) hauteur significative, de la B) direction et de la C) période des vagues de la région d'étude, où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM).....66
- Figure 22. Variations annuelles des valeurs moyennes de la A) hauteur significative, de la B) direction et de la C) période des vagues en conditions libres de glace (< 20%) pour la région d'étude, où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM).....69
- Figure 23. Distribution des A) niveaux d'eau totaux maximums quotidiens (NET), B) les valeurs correspondantes de niveaux d'eau au repos (SWL) et C) de jet de rive ($R_{2\%}$), où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM).....70
- Figure 24. Variations mensuelles des valeurs moyennes (cercles), minimales et maximales (barres) des A) niveaux d'eau totaux maximums mensuels (NET), B) les valeurs correspondantes de niveaux d'eau au repos (SWL) et C) de jet de rive ($R_{2\%}$), où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM).....73
- Figure 25. Variations annuelles des valeurs maximales moyennes des A) niveaux d'eau totaux (NET) et des valeurs correspondantes B) de niveaux d'eau au repos (SWL) et C) de jet de rive ($R_{2\%}$), où le gradient de couleur du bleu

vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM).....	75
Figure 26. Nombre de tempêtes par année selon le gradient latitudinal variant du bleu vers le rouge, du sud vers le nord, avec en bleu le secteur W-K, en vert le secteur DM, en jaune le secteur PRB, en orange le secteur LT et en rouge le secteur UM.....	77
Figure 27. Distribution des valeurs de A) hauteur significative moyenne et B) maximales des vagues de tempêtes, C) de leur période et D) de leur direction pour chaque point de grille WW3 sélectionné évoluant du sud vers le nord, de la gauche vers la droite. Les points de couleurs représentent les valeurs moyennes (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)	78
Figure 28. Pourcentage du nombre tempêtes par mois pour chaque point de grille WW3 sélectionné variant du bleu vers le rouge, du sud vers le nord, avec en bleu le secteur W-K, en vert le secteur DM, en jaune le secteur PRB, en orange le secteur LT et en rouge le secteur UM	80
Figure 29. Carte de localisation des sous-secteurs et des types de côte du secteur W-K	84
Figure 30. Distribution des taux d'évolution diachronique pour les 6 sous-secteurs du secteur W-K. Les sous-secteurs se classent du sud vers le nord, de A à F, avec le sous-secteur A localisé sur la berge sud de l'embouchure de la Grande-Rivière-à-la-Baleine.....	85
Figure 31. Distribution des taux d'évolution côtière pondérés en fonction du type de côte pour le secteur W-K pour la période de 1931 à 2017	86
Figure 32. Carte des types de côte du secteur du détroit de Manitounuk accompagnée des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m. Les traits rouges pointillés représentent la valeur moyenne des taux d'évolution de chaque sous-secteur.....	88
Figure 33. Distribution des taux d'évolution diachroniques en fonction du type de côte pour le secteur Déroit de Manitounuk pour la période de 1990 à 2017	90
Figure 34. Carte des types de côte du secteur Lac Tasiujaq accompagnée des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m pour quatre secteurs : A) de 1956 à 2019, B) de 1957 à 2019, C) de 1990 à 2019 et D) de 2010 à 2019. Les traits rouges pointillés représentent la valeur moyenne des taux d'évolution de chaque sous-secteur.....	92
Figure 35. Distribution des taux d'évolution diachroniques en fonction du type de côte pour le secteur Lac Tasiujaq, en A) pour la période de 1956 à 2019, en B)	

	pour la période de 1957 à 2019, en C) pour la période de 1990 à 2019 et en D) pour la période de 2010 à 2019.....	94
Figure 36.	Carte des types de côte du secteur Umiujaq (A), une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et les taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1957 à 2019, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)	97
Figure 37.	Distribution des taux d'évolution côtière pondérés en fonction du type de côte pour le secteur Umiujaq pour la période de 1957 à 2019	99
Figure 38.	Carte de localisation des zones d'analyse des taux d'évolution pour chaque secteur de la région d'étude et représentation spatiale de ces taux pour les secteurs Umiujaq (rouge) et Lac Tasiujaq (orange) en A1 et détroit de Manitounuk (vert) et W-K (bleu) en A2. Le tableau de droite présente un résumé des taux moyens pour chaque secteur selon leur période d'étude.	101
Figure 39.	Température de l'air journalière (sans la nuit) annuelle moyenne pour les communautés de A) Whapmagoostui-Kuujuarapik et B) Umiujaq (source des données : ECCC, 2023).....	107

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ARK	Administration Régionale Kativik
BWA	<i>Baffin Island West Atlantic</i>
CDEM	Modèle numérique d'élévation du Canada
CEGRIM	Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes
CEN	Centre d'études nordiques
CHM	Côte hudsonienne du détroit de Manitounuk
<i>dir</i>	Direction
DM	Détroit de Manitounuk
DSAS	<i>Digital Shoreline Analysis System</i>
E_n	Erreur humaine de numérisation
EPR	Méthode des extrémités (<i>End point rate</i>)
EPR_{unc}	Incertitude de la méthode des extrémités (EPR)
EQM	Erreur quadratique moyenne
E_r	Résolution spatiale
eSPACE	<i>Emergency Spatial Pre-SCAT for Arctic Coastal Ecosystems</i>
ET	Erreur totale de numérisation
GPS RTK	<i>Global Positioning System Real-Time Kinematic</i>

H_s	Hauteur significative
L_0	Longueur d'onde
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
LNAR	Laboratoire d'études des littoraux nordiques et arctiques
LT	Lac Tasiujaq
MOR	Modèle Océanographique Régional
MRCC	Modèle Régional Canadien du Climat
MRNF	Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts du Québec
NET	Niveau d'eau total
ONA	Oscillation Nord Atlantique
PACC	Plan d'action sur les changements climatiques
PRB	Petite-Rivière-à-la-Baleine
r	Coefficient de corrélation
R^2	Coefficient de détermination
$R_{2\%}$	Jet de rive
SWL	Niveau d'eau au repos (<i>Still Water Level</i>)
T_{02}	Période
UM	Umiujaq
UQAM	Université du Québec à Montréal
UQAR	Université du Québec à Rimouski

UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
W-K	Whapmagoostui-Kuujuarapik
WLR	Régression linéaire pondérée (<i>Weighted linear regression</i>)
<i>wlv</i>	Niveau d'eau
WW3	WAVEWATCH III

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PROBLÉMATIQUE

Les régions nordiques subissent des changements de température de l'air rapides, à des taux significativement plus élevés qu'à l'échelle globale (AMAP, 2019), soit près de 4 fois plus rapidement pour les régions arctiques (Rantanen *et al.*, 2022). Les précipitations annuelles augmentent de 1,5 à 2% par décennie en Arctique (AMAP, 2019). Ces conséquences des changements climatiques, ainsi que l'augmentation des événements météorologiques extrêmes (Logan *et al.*, 2011), modifient la dynamique des côtes nordiques. Le dérèglement climatique influence cette dynamique côtière, entre autres, à travers la diminution de la glace de mer rehaussant les conditions tempétueuses (vagues et niveaux d'eau côtiers) et le dégel du pergélisol favorisant l'érosion des côtes sédimentaires. Ces deux processus affectent l'érosion du littoral et induisent des flux sédimentaires importants.

Le rôle de la glace côtière et de la glace de mer dans l'atténuation de l'énergie des vagues, protégeant la côte lors des périodes englacées qui fixent le paysage saisonnièrement, est bien reconnu (Manson *et al.*, 2005; Mudryk *et al.*, 2021; Neumeier *et al.*, 2023; Wadhams *et al.*, 1988). L'énergie des vagues créées par le vent est déterminée par la vitesse du vent, la bathymétrie du littoral, la présence de glace de mer et sa fracturation, et enfin le fetch, soit la surface d'eau disponible pour la formation de vagues (Hachem & Bleau, 2020; Neumeier *et al.*, 2023). Or, la hausse des températures de l'air et de l'eau diminue la durée de la période englacée, la surface couverte par la glace de mer et son épaisseur (Andrews *et al.*, 2018; Barrette *et al.*, 2020; Mudryk *et al.*, 2021; Neumeier *et al.*, 2023; Senneville & St-Onge Drouin, 2013). En réduisant la surface couverte par la glace de mer, les changements climatiques augmentent à la fois le fetch et la période d'eau libre pendant laquelle les forts vents peuvent influencer la hauteur significative maximale des vagues (Barnhart *et al.*, 2014)

et leur énergie à la côte (Bosboom & Stive, 2022). La synchronicité entre la période d'eau libre ou de glace non consolidée et celle des tempêtes (saison automnale) détermine également l'énergie des vagues transmise à la côte (Irrgang *et al.*, 2022). Avec les changements climatiques, cette coïncidence augmente, en plus de l'intensité des tempêtes, maximisant l'énergie des vagues à la côte ayant la capacité de mobiliser des volumes de sédiments importants (Barnhart *et al.*, 2014; Barrette *et al.*, 2020; Hachem & Bleau, 2020; Neumeier *et al.*, 2023; Savard *et al.*, 2014). Les communautés côtières nordiques se retrouvent alors plus exposées à des événements météo-marins à fort potentiel érosif (Neumeier *et al.*, 2023; Savard *et al.*, 2014).

Le second processus d'érosion des côtes sédimentaires nordiques est lié au pergélisol, autant sur les parcelles isolées que continues. Bien que les côtes rocheuses en milieu nordique soient affectées par les processus de gélifraction et d'hydroclastie, les côtes sédimentaires ont un potentiel érosif supérieur, voire jusqu'à trois à quatre fois plus élevé pour les côtes à pergélisol et d'autant plus si ce dernier est riche en glace (Aré, 1988; L'Hérault *et al.*, 2017; Manson *et al.*, 2019). Les côtes de l'archipel arctique canadien semblent faire exception à ce constat. Ces côtes seraient en progression, et ce, malgré leur concentration moyenne en glace et l'observation de changements morphologiques notables (Didier *et al.*, 2023), car elles bénéficieraient du relèvement isostatique (Irrgang *et al.*, 2022; Lantuit *et al.*, 2012). Toutefois, un manque de données sur les régions arctiques et subarctiques canadiennes limite l'extrapolation de ces conclusions.

Les changements climatiques, par leurs impacts sur les conditions hydrodynamiques et sur le pergélisol côtier, influencent l'évolution des littoraux nordiques et exposent les communautés aux risques d'érosion et de submersion côtière. Selon la morphologie et le contexte local, l'impact ne sera pas le même pour l'ensemble des littoraux (Irrgang *et al.*, 2022; Lantuit *et al.*, 2012; Manson *et al.*, 2019). Néanmoins, que l'évolution du littoral soit positive (accumulation) ou négative (érosion), elle aura des conséquences inévitables sur les communautés et les écosystèmes côtiers (Debortoli *et al.*, 2019; Irrgang *et al.*, 2022; James *et al.*, 2021; Pearce *et al.*, 2011). L'aggradation des côtes influencera la navigation en

modifiant la profondeur d'eau en zone côtière et en modifiant la capacité d'amarrage au niveau des infrastructures portuaires déjà en place (Debortoli *et al.*, 2019; Irrgang *et al.*, 2022; James *et al.*, 2021). L'érosion des côtes sédimentaires induira un apport de sédiments en suspension important augmentant la turbidité de l'eau et limitant la capacité de la lumière à pénétrer dans la colonne d'eau (Irrgang *et al.*, 2022; Pearce *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2022). Combiné à la libération de gaz induite par le dégel du pergélisol, ces changements dans la turbidité et la composition chimique des environnements côtiers vont provoquer le déplacement de certaines espèces marines risquant d'affecter des activités traditionnelles comme la chasse et la pêche (Irrgang *et al.*, 2022; Pearce *et al.*, 2011). Les déplacements et l'accessibilité aux lieux de chasse seront aussi impactés par la diminution de la durée de la période englacée, ainsi que par les conditions hydrodynamiques énergétiques caractérisant la période d'englacement et affectant la qualité, l'épaisseur et la texture de la banquise (Barrette *et al.*, 2020; Hachem & Bleau, 2020; Pearce *et al.*, 2011; Savard, 2016).

Les communautés du nord canadien sont, de manière générale, inaccessibles par des chemins routiers et dépendent des ressources marines et de l'accès côtier pour leur sécurité alimentaire et la pratique de leurs activités traditionnelles (Debortoli *et al.*, 2019; Lantuit *et al.*, 2012; Pearce *et al.*, 2011). Leur vulnérabilité face aux changements climatiques varie grandement spatialement. Il y a une concentration d'études sur l'évolution des littoraux arctiques, particulièrement du côté de la mer de Beaufort, de l'Alaska et de la Russie (Irrgang *et al.*, 2022; Lantuit *et al.*, 2012), tandis que les littoraux subarctiques, dont ceux du Nunavik, ont été négligés, souvent sous le prétexte qu'ils sont stables ou en progradation grâce aux taux élevés de relèvement isostatique surpassant la hausse du niveau marin mondial. Toutefois, certaines études ont montré que ce n'est pas toujours le cas (Beaulieu, 1997; Beaulieu & Allard, 2003; Boisson *et al.*, 2020b). Les stades avancés de dégradation du pergélisol rendent aussi ces latitudes uniques et difficiles à prédire. Ces dernières offrent une fenêtre sur les processus qui influenceront potentiellement les côtes de pergélisol continu de l'Arctique qui deviendront rapidement caractérisées de pergélisol discontinu à des parcelles isolées au cours des prochaines décennies.

Malgré l'accélération observée et anticipée des changements environnementaux dans ces régions subarctiques isolées, un manque de connaissances sur l'environnement côtier persiste. Ce manque de connaissances est particulièrement flagrant à propos des conditions hydrodynamiques, bathymétriques et éco-géomorphologiques qui caractérisent ces côtes. Depuis 2010, deux programmes scientifiques s'intéressant à l'ensemble des littoraux canadiens ont lieu. Le projet eSPACE (*Emergency Spatial Pre-SCAT for Arctic Coastal Ecosystems*) d'Environnement Canada a pour but d'améliorer la gestion d'état d'urgence face aux risques de déversements d'hydrocarbures et leurs impacts sur les écosystèmes côtiers (Environnement Canada, 2012; Owens, 2010; Wynja *et al.*, 2015). Dans le cadre de ce programme, la première typologie et cartographie des types de côtes du Nord canadien a été développée. Le projet CanCoast de la Commission Géologique du Canada, quant à lui, regroupe une collection de bases de données décrivant les caractéristiques physiques des côtes maritimes canadiennes (Manson *et al.*, 2019). L'objectif de ce projet était de développer des indices de sensibilité côtière aux changements climatiques. Toutefois, puisque ces deux programmes sont réalisés sur un très grand territoire, l'échelle d'analyse est trop petite pour résoudre les particularités locales de chaque région maritime canadienne (Manson *et al.*, 2019; Wynja *et al.*, 2015).

Au Québec, il y a un nombre limité d'études qui se sont intéressées aux côtes subarctiques du Nunavik. Pour le secteur entre Whapmagoostui-Kuujuarapik (W-K) et Umiujaq, on note, entre autres, la description générale de la baie d'Hudson par Kranck (1951) et la description des cuestas du sud-est de la Baie d'Hudson par Guimont et Laverdière (1980). Certaines études se sont intéressées davantage à des formes géomorphologiques de la région : les dunes côtières par Marin et Filion (1992) et Ruz et Allard (1994, 1995), les marais longeant le détroit de Manitounuk par Ruz *et al.* (1994, 1998), les deltas de la côte sud-est de la baie d'Hudson par Roberge (1998), Hill *et al.* (2003) et Lavoie *et al.* (2002). Les processus d'érosion et de sédimentation côtière ont aussi été étudiés dans le secteur du détroit de Manitounuk, au nord-est de W-K, par Allard *et al.* (1998), Beaulieu (1997), Beaulieu et Allard (2003) et Ruz et Beaulieu (1998).

Au cours des dernières années, un projet du Centre d'études nordiques s'est intéressé à analyser et cartographier les aléas naturels et les vulnérabilités à l'échelle du Nunavik afin d'orienter les processus décisionnels de développement sur ce territoire (L'Hérault *et al.*, 2017). La caractérisation de la géomorphologie côtière de ce projet a été réalisée à partir de données vidéo et de photographies aériennes acquises par hélicoptère (Wynja *et al.*, 2015). Plus récemment, dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC), le ministère des Transports et de la Mobilité Durable du Québec, en partenariat avec Ouranos et l'Institut des Sciences de la Mer à l'UQAR se sont intéressés aux impacts des changements climatiques sur l'environnement côtier et maritime du Nunavik. À travers différents projets, à l'aide principalement de modélisation, ils se sont intéressés aux variations climatiques de ce territoire et à l'évolution de la glace de mer, du climat de vagues et du régime de tempêtes (Bernier *et al.*, 2015; Clerc *et al.*, 2012; Hachem et Bleau, 2020; Massé et Gallant, 2016; Massé et Villeneuve, 2013; Neumeier *et al.*, 2023; Savard, 2016; Savard *et al.*, 2014; Senneville, 2018; Senneville et St-Onge Drouin, 2013). Un portrait climatique des régions du Nunavik et du Nunatsiavut a aussi été réalisé par une équipe d'ArcticNet (Barrette *et al.*, 2020). Dans ces mêmes années, une autre étude portant sur l'ensemble des côtes du Nunavik a présenté une caractérisation et des modèles d'évolution des environnements côtiers (Boisson, 2019). De nouveaux schémas conceptuels de l'évolution des modelés de paysages côtiers ont été apportés, permettant de mieux expliquer les contrastes qui existent entre les littoraux des baies d'Hudson et d'Ungava, par exemple (Boisson et Allard, 2020a, b), ou encore de soulever certains questionnements sur la formation de nouveau pergélisol côtier en zone à fort taux d'émersion des terres (Boisson *et al.*, 2020a).

Enfin, des travaux sur l'évaluation de l'évolution historique du littoral d'un point de vue géomorphologique ont récemment été réalisés dans certaines communautés (Boisson *et al.*, 2020a; Didier et Boisson, 2021). Ces travaux se concentrent majoritairement à l'échelle des communautés et sont limités pour les secteurs côtiers qui les relient. Actuellement, aucune étude ne s'intéresse à la dualité qui unie les écosystèmes côtiers à la morphodynamique du littoral au Nunavik, d'autant plus à l'aide de données d'observation et de validation *in situ* dans la zone côtière entre les communautés.

Au Nunavik, ce sont quinze communautés autochtones qui voient leur vulnérabilité augmenter face aux changements climatiques en raison de leur localisation côtière (Hachem & Bleau, 2020). La zone côtière est fortement utilisée pour la chasse et la pêche par les communautés inuites du Nunavik. Lorsque des événements comme des glissements de terrain ou de l'érosion au niveau du littoral ont lieu, des préoccupations sont soulevées auprès des communautés concernant l'impact de ces événements et leur occurrence future. Il importe ainsi de s'intéresser au linéaire côtier reliant les communautés inuites du Nunavik. Afin d'améliorer les capacités de gestion du littoral de cette région isolée du Québec, le gouvernement québécois a mis sur pied un vaste programme de collaboration avec les communautés côtières et les ministères en charge de la protection environnementale. Le but du programme est de favoriser leur adaptation aux changements climatiques en fournissant des données environnementales et des connaissances fondamentales pour une gestion durable du territoire côtier et des activités traditionnelles. Un des objectifs de ce programme est de développer un indice de vulnérabilité morphosédimentaire (IVM) aux hydrocarbures adapté et applicable aux côtes du Nunavik. Les indices de vulnérabilité sont des outils régulièrement utilisés dans la gestion des risques de déversements d'hydrocarbures (Béland *et al.*, 2023; Cai *et al.*, 2015; Castanedo *et al.*, 2009; Depellegrin & Pereira, 2016; Fattal *et al.*, 2010; Grottoli & Ciavola, 2019; Gundlach & Hayes, 1978; Manson *et al.*, 2019; Sorgente *et al.*, 2020). Afin de développer un IVM adapté au contexte littoral du Nunavik et utile à la gestion du territoire, il est essentiel d'approfondir les connaissances de base sur la dynamique côtière. Une analyse de l'évolution récente, ainsi qu'une cartographie et une caractérisation détaillées de la côte constituent une première étape fondamentale à l'atteinte de ces objectifs. La présente étude s'insère dans ce vaste projet gouvernemental à travers la compréhension de la dynamique de l'évolution du littoral des 340 km de linéaire côtier rejoignant les communautés de Whapmagoostui-Kuujuarapik et d'Umiujaq au Nunavik, à l'est de la baie d'Hudson.

OBJECTIFS

L'objectif principal de cette étude est de décrire et d'expliquer la variabilité de l'évolution côtière sur un gradient latitudinal de Whapmagoostui-Kuujuarapik à Umiujaq au Nunavik. Pour l'atteindre, des analyses d'imagerie satellitaire à haute résolution validées par des données *in situ* ont été réalisées afin de (i) comprendre le rôle de la typologie côtière sur l'évolution des littoraux. La description de la variabilité des conditions hydrodynamiques à l'aide d'un modèle océanographique a été réalisée afin (ii) de déterminer les processus hydrodynamiques affectant les types de côte et influençant l'évolution du littoral. À travers ces objectifs spécifiques, cette étude dresse un portrait géomorphologique et hydrodynamique de la région d'étude et décrira leur variabilité selon les secteurs. Les secteurs côtiers plus sensibles à l'érosion et aux conditions hydrodynamiques et climatiques changeantes pourront être identifiés et suivis davantage. Cette étude permettra une meilleure compréhension de la dynamique côtière de l'est de la baie d'Hudson, tant au niveau communautaire qu'entre les communautés, et favorisera la mise en place d'infrastructures maritimes et de plans de gestion du littoral adaptés au contexte local.

Le mémoire contient quatre chapitres. Le premier présente les contextes géologique, géomorphologique, hydrodynamique et climatique de la région d'étude. Le second détaille la méthodologie employée pour la collecte, le traitement et l'analyse des données, dont les résultats sont présentés au chapitre 3. Les relations entre les variables hydrodynamiques et la typologie côtière sont discutées au chapitre 4 afin de déterminer les variables ayant un rôle dominant sur la variabilité latitudinale de l'évolution côtière de la région d'étude.

CHAPITRE 1

RÉGION D'ÉTUDE

Ce chapitre présente les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et hydrodynamiques de la région d'étude s'étendant de Whapmagoostui-Kuujuarapik à Umiujaq au Nunavik (Québec, Canada). Cette région couvre 340 km de linéaire côtier à l'est de la baie d'Hudson (fig. 1). Le climat de la région, les délimitations réalisées ainsi que les types de côtes dominants caractérisant chacun des secteurs analysés sont ensuite présentés.

1.1 GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE

La géologie de la région fait partie de la province du Supérieur et est caractérisée par des roches de l'Archéen, soit plus précisément du gneiss granitique, de la granodiorite et de la tonalite (Boisson, 2019; Wheeler *et al.*, 1997; Fulton, 1989). Les îlots rocheux sont caractérisés par de la dolomie protérozoïque. Lors du Quaternaire, la région de W-K à Umiujaq était localisée sous un dôme glaciaire de l'inlandsis Laurentidien. Lors de la déglaciation, cette région a été envahie par la mer de Tyrell jusqu'à une altitude maximale de 270 m (Lavoie *et al.*, 2012). Cette invasion marine a laissé derrière elle des dépôts de sédiments fins au niveau de la zone côtière qui ont gelé sur place une fois la mer retirée (Fulton, 1989). Ces dépôts de sédiments marins fins sont propices à la formation de pergélisol riche en glace et sensible aux mouvements de masse et aux processus thermokarstiques (Allard *et al.*, 1996; Beaulieu & Allard, 2003; L'Hérault *et al.*, 2017; Manson *et al.*, 2019). Aujourd'hui, la région côtière de W-K à Umiujaq se trouve en zone de pergélisol résiduel ou sporadique au sud à discontinu au nord (fig. 2; Boisson, 2019; L'Hérault *et al.*, 2017; L'Hérault & Allard, 2018). Les types de côte à sédiments fins de pergélisol en dégradation se concentrent principalement à la hauteur du détroit de Manitounuk.

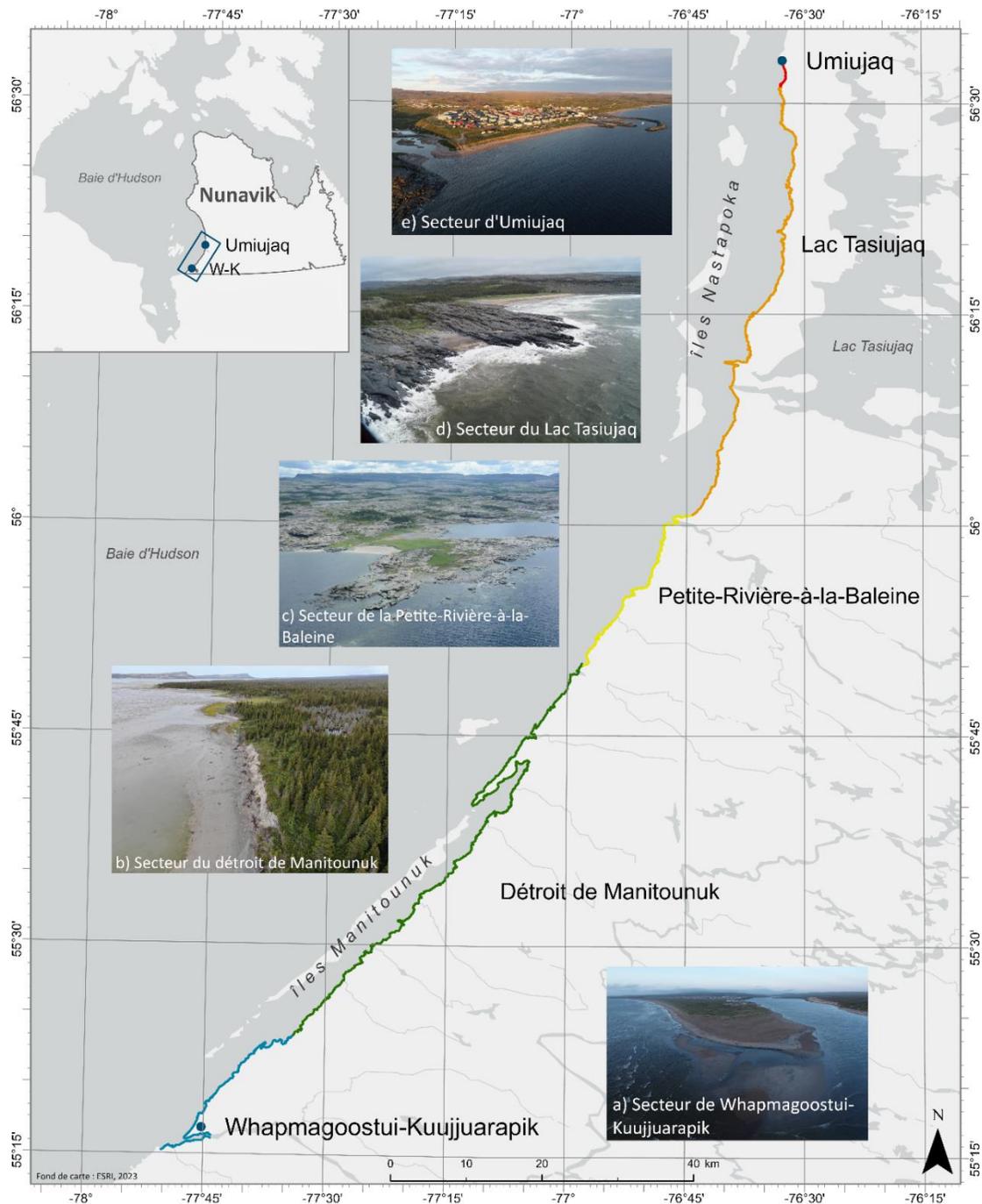


Figure 1. Région à l'étude et secteurs d'analyse entre W-K et Umiujaq. Les encarts représentent chaque secteur d'analyse, en ordre alphabétique du sud vers le nord, à l'aide de photographies obliques acquises en 2021 (b, c, d) et 2022 (a, e) par hélicoptère (c, d) et par drone (a, b, e) dans le cadre de deux campagnes de terrain.

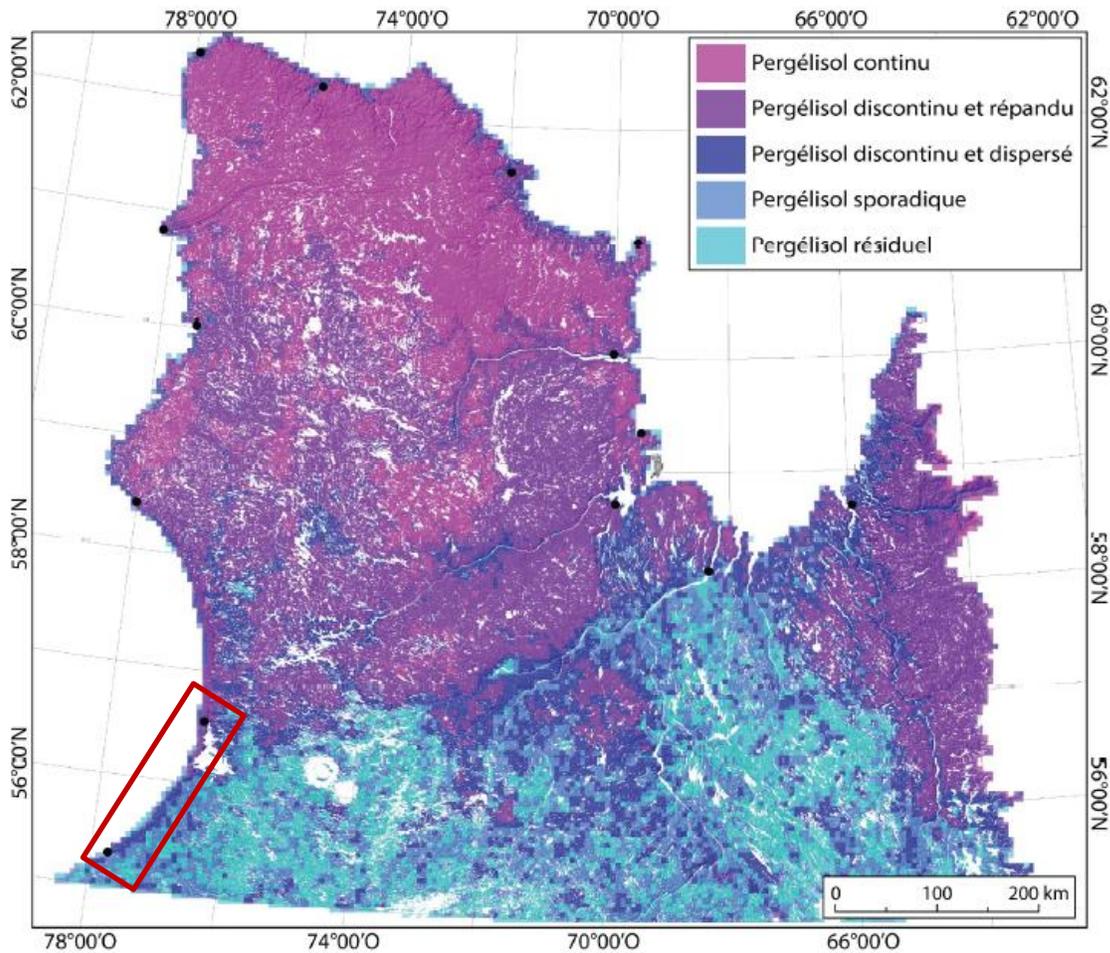


Figure 2. Distribution du pergélisol au Nunavik où l’encadré rouge cible la région d’étude (Boisson, 2019; adapté de L’Hérault *et al.*, 2018)

Le dégel du pergélisol et la fonte des lentilles de glace dans des sédiments post-glaciaires fins et en zone côtière peut provoquer d’importants mouvements de terrain (Fulton, 1989; L’Hérault *et al.*, 2017), comme celui observé au début des années 2000 au nord de W-K (fig. 3), et l’érosion de falaises basses (fig. 1b ; Beaulieu & Allard, 2003).

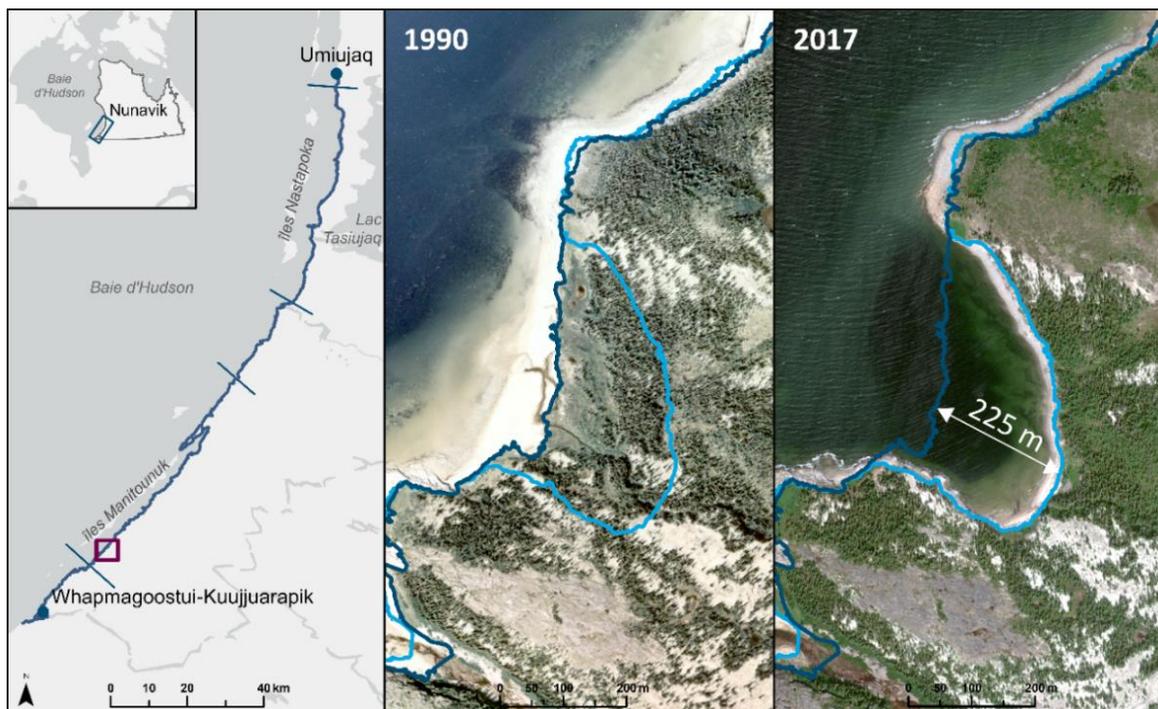


Figure 3. Mouvement de terrain au sud du détroit de Manitounuk visible entre la photographie aérienne de 1990 et l'image satellitaire WorldView-4 de 2017

1.2 RELÈVEMENT ISOSTATIQUE ET CONTEXTE POST-GLACIAIRE

La région de W-K à Umiujaq est encore aujourd'hui sous l'effet du relèvement glacio-isostatique à la suite de la déglaciation de l'inlandsis Laurentidien à des taux parmi les plus élevés au Canada (Robin *et al.*, 2020). À W-K, le taux de relèvement est de $1,32 \pm 0,013$ cm an^{-1} , alors qu'il est estimé à environ $1,15$ cm an^{-1} à Umiujaq (Robin *et al.*, 2020). Ce rebond post-glaciaire est non-négligeable. Même combiné aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et de réchauffement les plus pessimistes, cette région du Nunavik devrait observer une baisse du niveau marin relatif de l'ordre de 5 à 6 cm pour W-K à environ 15 cm pour Umiujaq d'ici 2100 (fig. 4 ; James *et al.*, 2021). En comparaison, ce scénario estime que le niveau marin mondial devrait augmenter de près de 2 m pour cette même période (IPCC, 2023).

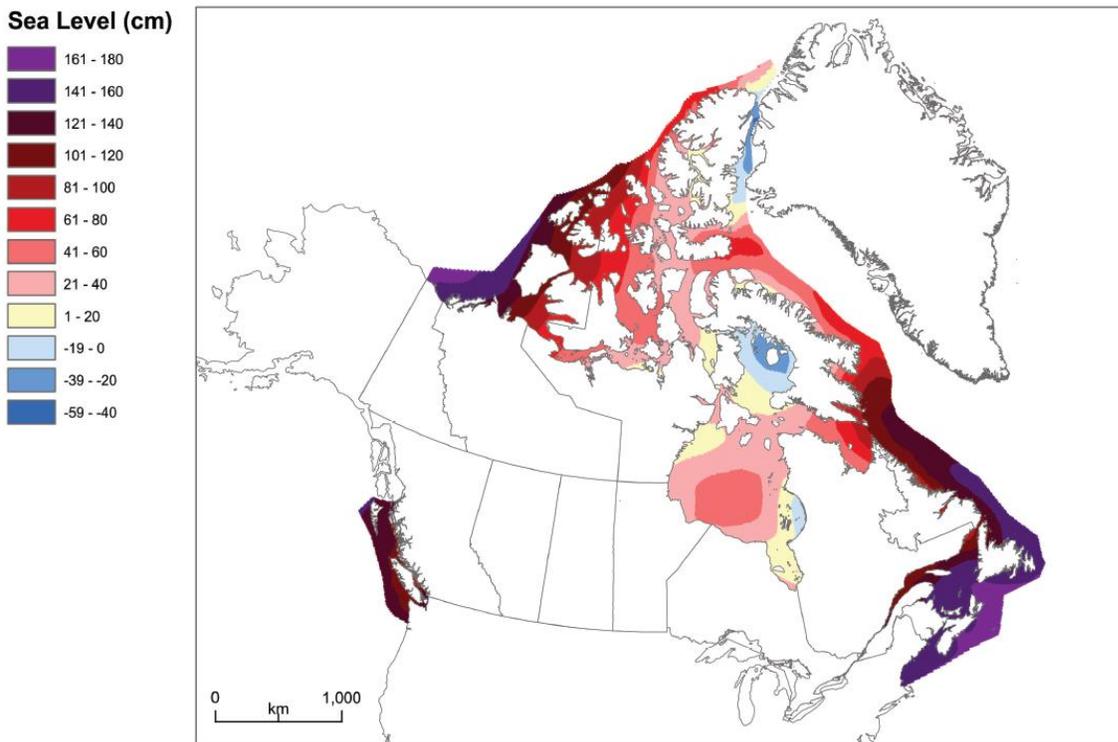


Figure 4. Projections du niveau marin relatif d'ici 2100 par rapport aux niveaux moyens de 1986 à 2005 au Canada selon le scénario rehaussé (James *et al.*, 2021)

Une telle baisse du niveau marin relatif permet de contrer l'occurrence de surcote, soit une hausse du niveau d'eau influencée par des paramètres non-tidaux comme la pression atmosphérique ou le vent (Hachem & Bleau, 2020), et de réduire, en théorie, le risque d'érosion côtière. Les taux de relèvement isostatique, combinés aux conditions hydrodynamiques et morpho-sédimentaires locales, influenceraient positivement la progression vers la mer de marais maritimes et de côtes sableuses comme les flèches littorales et les tombolos (L'Hérault *et al.*, 2017). Toutefois, une baisse du niveau marin relatif augmente le risque à la navigation dans des eaux peu profondes et mal cartographiées, tout en réduisant l'accessibilité maritime aux infrastructures côtières (Debortoli *et al.*, 2019; Irrgang *et al.*, 2022; James *et al.*, 2021). Cette dynamique peut également mener à l'ensablement d'embouchures de grandes rivières (Massé et Gallant, 2016), remodelant le paysage côtier.

1.3 DYNAMIQUE LITTORALE

Malgré la baisse du niveau marin relatif, la région de W-K à Umiujaq est exposée à des aléas côtiers. Les secteurs non-protégés par les îles Manitounuk au sud-ouest et Nastapoka au nord-est de la région sont exposés à un fetch d'une centaine de kilomètres pouvant générer des vagues moyennes allant jusqu'à 3 m lors de tempêtes (Boisson, 2019; Hill *et al.*, 2003; L'Hérault *et al.*, 2017). Bien que les deux séries d'îles apportent une protection contre les vagues de tempêtes provenant du large, des impacts majeurs ont tout de même été observés à la côte au cours des dernières années (Beaulieu et Allard, 2003; L'Hérault *et al.*, 2017). Ces tempêtes ont généralement lieu lorsque la côte est libre de glace et leur occurrence risque d'augmenter avec les changements climatiques (Savard *et al.*, 2014).

Le régime marégraphique entre Umiujaq et W-K est microtidal semi-diurne (Dohler, 1966 dans L'Hérault *et al.*, 2017), avec un marnage moyen variant de 1 à 1,5 m et une valeur maximale de 1,4 m pour Umiujaq et de 2 m pour W-K (Pêches et Océans Canada, 2023). Le courant dominant de la baie d'Hudson est une gyre anti-horaire (Boisson, 2019; L'Hérault *et al.*, 2017). Du côté est de la baie d'Hudson, les courants de marées sont généralement faibles, mais s'intensifient à l'automne par la présence de forts vents (L'Hérault *et al.*, 2017).

Considérant le fetch possible et le marnage de la région de W-K à Umiujaq, celle-ci est caractérisée par un régime hydrodynamique influencé de manière dominante par les vagues (L'Hérault *et al.*, 2017). Les types de côtes de la région, comme les flèches littorales à l'embouchure des rivières, sont typiques de ce type de régime (Boisson, 2019).

1.4 CLIMAT

La région de W-K à Umiujaq au Nunavik est caractérisée par un climat continental humide froid (Dfc) selon la classification Köppen-Geiger (Kottek *et al.*, 2006). Il s'agit d'un climat subpolaire où les températures minimales sont inférieures à -3°C, où les étés sont frais (moins de quatre mois où la température moyenne dépasse 10°C) et les hivers sont froids.

Les précipitations annuelles, liquides ou solides, de ce type de climat sont modérées, soit entre 470 mm et 799 mm (Kottek *et al.*, 2006; Charron, 2015).

Selon les données de température horaire mesurées aux aéroports de W-K et d'Umiujaq (de 8h à 18h), la température moyenne annuelle pour la période de 1993 à 2022 est de -1,6°C à W-K et de -3,1°C à Umiujaq, soit en moyenne 1,5°C plus chaude au sud qu'au nord (ECCC, 2023). L'année la plus froide enregistrée est 1994 à W-K (-3,5°C) et 2018 à Umiujaq (-5,5°C), tandis que l'année la plus chaude est 2010 pour les deux communautés (1,1°C à W-K et -0,37°C à Umiujaq). Les mois les plus froids sont janvier et février avec des températures moyennes de respectivement -21°C et -21,2°C pour l'ensemble de la région d'étude (tableau 1). Les mois les plus chauds sont juillet et août avec des températures moyennes de 12,6°C à W-K et de 12,2°C à Umiujaq. L'écart de température le plus important entre le nord et le sud de la région s'observe au mois de décembre avec des températures plus froides de 2,3°C en moyenne à W-K (sud). Au printemps, l'inverse se produit et les températures sont en moyenne 1°C plus chaudes à W-K.

Tableau 1. Moyennes mensuelles et écarts-types de la température de l'air journalière (de 8h à 18h) pour les communautés de W-K et d'Umiujaq (source des données : ECCC (2023))

Mois	Moyenne T°	Moyenne T°	Écart-Type	Écart-Type
	W-K (°C)	Umiujaq (°C)	W-K	Umiujaq
Janvier	-20,9	-21,0	3,3	3,1
Février	-21,0	-21,5	3,1	3,3
Mars	-14,4	-15,1	3,4	3,5
Avril	-4,9	-6,3	2,7	2,7
Mai	3,0	2,5	2,4	3,5
Juin	8,3	8,6	2,3	3,0
Juillet	12,4	12,1	1,7	2,7
Août	12,7	12,4	2,0	2,0
Septembre	9,0	8,1	1,8	1,4
Octobre	3,4	3,2	1,9	2,0
Novembre	-3,8	-4,1	1,9	1,7
Décembre	-14,1	-11,8	3,9	3,1

Selon les réanalyses climatiques, pour la période de 1981 à 2010, le secteur de W-K a reçu en moyenne 787 mm de précipitations, dont 292 mm (37%) sont tombés sous forme de neige (Boisson, 2019; Charron, 2015). Le secteur d'Umiujaq a reçu en moyenne 753 mm de précipitations dont 304 mm sont tombés sous forme de neige, soit près de 40% pour cette même période (Boisson, 2019; Charron, 2015). Selon ces mêmes modèles, la quantité de précipitations devrait augmenter pour la période future, et ce, de manière plus prononcée pour les mois de juillet et décembre (Charron, 2015).

Selon les données des stations météorologiques de l'ECDC (2023), la vitesse moyenne du vent est de 13,4 km/h pour W-K et de 23,3 km/h pour Umiujaq, soit 1,7 fois supérieur. Le secteur W-K enregistre une vitesse du vent mensuelle moyenne similaire pour l'ensemble de l'année (Annexe-A (A.1)). Les vitesses moyennes maximales sont en novembre et décembre et atteignent environ 15,2 km/h. La vitesse minimale moyenne est de 11,1 km/h, principalement en juillet et août. La direction dominante des vents suit l'axe sud-ouest/nord-est de la côte. Lors de la saison d'eau libre (août à décembre), les vents les plus forts proviennent principalement du nord-ouest.

Le secteur d'Umiujaq enregistre des vitesses moyennes mensuelles supérieures au secteur W-K pour tous les mois de l'année (Annexe-A (A.2)). Les vitesses moyennes maximales sont d'environ 28,4 km/h et caractérisent les mois de novembre et de décembre. Le mois d'octobre a tout de même une vitesse moyenne élevée de 24,5 km/h. Les vitesses minimales sont observées en juillet (18,3 km/h) et août (19,5 km/h). La direction dominante des vents pour l'entièreté de l'année est l'est. Néanmoins, lors de la saison d'eau libre, les vents provenant des directions entre le sud-ouest et le nord-ouest augmente en fréquence et en intensité, jusqu'à ce qu'à l'automne, pour les mois de septembre à décembre, les vents de l'ouest-sud-ouest jusqu'au ouest-nord-ouest dominant en intensité.

1.5 DIVISIONS DE LA RÉGION D'ÉTUDE

La région d'étude a été divisée en 5 secteurs aux caractéristiques physiques côtières similaires afin de simplifier les traitements et l'étude de la variabilité spatiale (fig. 1 (p.9)).

La superficie couverte par les différentes images satellitaires disponibles a également guidé cette segmentation régionale. À titre d'exemple, la délimitation du secteur Détroit de Manitounuk correspond aux limites des images satellitaires acquises à une même date et par un même satellite. Cette séparation est justifiée par le fait que, pour des images acquises par un même satellite à une même date, les propriétés spectrales permettent de produire une mosaïque et réaliser des traitements (c-à-d., la classification surfacique) avec les mêmes valeurs de paramètres. Des images provenant de satellites différents et séparées dans le temps nécessitent un ajustement lors des traitements ce qui complexifie le mosaïquage des images.

Les 5 secteurs sont, du sud vers le nord, Whapmagoostui-Kuujuarapik (W-K), le détroit de Manitounuk (DM), la Petite-Rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur côtier à la hauteur du lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM) (fig. 1 (p.9)). Pour la description de la variabilité géomorphologique, un secteur supplémentaire a été créé : le secteur de la côte hudsonienne du détroit de Manitounuk (CHM). La géomorphologie significativement différente de ce secteur, soit des côtes rocheuses entrecoupées de plages de sédiments mixtes grossiers, par rapport à celle de l'intérieur du détroit de Manitounuk, dominée par des côtes meubles et végétalisées ayant de larges battures de sédiments fins, explique cette division. Le tableau 2 présente la longueur de côte de chaque secteur, ainsi que le pourcentage de la région d'étude qu'ils représentent. Le plus long secteur est celui longeant le lac Tasiujaq (LT) (104 km), au nord de la Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB). Le plus petit secteur est celui d'Umiujaq (UM) bordant de part et d'autre la communauté (7 km).

Tableau 2. Longueur de chaque secteur (km) et leur pourcentage de la région d'étude

Secteur	Longueur (km)	Pourcentage de la région d'étude (%)
Umiujaq (UM)	7	2,1
Lac Tasiujaq (LT)	104	30,7
Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB)	44,6	13,2
Côte hudsonienne, secteur Manitounuk (CHM)	37,1	11
Détroit de Manitounuk (DM)	98	28,9
Whapmagoostui-Kuujuarapik (W-K)	48,2	14,2

La région de W-K à Umiujaq est caractérisée par une côte fortement échancrée à géomorphologie variée. Le secteur W-K est riche en sédiments sableux et se distingue par une flèche sableuse de plus de 3 km, des tombolos en progradation, ainsi que des affleurements rocheux marqués de traces d'érosion glaciaire de l'inlandsis Laurentidien.

Le secteur DM est en majorité abrité par les îles Manitounuk. Il est caractérisé par de larges estrans sablo-silto-argileux, des marais, des falaises silto-argileuses basses (5 à 6 m) en érosion et une arrière-plage dominée par un paysage de pergélisol en dégradation, principalement des mares de thermokarst et des buttes de pergélisol (Beaulieu & Allard, 2003). Les secteurs côtiers de W-K et du détroit de Manitounuk sont des terres de catégorie I et II selon la convention de la Baie-James et du Nord québécois, soit des terres exclusives à l'usage des autochtones (Gouvernement du Québec, 1998). Les terres de catégorie I sont des terres où l'occupation et les activités qui y ont lieu sont exclusives aux autochtones, alors que les terres de catégorie II sont celles où les activités de chasse, de pêche et de trappage sont exclusives aux autochtones, sans toutefois y avoir de droit spécial d'occupation (Gouvernement du Québec, 1998). Les autorisations des communautés sont nécessaires pour réaliser des activités de chasse, de pêche et de camping dans ces deux catégories de terres.

La côte du secteur PRB est majoritairement rocheuse, entre autres associée à des revers de cuestas entrecoupés par des plages de poches sableuses ou de blocs. Les plages de blocs sont alimentées en sédiments par la gélifraction associée aux cycles gel-dégel affectant les affleurements rocheux (L'Hérault *et al.*, 2017). Deux rivières sont localisées dans ce secteur : la rivière Kajurtuit et la rivière Qilalugarsiuvik ou Whapmagoostui'sh (PRB). Leur embouchure est localisée entre deux cuestas et est marquée par une flèche littorale sableuse. Le secteur PRB est une zone de préservation selon Parcs Nunavik (2023).

La géomorphologie du secteur LT est similaire à celle du secteur PRB : des côtes rocheuses associées au revers de cuestas entrecoupées de plages sableuses. Une différence importante est la présence des îles Nastapoka à plus ou moins 6 km au large qui contribuent à la protection de la côte contre les agents hydrodynamiques. Ce secteur est aussi marqué par le goulet (Tursuq) du lac Tasiujaq.

Enfin, le secteur le plus nordique est celui d'Umiujaq, le plus court de l'analyse. Il est caractérisé par deux plages sableuses entrecoupées par une infrastructure maritime. Les secteurs côtiers du lac Tasiujaq et d'Umiujaq sont des terres de catégorie I selon la convention de la Baie-James et du Nord québécois (Parcs Nunavik, 2023).

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille l'approche méthodologique utilisée afin de décrire les facteurs potentiels à l'origine de la variabilité spatiale de l'évolution côtière. La méthodologie se divise en quatre sections : les étapes de pré-traitement des données (2.1), la caractérisation géomorphologique par photo-interprétation (2.2), la description des conditions hydrodynamiques modélisées (2.3) et l'analyse des taux d'évolution côtière (2.4). La figure 5 illustre les grandes étapes méthodologiques du projet, les données utilisées, les analyses et les résultats qui en découlent.

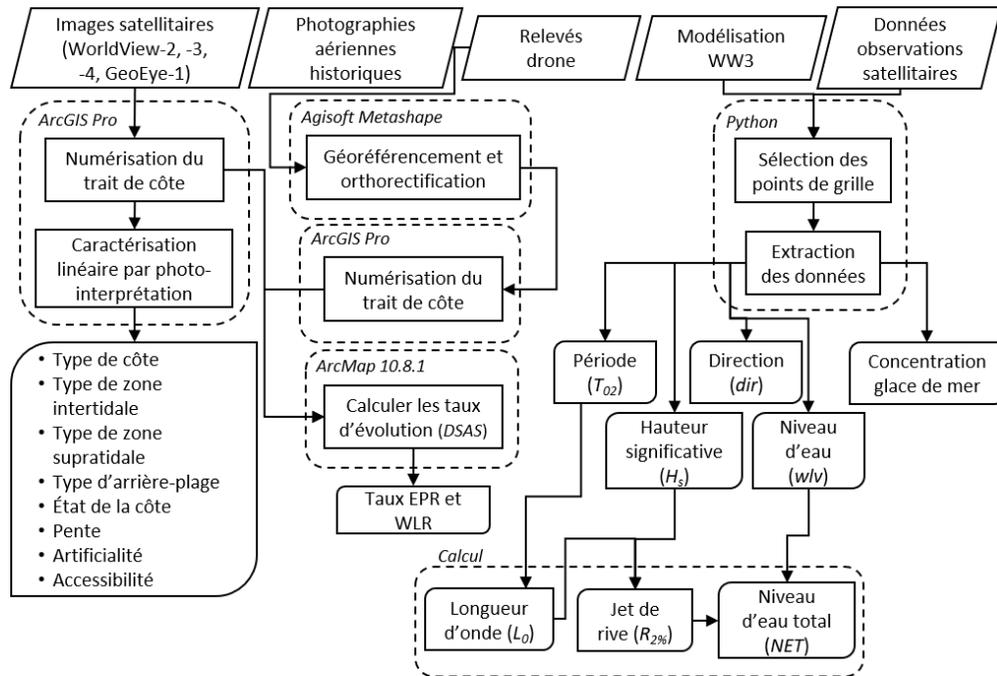


Figure 5. Organigramme méthodologique. Les parallélogrammes représentent les données sources utilisées, les rectangles sont les étapes méthodologiques, les polygones pointillés sont les logiciels utilisés et les rectangles aux coins arrondis sont les données résultantes.

2.1 PRÉ-TRAITEMENTS

2.1.1 Données utilisées

Afin de décrire la variabilité géomorphologique de la région d'étude (2.2), l'entière du linéaire côtier entre W-K et Umiujaq a été numérisé sur de l'imagerie satellitaire récente à très haute résolution spatiale acquise entre 2017 et 2019 (tableau 3). Ces images acquises par les capteurs WorldView-2, -3 et -4 et GeoEye-1 sont composées des bandes spectrales bleue, verte, rouge et proche infrarouge permettant la création de composés fausses couleurs. Ces composés facilitent la différenciation de la végétation, améliorant ainsi la capacité de numérisation de la côte en milieux humides ou de marais maritimes. Ces images, couvrant la région d'étude de manière continue, ont permis la numérisation de toute la région à l'aide d'une seule entité linéaire de 340 km.

Tableau 3. Images satellitaires couvrant la région d'étude selon chaque secteur

Secteur	Satellite	Date d'acquisition	Résolution spatiale (m)	Hauteur de la marée (m)	Condition de marée et de glace
W-K	WorldView-4	2017-08-23	0,3	0,2	Marée basse; sans glace de mer
Déroit Manitounuk	WorldView-4	2017-09-17	0,3	1,3	Marée montante; sans glace de mer
	WorldView-2	2017-09-02	0,46	1,4	Marée montante; sans glace de mer
PRB	GeoEye-1	2018-06-15	0,5	0,3	Marée descendante; avec glace de mer
	WorldView-3	2017-08-12	0,31	0,7	Marée basse; sans glace de mer
Lac Tasiujaq et Umiujaq	WorldView-3	2019-09-18	0,31	0,7	Marée descendante; sans glace de mer

Afin de réaliser l'étude de l'évolution diachronique du trait de côte (2.4), des données photographiques historiques et récentes ont été utilisées en plus de l'imagerie satellitaire présentée ci-haut. Les données historiques sont des photographies aériennes de 1931 à 2015 acquises auprès des cartothèques des universités québécoises comme l'UQAM, l'UQTR et l'Université Laval, l'Administration régionale Kativik (ARK) et le ministère des Ressources

Naturelles et des Forêts du Québec (MRNF). Des données récentes à très haute résolution (centimétrique), soit des relevés photogrammétriques, ont été acquises par drone pour les communautés de W-K et d'Umiujaq lors de travaux de terrain de l'équipe du Laboratoire d'études des littoraux nordiques et arctiques (LNAR) à l'UQAR en 2021 et 2022. Ces données ont servi à numériser le trait de côte, améliorant la résolution temporelle pour le suivi de l'évolution côtière récente.

Afin de caractériser l'évolution de la côte pour la région d'étude, les secteurs décrits dans le chapitre 1 (1.5) ont été divisés en sous-secteurs, selon l'étendue des photographies aériennes historiques disponibles et selon le type de côte. Le seul secteur n'ayant pas de photographies aériennes historiques est celui de la Petite-Rivière-à-la-Baleine. Le tableau 4 présente les données disponibles et utilisées pour l'analyse de l'évolution côtière. Les données permettent de couvrir une période de 91 ans pour le secteur de W-K, 27 ans pour le secteur du détroit de Manitounuk, 63 ans pour le secteur bordant le Lac Tasiujaq et 65 ans pour le secteur d'Umiujaq. La résolution temporelle des données utilisées n'est toutefois pas la même pour chaque secteur. Le trait de côte a été tracé respectivement pour 12, 2, 4 et 8 années pour les secteurs de W-K, détroit de Manitounuk, Lac Tasiujaq et Umiujaq. La résolution spatiale des données utilisées varie de 0,07 m à 1,75 m pour les photographies aériennes historiques, 0,30 m pour l'imagerie satellitaire et de 0,01 à 0,03 m pour les levés de drones à faible altitude.

Tableau 4. Caractéristiques des images utilisées pour l'analyse de l'évolution côtière selon chaque secteur, où E_r est la résolution spatiale de la donnée, EQM est l'erreur quadratique moyenne de l'orthorectification et du géoréférencement et ET est l'erreur totale de numérisation

Secteur	Sous-secteur	Date	Source	Type d'image	E_r (m)	EQM (m)	ET (m)	
W-K	A, B, C, D, E, F	1931-09-05	Earth explorer / CEGRIM	Orthophoto	0,31	0,86	1,37	
	A, B, C, D, E, F	1954-07-10	UQAM		1,82	1,80	2,75	
	B	1964-06-16	Earth explorer		0,11	0,61	1,18	
	-	1972-06-24	ARK		0,21	NA	1,02	
	A, B, C, D	1975-07-17	ARK		0,43	0,60	1,24	
	-	1982-08-03	Earth explorer / CEGRIM		0,15	1,11	1,50	
	A, B, C, D, E	1986-08-18	Earth explorer / CEGRIM		0,20	1,21	1,58	
	B	NA	ARK		0,21	NA	1,02	
	B	NA	MRNF		0,25	NA	1,03	
	C	NA	ARK		0,22	0,66	1,22	
	A, B, C, D	2010-08-13	ARK / MRNF	0,15	NA	1,01		
	B	NA	ARK / MRNF	0,07	NA	1,00		
	A, B, C, D, E, F	2017-08-23	CEGRIM	Satellitaire	0,30	NA	1,04	
-	2021-08-20	LNAR	Drone	0,01	0,07	0,50		
B	2022-08-08			0,03	NA	0,50		
Déroit Manitounuk	A, B, C	1990-08-22	Université Laval (Michel Allard)	Orthophoto	0,15	1,14	1,52	
		2017-08-23	CEGRIM	Satellitaire	0,30	NA	1,04	
Lac Tasiujaq	A	1956-07-18	UQTR	Orthophoto	1,75	1,67	2,61	
	B	1957-06-25			0,89	1,14	1,76	
	C	1990-08-31	Université Laval (Michel Allard)		0,42	0,35	1,14	
	D	2010-08-12	ARK / MRNF		0,15	0,15	1,02	
	A, B, C, D	2019-09-18	CEGRIM	Satellitaire	0,30	NA	1,04	
Umiujaq	A	1957-06-17	ARK	Orthophoto	1,75	0,04	2,01	
	A	1986-09-23	ARK / CEN		0,17	0,92	1,37	
	-	1990-08-31	Université Laval (Michel Allard)		0,42	0,35	1,14	
	A	1993-07-29	ARK		0,10	0,54	1,14	
	-	2002	Université Laval (Michel Allard) / MRNF		0,25	0,88	1,36	
	A	2003-07-23	Université Laval (Michel Allard)		0,23	0,45	1,12	
	A	2010-08-12	ARK / MRNF		0,15	0,15	1,02	
	A	NA	ARK / MRNF		0,07	0,76	1,26	
	A	2019-09-18	CEGRIM		Satellitaire	0,30	NA	1,04
	-	2021-08-24	LNAR		Drone	0,02	0,22	0,55
	A	2022-08-11	LNAR	0,03		NA	0,50	

2.1.2 Orthorectification et géoréférencement

Les propriétés géométriques des photographies aériennes et de l'imagerie acquise par drone ont été orthorectifiées et géoréférencées (Rocchini *et al.*, 2012; Rocchini & Di Rita, 2005). Ces étapes de pré-traitement ont contribué à diminuer l'erreur de numérisation du trait de côte. L'imagerie satellitaire récente a été orthorectifiée par les fournisseurs. Les photographies aériennes historiques et les relevés photogrammétriques ont été orthorectifiés dans le logiciel Agisoft Metashape. Pour les photographies aériennes, les points de contrôle utilisés ont été identifiés sur l'imagerie satellitaire récente pour la latitude et la longitude et via le modèle numérique d'élévation du Canada (CDEM) pour les données topographiques. Les points de contrôle des relevés photogrammétriques ont été acquis sur le terrain à l'aide d'un GPS RTK. Certaines photographies aériennes orthorectifiées ont dû être ajustées par géoréférencement à l'aide de l'imagerie satellitaire récente et du logiciel ArcMap 10.8.1. Les erreurs quadratiques moyennes (EQM) résultant de l'orthorectification et du géoréférencement ont été additionnées. L'EQM correspond à la moyenne des erreurs résiduelles des points de contrôle, soit la différence entre la position réelle et la position transformée des points de contrôle. Cette méthode combinée a permis la création d'orthomosaïques projetées dans le système NAD83 (SCRS) MTM 9 (EPSG : 2951).

L'erreur totale de numérisation du trait de côte (ET) a été calculée à partir de la somme quadratique des incertitudes (Éq. 1, Chenthamil Selvan *et al.*, 2014; Gibbs *et al.*, 2021; Hapke *et al.*, 2011; Niang, 2020). Les incertitudes incluses dans ce calcul sont la résolution spatiale de la donnée utilisée (E_r), l'erreur totale d'orthorectification et de géoréférencement (EQM) et une erreur humaine de numérisation (E_n) estimée à 1 m pour l'ensemble des données à l'exception des levés de drone où elle a été estimée à 0,50 m (Chenthamil Selvan *et al.*, 2014; Gibbs *et al.*, 2021; Hapke *et al.*, 2011; Niang, 2020). Les erreurs de numérisation pour chaque donnée photographique disponible sont présentées au tableau 4.

$$ET = \sqrt{E_r^2 + EQM^2 + E_n^2} \quad \text{Éq. 1}$$

2.1.3 Délimitations de la zone côtière

Avant de détailler la méthode de caractérisation côtière, il importe de définir les divisions de la zone côtière perpendiculaires au trait de côte (fig. 6). La division employée est une combinaison de celle utilisée au laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR (LDGIZC), de Dionne (2004) et du projet eSPACE (Environnement Canada, 2012). De la mer vers la terre, il y a d'abord la zone infralittorale, soit la zone allant de la limite inférieure des basses mers de grandes marées à la limite de la zone photique. La zone infralittorale est toujours submergée.

La zone intertidale correspond ensuite à la zone de battements des marées et est délimitée par la limite inférieure des basses mers de grandes marées et par la limite supérieure des pleines mers de grandes marées (fig. 6A et B). Elle est associée au bas et au haut estran, tous deux séparés généralement par une rupture de pente (flexure) en milieu à faible énergie, limite correspondant relativement au niveau moyen des mers. Pour les marais maritimes, ces limites incluent la slikke, le schorre inférieur (végétation hydrophile) et la partie inférieure du schorre supérieur (fig. 6C).

La zone supratidale se retrouve vers les terres et est essentiellement associée au haut de plage. Cette zone est émergée et n'est pas affectée par le battement des marées moyennes, mais peut être atteinte par les vagues lors de tempêtes ou par le jet de rive en période de marée haute (fig. 6A et B). Pour les marais maritimes, cette zone correspond à la partie supérieure du schorre supérieur (fig. 6C).

Enfin, la dernière zone abordée est l'arrière-plage. Dans cette étude, le terme « arrière-plage » est utilisé afin de simplifier la caractérisation, mais cette zone inclut aussi l'arrière-côte des falaises et des marais. L'arrière-plage (ou arrière-côte) se trouve entre la limite des débris de houles de tempêtes et la limite des débris de houle de tempêtes extrêmes. Dans le cadre du projet, elle est principalement abordée par son impact sur l'accessibilité à la côte.

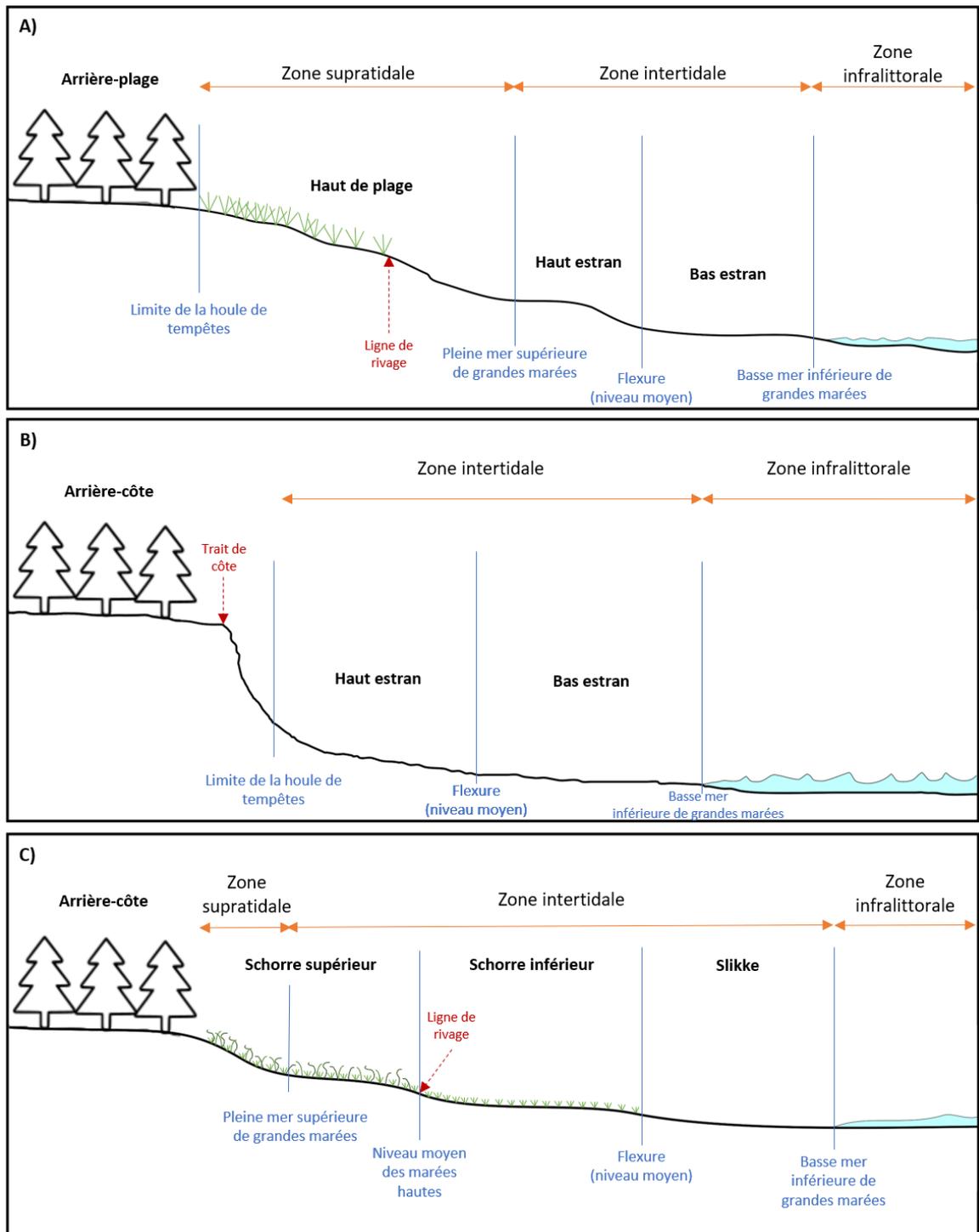


Figure 6. Délimitations de la zone côtière utilisées pour le projet (A) pour une côte meuble sans falaise, (B) pour une côte meuble à falaise basse et (C) pour une côte à marais maritime

2.1.4 Numérisation du trait de côte

La méthode utilisée pour tracer la côte est inspirée de celle de Bernatchez et Drezja (2015) et de Beaulieu et Allard (2003). La numérisation du trait de côte a été réalisée à une échelle 1 : 600. Le tableau 5 décrit les lignes tracées et les repères utilisés selon les différents environnements côtiers rencontrés dans la région d'étude. Les repères utilisés varient selon le type de côte en place.

Pour les côtes meubles, ce sont principalement la limite de la végétation dense ou la rupture de pente qui ont été utilisées comme repères de la ligne de rivage.

Pour les côtes à marais maritime, la ligne numérisée était, de manière prioritaire, la limite entre le schorre supérieur et inférieur. Toutefois, lorsque cette limite était difficile à identifier, soit à cause de la saisonnalité ou de la qualité des données disponibles, c'est plutôt la limite entre le schorre inférieur et le substrat, soit le front du marais, qui a été numérisée. Ceci dit, pour un même segment côtier, les repères utilisés sont demeurés constants pour les différentes images disponibles afin d'en faciliter la comparaison et le calcul d'évolution.

Puisque les côtes rocheuses de la région d'étude sont principalement des plateformes et des rampes rocheuses peu végétalisées, la limite de la végétation n'était pas toujours le repère de choix. À certains endroits, ce sont plutôt la différence de couleur dans le roc, indiquant la limite de la zone de battement des marées, ou la limite de l'eau qui ont été utilisées comme repères pour la numérisation de la côte.

La figure 7 présente des types de côte où a été numérisée la côte selon les différents critères énoncés ci-haut.

Tableau 5. Méthodologie du tracé de la côte pour différents environnements côtiers

Environnement côtier	Type de côte associé	Ligne tracée	Repère
Côte basse sans falaise	Plage, dune, flèche littorale, tombolo, plateforme rocheuse	Ligne de rivage	Limite de la végétation herbacée dense, ligne d'eau ou contraste de couleurs sur le roc
Côte basse avec falaise de moins de 5 m	Terrasse de plage, flèche littorale, tombolo, dune	Sommet de la falaise * Il ne s'agit pas du trait de côte, puisqu'il pourrait être submergé par des vagues de tempêtes	Limite de la végétation dense ou rupture de pente
Côte à falaise meuble ou rocheuse	Falaise meuble, rampe rocheuse, falaise rocheuse, hautes dunes en érosion	Trait de côte	Sommet du talus, rupture de pente, ligne d'eau contraste de couleur sur le roc
Côte à marais maritime	Marais maritime	Ligne de rivage ou front du marais	Pour la ligne de rivage : limite entre le schorre supérieur et inférieur ; correspond souvent à la limite supérieure des étendues monospécifiques. Pour le front du marais : limite entre la végétation et le substrat.
Côte artificialisée	-	Trait de côte	Limite supérieure des ouvrages de protection

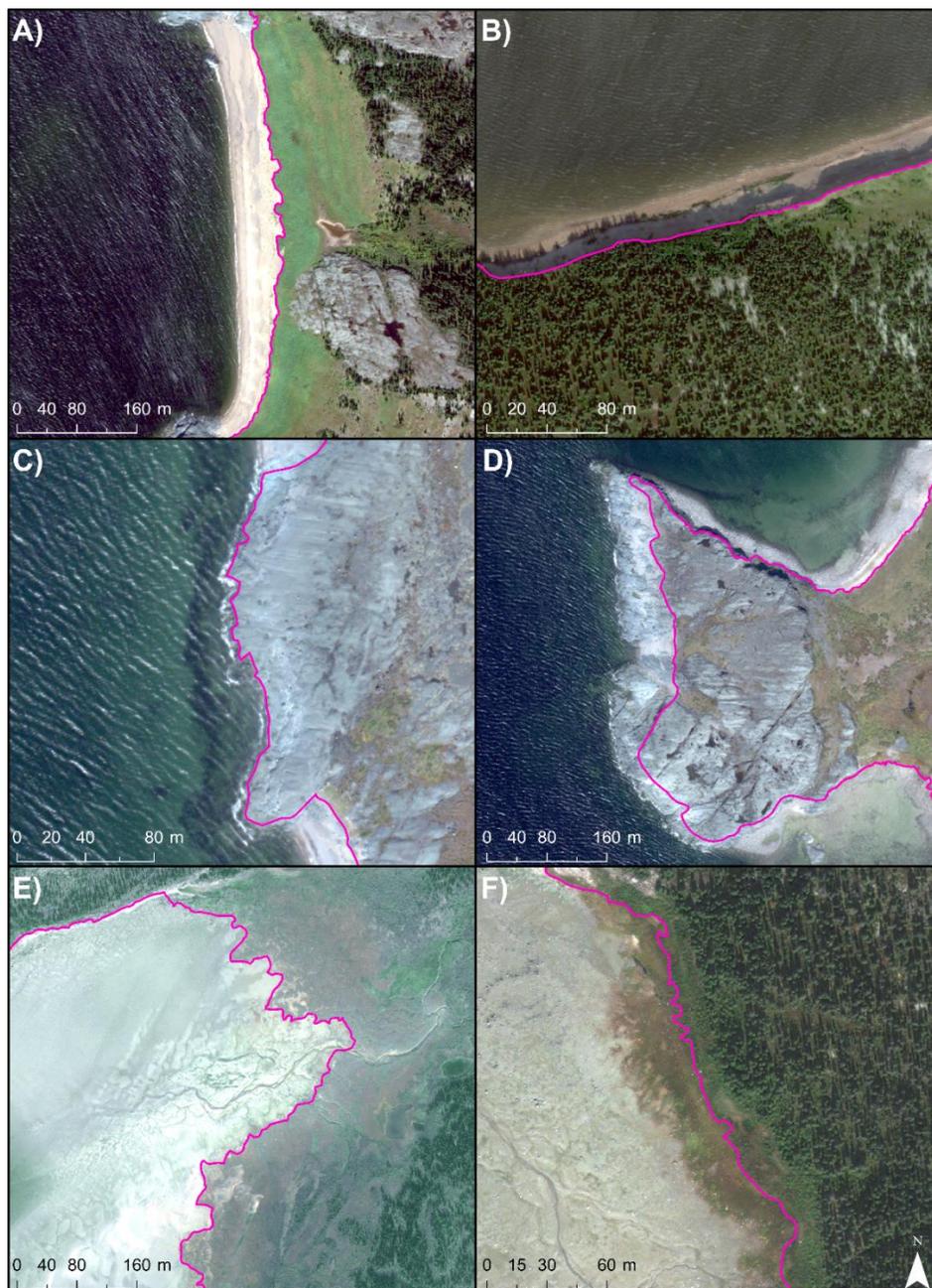


Figure 7. Numérisation de la côte selon différents types de côte et différents indicateurs. (A) La limite de la végétation dense comme indicateur pour une terrasse de plage, (B) la rupture de pente comme indicateur pour une falaise meuble, (C) la ligne d'eau comme indicateur pour une plateforme rocheuse, (D) le changement de couleur comme indicateur pour une plateforme rocheuse, (E) le front du marais comme indicateur pour un marais maritime et (F) la limite entre le schorre supérieur et inférieur comme indicateur pour un marais maritime

2.2 CARACTÉRISATION GÉOMORPHOLOGIQUE

Le trait de côte numérisé à partir de l'imagerie satellitaire récente a été segmenté selon le type de zone supratidale ou intertidale. Pour chaque changement dans le type de la zone supratidale ou intertidale, un nouveau segment était créé. Cette segmentation réalisée à partir de photo-interprétation des images satellitaires a permis la création de 1743 segments.

2.2.1 Variables

Chaque segment a été décrit selon huit variables. Par soucis d'uniformité et de cohérence pour les côtes du Québec maritime, les variables et les attributs décrits par la caractérisation linéaire sont étroitement liés à ceux utilisés dans le projet *Résilience Côtière* dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent du laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR (LDGIZC; Arsenault *et al.*, 2021). Ils ont aussi été déterminés dans l'objectif de poursuivre la caractérisation linéaire pour les autres secteurs côtiers du Nunavik. Les attributs de chaque variable sont détaillés à l'Annexe-B (B.1 à B.10). La méthode de caractérisation linéaire est essentielle à l'interprétation de la variabilité de l'évolution côtière sur le gradient latitudinal de la région d'étude. La caractérisation linéaire est une méthode efficace pour regrouper des informations descriptives de la côte. Elle permet de décrire la variabilité longitudinale et perpendiculaire à la côte.

La première variable est le *Type de côte* et est décrite par 13 types différents (Annexe-B (B.1)). Celle-ci a une influence directe sur l'évolution côtière. Une côte meuble est davantage vulnérable à l'érosion côtière qu'une côte rocheuse, d'autant plus celles à faible pente comme les plateformes ou les rampes rocheuses. Le type de côte nous informe aussi sur les systèmes géomorphologiques en place et donne un aperçu sur le potentiel d'accessibilité à la côte.

Puisque la variable *Type de côte* est assez générale, il importe de décrire les types de côte des sections exposées aux conditions hydrodynamiques (fig. 6). Selon la hauteur de la marée et les conditions météorologiques et atmosphériques, les vagues peuvent impacter les

zones intertidale et supratidale (haut de plage). La nature des sédiments de ces deux zones ainsi que leur pente ont un impact sur la vulnérabilité côtière (Béland *et al.*, 2023; ECCC, 2016; Grottoli & Ciavola, 2019; Gundlach & Hayes, 1978). Il est donc important de préciser le type de côte général à l'aide des variables *Type de zone intertidale* et *Type de zone supratidale*. Cette première décrit le type de côte observé de la limite supérieure du haut estran jusqu'à la ligne d'eau instantanée sur l'imagerie satellitaire ou sur les photographies obliques et se distingue par 8 types différents (Annexe-B (B.2)). Le type de zone supratidale décrit le type de côte observé à l'endroit du segment tracé et se distingue par 18 types différents (Annexe-B (B.3)).

La troisième variable est le *Type de l'arrière-plage*. Dans cette étude, cette variable inclut l'arrière-côte des falaises et des marais côtiers. Elle permet de décrire par photo-interprétation le type de côte observé derrière le trait de côte. Cette variable influence la vulnérabilité côtière en ayant un impact direct sur l'accessibilité et sur les environnements qui seront possiblement exposés aux conditions hydrodynamiques advenant une migration du trait de côte ou de la ligne de rivage vers l'intérieur des terres. En cas de tempête extrême, l'arrière-plage peut aussi être atteint par les vagues. Cette variable se distingue par 20 types différents (Annexe-B (B.4)).

La quatrième variable, l'*État de la côte*, permet de résumer l'information mesurée par l'évolution diachronique du trait de côte (2.4) et de décrire par photo-interprétation l'état des segments où l'étude de l'évolution était impossible. Documenter cette variable permet aussi de ressortir les tendances d'évolution côtière pour la région d'étude. Les 4 classes utilisées pour la variable *État de la côte* sont tirées du projet Résilience Côtière du LDGIZC : accumulation, active/vive (moins de 25% de végétation), semi-végétalisée (entre 25% et 75% de végétation), stable/végétalisée (plus de 75% de végétation) (Annexe-B (B.5)).

La cinquième variable, la *Pente*, est divisée en trois parties dans la caractérisation linéaire : celle de l'estran, de la zone supratidale et de l'arrière-plage. Les valeurs de pente informe sur les conditions hydrodynamiques auxquelles est exposée la zone côtière ainsi que sur la taille granulométrique des sédiments en place. De manière générale, une plage à faible

penne est caractérisée par des sédiments fins et est exposée à des conditions hydrodynamiques plus calmes qu'une plage à pente élevée (Bosboom & Stive, 2022). Une pente intertidale, supratidale et d'arrière-plage plus ou moins élevée a aussi un impact sur la hauteur atteinte par le jet de rive suite au déferlement des vagues. La valeur de pente de l'arrière-plage a aussi un impact sur l'accessibilité à la côte. Les valeurs de pente décrites dans la caractérisation linéaire sont celles du projet eSPACE (Environnement Canada, 2012). Elles ont été estimées à partir de données vidéo collectées en hélicoptère et se divisent en 4 classes : faible ($< 5^\circ$), moyenne (5° à 35°), élevée ($> 35^\circ$) et terrasses/en escaliers (Environnement Canada, 2012; Annexe-B (B.6)).

La variable *Artificialité* permet de préciser les segments ayant été caractérisés comme étant artificiel ou d'indiquer qu'une artificialité est présente sur un segment n'étant pas à dominance artificielisée. Quatre variables ont été établies afin de décrire les artificialités côtières. La première consiste à identifier le type d'artificialité et se distingue à l'aide de 26 classes différentes (Annexe-B (B.7)). Tout comme les sédiments meubles ou les plateformes rocheuses, les différents types d'artificialité peuvent être perméable ou imperméable. C'est ce que la variable *Perméabilité* vient préciser. Les deux autres variables, *Regroupement* et *Catégorie*, permettent de trier les artificialités répertoriées afin de les analyser selon des critères plus précis. Les regroupements rassemblent les artificialités selon leurs propriétés structurelles et se distinguent par 9 classes différentes (Arsenault *et al.*, 2021; Annexe-B (B.8)). Les catégories rassemblent les artificialités en fonction de leur rôle et se distinguent à l'aide de 4 classes : ouvrage de protection à l'aide d'une structure rigide ou douce et les infrastructures côtières ou portuaires (Arsenault *et al.*, 2021; Annexe-B (B.9)). Les classes utilisées pour caractériser ces variables sont également tirées du projet Résilience Côtière du LDGIZC (Arsenault *et al.*, 2021).

La dernière variable caractérisée est l'*Accessibilité*. Dans le but d'améliorer les capacités de gestion d'incidents maritimes au Nunavik, il importe de documenter cette variable pour les différents segments côtiers. Cette accessibilité est divisée en trois parties dans la caractérisation linéaire : les moyens de transport permettant d'accéder à la côte, le

meilleur moyen de transport afin d'accéder à la côte par l'arrière-plage ou l'arrière-côte et, si oui ou non, le segment est accessible à partir du segment de côte voisin à la marche. Des barrières pouvant restreindre l'accès par l'arrière-plage sont les falaises, les forêts denses ou les milieux humides à fortes teneur en eau. Des barrières pouvant restreindre l'accès par la plage voisine sont les falaises, les cours d'eau ou les milieux humides. Les moyens de transport disponibles pour la caractérisation se distinguent en 7 classes (Annexe-B (B.10)). Les classes et leur définition sont tirées du projet eSPACE (Environnement Canada, 2012) et de L'Hérault *et al.* (2017).

2.2.2 Validation

La caractérisation linéaire récente a été validée à partir de photographies aériennes obliques prises par hélicoptère en 2015 et 2021 à marée haute et à marée basse couvrant l'entièreté de la côte entre W-K et Umiujaq (fig. 8). Les photographies à marée haute ont permis de valider les limites des zones intertidale et supratidale, tandis que les photographies à marée basse ont permis de valider le substrat de la zone intertidale, parfois moins évident à identifier sur les images satellitaires.



Figure 8. Photographies obliques acquises par hélicoptère en A) 2015 à marée haute, et en B) 2021 à marée basse

Lors des campagnes de terrain de 2021 et de 2022, une caractérisation de la côte et de la couverture de sol ainsi qu'une description de la végétation a été réalisée. Des échantillons granulométriques ont été récupérés à la majorité des sites visités. Ils ont ensuite été analysés

par des méthodes de tamisage dans les laboratoires de l'UQAR au retour du terrain. Des relevés photogrammétriques à l'aide d'un drone ont été pris pour les côtes à proximité des communautés de W-K et d'Umiujaq. Ces relevés ont été orthorectifiés au retour du terrain, afin de pouvoir y numériser le trait de côte et étudier l'évolution côtière jusqu'à l'année 2022 pour les communautés à l'étude (2.1). La description de la côte réalisée sur le terrain et les échantillons de substrat récoltés ont servi à valider les classes détaillant les variables de la caractérisation linéaire, ainsi qu'à offrir une nouvelle perspective de la région d'étude et améliorer la photo-interprétation (fig. 9).

Une densité importante de segments côtiers à proximité des communautés de W-K et d'Umiujaq ont été caractérisés grâce à leur accessibilité en VTT. Néanmoins, quatre sites entre les deux communautés ont été caractérisés par hélicoptère lors de la campagne de 2021. Cette opportunité a permis d'améliorer la résolution spatiale de la validation *in situ* pour la région d'étude. À ces sites, une description de la côte a été réalisée et des échantillons granulométriques, ainsi que des photographies aériennes obliques par drone ont été pris.

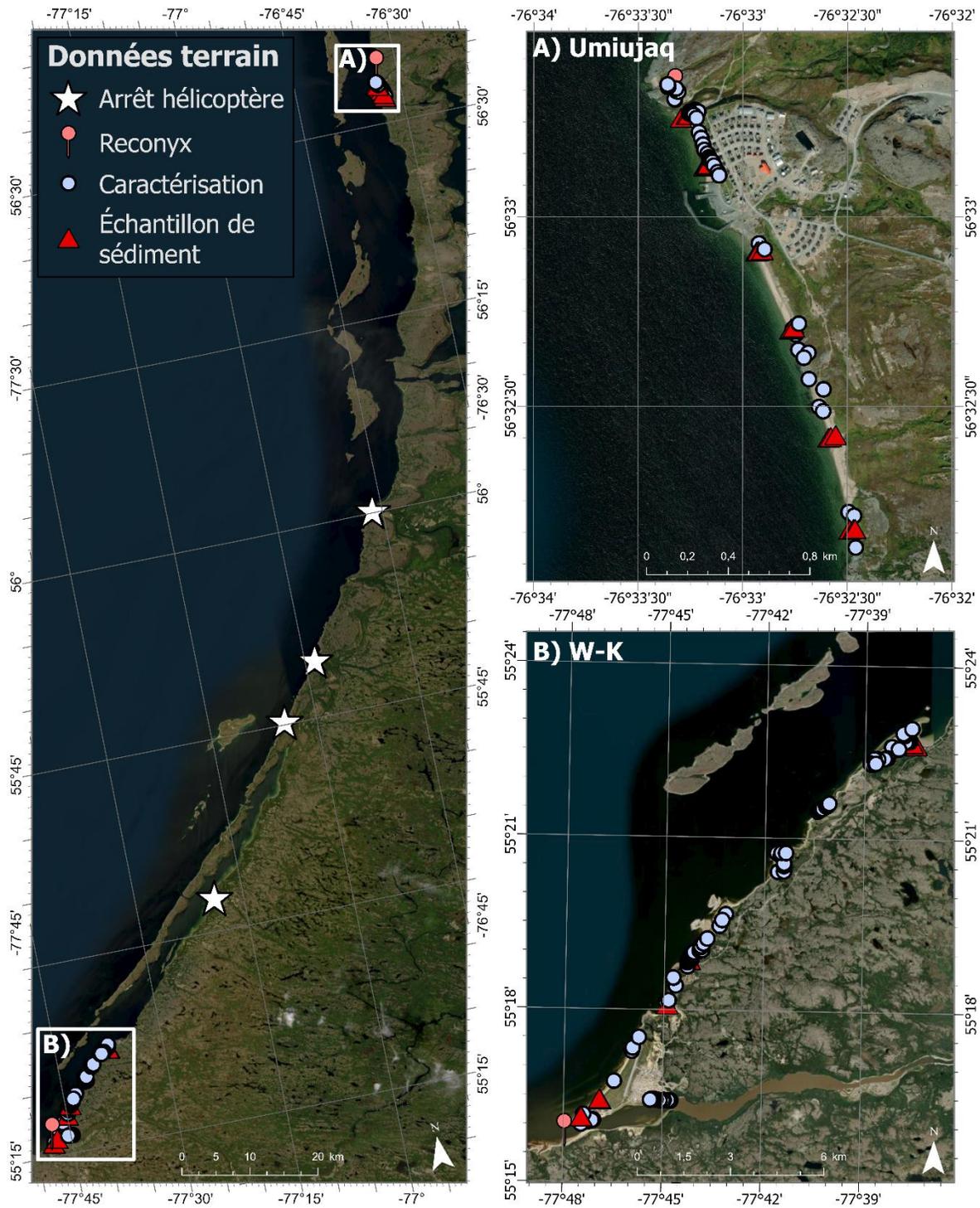


Figure 9. Localisation des données récoltées sur le terrain lors des campagnes de 2021 et 2022

2.3 CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES MODÉLISÉES

La variabilité des conditions hydrodynamiques influence la morphologie côtière et son évolution. Afin de réaliser un portrait complet de l'hydrodynamisme de la région d'étude, les données horaires de 15 points de grille du modèle de vagues WAVEWATCH III (WW3) ont été extraites (fig. 10 ; Barrette *et al.*, 2020; Saucier *et al.*, 2004; WW3DG, 2016). Les niveaux d'eau proviennent du Modèle Océanographique Régional (MOR) développé par Pêches et Océans Canada, dont la résolution verticale est de 10 m (Saucier *et al.*, 2004). La résolution horizontale du modèle WW3 est de 10 km selon une projection stéréographique polaire (Saucier *et al.*, 2004). La période de référence du passé récent s'étend de 1982 à 2004 et la période de projections futures est de 2005 à 2099 (Barrette *et al.*, 2020). Les projections du modèle sont forcées par le Modèle Océanographique Régional (MOR/CICE5), en suivant la simulation climatique AHJ du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) basée sur le scénario d'émissions de gaz à effet de serre SRES-A2 du GIEC utilisé dans les 3^e et 4^e rapports d'évaluation. Ce scénario considère, entre autres, une population mondiale en constante croissance et une économie plutôt à échelle régionale (IPCC, 2000).

Afin d'avoir un climat de vagues représentatif du large, les points de grille les plus près de la côte qui sont à une profondeur supérieure à 30 m ont été sélectionnés (fig. 10). Puisque la résolution du modèle ne permet pas de résoudre l'obstruction causée par les îles Nastapoka, les points de grille sélectionnés sont localisés à l'intérieur du détroit. Les simulations WW3 ne couvrant pas l'intérieur du détroit de Manitounuk, des points côté mer ont été choisis.

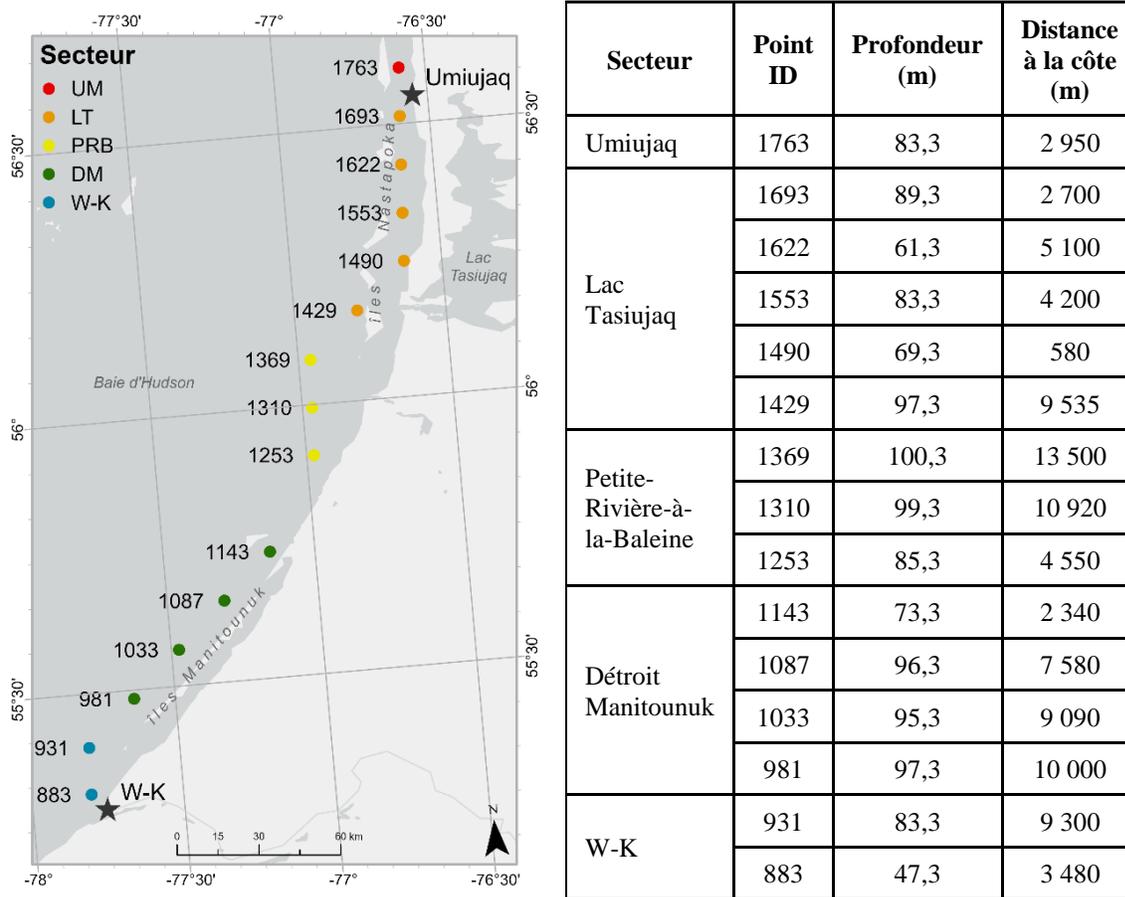


Figure 10. Position, profondeur et distance à la côte des points de grille du modèle WW3 sélectionnés. La position des points de grille est indiquée, tout comme le gradient de couleur représentant la latitude.

2.3.1 Glace de mer

Dans un contexte nordique comme la région de W-K à Umiujaq, la glace affecte la dynamique côtière la majeure partie de l'année. Il est assumé que l'érosion côtière se produit principalement dans des conditions libres de glace, conditions correspondant à une concentration de glace inférieure à 20% (Andrews *et al.*, 2018; Ruest *et al.*, 2016; Senneville & St-Onge Drouin, 2013). Il est important de documenter l'évolution de la période englacée afin d'analyser l'impact de ces variations spatiotemporelles sur l'évolution côtière.

La saison englacée a été documentée à l'aide de données distribuées par le service Copernicus sur les océans et la glace de mer européen (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS OSI TAC)*). Les données de glace de mer proviennent des observations satellitaires de micro-ondes passives acquises par plusieurs satellites, et retraitées par l'Agence européenne de météorologie satellitaire (EUMSTAT OSI SAF, 2023). Ces données nous informent sur le pourcentage de la couverture de la glace de mer quotidien moyenné sur une grille ayant une résolution spatiale de 25 km. Considérant cette résolution, les points de grille sélectionnés pour l'analyse de la glace de mer sont plus largement espacés que ceux du modèle WW3 (fig. 11A). Les données d'observations couvrent la période du 25 octobre 1978 au 31 décembre 2020. Pour les fins du projet, la période de 1991 à 2020 a été sélectionnée afin d'avoir des données quasiment quotidiennes (fig. 11B). Il est à noter que les données de pourcentage de couverture de glace représentent la glace de mer sur le domaine couvert par la grille spatiale et, par conséquent, n'est pas considérée comme de la glace ancrée à la côte.

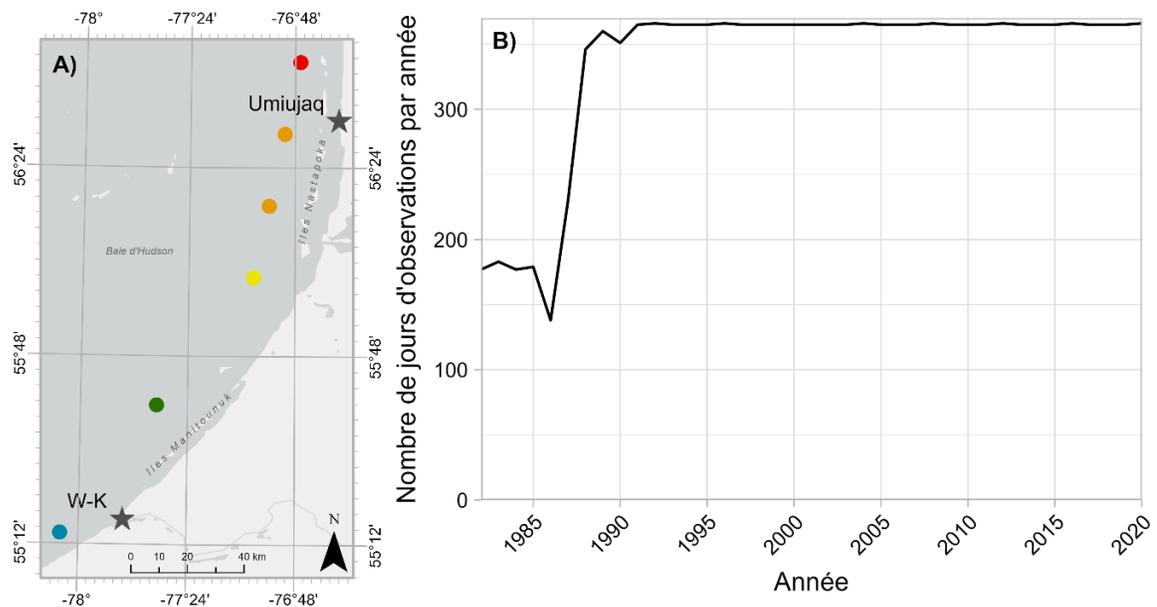


Figure 11. Localisation des points de grille de données d'observations de glace sélectionnés (A) et le nombre de jours d'observation enregistré par le CMEMS OSI TAC pour la période de 1982 à 2020 (B)

2.3.2 Climat de vagues

Le climat de vagues est un indicateur hydrodynamique ayant un impact non-négligeable sur l'exposition de la côte à l'érosion. Le climat de vagues modélisé au large a été décrit par la hauteur significative (H_s) et la période (T_{02}), qui sont des paramètres intégrés notamment aux équations de jet de rive, et la direction des vagues (*dir*).

Au large

Le flux d'énergie des vagues (*wave power*) est fonction de la hauteur des vagues mais aussi de leur période (Bosboom & Stive, 2022). Typiquement, plus la hauteur significative est importante, plus l'énergie libérée lors du déferlement sera importante. Par contre, à la côte, l'impact sera modulé par le niveau de marée et les processus de déferlement, ce qui dépend aussi de la morphologie et la bathymétrie.

Dans ce projet, H_s et T_{02} ont été considérées comme indicateurs principaux des conditions énergétiques, ce qui est typiquement fait pour l'analyse des événements extrêmes (Autret *et al.*, 2023; Didier *et al.*, 2020; Masselink *et al.*, 2016). Ce choix méthodologique assume que la zone côtière est homogène, et que l'exposition face à l'énergie des vagues est la même pour l'ensemble des secteurs à proximité. L'énergie libérée à la côte devient disponible pour mobiliser les sédiments.

Ces variables ne sont pas les seules influençant l'énergie libérée à la côte, surtout dans un environnement à fetch limité comme la baie d'Hudson ; leur direction a aussi un impact. Afin d'avoir un portrait complet du climat de vagues, il est important de caractériser leur direction dominante et de comparer celle-ci à l'orientation de la côte (Castanedo *et al.*, 2009; Depellegrin & Pereira, 2016).

Pour chaque point de grille sélectionné, les valeurs horaires et les moyennes mensuelles et annuelles de H_s , T_{02} et de direction des vagues lorsque la concentration de glace était inférieure à 20% ont été décrites. De cette manière, la description du climat de vagues se concentre sur les conditions où la glace de mer a peu d'impact sur leur formation et leur

propagation. Cette méthode permet de caractériser la variabilité annuelle et saisonnière du climat de vagues, mais aussi de détecter une variabilité spatiale à travers la région d'étude.

À la côte

Lors du déferlement, l'énergie des vagues est dissipée sous l'effet de la réduction de la profondeur d'eau, et une portion de cette énergie est convertie en énergie potentielle sous la forme de jet de rive (*wave runup*) (Stockdon *et al.*, 2006). Ce dernier correspond à la différence entre le niveau maximum atteint par l'eau suite au déferlement des vagues et le niveau moyen de la mer observé au repos (Stockdon *et al.*, 2006). Comme la position du déferlement des vagues fluctue en fonction du niveau d'eau et de la marée, le jet de rive peut atteindre l'ensemble de l'estran en fonction des conditions marégraphiques, et la zone supratidale lors des tempêtes. La limite atteinte par le jet de rive dépend des conditions de vagues au large et de la pente de la plage (Didier *et al.*, 2020; Stockdon *et al.*, 2006). N'ayant pas accès à la pente des plages de la région d'étude, le jet de rive a été calculé pour chaque point de grille à partir de l'équation de Stockdon *et al.* (2006) (Éq. 2) pour des plages microtidales. Malgré qu'elle soit adaptée à des plages dissipatives (indice Iribarren < 0.3), considérant que l'objectif est d'illustrer la variabilité du jet de rive selon un gradient latitudinal, il a été convenu que cette équation répondait aux objectifs de l'étude.

$$R_{2\%} = 0.043(H_0L_0)^{1/2} \quad \text{Éq. 2}$$

Le jet de rive ($R_{2\%}$) est fonction de la hauteur de vagues au large (H_0) et de la longueur d'ondes des vagues (L_0), où L_0 a été calculée à partir de la période T_{02} et de l'équation 3 (Éq. 3), où g correspond à la force gravitationnelle $9,8 \text{ m/s}^2$ (Stockdon *et al.*, 2006).

$$L_0 = \frac{(g \cdot T_{02}^2)}{2 \cdot \pi} \quad \text{Éq. 3}$$

2.3.3 Niveau d'eau

De manière complémentaire au climat de vagues, les données de niveaux d'eau issues du modèle ont été considérées. Ces données nous informent sur le niveau moyen de la mer

ainsi que sur les variations saisonnières pouvant être associées à la présence de glace ou à des systèmes tempétueux. Le niveau d'eau disponible dans WW3 (wlv), est le niveau d'eau au repos (*Still Water Level (SWL)*). Ce niveau d'eau considère l'influence des marées, des vents et des courants, mais exclut l'influence de la pression atmosphérique dans WW3. Afin de mieux comprendre la combinaison des niveaux d'eau et de l'effet des vagues, le jet de rive calculé empiriquement sur les données horaires a été additionné au *SWL* afin d'illustrer la variabilité spatiale des niveaux d'eau totaux (*NET*) le long du gradient latitudinal. Les *NET*, *SWL* et $R_{2\%}$ maximaux quotidiens et annuels ont été décrits pour la période de disponibilité des données (1982-2004). La modélisation WW3 n'inclut pas de projections des niveaux d'eau pour la période de 2005 à 2099. Ce ne sont donc que les données issues de la période rétrospective (*hindcast*) de la modélisation qui sont disponibles.

2.3.4 Régime de tempête

Afin de compléter le portrait des conditions hydrodynamiques de la région d'étude, il importe de s'intéresser aux conditions extrêmes. Dans un contexte où la durée de la période englacée est significativement diminuée, laissant, de manière générale, la saison automnale libre de glace, il est essentiel de s'intéresser à l'impact de ces changements sur le régime des tempêtes (Irrgang *et al.*, 2022; Lantuit *et al.*, 2012; Pearce *et al.*, 2011).

Dans ce projet, les tempêtes ont été définies à l'aide de la méthode du dépassement de seuil (Autret *et al.*, 2023; Burvingt *et al.*, 2017; Masselink *et al.*, 2016). Celle-ci se détaille en deux étapes. Lorsque H_s dépassait le 99^e percentile, une tempête était identifiée. Leur début et leur fin ont été identifiés par un seuil de 95^e percentile. Comme l'impact des tempêtes à la côte est influencé par leurs caractéristiques, pour chaque point de grille du modèle WW3 sélectionné, leur intensité en fonction de H_s et T_{02} , ainsi que leur direction ont été décrits. L'évolution du nombre de tempête au cours de la période et à travers la région d'étude, ainsi que le moment dans l'année auquel elles se produisent, ont été identifiés. Rappelons cependant qu'à partir de 2005, les tempêtes identifiées résultent entièrement de simulations prédictives du climat.

2.4 ÉVOLUTION DIACHRONIQUE DU TRAIT DE CÔTE

Les analyses d'évolution côtière ont été réalisées principalement sur les côtes meubles de la région d'étude. En raison de la variabilité des repères à utiliser pour la numérisation des côtes rocheuses sans falaise, mesurer l'évolution du trait de côte sur les environnements à plateforme et à rampe rocheuse implique un biais qui réside dans la capacité du photo-interprète à être systématique dans le traçage. Puisque la lithologie de cette région du Nunavik résiste efficacement à l'érosion des vagues, soit des roches de l'Archéen du bouclier canadien (Ch.1 (1.1); Fulton, 1989), l'évolution côtière des segments rocheux n'a pas été calculée dans ce projet.

2.4.1 Outil d'analyse

L'analyse de l'évolution de la côte a été réalisée à l'aide de l'outil *Digital Shoreline Analysis System* version 5.0 (DSAS), développé par la USGS, disponible dans le logiciel ArcMap 10.8.1. Cet outil calcule la différence de position entre les traits de côte sélectionnés le long de transects perpendiculaires au littoral et à une ligne de base selon un intervalle choisi (fig. 12).

Considérant l'ampleur de la région et des sous-secteurs d'étude, les taux d'évolution ont été calculés à partir de transects positionnés tous les 10 m perpendiculairement à la côte. Plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées afin d'avoir un portrait complet de l'évolution côtière : le mouvement net du trait de côte, la méthode des extrémités ainsi que la régression linéaire pondérée (Chenthamil Selvan *et al.*, 2014; Gibbs *et al.*, 2021; Luijendijk *et al.*, 2022; Niang, 2020; Pérez-Alberti *et al.*, 2011; Zagórski *et al.*, 2015).

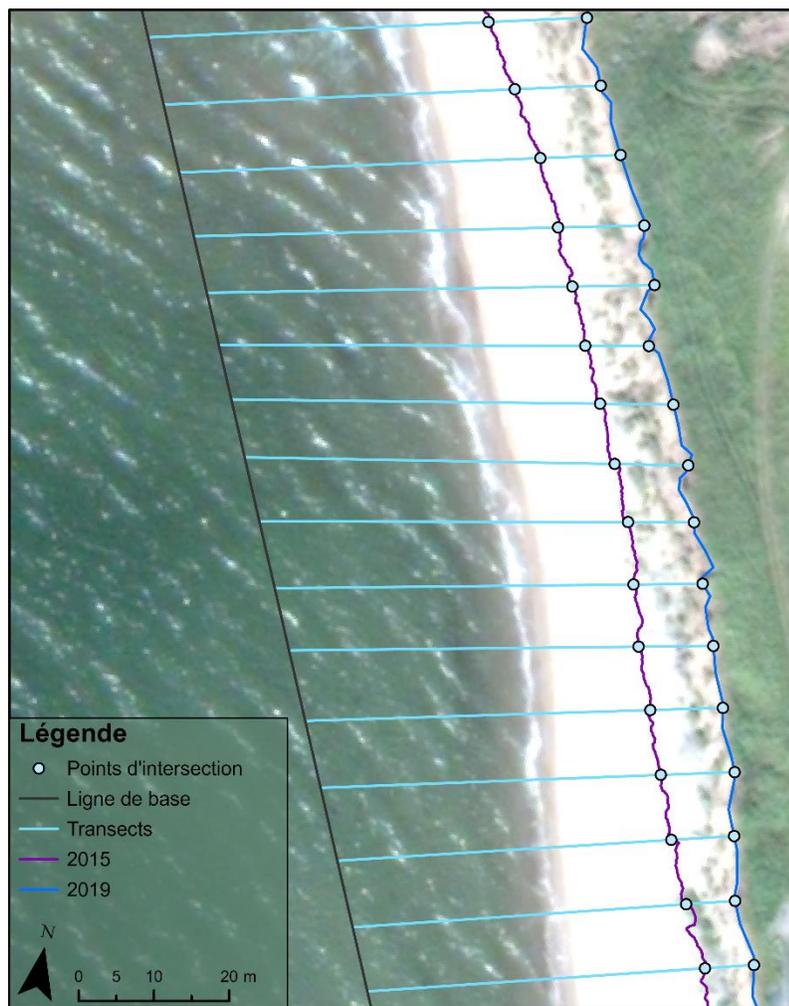


Figure 12. Exemple du fonctionnement de l'outil DSAS

2.4.2 Méthode des extrémités

Lorsque seulement deux dates étaient disponibles, la méthode de calculs des taux de migration entre les extrémités (*End Point Rate (EPR)*) a été employée. Cette méthode divise la mesure de déplacement net de la côte par le nombre d'années entre deux traits de côte, nous informant sur le taux de déplacement annuel en mètres par an (m an^{-1}). Le désavantage de cette méthode est qu'elle ne considère pas les traits de côte intermédiaires.

2.4.3 Régression linéaire pondérée

Lorsque plus de deux dates étaient disponibles, la régression linéaire pondérée (*Weighted Linear Regression* (WLR)) a été employée pour permettre une meilleure représentation de la variabilité temporelle à long terme de l'évolution du littoral. La méthode WLR met en relation la distance entre la ligne de base et chaque trait de côte en fonction de la date de chaque trait de côte (fig. 13). Elle permet de calculer une droite expliquant la position du trait de côte en fonction de la date, et ce pour chaque transect, tout en accordant un poids plus ou moins important à chaque position de trait de côte selon son incertitude (Himmelstoss *et al.*, 2021). L'incertitude des taux d'évolution calculés à partir de cette méthode est décrite à l'aide d'un intervalle de confiance de 95%. La pente de la droite de régression donne un taux d'avancée ou de recul de la côte en m an^{-1} . La figure 13 illustre la méthode de calcul des taux de migration à l'aide de la régression linéaire pondérée.

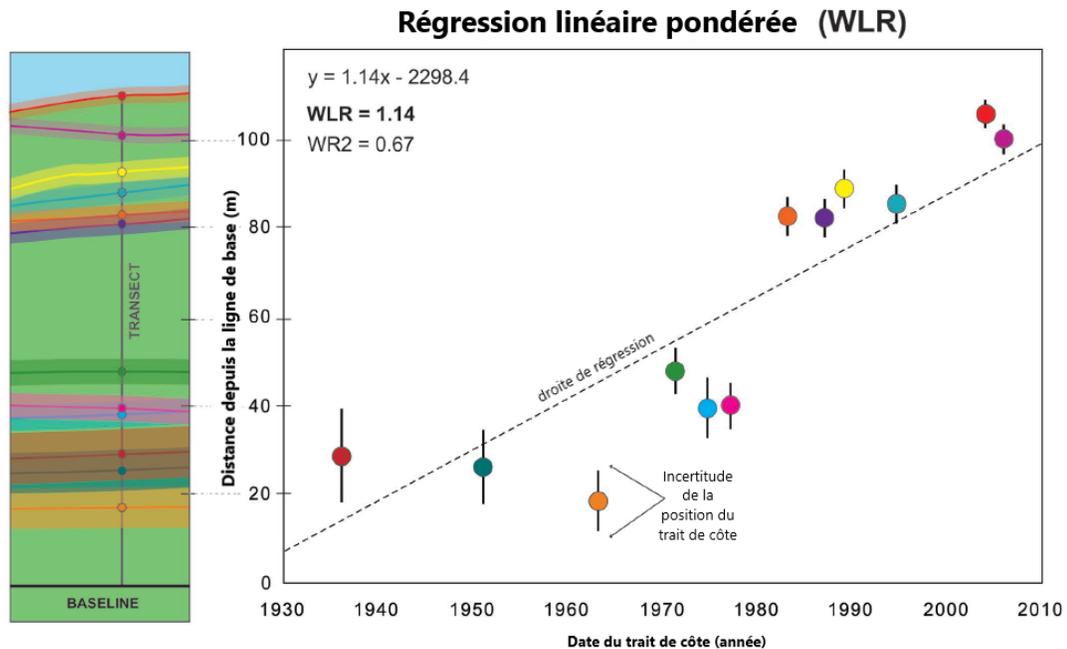


Figure 13. Exemple schématique du calcul de taux d'évolution pour un transect donné à partir de la méthode de régression linéaire pondérée, où la valeur de la pente de la droite de régression correspond au taux d'évolution (WLR) (adaptée de Himmelstoss *et al.*, 2021)

2.4.4 Variabilité à court terme

Bien que la régression linéaire pondérée permette d'obtenir un meilleur portrait de l'évolution à long terme du littoral, elle ne permet pas de quantifier des tendances non linéaires et des évènements morphogènes agissant à courts termes. Les différences de positions entre les traits de 1951, 1963 et 1972 sur la figure 13, qui suggèrent un inversement de l'évolution, en sont un bon exemple. Ainsi, pour les secteurs où plusieurs dates sont disponibles, la méthode EPR a été employée pour chaque paire d'années, des dates les plus anciennes aux plus récentes. Cette méthode permet d'observer la variabilité à court terme en mettant de l'avant des périodes d'érosion ou d'accumulation qui seraient camouflées par la régression linéaire (Gibbs *et al.*, 2021; Himmelstoss *et al.*, 2021). L'outil DSAS calcule une incertitude moyenne des taux d'évolution (EPR_{unc}) déterminés à partir de la méthode des extrémités pour un secteur donné en combinant l'incertitude (ET) des deux traits de côte impliqués et l'écart de date (Himmelstoss *et al.*, 2021) :

$$EPR_{unc} = \frac{\sqrt{ET_A^2 + ET_B^2}}{date_A - date_B} \quad \text{Éq. 4}$$

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre décrit de manière détaillée les types de côte de la région d'étude en précisant les types de zones intertidales, de zones supratidales et d'arrière-plage. Les conditions hydrodynamiques (vagues et niveaux d'eau), les tempêtes et la glace de mer sont ensuite décrites. La variabilité spatio-temporelle de ces variables est présentée afin de mettre en perspective les différences régionales des conditions environnementales et des forçages potentiellement impliqués dans l'évolution côtière. Enfin, la variabilité de l'évolution côtière sera décrite pour les secteurs Whapmagoostui-Kuujuarapik (W-K), détroit de Manitounuk (DM), Lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM).

3.1 VARIABILITÉ GÉOMORPHOLOGIQUE

La caractérisation linéaire a permis de couvrir près de 340 km de linéaire côtier rejoignant les communautés de W-K et d'Umiujaq. Des critères géomorphologiques et méthodologiques ont été utilisés pour procéder à la division de la région d'étude (Ch.1 - fig. 1 (p.9)). La géomorphologie, l'état, la pente et l'accessibilité de 1743 segments côtiers ont été décrits. La longueur moyenne de ces segments est de 194,5 m. La figure 14 montre que la longueur des segments suit une distribution de type log-normale où près de 41 % de ces segments ont une longueur inférieure à 100 m, dont 16,7 % ont une longueur inférieure à 50m. Très peu de segments ont une longueur supérieure à 800 m. La longueur maximale est de 3,7 km (non représenté sur la figure) et correspond à la flèche littorale de W-K.

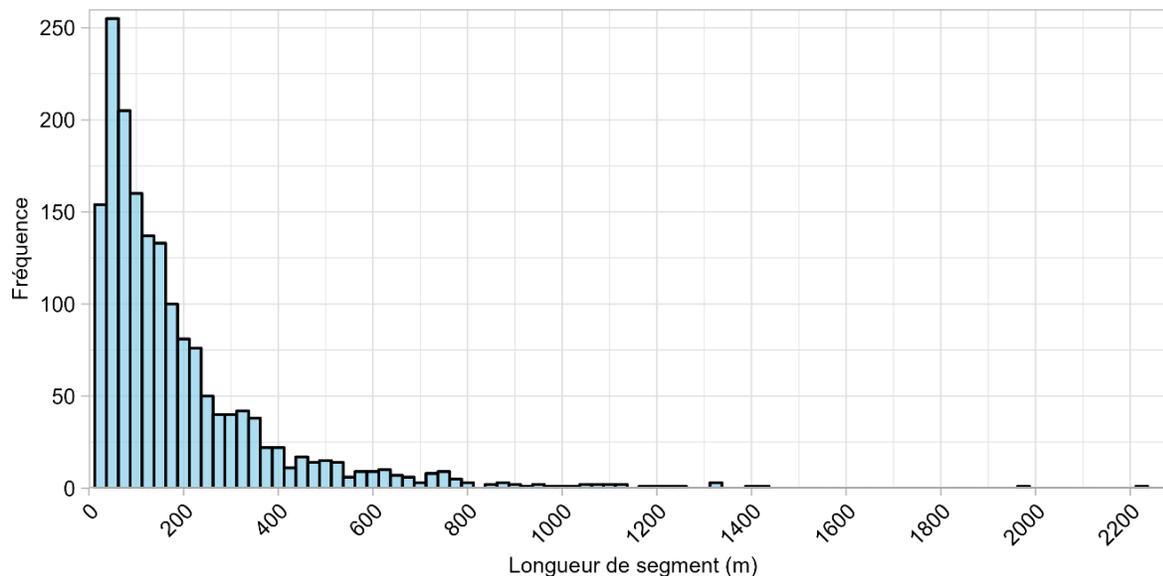


Figure 14. Histogramme de fréquence de la longueur des segments créés lors de la caractérisation linéaire

3.1.1 Type de côte

Les types de côte de la région d'étude varient selon les secteurs. La figure 15 présente les proportions des types de côte pour la région d'étude ainsi que chaque secteur d'étude. Les teintes chaudes (brun, orange, saumon, jaune et vert) sont associées à des types de côte meubles, tandis que les teintes froides sont associées à des types de côte rocheux. Le tableau 6 détaille ces proportions en précisant la longueur du linéaire côtier associée à chaque type de côte ainsi que le pourcentage du secteur qu'ils représentent.

La région d'étude est caractérisée par 95 % de côtes basses et 4 % de côtes à falaise, avec une dominance de côtes meubles (61,8%) comparativement aux côtes rocheuses (37 %). Les côtes artificialisées sont présentes seulement dans les secteurs de W-K et d'Umiujaq et représentent seulement 0,4 % de la région. Les côtes meubles sans falaise sont dominantes pour les trois secteurs au sud (W-K, DM, CHM). Pour les trois secteurs au nord, soit PRB, LT, et UM, les côtes rocheuses sans falaise dominent avec respectivement 59,5 %, 41 % et 34,5 %. La transition des types de côte secondaires entre le sud et le nord de la région

s'observe à la hauteur des secteurs CHM et PRB. En effet, leur second type de côte dominant est respectivement la « côte rocheuse (sans falaise) » et la « côte meuble (sans falaise) ».

Le secteur W-K présente la plus grande diversité de types de côte, avec des flèches littorales, des terrasses de plage et des côtes rocheuses en proportions similaires. Ce secteur a aussi un faible pourcentage des autres types de côtes utilisés dans la caractérisation linéaire. Le secteur DM est le second plus varié avec la présence de chaque type de côte, à l'exception des systèmes dunaires et des côtes artificialisées. Il est aussi celui avec le plus haut pourcentage de côte de marais maritime. La protection dont ce secteur bénéficie grâce aux îles Manitounuk facilite le développement de ce type de côte. Le secteur à l'extérieur de ces îles, bordant la baie d'Hudson (i.e. le secteur CHM), marque la transition vers des côtes meubles et rocheuses en proportions quasi-équivalentes. Contrairement au DM, le secteur CHM, bordant la baie d'Hudson, est caractérisé de côtes rocheuses sans falaise associées au revers de cuestas. Ce type de côte est le deuxième dominant pour le secteur CHM, derrière les côtes meubles sans falaise. Les côtes rocheuses sans falaise associées au revers des cuestas deviennent dominantes pour les secteurs PRB et LT. Malgré cela, les segments rocheux de ces secteurs demeurent entrecoupés de terrasses de plage et de côtes meubles sans falaise, deuxièmes types de côte dominants pour ces secteurs. Le court secteur UM a la géomorphologie la moins variée. Il est caractérisé en proportion quasi-équivalente par des segments de côte rocheuse (sans falaise) et de terrasse de plage.

Tableau 6. Longueur et proportion de chaque type de côte pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)

	W-K	DM	CHM	PRB	LT	UM	Total
	Longueur en km (% de chaque secteur)						
Falaise meuble	1,58 (3,27)	0,38 (0,38)	0	0	0	0	1,96 (0,58)
Flèche littorale	5,68 (11,78)	0,61 (0,62)	1,06 (2,86)	2,12 (4,75)	0	0	9,47 (2,79)
Tombolo / cordon littoral	1,61 (3,33)	2,70 (2,76)	0,07 (0,18)	1,05 (2,35)	0,32 (0,31)	0	5,74 (1,69)
Dune	1,09 (2,26)	0	0	0	0	0	1,09 (0,32)
Delta	0	0,80 (0,82)	0	0	0	0	0,80 (0,24)
Marais maritime	0,42 (0,87)	22,72 (23,19)	0	0	0,07 (0,07)	0	23,21 (6,85)
Côte meuble (sans falaise)	12,58 (26,08)	50,91 (51,97)	19,68 (52,95)	8,67 (19,46)	19,17 (18,44)	1,22 (17,34)	112,22 (33,11)
Terrasse de plage	10,68 (22,14)	6,20 (6,33)	0,96 (2,58)	0,89 (1,99)	30,82 (29,64)	2,36 (33,62)	51,90 (15,31)
Terrasse de plage avec base rocheuse	0,77 (1,60)	0,29 (0,30)	0	0,54 (1,21)	1,51 (1,46)	0,09 (1,35)	3,21 (0,95)
Côte rocheuse à estran meuble	3,07 (6,36)	3,51 (3,59)	3,11 (8,36)	2,63 (5,91)	5,22 (5,02)	0,34 (4,84)	17,88 (5,28)
Côte rocheuse (sans falaise)	9,31 (19,3)	5,91 (6,03)	11,41 (30,72)	26,52 (59,50)	42,68 (41,04)	2,43 (34,58)	98,26 (28,99)
Falaise / versant rocheux	0,51 (1,07)	2,99 (3,06)	0,48 (1,28)	1,69 (3,79)	3,46 (3,33)	0	9,13 (2,70)
Côte artificielle	0,62 (1,28)	0	0	0	0	0,58 (8,26)	1,20 (0,35)
Non-applicable	0,31 (0,64)	0,94 (0,96)	0,40 (1,06)	0,46 (1,04)	0,73 (0,70)	0	2,84 (0,84)

3.1.2 Type de zone intertidale

Le type de zone intertidale permet de préciser le type de côte et mieux comprendre la réponse potentielle de la côte aux conditions hydrodynamiques et aux déversements d'hydrocarbures. La figure 16 présente les proportions des types de zone intertidale pour la région d'étude ainsi que pour chaque secteur. Les teintes de beige et brun correspondent aux

substrats meubles de différentes tailles granulométriques en terminant par la barricade de blocs en gris pâle. Les teintes bleues sont associées aux substrats rocheux. Le tableau 7 détaille ces proportions en précisant la longueur du linéaire côtier associée à chaque type de zone intertidale, ainsi que le pourcentage du secteur qu'ils représentent.

Les secteurs plus au sud ont des zones intertidales à dominance meuble contrairement aux secteurs nord où les proportions entre les types meubles et rocheux se rapprochent, tel qu'était le cas avec les types de côte (fig. 15 et 16). La région d'étude a une dominance de zones intertidales meubles à 67 % comparativement aux zones intertidales rocheuses à 29 %. Ces pourcentages diffèrent de ceux du type de côte (61,8 % meuble et 37 % rocheux), ce qui indique que certaines côtes rocheuses de la région d'étude ont un estran meuble.

Les estrans sableux dominant dans le secteur W-K, suivi par des estrans à sédiments mixtes grossiers avec blocs. Le secteur DM est caractérisé par la plus grande variété de types de zones intertidales et est le seul à avoir des estrans vaseux-argileux. Il s'agit d'ailleurs du type dominant de ce secteur, suivi par les estrans à sédiments mixtes grossiers avec blocs. Près de la moitié du secteur CHM est caractérisé par ce type d'estran. Ensuite, ce secteur est caractérisé par des segments à estran sableux et d'autres à plateforme rocheuse en proportions similaires. Le secteur PRB est le plus rocheux de toute la région d'étude avec près du deux tiers de son linéaire côtier divisé entre des zones intertidales à plateforme et à rampe rocheuse. Le secteur LT a des proportions similaires de zones intertidales à estran sableux et à plateforme rocheuse. D'ailleurs, ce secteur est celui ayant la plus petite différence entre les proportions d'estrans de type meuble et rocheux avec respectivement 56,4 % et 40,7 %. Enfin, une dominance de segments à estran sableux s'observe dans le secteur UM, suivi par près d'un quart de son linéaire côtier à estran de plateforme rocheuse.

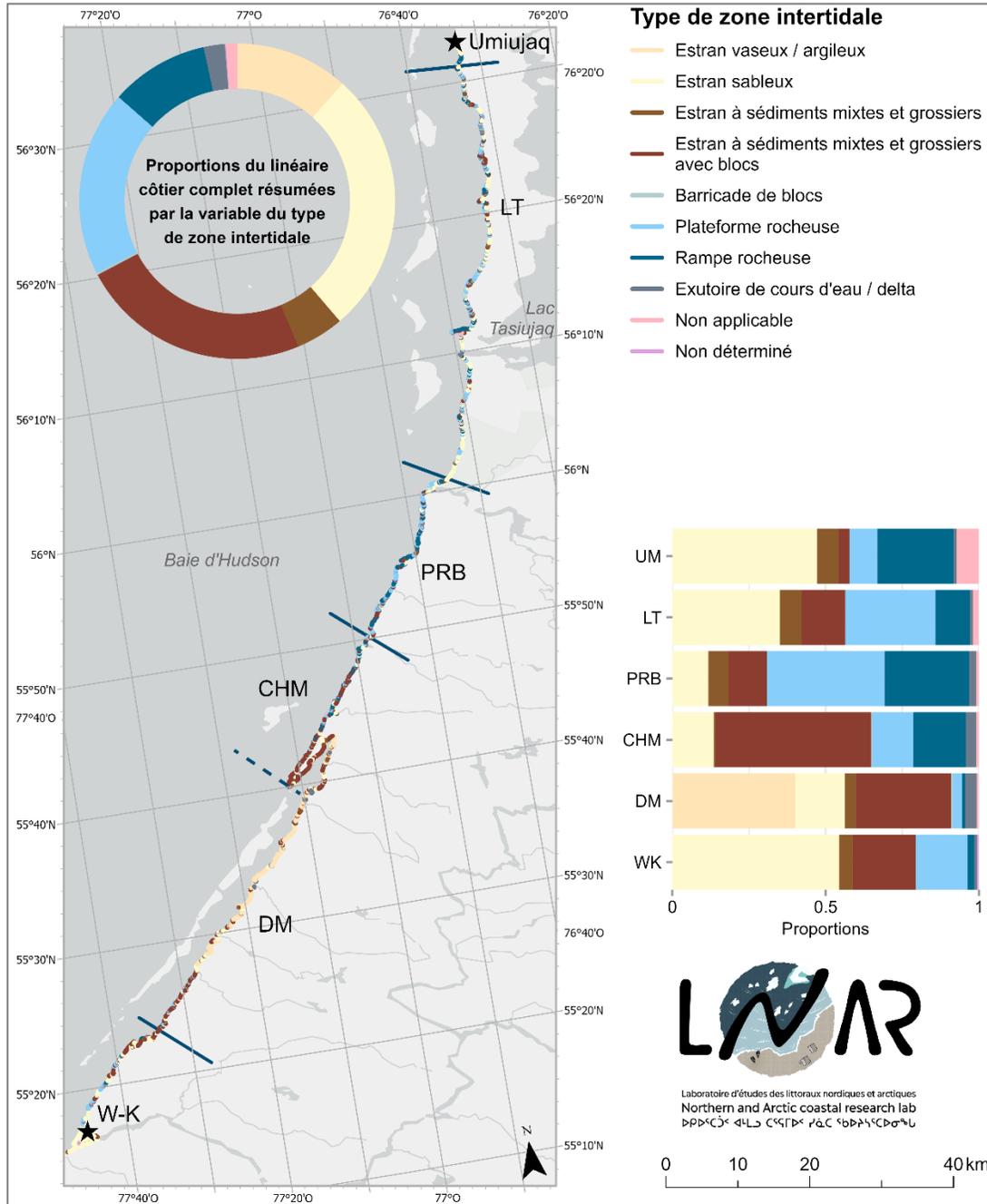


Figure 16. Proportions des types de zone intertidale pour l'entièreté de la région d'étude (haut-gauche : graphique beigne) et pour chaque secteur d'étude (bas-droite) ordonné du sud vers le nord (du bas vers le haut) en débutant par Whapmagoostui-Kuujuarapik (WK), le détroit de Manitounuk (DM), la côte hudsonnienne du détroit de Manitounuk (CHM), la Petite-rivière-à-la-Baleine (PRB), le secteur bordant le lac Tasiujaq (LT) et Umiujaq (UM)

Tableau 7. Longueur et proportion de chaque type de zone intertidale pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)

	W-K	DM	CHM	PRB	LT	UM	Total
	Longueur en km (% de chaque secteur)						
Estran vaseux-argileux	0	39,27 (40,09)	0	0	0,07 (0,07)	0	39,35 (11,61)
Estran sableux	26,23 (54,38)	15,79 (16,12)	5,02 (13,51)	5,23 (11,73)	36,41 (35,01)	3,31 (47,18)	91,99 (27,14)
Estran à sédiments mixtes grossiers	2,12 (4,39)	3,51 (3,59)	0,20 (0,53)	2,94 (6,59)	7,41 (7,13)	0,49 (6,93)	16,66 (4,92)
Estran à sédiments mixtes grossiers avec blocs	9,94 (20,61)	30,51 (31,14)	18,88 (50,83)	5,59 (12,55)	14,79 (14,22)	0,26 (3,66)	79,97 (23,59)
Barricade de blocs	0	0,56 (0,58)	0,11 (0,31)	0	0	0	0,68 (0,20)
Plateforme rocheuse	8,15 (16,89)	2,95 (3,01)	4,98 (13,41)	17,1 (38,37)	30,63 (29,46)	0,64 (9,12)	64,45 (19,00)
Rampe rocheuse	1,09 (2,27)	0,98 (1,00)	6,38 (17,18)	12,31 (27,61)	11,71 (11,26)	1,74 (24,84)	34,22 (10,10)
Exutoire de cours d'eau / delta	0,41 (0,86)	3,69 (3,77)	1,25 (3,36)	1,01 (2,26)	0,94 (0,90)	0,07 (0,98)	7,37 (2,18)
Non-déterminé	0,29 (0,60)	0	0	0	0	0	0,29 (0,08)
Non-applicable	0	0,69 (0,70)	0,32 (0,87)	0,39 (0,88)	2,04 (1,96)	0,51 (7,28)	3,95 (1,17)

3.1.3 Type de zone supratidale (haut de plage)

Le type de zone supratidale permet de compléter le type d'estran afin d'améliorer la compréhension de la réponse de la côte aux conditions hydrodynamiques, particulièrement en cas de tempêtes. Cette zone côtière est sujette à évoluer, et potentiellement s'éroder, selon les différents climats de vagues et de niveaux d'eau. La nature des sédiments caractérisant, la zone supratidale influence l'exposition de la côte à l'érosion. La figure 17 présente les proportions des types de zone supratidale pour la région d'étude ainsi que pour chaque secteur. Les teintes de beige et de brun correspondent aux substrats meubles de différentes tailles granulométriques, les teintes vertes à des types végétalisés, les teintes bleues aux substrats rocheux et les couleurs gris et noir représentent respectivement les structures

anthropiques perméables et imperméables. Le tableau 8 détaille ces proportions en précisant la longueur du linéaire côtier associée à chaque type de zone supratidale, ainsi que le pourcentage du secteur qu'ils représentent.

De manière similaire aux variables de type de côte et de zone intertidale, la zone supratidale de la région d'étude a une dominance meuble (65 %) comparativement aux zones rocheuses (34 %). Ces dernières se concentrent dans le nord de la région, tandis que l'inverse s'observe pour les zones meubles. La figure 17 montre que la variété des types de zone supratidale est plus grande pour les secteurs au sud que ceux au nord.

Le secteur W-K a une dominance de haut de plage sableux, suivi par les plateformes rocheuses. Les autres types de zones supratidales de ce secteur sont présents en proportions similaires. Le secteur DM est celui ayant la plus grande variété de zones supratidales. Il est caractérisé en proportions similaires par des marais maritimes et des hauts de plage de sédiments mixtes. Comme pour la zone intertidale, le secteur DM est le seul à présenter des segments supratidaux vaseux-argileux, bien qu'ils soient en très faible proportion (0,08 %). Le secteur CHM, malgré qu'un tiers de sa zone supratidale soit rocheuse (plateforme et rampe rocheuse confondues), est caractérisé en dominance par des hauts de plage à sédiments mixtes (38 %) et sableux (25 %). Tout comme pour les types de côte et d'estran, le secteur PRB est le seul à avoir une dominance de côte rocheuse (63,5 %) avec, en proportions équivalentes, les plateformes et les rampes rocheuses. Ce secteur présente tout de même 18% de hauts de plage à sédiments mixtes. Le secteur LT demeure celui ayant la plus petite différence entre le linéaire côtier meuble et rocheux avec respectivement 52,5 % et 46,8 %. Il est dominé par des hauts de plage sableux ainsi que des plateformes rocheuses. Enfin, le secteur UM a aussi des proportions similaires de segments meubles et rocheux tout en ayant le haut de plage sableux comme type dominant (39,5 %), suivi des rampes rocheuses (26%).

Tableau 8. Longueur et proportion de chaque type de zone supratidale pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)

	W-K	DM	CHM	PRB	LT	UM	Total
	Longueur en km (% de chaque secteur)						
Berge vaseuse-argileuse	0	0,08 (0,08)	0	0	0	0	0,08 (0,02)
Haut de plage sableux	23,32 (48,35)	18,24 (18,63)	9,11 (24,52)	5,62 (12,62)	38,55 (37,07)	2,77 (39,52)	97,62 (28,80)
Haut de plage de cailloux-galets	1,64 (3,40)	0,78 (0,80)	0	0,04 (0,08)	0	0,05 (0,67)	2,51 (0,74)
Haut de plage de blocs	3,17 (6,57)	6,59 (6,73)	0,49 (1,31)	1,74 (3,90)	1,27 (1,22)	0,04 (0,63)	13,30 (3,92)
Haut de plage de sédiments mixtes	3,35 (6,95)	23,86 (24,36)	14,25 (38,34)	8,05 (18,05)	14,51 (13,95)	0,78 (11,09)	64,80 (19,12)
Falaise meuble	0	1,17 (1,19)	0	0	0	0	1,17 (0,34)
Berge végétalisée	1,09 (2,27)	3,01 (3,07)	0,48 (1,30)	0,33 (0,73)	0	0,09 (1,30)	5,00 (1,48)
Basse toundra inondée	0	0,11 (0,11)	0	0	0	0	0,11 (0,03)
Marais maritime	2,90 (6,01)	26,56 (27,12)	0,13 (0,34)	0	0,07 (0,07)	0	29,66 (8,75)
Côte de tourbe	0	5,54 (5,66)	0	0	0,19 (0,18)	0	5,73 (1,69)
Plateforme rocheuse	8,13 (16,85)	4,95 (5,06)	4,67 (12,57)	13,88 (31,15)	28,78 (27,67)	0,86 (12,27)	61,27 (18,08)
Rampe rocheuse	3,43 (7,12)	3,76 (3,84)	7,07 (19,03)	13,43 (30,13)	16,86 (16,21)	1,84 (26,25)	46,40 (13,69)
Falaise rocheuse	0,69 (1,42)	2,1 (2,14)	0,57 (1,53)	1,02 (2,29)	3,02 (2,91)	0	7,39 (2,18)
Structure anthropique perméable	0,09 (0,18)	0	0	0	0	0,58 (8,26)	0,67 (0,20)
Structure anthropique imperméable	0,11 (0,24)	0	0	0	0	0	0,11 (0,03)
Exutoire de cours d'eau	0,31 (0,64)	1,09 (1,12)	0,40 (1,06)	0,46 (1,04)	0,73 (0,70)	0	2,99 (0,88)
Non-applicable	0	0,12 (0,12)	0	0	0	0	0,12 (0,03)

3.1.4 Type d'arrière-plage

L'arrière-plage est susceptible d'être exposée aux conditions hydrodynamiques causant un recul de la côte, telles que la houle des tempêtes extrêmes. Le type d'arrière-plage a aussi un impact sur l'accessibilité à la côte. Les proportions de type d'arrière-plage pour la région d'étude, ainsi que pour chaque secteur, sont présentées à la figure 18 avec des teintes de vert pour les environnements végétalisés, les teintes turquoise pour les milieux riches en eau, les teintes terreuses (orange, beige et brun) pour les milieux plutôt sableux, mais non-végétalisé, et les teintes bleues pour les environnements rocheux. Les proportions noires sont associées aux zones artificialisées des communautés de W-K et Umiujaq. Le tableau 9 détaille ces proportions en précisant la longueur du linéaire côtier associée à chaque type d'arrière-plage, ainsi que le pourcentage du secteur qu'ils représentent.

La tendance des zones intertidales et supratidales se maintient au niveau de l'arrière-plage en ce qui concerne les proportions des types meubles et rocheux (fig. 18). Les segments côtiers à l'estran et à la zone supratidale caractérisés par des plateformes et des rampes rocheuses ont, de manière générale, une arrière-plage du même type. Toutefois, la végétation de type bryoïde, caractérisée par la végétation courte comme les lichens et les bryophytes (mousses, sphaignes, etc.) a tendance à se retrouver sur les plateformes et les rampes rocheuses ou dans les cavités de ces dernières. Ainsi, pour des secteurs comme CHM, LT et UM, la figure 18 montre que les bryoïdes empiètent sur les proportions qui sont représentées par les types rocheux dans les figures 15 à 17 pour les variables de type de côte, d'estran et de zone supratidale. Néanmoins, l'arrière-plage dominante de la région d'étude est le type herbacé (32 %).

La plus grande variété d'arrière-plage se retrouve dans le secteur W-K. La végétation herbacée et les forêts sont les types dominants. Le secteur DM a aussi une dominance d'arrière-plage de types herbacé et forestier, mais en proportions équivalentes. Ce secteur est le seul à être caractérisé par des formes issues de la dégradation du pergélisol (9 %) et, en particulier, des mares de thermokarst. À l'exception des zones herbacées et forestières, ce

sont les milieux humides qui prédominent l'arrière-plage du secteur DM. Le secteur CHM est dominé par les bryoïdes et les rampes rocheuses. L'exposition de ce secteur côtier aux conditions dynamiques et parfois hostiles de la baie d'Hudson favorise le développement de végétation courte comme les bryoïdes en opposition à de la végétation herbacée, arbustive ou forestière. Le secteur PRB est marqué par une dominance de rampes rocheuses en arrière-plage, en cohérence avec les types de zones intertidales et supratidales discutés précédemment. En proportion moindre, l'arrière-plage de type herbacé est tout de même notable pour le secteur PRB, végétation caractéristique des côtes de terrasses de plage. Pour le secteur LT, les arrières-plages rocheuses, correspondant aux plateformes et aux rampes rocheuses, caractérisent près de 38 % du linéaire côtier de ce secteur, soit un pourcentage similaire aux arrières-plages de végétation herbacée. Ces proportions sont en cohérence avec les types de côte, où les segments de côte rocheuse et de terrasse de plage se succèdent. La moitié du linéaire côtier du secteur UM est caractérisée en proportions équivalentes par une arrière-plage herbacée et de rampe rocheuse. Ce secteur, par sa longueur significativement inférieure aux autres, est marqué par le plus haut pourcentage de zones artificialisées en arrière-plage.

En somme, les résultats montrent que la côte est de la baie d'Hudson n'est pas que rocheuse. En fait, l'ensemble des secteurs côtiers de W-K à Umiujaq ont une dominance de côtes meubles, à l'exception du secteur PRB. Ce dernier est aussi le seul à ne pas bénéficier de la protection d'îles. Les secteurs au nord (PRB, LT et UM) ont des proportions équivalentes de côtes meubles et rocheuses, soit principalement des rampes rocheuses entrecoupées de plages de sable, de sédiments mixtes et de blocs. Les secteurs sud (W-K et DM) sont dominés par des côtes meubles de types variés, dont principalement des côtes basses à dominance sableuse comme des systèmes de flèches littorales et des tombolos, ainsi que certains systèmes issus d'environnements protégés comme des marais maritimes et de larges estrans de sédiments fins. Le secteur DM est le seul avoir des berges et des estrans vaseux-argileux ainsi qu'une arrière-plage dominée par des milieux humides où on retrouve des formes de pergélisol en dégradation.

Tableau 9. Longueur et proportion de chaque type d'arrière-plage pour chaque secteur de la région d'étude du sud vers le nord (de la gauche vers la droite)

	W-K	DM	CHM	PRB	LT	UM	Total
	Longueur en km (% de chaque secteur)						
Herbacé	20,57 (42,65)	26,15 (26,69)	7,79 (20,97)	9,25 (20,76)	42,6 (40,96)	1,91 (27,17)	108,27 (31,94)
Terrain d'arbrisseaux	1,98 (4,10)	6,17 (6,30)	0	0,29 (0,65)	3,30 (3,17)	0,67 (9,55)	12,40 (3,66)
Forêt	9,81 (20,34)	26,29 (26,84)	0,09 (0,24)	0,70 (1,58)	0,76 (0,73)	0	37,66 (11,11)
Bryoïde	0	0,42 (1,45)	14,38 (38,70)	3,10 (6,96)	13,97 (13,43)	1,26 (17,95)	34,14 (10,07)
Surface dénudée	0	0	0,63 (0,17)	0,86 (1,93)	1,18 (1,13)	0,22 (3,12)	2,32 (0,07)
Buttes de pergélisol	0	0,08 (0,08)	0	0	0	0	0,08 (0,02)
Plateau de pergélisol	0	0,43 (0,44)	0	0	0	0	0,43 (0,13)
Milieu humide	1,62 (3,35)	15,06 (15,38)	0,43 (1,16)	0,60 (1,34)	1,38 (1,33)	0	19,09 (5,63)
Mares de thermokarst	0	8,24 (8,41)	0	0	0	0	8,24 (2,43)
Marécage	0,10 (0,21)	0	0	0	0	0,95 (1,35)	0,20 (0,06)
Plan d'eau	0,27 (0,56)	0,94 (0,96)	0,40 (1,06)	1,05 (2,36)	1,00 (0,97)	0,07 (0,98)	3,73 (1,10)
Talus meuble	0,96 (2,00)	5,13 (5,23)	0	0	0	0	6,09 (1,80)
Dune	1,09 (2,26)	0	0	0	0	0	1,09 (0,32)
Falaise meuble	0,89 (1,84)	0	0	0	0	0	0,89 (0,26)
Plateforme rocheuse	4,25 (8,81)	3,91 (3,99)	1,69 (4,55)	7,26 (16,29)	18,56 (17,85)	0	35,67 (10,52)
Rampe rocheuse	5,86 (12,16)	2,76 (2,82)	11,71 (31,53)	20,74 (46,53)	20,74 (19,94)	1,68 (23,89)	63,50 (18,73)
Falaise rocheuse	0	1,39 (1,41)	0,60 (1,61)	0,71 (1,60)	0,50 (0,48)	0	3,19 (0,94)
Zone artificialisée	0,82 (1,71)	0	0	0	0	1,12 (15,98)	1,95 (0,57)

3.2 VARIABILITÉ DE LA GLACE DE MER ET DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

Les données d'observations satellitaires de glace de mer et de modélisation du climat de vagues et des niveaux d'eau sont analysées dans cette section. Le gradient latitudinal est exprimé de manière sud-nord par un gradient de couleur évoluant du bleu vers le rouge pour l'ensemble des variables présentées.

3.2.1 Glace de mer

Les conditions de glace de mer au large de la région d'étude pour la période de 1991 à 2020 proviennent des données issues de micro-ondes passives satellitaires (Ch.2 (2.3.1)). Un seuil de concentration de glace à 20% a été utilisé afin de qualifier la présence ou l'absence de glace de mer. Chaque journée ayant un pourcentage de couverture de glace supérieur à 20% a été comptée comme une journée englacée. Ce dénombrement est représenté à l'aide d'une série temporelle dans la figure 19A pour chaque point de grille sélectionné. La couleur des lignes correspond au point de grille localisé sur la carte.

La durée de la saison englacée au cours de la période d'étude est de l'ordre de 190 jours par an et ne varie pas de manière linéaire ($R^2 = 0,003$; $p\text{-value} > 0,001$) (fig. 19A). La proximité des lignes illustrant l'évolution temporelle du nombre de jours de glace pour chaque point de grille montre une faible variabilité spatiale dans la durée de la saison englacée (fig. 19A). La distinction se fait principalement pour les courbes des points les plus au sud et au nord, soit ceux à proximité des communautés de W-K et d'Umiujaq (fig. 19A; courbes bleue et rouge respectivement). Néanmoins, la durée de la saison englacée à proximité de ces deux communautés demeure fortement corrélée ($r = 0,9$; $p\text{-value} < 0,001$) (fig. 19B). Pour la période de 1991 à 2020, il y a en moyenne 11,6 jours de glace de plus par année pour le secteur W-K en comparaison à celui d'Umiujaq, soit environ 6,3 % plus de jours englacés qu'au nord.

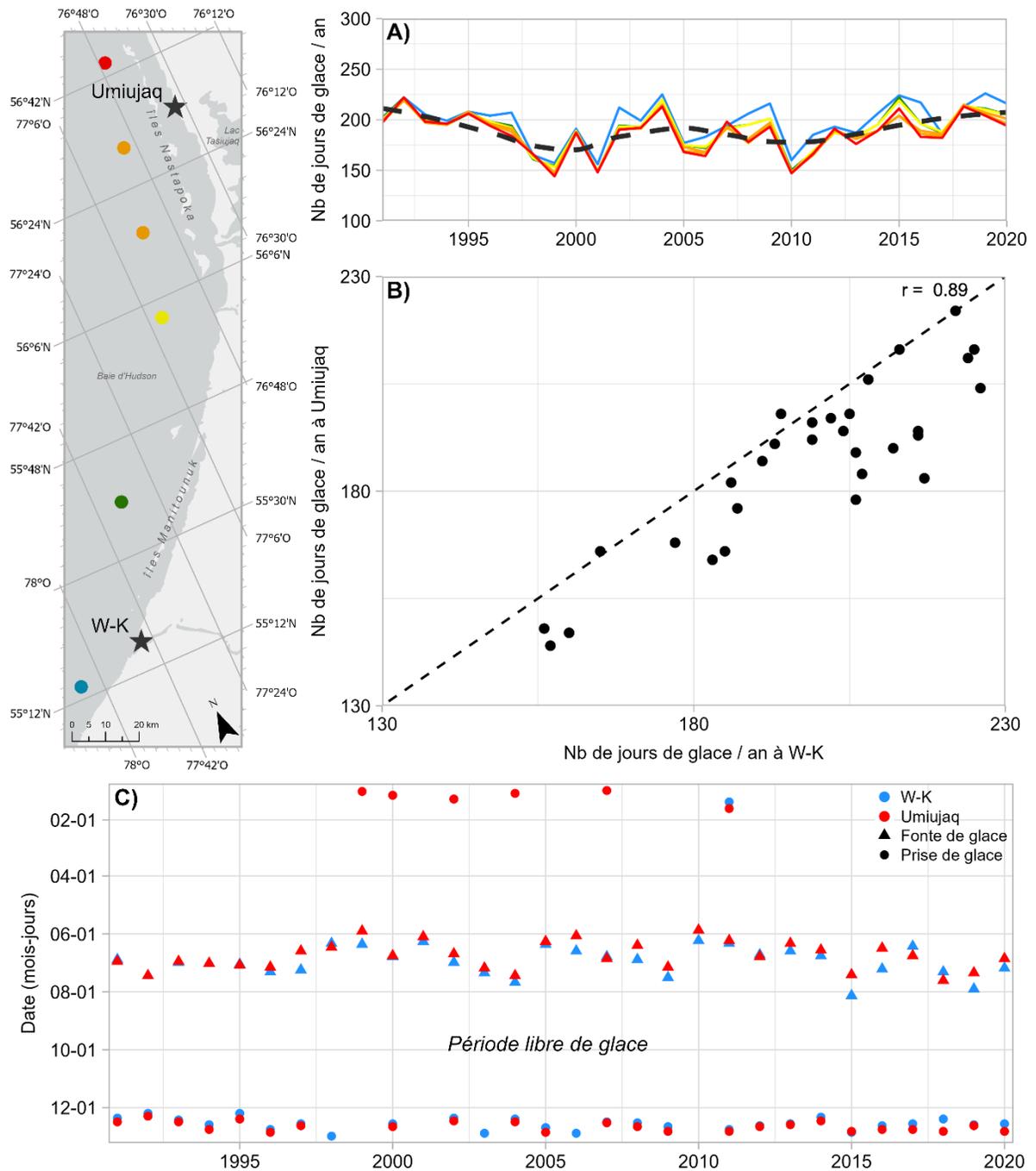


Figure 19. Variations spatio-temporelles de la concentration de glace de mer. A) Évolution du nombre de jours de glace par année pour la période de 1991 à 2020 ; B) Distribution du nombre de jours de glace annuel pour les secteurs de W-K et d'Umiujaq ; C) Dates de prise et de fonte de glace annuelles pour les secteurs de W-K et d'Umiujaq

La variabilité spatio-temporelle de la saison libre de glace pour les communautés de W-K (bleu) et d'Umiujaq (rouge) est illustrée par l'identification des dates d'englacement et de fonte de glace, à l'aide respectivement de cercles et de triangles, pour la période de 1991 à 2020 (fig. 19C). La date d'englacement a été identifiée comme la 7^e journée consécutive ayant une concentration de glace supérieure à 20%, tandis que la date de fonte de glace a été identifiée comme la 7^e journée consécutive ayant une concentration de glace inférieure à 20% (Andrews *et al.*, 2018). Trois hivers se démarquent, tant au sud qu'au nord, par leur date tardive de prise de glace : 1999-2000, 2001-2002 et 2010-2011 (fig. 19C). La saison d'eau libre de l'année 2010 a d'ailleurs été la plus longue pour les secteurs W-K et UM avec respectivement une fonte le 8 juin et le 28 mai 2010 et une prise de glace les 13 et 20 janvier 2011, soit 219 et 237 jours sans glace. Cette saison d'eau libre est 2,5 à 3 mois plus longue que le minimum enregistré en 1992. Trois autres hivers se démarquent par leur date tardive de prise de glace, mais que pour le secteur UM : 1998-1999, 2003-2004, 2006-2007.

Il y a un léger décalage dans les moments de prise et de fonte de glace entre 1991 et 2020. La prise de glace s'est faite respectivement 7 jours et 4 jours plus tard pour les secteurs W-K et UM en 2019 comparativement à 1991. Pour la fonte de glace, elle s'est produite 8 jours plus tôt pour le secteur W-K en 2020 comparativement à 1992, et 19 jours plus tôt pour le secteur UM. La saison englacée de 2019-2020 a donc été de 15 à 22 jours plus courte que la saison englacée de 1991-1992. Puisqu'il n'y a aucune tendance significative dans l'évolution de la durée de la saison englacée pour la période de 1991 à 2020 (fig. 19A), il est possible que cette différence ne soit liée qu'à une variabilité interannuelle.

3.2.2 Climat de vagues

Le climat de vagues est décrit par les valeurs horaires de la hauteur significative des vagues (H_s), leur direction et leur période (T_{02}) lorsque la concentration de glace est inférieure à 20 % (fig. 20). Afin de représenter ces variables, un diagramme en boîte et moustache a été réalisé pour chaque point de grille du modèle WW3 sélectionné. Un point de couleur par

diagramme représente la valeur moyenne horaire. La couleur est associée au point de grille du modèle localisé sur la carte à gauche de la figure (fig. 20).

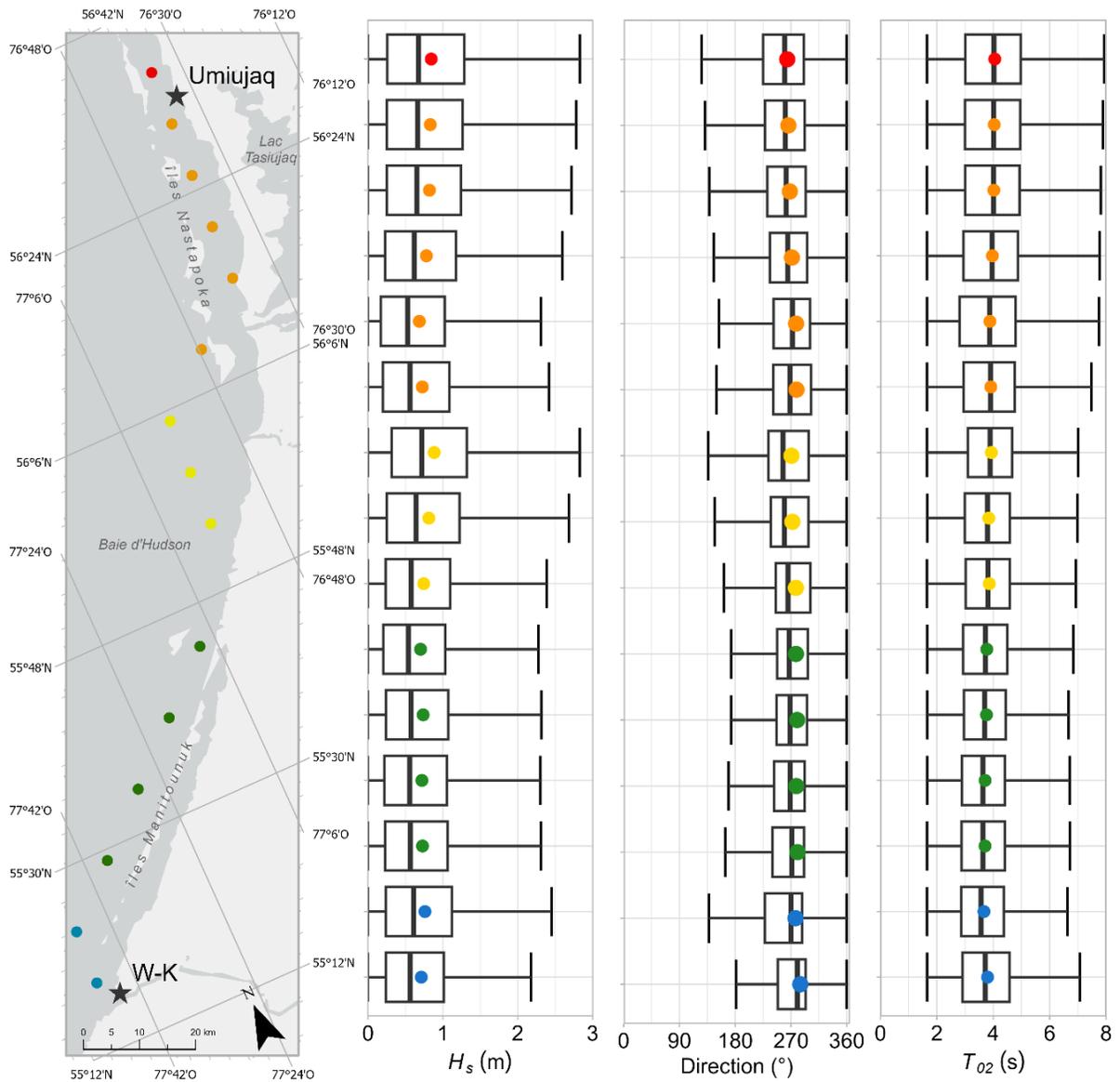


Figure 20. Distribution des valeurs horaires de hauteur significative (H_s), de direction et de période (T_{02}) de vagues lorsque la concentration de glace est inférieure à 20 % pour chaque point de grille du modèle WW3 sélectionné. Les points de couleurs représentent les valeurs moyennes en bleu pour le secteur W-K, en vert pour le secteur DM, en jaune pour le secteur PRB, en orange pour le secteur LT et en rouge pour le secteur UM

Les distributions des données horaires du climat de vagues montrent qu'il est relativement homogène à travers la région d'étude. Pour l'ensemble des secteurs, l'étendue des valeurs de H_s moyennes n'est que de 25 cm, et pour les hauteurs maximales moyennes, que de 78 cm (limite de la moustache supérieure). L'ensemble des points de grille sélectionnés présente une distribution log-normale des données de hauteur de vagues avec une asymétrie positive, c'est-à-dire une concentration de vagues inférieures à 1,4 m et une petite quantité de vagues aux hauteurs très élevées. La variabilité latitudinale s'observe surtout au niveau des hauteurs extrêmes de vagues (pas représentées dans la figure). L'étendue des valeurs extrêmes atteint 3,2 m, où les hauteurs maximales sont observées dans le secteur UM et les valeurs minimales dans le secteur DM. La différence de hauteur de vagues extrêmes entre le point le plus au nord et le point le plus au sud est de 2,40 m.

La direction moyenne des vagues ne varie pas de manière significative à travers la région d'étude. L'étendue des valeurs moyennes est de seulement $21,1^\circ$. La direction dominante pour l'ensemble des secteurs est l'ouest, avec une direction moyenne variant entre $263,9^\circ$ à UM (nord) et $284,9^\circ$ à W-K (sud). Cependant, l'étendue des valeurs directionnelles modélisées est plus grande pour le secteur UM que celui de W-K avec une différence de $55,4^\circ$.

La période des vagues (T_{02}) suit la même tendance que la hauteur et la direction : la latitude a un impact mineur sur cette variable (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,008$). L'ensemble des points de grille sélectionnés présente une distribution de données avec une asymétrie positive. Les trois quarts des vagues ont une T_{02} entre 1,7 s et 5 s. Les valeurs de T_{02} moyennes oscillent entre 3,7 et 4,1 s à travers la région d'étude, soit un écart de 0,4 s. Bien qu'il n'y ait qu'un petit nombre de valeurs très élevées, comme pour la hauteur des vagues, c'est au niveau de ces valeurs que s'observe la variabilité latitudinale. Il y a un écart de 1,3 s entre la période maximale moyenne du secteur Umiujaq et celle du secteur W-K, correspondant respectivement à la valeur maximale et minimale de la région d'étude. Au niveau des valeurs extrêmes, l'écart atteint 2,8 s, où les valeurs maximales sont observées au sud du secteur LT et les valeurs minimales au sud du secteur PRB.

Variabilité mensuelle

Afin d'avoir une meilleure compréhension de la variabilité du climat de vagues au cours d'une année, les moyennes mensuelles de H_s , de direction et de T_{02} lorsque la concentration de glace est inférieure à 20 % ont été étudiées. L'étendue des maximums et minimums moyens mensuels est représentée par les barres autour des points (fig. 21).

À l'exception des mois de décembre à avril, le secteur UM est celui présentant les H_s moyennes et maximales les plus élevées, suivi de près par les secteurs LT et PRB (fig. 21A). Lors de la saison libre de glace (3.2.1), H_s augmente pour les mois de juin à septembre, suivi d'une stabilisation entre septembre et novembre. Les vagues des mois de décembre et janvier ont un H_s supérieur à celles des mois d'hiver (février à avril), puisque le couvert de glace n'est pas complètement consolidé. Les vagues enregistrées au mois de décembre ont des H_s maximales moyennes d'environ 3 m avec un gradient latitudinal inversé, où les secteurs W-K et DM ont les H_s les plus élevées. Cette tendance se maintient pour le mois de janvier.

La direction moyenne des vagues ($275,6^\circ$) pour l'ensemble de la région d'étude est stable, particulièrement pour les mois libres de glace de mer (juillet à décembre) (fig. 21B). Les périodes de transition où la glace commence à se consolider et à se déconsolider (janvier, mai et juin), présentent des moyennes de direction des vagues très variées entre le nord-ouest et le sud, contrairement à la saison d'eau libre où les vagues ont une direction dominante de l'ouest.

En cohérence avec H_s et la direction des vagues, T_{02} moyen est similaire pour les mois d'août à décembre variant de 3,8 s à 4,3 s (fig. 21C). L'écart de T_{02} moyen à travers la région d'étude s'accroît au cours des mois de septembre à novembre avec des moyennes augmentant pour le secteur UM (4,2 s à 4,6 s), contrairement aux secteurs sud qui demeurent stables (3,8 s à 3,9 s). Néanmoins, T_{02} maximums sont observés lors des mois de juillet et août pour l'ensemble des secteurs, avec des valeurs maximales allant jusqu'à 13,6 s dans le secteur LT (pas représentées dans la figure).

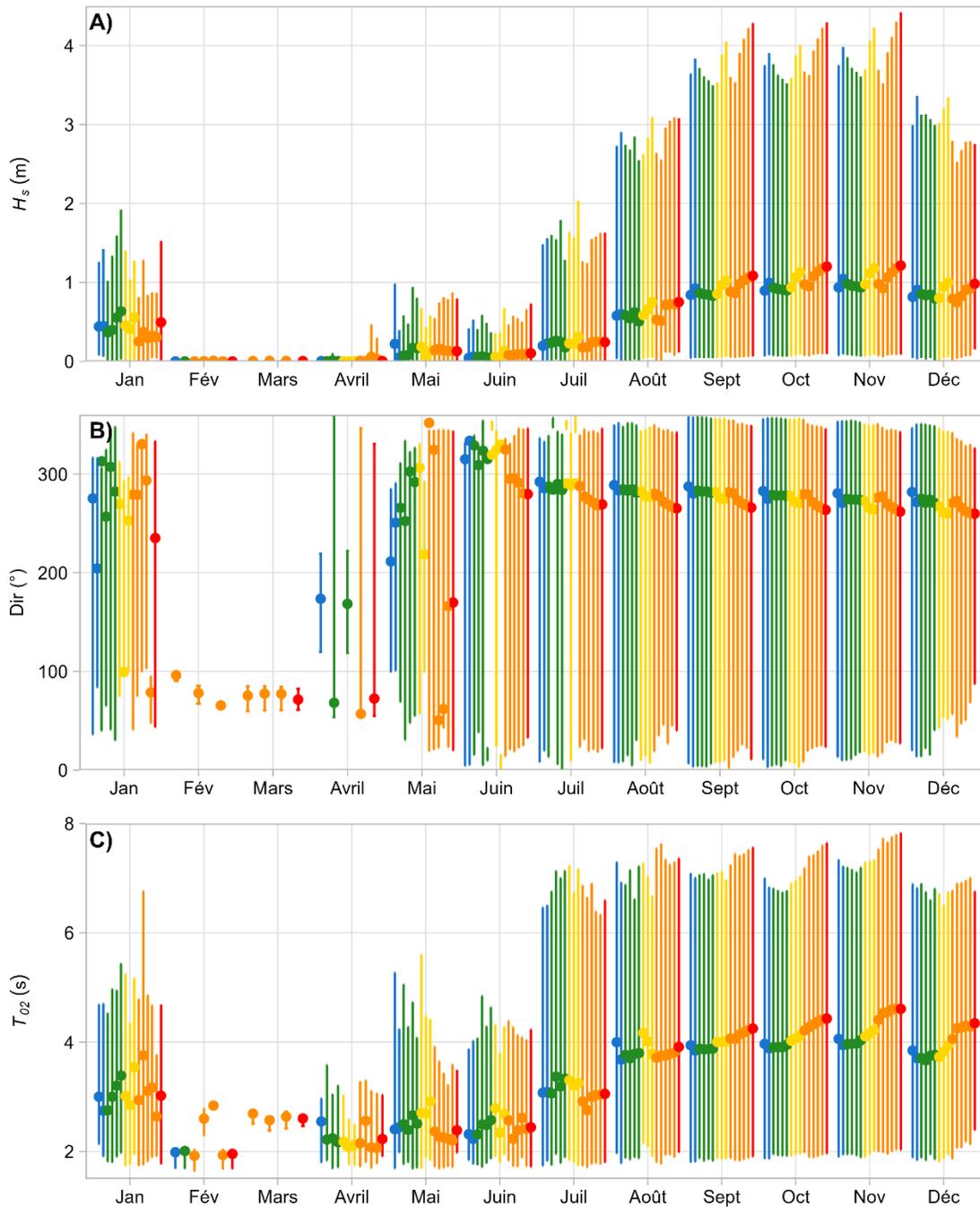


Figure 21. Variations mensuelles des valeurs moyennes (cercles), minimales et maximales (barres) de la A) hauteur significative, de la B) direction et de la C) période des vagues de la région d'étude, où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

Variabilité interannuelle

Au cours de la période d'étude, les résultats de la modélisation WW3 montrent une faible augmentation de la H_s moyenne annuelle ($\beta = 0,002$; $R^2 = 0,027$; $p\text{-value} < 0,001$). Bien que cette variable ait une relation statistiquement significative avec le temps (année), la différence de H_s moyenne modélisée entre 2023 et 1983 n'est que de 11 cm. Pour la période d'étude, le minimum modélisé est de 0,5 m et le maximum de 1,4 m. Quelques années se démarquent par des moyennes plus élevées, plus particulièrement pour le secteur UM (en rouge) : 1998, 2005 et 2012 (fig. 22A). Cependant, les années où les H_s maximales sont les plus élevées sont 1999, 2001, 2003, 2011 et 2022, avec des hauteurs supérieures pour le secteur UM (pas représentées dans la figure). Lors de ces années, le secteur UM a des H_s modélisées maximales de plus de 3 m supérieures à celles des secteurs DM et W-K (tableau 10). De manière générale, selon la modélisation WW3, le nord de la région serait caractérisé par des H_s supérieures à celles du sud (fig. 22A). Il est toutefois important de rappeler que les résultats à partir de 2005 sont basés sur un modèle de vagues forcé par des champs atmosphériques et un couvert de glace prédits par des modèles, et non à partir de réanalyses climatiques.

Tableau 10. Hauteurs maximales de vagues du secteur Umiujaq et des secteurs sud (moyenne W-K et DM)

Année	Umiujaq	Secteurs Sud
1999	8,6 m	5,5 m
2001	10,2 m	7,1 m
2003	9,12 m	6,3 m
2011	7,7 m	4,5 m
2022	7,8 m	4,4 m

La direction moyenne des vagues modélisées est demeurée stable au cours de la période d'étude ($p\text{-value} > 0,001$), avec une orientation moyenne de 275° , couvrant une étendue de 51° oscillant entre 252° et 303° . Les années 2001, 2004 et 2010 se démarquent avec des vagues d'orientation davantage nord-ouest, tandis que les années 1990, 2005 et 2020 se

démarquent avec des vagues plutôt sud-ouest (fig. 22B). De manière générale, les vagues annuelles moyennes ont une orientation ouest-sud-ouest pour les secteurs nord et ouest-nord-ouest pour les secteurs sud de la région.

La période moyenne des vagues n'a pas de tendance significative entre 1982 et aujourd'hui (p -value $> 0,001$), mais présente des variations en apparence cycliques (fig. 22C). La période moyenne est de 3,9 s, couvrant une étendue de valeurs de 2,7 à 5,4 s. De manière générale, T_{02} est supérieure pour les secteurs au nord de la région d'étude (i.e. Umiujaq (rouge) et Lac Tasiujaq (orange), fig. 22C). Les variations interannuelles ont une moins grande amplitude pour les secteurs au sud.

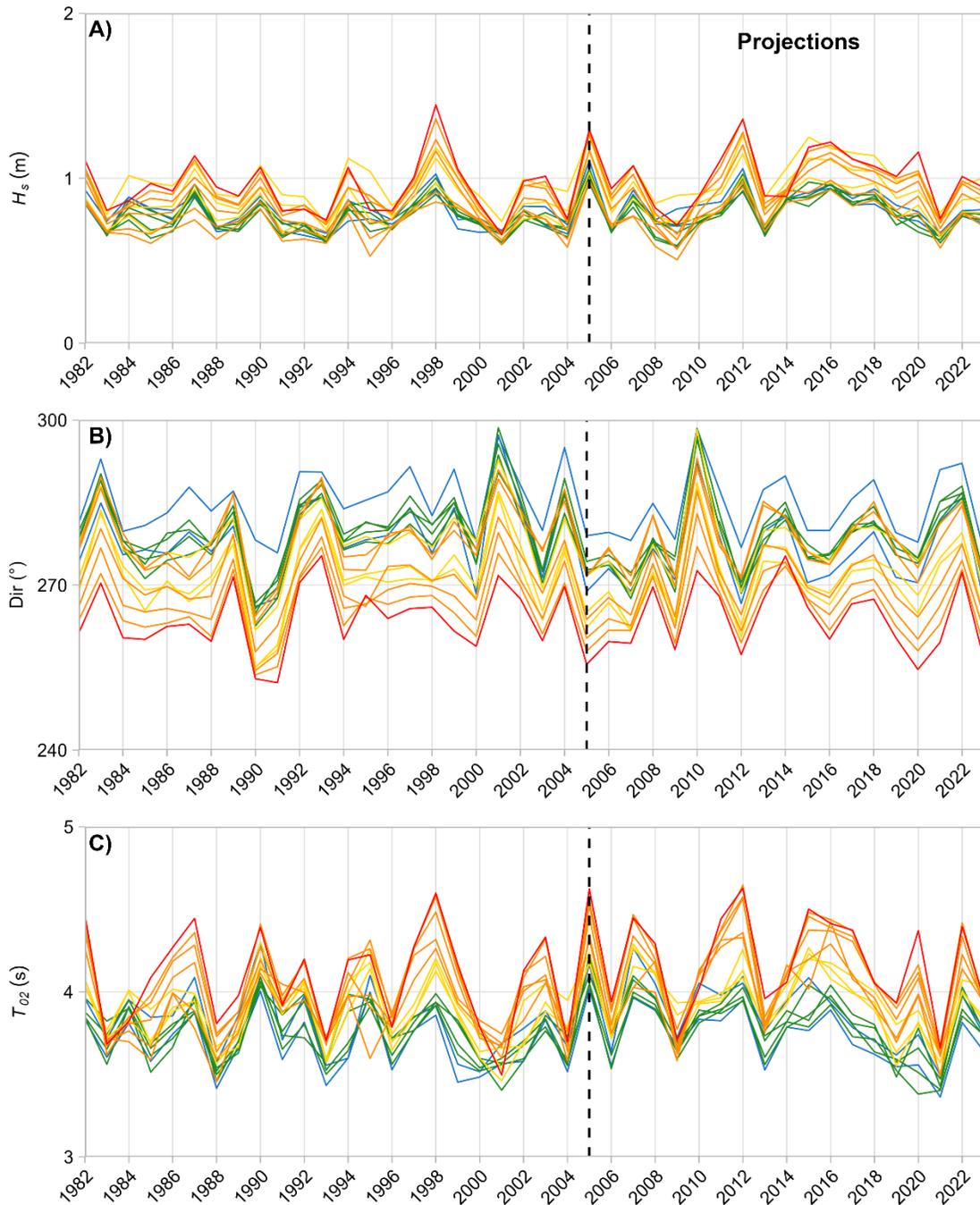


Figure 22. Variations annuelles des valeurs moyennes de la A) hauteur significative, de la B) direction et de la C) période des vagues en conditions libres de glace (< 20%) pour la région d'étude, où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

3.2.3 Niveau d'eau

Les niveaux d'eau sont décrits par les valeurs quotidiennes maximales des niveaux d'eau totaux (*NET*; fig. 23A), ainsi que les valeurs correspondantes de niveaux d'eau au repos (*SWL*; fig. 23B) et de jet de rive (*R_{2%}*; fig. 23C). Afin de représenter ces variables, trois diagrammes de fréquence ont été réalisés où chaque courbe est associée à un point de grille du modèle WW3. La couleur des courbes est associée au point de grille du modèle avec une variation du bleu au rouge en allant du sud (W-K) vers le nord (Umiujaq).

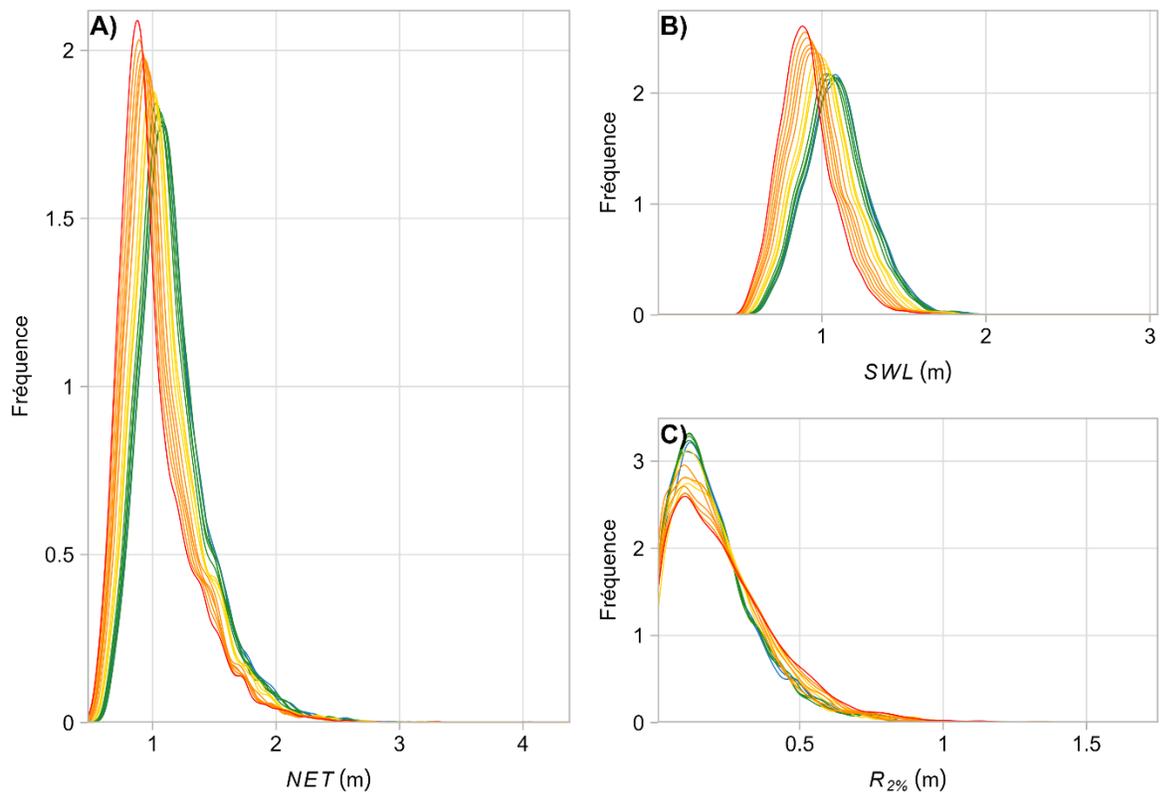


Figure 23. Distribution des A) niveaux d'eau totaux maximums quotidiens (*NET*), B) les valeurs correspondantes de niveaux d'eau au repos (*SWL*) et C) de jet de rive (*R_{2%}*), où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

Les courbes de fréquence des niveaux d'eau totaux (*NET*) maximums quotidiens présentent un gradient latitudinal (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,041$). Les *NET* maximums quotidiens sont plus élevés pour les secteurs au sud (bleu et vert) que pour les secteurs au nord (orange et rouge) (fig. 23A). La valeur médiane des *NET* du secteur W-K (sud) est de 1,14 m en comparaison à 0,93 m pour le secteur UM (nord). Les distributions de fréquence des *NET* des secteurs au nord ont une asymétrie positive supérieure à ceux du sud, indiquant une concentration plus importante de petites valeurs.

La distinction entre les secteurs sud et nord est accentuée lorsque seule la variable *SWL* est considérée (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,112$; fig. 23B). Les valeurs médianes de *SWL* varient de 0,89 m (UM) à 1,10 m (W-K). Ces résultats sont cohérents, considérant que le régime marégraphique microtidal de la région d'étude apporte des marnages maximaux jusqu'à 2 m à W-K au sud en opposition à 1,4 m à Umiujaq au nord (Pêches et Océans Canada, 2023). Le coefficient d'asymétrie est positif pour l'ensemble de la région d'étude, mais est supérieur pour les secteurs au nord. Il y a ainsi une plus grande concentration de petites valeurs de *SWL* au nord qu'au sud.

Le signal est différent en ce qui concerne les valeurs de jet de rive ($R_{2\%}$) mesurées pendant le maximum quotidien du *NET* (fig. 23C). La latitude a un impact mineur sur les variations de $R_{2\%}$ (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,002$). Les valeurs médianes sont en moyenne de 0,02 cm et les valeurs moyennes varient de 9 cm (W-K) à 10 cm (UM). L'asymétrie des courbes de fréquence est similaire pour l'ensemble de la région d'étude avec des coefficients d'asymétrie variant de 2,1 à 2,2 du sud vers le nord.

Ainsi, malgré que le jet de rive survenant lors du maximum quotidien du niveau d'eau total soit supérieur pour les secteurs au nord, son impact sur le niveau d'eau total est inférieur à celui des niveaux d'eau influencés par la marée, les vents et les courants (*SWL*).

Variabilité mensuelle

Afin d'avoir une meilleure compréhension de la variabilité des niveaux d'eau maximums au cours d'une année, les moyennes mensuelles des *NET* maximums, ainsi que leurs valeurs correspondantes de *SWL* et de $R_{2\%}$ pour la période de 1982 à 2004 ont été étudiés. L'étendue des maximums mensuels est représentée par les barres autour des points (fig. 24). Ces derniers représentent les valeurs maximales mensuelles moyennes pour la période d'étude.

Les *NET* maximums moyens sont supérieurs pour les mois de septembre à novembre (2,15 m), modérés pour les mois d'août et décembre (1,88 m) et inférieurs pour les mois de janvier à juillet (1,23 m). Les *NET* maximums moyens sont supérieurs de 0,13 m à 0,30 m pour les secteurs au sud (W-K et DM; fig. 24A). La variabilité latitudinale des *NET* maximums moyens est plus faible à l'automne. En fait, pour les mois d'août à octobre, le gradient latitudinal des *NET* maximaux s'inverse et ils deviennent supérieurs pour le secteur UM (nord). Ils redeviennent supérieurs pour les secteurs sud en novembre et décembre.

Les valeurs mensuelles régionales moyennes de *SWL* coïncidant avec les événements de *NET* maximums varient entre 1,13 m et 1,56 m, où la plus faible moyenne est en avril et la plus élevée en septembre. Les *SWL* moyens et maximums sont supérieurs de 0,21 m à 0,32m pour les secteurs sud tout au long de l'année (fig. 24B), où les écarts les plus grands sont aux mois de juin et juillet. Les mois d'août à octobre se démarquent avec les valeurs maximales atteintes les plus élevées dans le secteur du détroit de Manitousuk (3,03 m).

La variabilité mensuelle de $R_{2\%}$ calculé lors des événements de *NET* maximums se distingue en deux périodes. La période la plus faible, allant des mois de février à avril, et la période variable, allant des mois de juillet à décembre (fig. 24C). Pour cette dernière, $R_{2\%}$ est supérieur pour les secteurs au nord et peut atteindre jusqu'à 0,15 m de plus qu'au sud. Le mois d'octobre est caractérisé des $R_{2\%}$ maximums les plus élevés allant jusqu'à 1,66 m à UM. Les moyennes mensuelles de la région pour les mois de juillet à décembre varient entre 0,19m et 0,64 m, avec la plus faible moyenne en juillet et la plus élevée en novembre.

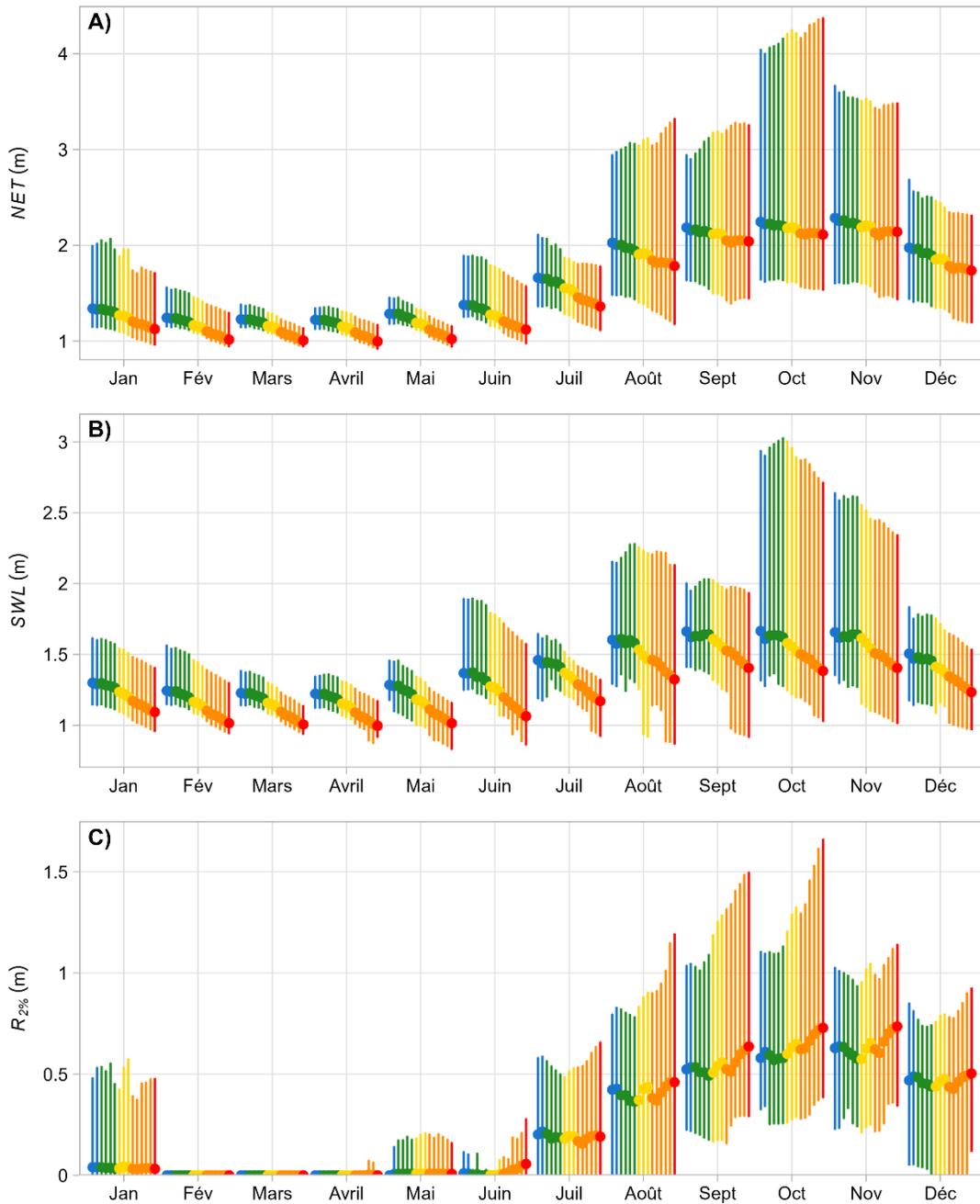


Figure 24. Variations mensuelles des valeurs moyennes (cercles), minimales et maximales (barres) des A) niveaux d'eau totaux maximums mensuels (NET), B) les valeurs correspondantes de niveaux d'eau au repos (SWL) et C) de jet de rive ($R_{2\%}$), où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

Variabilité interannuelle

Les niveaux d'eau totaux maximums moyens (*NET*) augmentent légèrement de 1982 à 2004 ($\beta = 0,02$; $R^2 = 0,07$; p-value $< 0,001$; fig. 25A), avec un *NET* moyen de 2,41 m. Quatre années font exception avec un niveau moyen notablement supérieur : 1985 (3,53 m), 1999 (3,10 m), 2001 (4,20 m) et 2003 (3,14 m) (fig. 25A). De manière générale, les secteurs sud (W-K et DM) ont des *NET* supérieurs aux secteurs nord. Pour ces quatre années, l'écart de *NET* entre les secteurs nord et sud est en moyenne de 0,34 m. L'écart moyen est réduit à 0,29m pour le reste de la période d'étude.

Les niveaux d'eau au repos (*SWL*) mesurés lors des *NET* maximums ne présentent pas d'augmentation ou de diminution pour la période de 1982 à 2004 ($\beta = 0,008$; $R^2 = 0,02$; p-value $> 0,001$). Ils expriment toutefois le même signal de niveaux élevés pour les années 1985, 1999, 2001 et 2003 que les *NET* (fig. 25B). Les *SWL* moyens de ces années sont de 2,51 m, 2,21 m, 2,91 m et 1,93 m respectivement. L'écart moyen entre les secteurs sud et nord pour ces dates est de 0,26 m. Le *SWL* annuel moyen pour le reste de la période d'étude est de 1,69 m (1,39 m à 1,87 m), où les niveaux plus élevés se trouvent au sud.

Les hauteurs de jet de rive ($R_{2\%}$) calculées lors des *NET* maximums varient peu de 1982 à 1990 ($\beta = 0,003$; $R^2 = 0,001$; p-value $> 0,001$; fig. 25C). Le $R_{2\%}$ moyen pour cette période est de 0,76 m avec une étendue de 0,73 m (0,41 m à 1,14 m). Le $R_{2\%}$ augmente légèrement de 1991 à 2004 ($\beta = 0,04$; $R^2 = 0,32$; p-value $< 0,001$). La variabilité latitudinale ainsi que l'étendue des valeurs est supérieure pour cette période. Le $R_{2\%}$ moyen augmente à 0,81 m et l'étendue des valeurs à 1,33 m (0,33 m à 1,66 m). Tout comme les *SWL*, les $R_{2\%}$ sont supérieurs pour les années 2001 et 2003. Enfin, pour plus de 60% de la période d'étude, les $R_{2\%}$ sont supérieurs au nord (UM), bien que l'écart avec les autres secteurs ne soit pas très prononcé.

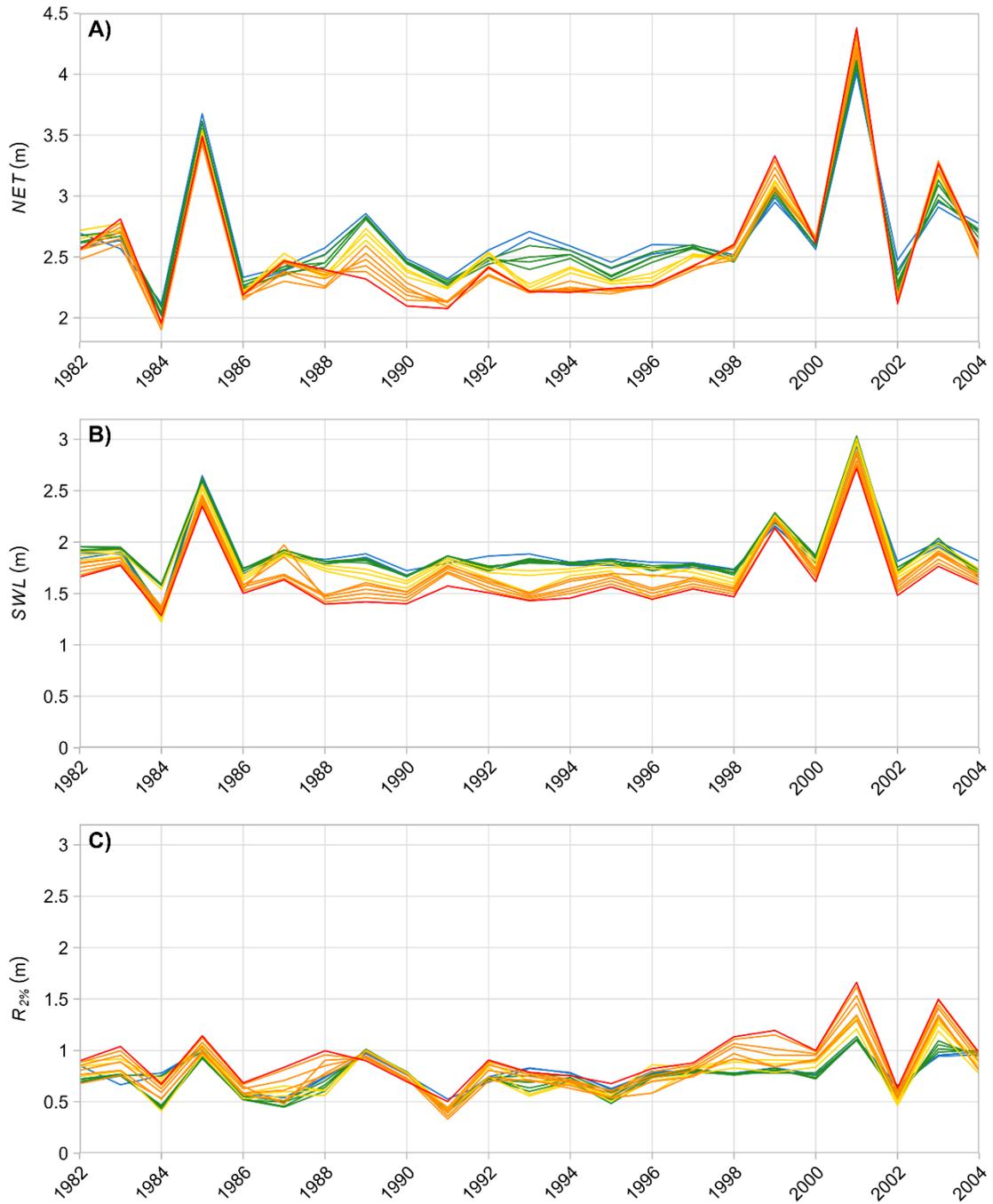


Figure 25. Variations annuelles des valeurs maximales moyennes des A) niveaux d'eau totaux (*NET*) et des valeurs correspondantes B) de niveaux d'eau au repos (*SWL*) et C) de jet de rive ($R_{2\%}$), où le gradient de couleur du bleu vers le rouge varie du sud vers le nord (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

3.2.4 Tempêtes

À l'aide de la méthode de dépassement de seuil (Ch.2 (2.3.4)), le nombre de tempêtes côtières annuel pour chaque point de grille WW3 sélectionné pour la période de 1982 à 2023 a été comptabilisé (fig. 26). La moyenne annuelle régionale du nombre de tempêtes varie entre 1,6 jours (2001) et 8,3 jours (2018). Malgré une variabilité interannuelle importante et la présence potentielle d'un cycle, il y a une tendance positive significative ($\beta = 0,06$; $R^2 = 0,16$; $p\text{-value} < 0,001$) à l'augmentation du nombre de tempêtes entre 1982 et 2023 à un taux de 0,06 jours de tempête par année. Toutefois, la durée moyenne des tempêtes a plutôt une tendance significative à la baisse ($\beta = -0,18$; $R^2 = 0,04$; $p\text{-value} < 0,001$).

Deux périodes relativement actives se démarquent par un nombre de tempêtes annuel élevé ainsi qu'une durée moyenne plus courte : 2003-2005 et 2015-2020. Les périodes étant caractérisées du moins de tempêtes sont de 1984 à 1990 et de 2007 à 2011. Il demeure important de mentionner que les données utilisées pour l'identification des tempêtes se basent sur des projections climatiques à partir de 2005.

La latitude a une influence significative sur la durée des tempêtes (Anova : $p\text{-value} > 0,001$; $\eta^2 = 0,036$). En effet, leur durée est supérieure dans le secteur UM comparativement aux secteurs W-K et DM. Cette variabilité latitudinale ne s'observe toutefois pas au niveau du nombre de tempêtes annuel (Anova : $p\text{-value} > 0,001$; $\eta^2 = 0,003$).

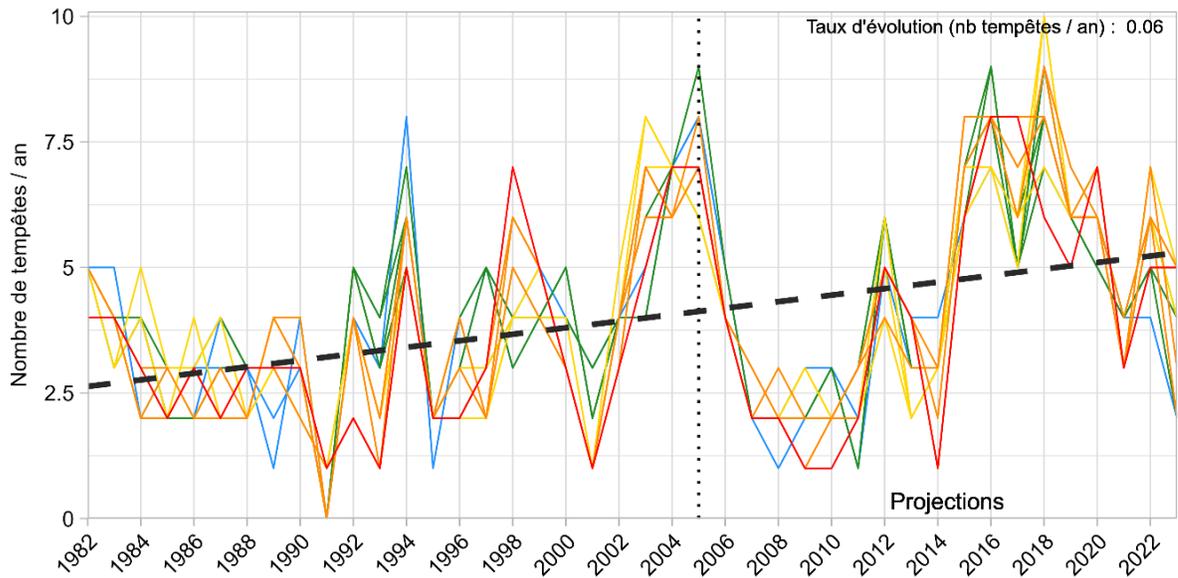


Figure 26. Nombre de tempêtes par année selon le gradient latitudinal variant du bleu vers le rouge, du sud vers le nord, avec en bleu le secteur W-K, en vert le secteur DM, en jaune le secteur PRB, en orange le secteur LT et en rouge le secteur UM

Les tempêtes sont décrites par quatre variables : la hauteur significative (H_s) moyenne et maximale des vagues atteintes lors de la tempête, leur période (T_p) et leur direction (fig. 27). Les quatre panneaux de la figure 27 présentent ces variables pour les quinze points WW3 sélectionnés, en allant du sud (gauche) vers le nord (droite). Les données de hauteur de vagues et de durée des tempêtes sont détaillées davantage pour chaque point de grille à l'Annexe-C (C.1 à C.15).

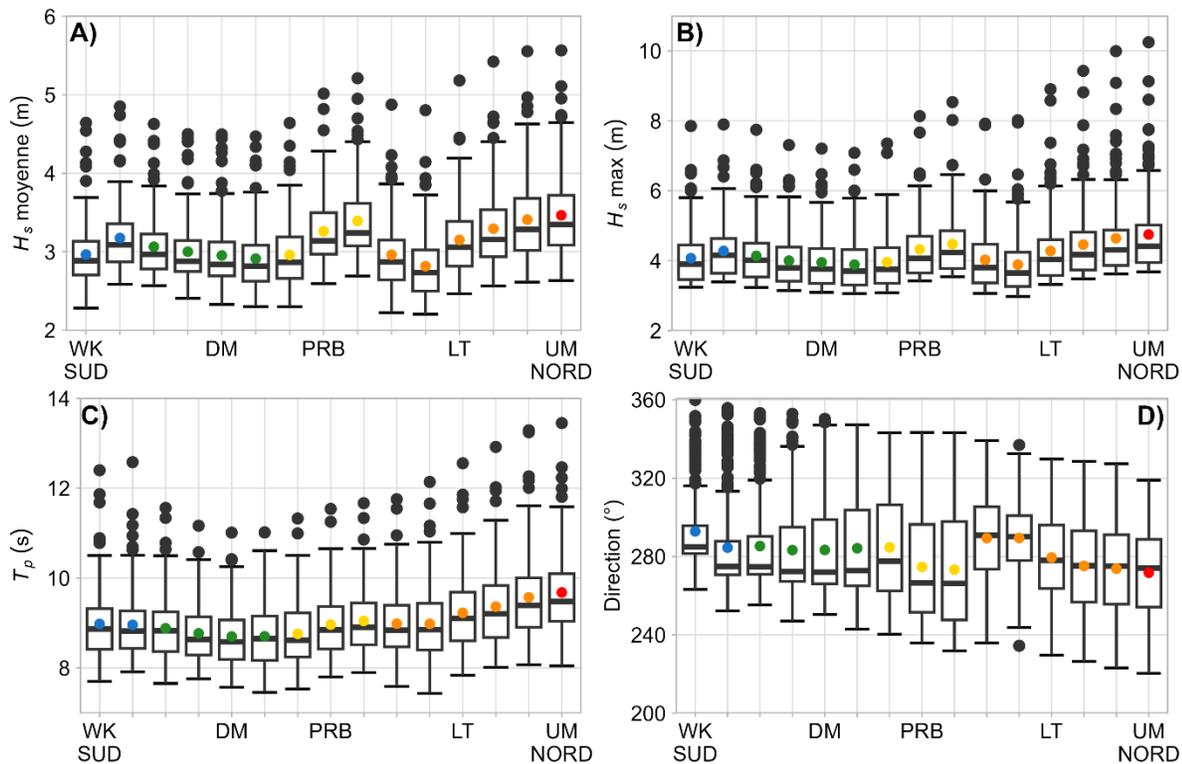


Figure 27. Distribution des valeurs de A) hauteur significative moyenne et B) maximales des vagues de tempêtes, C) de leur période et D) de leur direction pour chaque point de grille WW3 sélectionné évoluant du sud vers le nord, de la gauche vers la droite. Les points de couleurs représentent les valeurs moyennes (bleu = W-K, vert = DM, jaune = PRB, orange = LT et rouge = UM)

Les distributions des caractéristiques de tempêtes montrent de légères différences à travers la région d'étude (fig. 27). L'étendue des valeurs est de 65 cm pour les H_s moyennes (fig. 27A), et de 86 cm pour les H_s maximales moyennes (fig. 27B). Les H_s de l'ensemble des points de grille sélectionnés ont une distribution log-normale, avec une asymétrie positive qui est d'autant plus prononcée pour les H_s maximales (fig. 27B). Les vagues les plus hautes (H_s moyennes et H_s maximales) sont au nord de la région, soit dans les secteurs PRB et UM, ainsi que dans le nord du secteur LT. La différence des H_s moyennes les plus élevées entre le point le plus au nord et le point le plus au sud est de 92 cm et de 2,40 m pour les H_s maximales. Toutefois, l'écart entre le point ayant les vagues les plus hautes (point le plus au nord), et celui ayant les vagues les moins hautes, au nord du secteur DM, est de 1,10 m pour les H_s moyennes les plus élevées et de 3,16 m pour les H_s maximales les plus élevées.

La période (T_p) des vagues maximales suit la même tendance que H_s : la latitude a un impact sur cette variable (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,13$; fig. 27C). L'ensemble des points de grille sélectionnés ont une distribution de données avec une asymétrie positive, où les trois quarts des T_p ont une valeur entre 6,9 s et 10,9 s. À travers la région d'étude, les T_p moyens oscillent entre 8,7 s (DM) et 9,7 s (UM). Les plus grandes variations latitudinales s'observent pour les T_p élevés, soit 1,1 s entre T_p maximum du point le plus au nord et le plus au sud. Cet écart s'agrandit à 2,4 s entre le secteur UM et le nord du secteur DM.

La direction des vagues de hauteur maximale varie légèrement à travers la région (Anova : p-value < 0,001; $\eta^2 = 0,05$; fig. 27D) et leur direction dominante est le ouest-nord-ouest ($271,8^\circ$ à $292,9^\circ$). Elle est plus variable pour les secteurs nord à partir de PRB.

Variabilité mensuelle

Afin d'avoir une meilleure compréhension de la variabilité des tempêtes au cours d'une année, le pourcentage mensuel du nombre de tempêtes total enregistré au cours de la période 1982 à 2023 pour chaque point de grille WW3 sélectionné a été étudié (fig. 28).

Selon les résultats de la modélisation WW3, environ 75% des tempêtes se produisent entre les mois de septembre et novembre, avec un maximum en novembre, tandis que le minimum est au mois de juillet. Selon les projections, seuls le nord du secteur DM et le sud du secteur PRB seraient caractérisés par des tempêtes en janvier (moins de 1%).

Dans l'ensemble, les secteurs sud (W-K et DM) sont caractérisés par des proportions similaires de tempêtes pour les mois de septembre à décembre, contrairement aux secteurs nord (LT et UM) qui ont une concentration de tempête supérieure au reste de la région pour les mois d'août à novembre. Les tempêtes de novembre sont plus nombreuses pour le secteur UM, tandis que celles de décembre se concentrent surtout dans les secteurs sud.

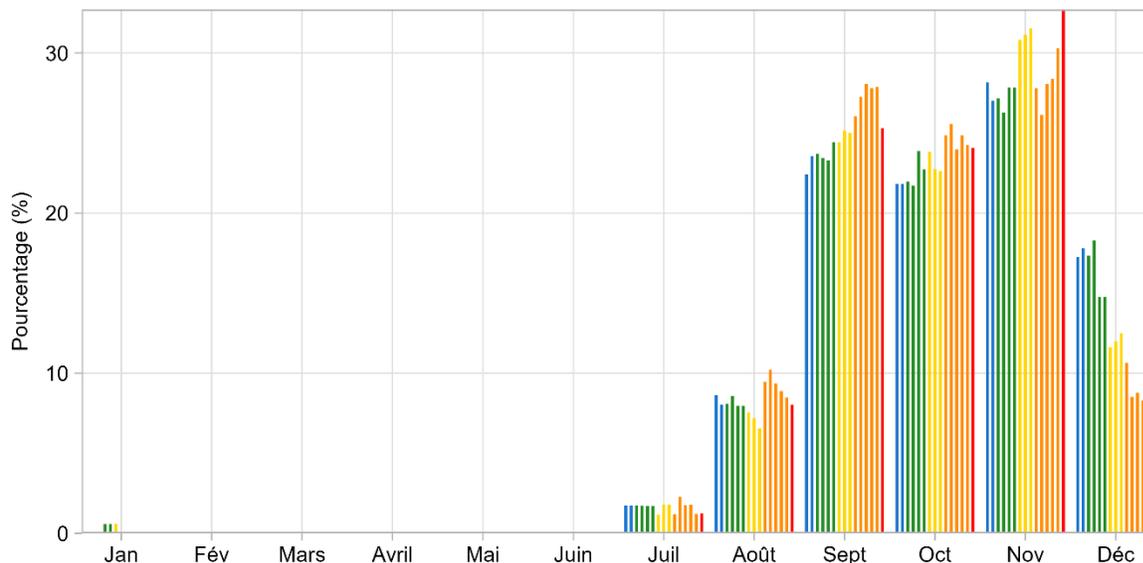


Figure 28. Pourcentage du nombre tempêtes par mois pour chaque point de grille WW3 sélectionné variant du bleu vers le rouge, du sud vers le nord, avec en bleu le secteur W-K, en vert le secteur DM, en jaune le secteur PRB, en orange le secteur LT et en rouge le secteur UM

3.3 ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

L'étude de l'évolution côtière couvre une distance de 93,4 km de manière discontinue à travers la région de W-K à Umiujaq. Le secteur caractérisé par des photographies aériennes historiques couvrant le plus long linéaire côtier est le secteur LT (39,3 km). Aucune photographie aérienne historique n'était accessible pour le projet pour le secteur PRB, soit 110 km de côte entre les secteurs DM et LT. Cette section s'intéresse à décrire l'évolution diachronique et générale de quatre secteurs bénéficiant de données historiques, soient W-K, DM, LT et UM.

3.3.1 Secteur Whapmagoostui-Kuujuarapik

L'analyse de l'évolution côtière du secteur W-K couvre une période de 86 ans sous-divisée en périodes variant de 3 à 63 ans. Elle se base sur des photographies aériennes

historiques datant de 1931 à 2015, de l'imagerie satellitaire récente de 2017, ainsi que d'un relevé photogrammétrique de 2022 couvrant une partie du secteur (tableau 11). La longueur de linéaire côtier couverte par les données historiques est de 22,1 km de manière discontinue et divisée en 6 sous-secteurs (tableau 11; fig. 29). Les divisions du secteur W-K ont été guidées par la couverture des photographies aériennes historiques et par les types de côte. Le chevauchement des photographies aériennes de ce secteur ont permis d'effectuer une analyse diachronique ainsi qu'une analyse générale de la période d'étude. L'analyse diachronique a été réalisée pour chaque paire de dates consécutives à l'aide du calcul des taux de migration des extrémités (méthode EPR; fig. 30). Les taux de migration pondérés (méthode WLR) ont été calculés pour la période de 1931 à 2017 (Annexe-D (D.1 à D.6)).

Le taux de migration pondéré moyen pour le secteur W-K pour la période de 1931 à 2017 est de $0,54 \pm 0,65 \text{ m an}^{-1}$ avec un écart-type de $0,66 \text{ m an}^{-1}$. Considérant l'incertitude moyenne des taux de migration pondérés, le pourcentage du secteur ayant des taux d'évolution supérieurs à $0,65 \text{ m an}^{-1}$ (i.e. les zones en accumulation) est de 36,4 %, comparativement à 0 % ayant des taux inférieurs à $-0,65 \text{ m an}^{-1}$ (i.e. les zones en érosion). Le taux d'évolution pondéré minimal calculé pour la période d'étude est de $-0,50 \text{ m an}^{-1}$ pour une terrasse de plage localisée au sud de la GRB dans le sous-secteur A (Annexe-D (D.1)). Le reste de ce secteur d'étude, soit 63,6 %, est considéré comme stable.

L'ensemble des sous-secteurs de W-K a des taux d'évolution pondérés moyens positifs pour la période de 1931 à 2017, mais certains se démarquent davantage. Le secteur W-K est riche en sédiments sableux alimentant des systèmes en progradation comme une flèche littorale et des tombolos ou cordons littoraux observables dans les secteurs B, D et E (fig. 29; Annexe-D (D.2 à D.4)). D'ailleurs le sous-secteur B est celui ayant les taux d'accumulation les plus élevés, fortement influencés par l'extrémité d'une flèche littorale longue de 3 km qui s'engraisse annuellement via un apport sédimentaire sableux issu de la dérive littorale. La progradation de l'extrémité de la flèche littorale est à l'origine de la forte variabilité des taux d'évolution diachroniques de ce sous-secteur, exprimée à travers l'étendue des valeurs de coefficient de variance allant de 0,19 à 8,90.

Le sous-secteur A, localisé sur la berge sud de l'embouchure de la Grande-Rivière-à-la-Baleine, a le taux d'accumulation pondéré moyen le plus faible avec $0,25 \pm 0,36 \text{ m an}^{-1}$ pour la période de 1931 à 2017 (Annexe-D (D.1)). Il présente d'ailleurs la période d'érosion la plus importante de l'ensemble du secteur W-K avec une moyenne de $-0,87 \pm 0,12 \text{ m an}^{-1}$ pour la période de 1931 à 1954 (fig. 30A). Le seul autre sous-secteur caractérisé d'une période de faible érosion est le D avec une moyenne de $-0,29 \pm 0,21 \text{ m an}^{-1}$ pour la période de 2010 à 2017 (tableau 11; fig. 30D; Annexe-D (D.4)).

Dans l'ensemble, les périodes d'analyses présentant les taux d'évolution diachroniques les plus élevés sont de 1954 à 1986 avec des taux moyens variant entre $0,56 \text{ m an}^{-1}$ et $2,42 \text{ m an}^{-1}$ (tableau 11; fig. 30). Le relevé photogrammétrique acquis par drone en 2022 permet d'identifier que le rythme de progradation du secteur W-K, du moins du sous-secteur B, se poursuit pour la période de 2017 à 2022 avec un taux d'évolution diachronique moyen de $1,51 \pm 0,23 \text{ m an}^{-1}$ (tableau 11; fig. 30B; Annexe-D (D.2)).

Tableau 11. Résumé des taux d'évolution diachroniques des sous-secteurs du secteur W-K

Sous-secteur	Longueur (km)	Période d'analyse	Nombre d'années total	Taux moyen (m an ⁻¹)	Taux minimal (m an ⁻¹)	Taux maximal (m an ⁻¹)	Écart-type	Incertitude moyenne (m an ⁻¹)
A	1,3	1931-1954	23	-0,87	- 2,04	1,04	0,63	0,12
		1954-1975	21	0,56	- 1,57	1,95	0,98	0,12
		1975-1986	11	0,36	- 0,84	2,71	0,78	0,17
		1986-2010	24	0,7	- 0,51	2,41	0,86	0,08
		2010-2017	7	0,19	- 0,76	3,7	0,61	0,21
		1931-2017	86	0,17	- 0,58	0,79	0,46	0,02
B	6,3	1931-1954	23	0,67	- 2,22	2,74	0,67	0,12
	4,4	1954-1964	10	0,42	- 4,60	7,23	2,6	0,26
	4,4	1964-1975	11	2,42	- 4,35	9,2	2,64	0,16
	6,7	1975-1986	11	0,93	- 1,79	13,44	2,52	0,18
	4,2	1986-1990	4	-0,09	- 3,44	5,15	1,15	0,47
	4,2	1990-2002	12	0,85	- 0,98	2,03	0,44	0,12
	7,5	2002-2010	8	0,94	- 0,69	10,67	1,57	0,18
	7,5	2010-2015	5	0,7	- 4,27	5,94	0,99	0,28
	7,5	2015-2017	2	0,58	- 3,85	9,61	1,38	0,72
	4,9	2017-2022	5	1,51	- 3,30	15,67	2,98	0,23
7,5	1931-2017	86	0,64	- 0,20	4,09	0,75	0,02	
C	2,2	1931-1954	23	0,47	- 1,09	1,51	0,34	0,12
		1954-1975	21	0,35	- 1,01	2,14	0,35	0,13
		1975-1986	11	1,05	- 0,44	4,68	0,75	0,18
		1986-2003	17	0,55	- 0,22	1,93	0,35	0,12
		2003-2010	7	0,76	- 0,80	2,97	0,68	0,23
		2010-2017	7	0,53	- 2,46	5,13	0,94	0,21
		1931-2017	86	0,56	0,23	1,3	0,22	0,02
D	2,5	1931-1954	23	0,19	- 1,03	1,09	0,36	0,12
	2,5	1954-1975	21	0,32	- 1,09	2,12	0,63	0,13
	2,7	1975-1986	11	1,07	- 1,37	3,65	0,94	0,18
	1,1	1986-2010	24	0,33	- 0,57	1,35	0,33	0,08
	1,1	2010-2017	7	-0,29	- 1,72	6,41	2,77	0,21
	2,7	1931-2017	86	0,37	- 0,01	1,17	0,36	0,02
E	1,4	1931-1954	23	0,39	- 1,00	1,65	0,38	0,12
	1,6	1954-1986	32	1,31	0,03	4,74	1,12	0,09
	1,6	1986-2017	31	0,7	- 0,10	2,26	0,69	0,06
	1,4	1931-2017	86	0,72	0,14	1,98	0,49	0,02
F	6,8	1931-1954	23	0,45	- 1,81	10,84	1,2	0,12
		1954-2017	63	0,39	- 0,39	3,19	0,57	0,04
		1931-2017	86	0,41	- 0,08	3,94	0,62	0,02

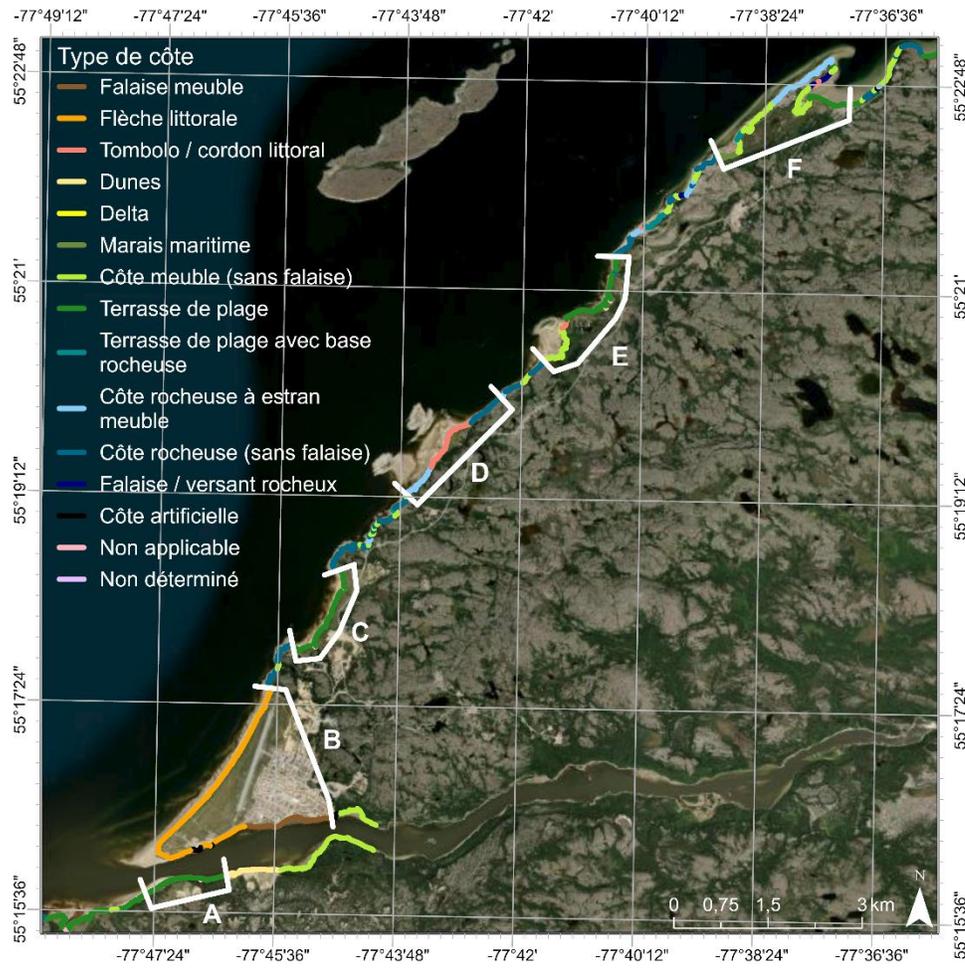


Figure 29. Carte de localisation des sous-secteurs et des types de côte du secteur W-K

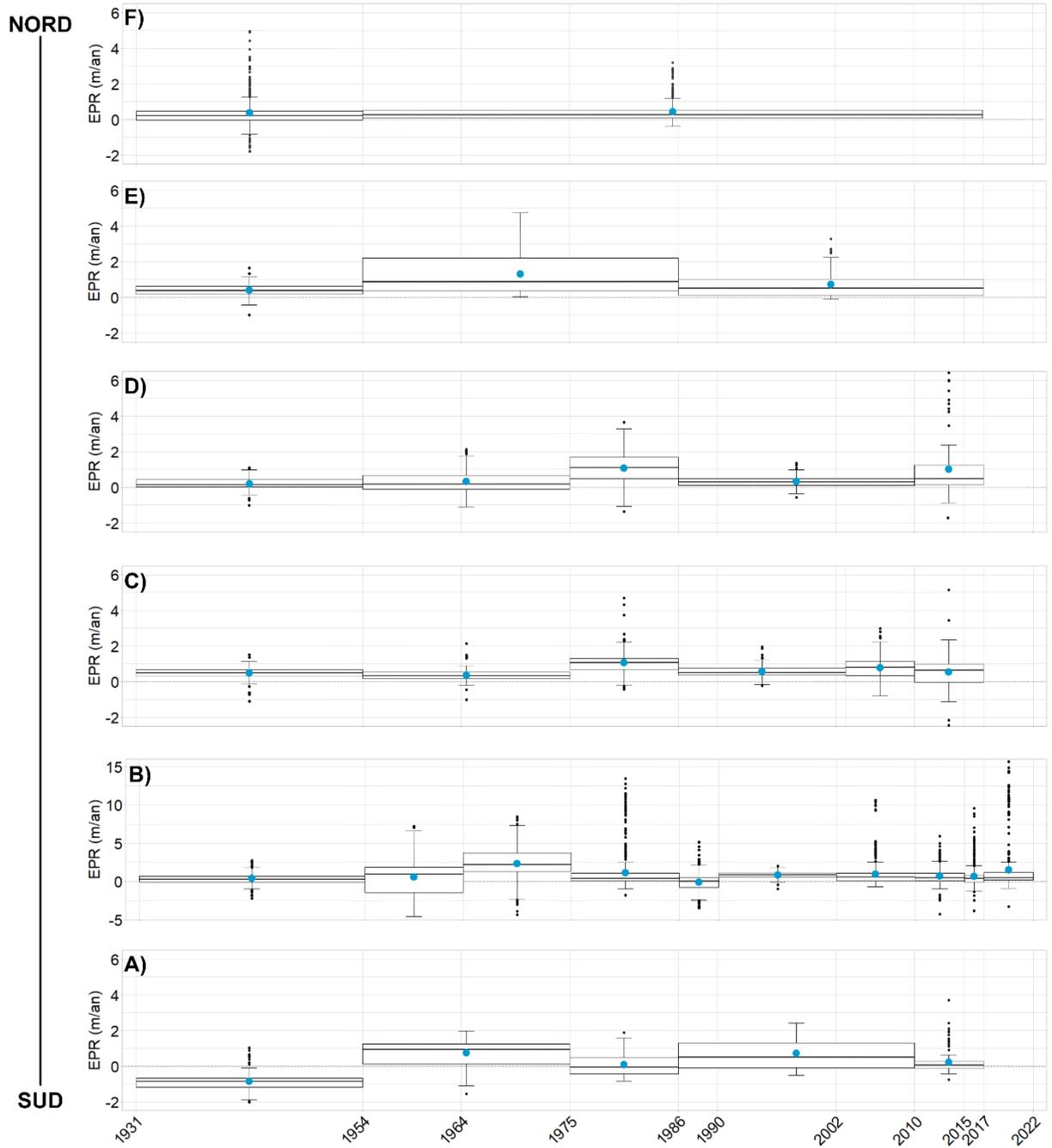


Figure 30. Distribution des taux d'évolution diachronique pour les 6 sous-secteurs du secteur W-K. Les sous-secteurs se classent du sud vers le nord, de A à F, avec le sous-secteur A localisé sur la berge sud de l'embouchure de la Grande-Rivière-à-la-Baleine

La longueur du linéaire côtier où les taux de migration pondérés ont été calculés pour le secteur W-K est caractérisée par 9 types de côte différents (fig. 31). L'ensemble des types de côte de ce secteur d'étude ont des taux d'évolution pondérés positifs, voire entièrement positifs pour les segments de tombolo / cordon littoral, de marais maritime et de terrasse de plage à base rocheuse. Les types de côtes ayant les plus hauts pourcentages d'accumulation sont les flèches littorales (73,7 %), les marais maritimes (55,1 %) et les tombolos / cordons littoraux (51,8 %). Les types de côtes étant majoritairement stables (i.e. taux d'évolution pondéré entre $-0,65 \text{ m an}^{-1}$ et $0,65 \text{ m an}^{-1}$), sont les côtes rocheuses à estran meuble et les côtes artificialisées avec seulement 2,6 % et 9,5 % de leur linéaire côtier en progradation. Le seul type de côte entièrement stable est la falaise meuble. Cette stabilité a d'ailleurs permis leur végétalisation au cours de la période d'étude, induisant une modification de l'indicateur choisi lors de la numérisation de la côte. Aucun type de côte du secteur W-K n'est en érosion.

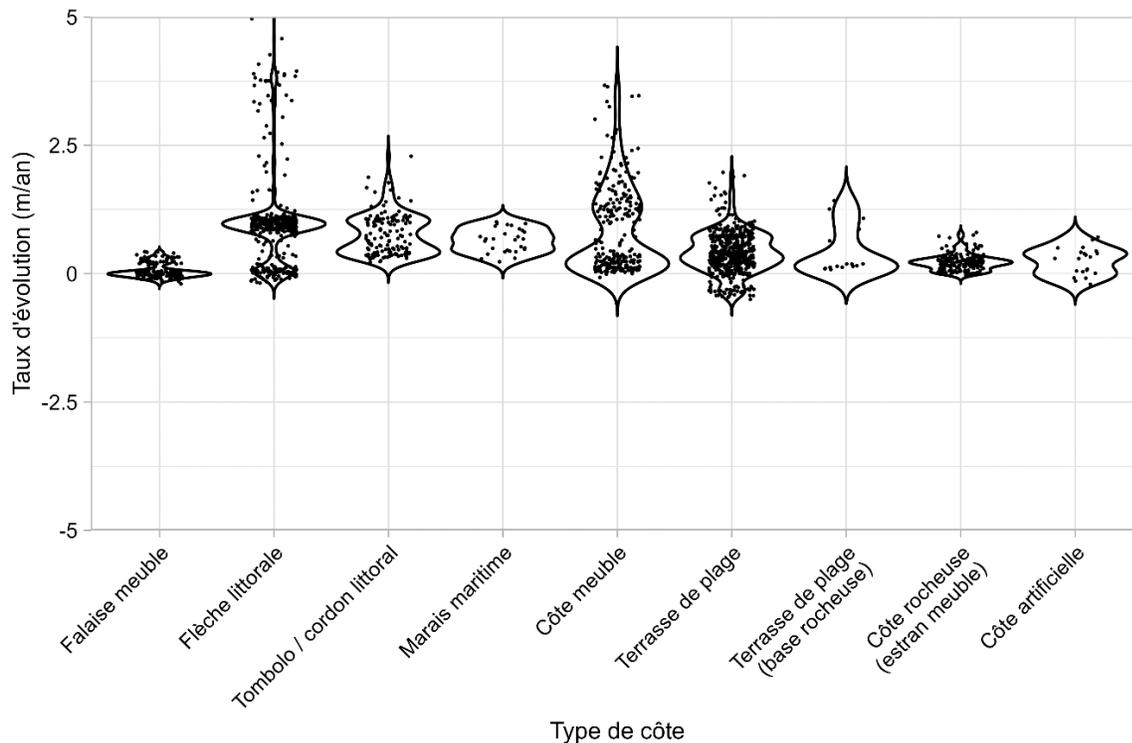


Figure 31. Distribution des taux d'évolution côtière pondérés en fonction du type de côte pour le secteur W-K pour la période de 1931 à 2017

3.3.2 Secteur Déroit de Manitousuk

L'analyse de l'évolution côtière du secteur DM couvre un total de 27 années grâce à des photographies aériennes historiques de 1990 et d'imagerie satellitaire récente de 2017. La longueur de linéaire côtier couverte par les données historiques est de 28,4 km de manière discontinue (tableau 12). Puisque seulement deux dates étaient disponibles pour ce secteur, ce sont les taux de migration diachroniques à l'aide de la méthode des extrémités (méthode EPR) qui ont été calculés.

Le taux de migration moyen pour le secteur DM est de $0,01 \pm 0,07$ m an⁻¹ avec un écart-type de 0,90 m an⁻¹. Considérant l'incertitude moyenne des taux de migration diachroniques, le pourcentage du secteur ayant des taux d'évolution supérieurs à 0,07 m an⁻¹ (i.e. les zones en accumulation) est de 21,5 % comparativement à 10,4 % ayant des taux inférieurs à -0,07 m an⁻¹ (i.e. les zones en érosion). Le reste de ce secteur d'étude, soit 68,1 %, est considéré comme stable.

Les valeurs maximales d'évolution côtière sont observées dans le secteur centre (fig. 32), où le taux d'accumulation maximal de 2,89 m an⁻¹ est observé pour un secteur à marais maritime. Le taux d'érosion le plus élevé (-8,49 m an⁻¹) est associé à un mouvement de terrain s'étant produit entre 2002 et 2005 dans le secteur sud (communication personnelle Michel Allard). Cet événement a provoqué le recul d'une terrasse de plage de 225 m. À l'exception de cet endroit, le secteur sud est stable.

Tableau 12. Résumé des taux d'évolution diachroniques des sous-secteurs du secteur DM

Sous-secteur	Longueur (km)	Période d'analyse	Nombre d'années total	Taux moyen (m an ⁻¹)	Taux minimal (m an ⁻¹)	Taux maximal (m an ⁻¹)	Écart-type (m an ⁻¹)	Incertitude moyenne (m an ⁻¹)
A (SUD)	15,6	1990-2017	27	0,04	- 8,49	1,73	1,06	0,07
B (CENTRE)	8,6			- 0,02	- 3,29	2,89	0,71	0,07
C (NORD)	4,2			- 0,03	- 1,64	1,14	0,62	0,07

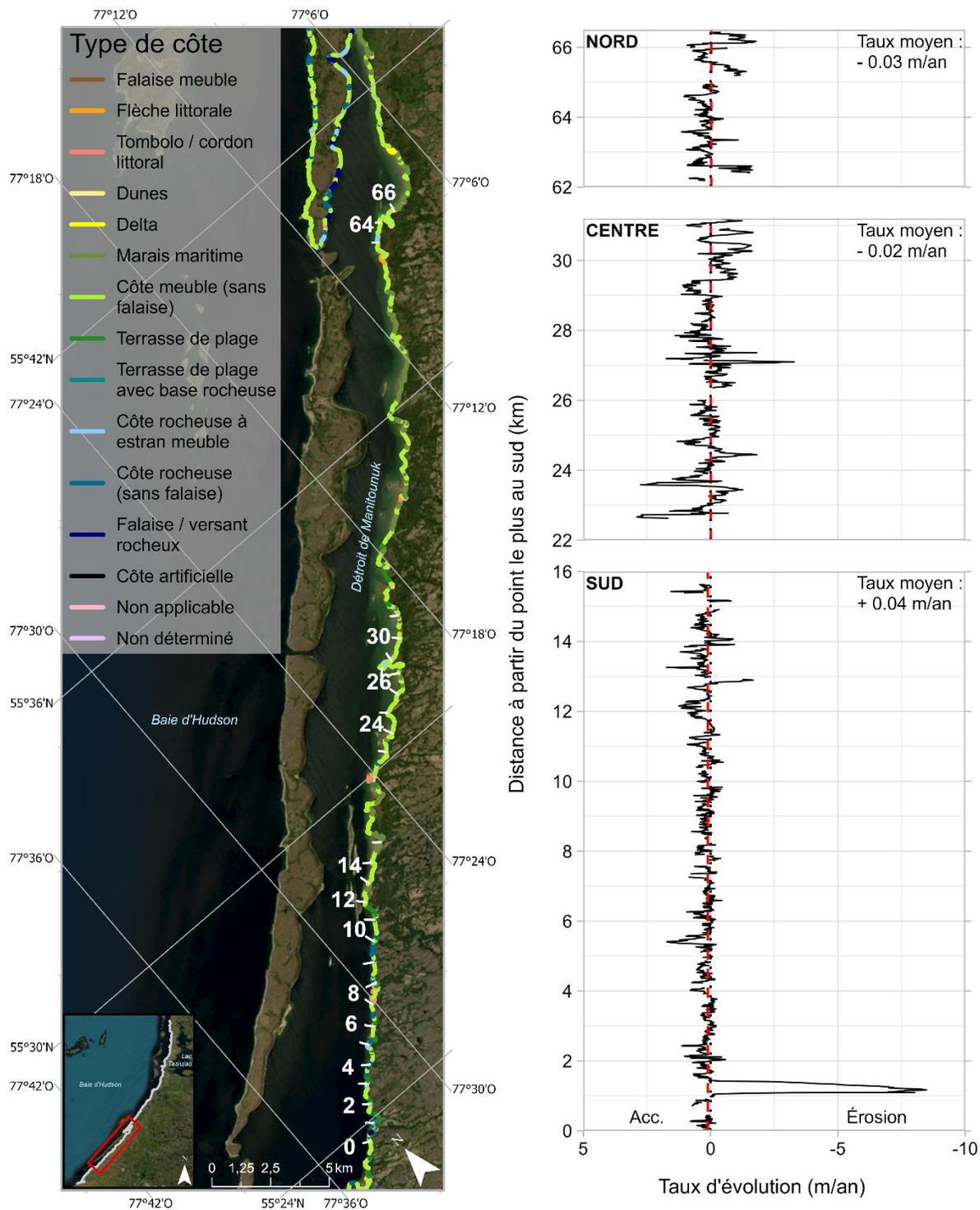


Figure 32. Carte des types de côte du secteur du détroit de Manitoonuk accompagnée des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m. Les traits rouges pointillés représentent la valeur moyenne des taux d'évolution de chaque sous-secteur

La longueur du linéaire côtier où les taux de migration ont été calculés est caractérisée par 9 types de côte différents (fig. 33). Les côtes à falaise meuble se démarquent davantage par leurs taux de migration en érosion ($< -0,07 \text{ m an}^{-1}$) à un rythme moyen de $-1,29 \pm 0,07 \text{ m an}^{-1}$. Celles-ci sont localisées principalement de 29 à 31 km par rapport au sud du secteur et représentent 1,2 % du linéaire côtier analysé (fig. 32).

Les types de côte présentant la plus grande variabilité sont les terrasses de plage, avec ou sans base rocheuse, avec des valeurs de variance de 4,52 et 1,35 respectivement. Les terrasses de plage, représentant 10,5 % du linéaire côtier analysé, sont le type de côte avec la plus grande asymétrie négative de distribution présentant les taux de recul les plus élevés, et ce, malgré une dominance de transects stables (près de 75 %). Ceci suggère que les taux de recul les plus importants pour les terrasses de plage sont plutôt des valeurs extrêmes, comme celles liées au mouvement de terrain du début des années 2000. Les seuls autres types de côte présentant une asymétrie négative sont les terrasses de plage avec base rocheuse et les marais maritimes. Les terrasses de plage avec base rocheuse présentent le taux d'érosion moyen le plus important après les falaises meubles ($-0,91 \text{ m an}^{-1}$), mais ne caractérisent que 0,3 % (80 m) du linéaire côtier analysé. Les marais maritimes sont caractérisés par la troisième plus grande valeur de variance, suggérant que la distribution des taux d'évolution pour ce type de côte est plus étalée que la majorité des autres types. Leur écart interquartile a une amplitude de valeurs de $0,95 \text{ m an}^{-1}$ (de $-0,59 \text{ m an}^{-1}$ à $0,36 \text{ m an}^{-1}$). Ce type de côte représente 8,3 % du linéaire côtier analysé.

Les 5 autres types de côte ont des distributions similaires, avec des valeurs de variance inférieures à 0,25 et de petits coefficients d'asymétrie positive (inférieurs à 1). Pour les deux types de côtes rocheuses, les taux d'évolution moyens sont stables ($0,05 \text{ m an}^{-1}$ et $0,07 \text{ m an}^{-1}$). Les côtes à flèche littorale, tombolo / cordon littoral et les côtes meubles sont en accumulation à des taux d'évolution moyens variant entre $0,11$ et $0,43 \pm 0,07 \text{ m an}^{-1}$.

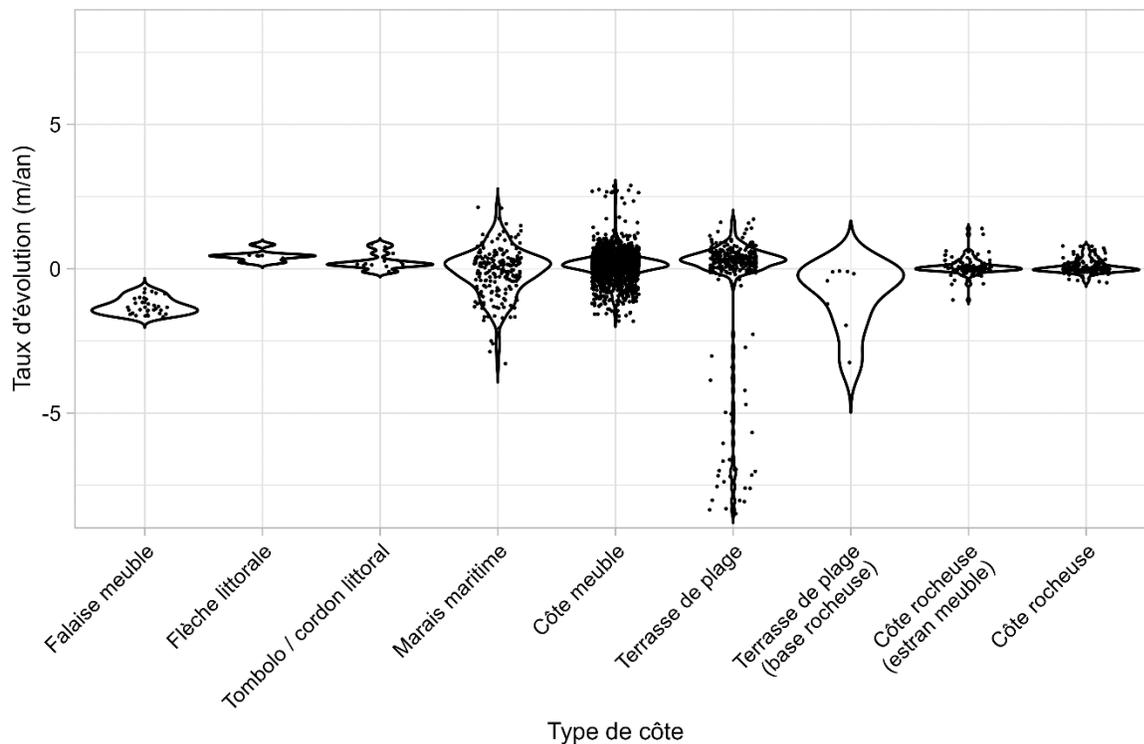


Figure 33. Distribution des taux d'évolution diachroniques en fonction du type de côte pour le secteur Déroit de Manicoueguen pour la période de 1990 à 2017

3.3.3 Secteur Lac Tasiujaq

L'analyse de l'évolution côtière du secteur LT couvre un maximum de 63 années et une période minimum de 9 ans grâce à des photographies aériennes historiques de 1956, 1957, 1990 et 2010 et de l'imagerie satellitaire récente de 2019. La longueur de linéaire côtier couverte par les données historiques est de 39,3 km de manière discontinue (tableau 13). Les photographies aériennes historiques des différentes années ne se chevauchent pas pour ce secteur. Elles ont été analysées en paires, soit une année de données historiques (1956, 1957, 1990, 2010) en comparaison avec le trait de côte de l'année 2019. Ainsi, puisque seulement des paires de dates étaient disponibles pour ce secteur, ce sont les taux de migration diachroniques à l'aide de la méthode des extrémités (méthode EPR) qui ont été calculés.

Le taux de migration moyen pour le secteur LT est de $0,28 \pm 0,04 \text{ m an}^{-1}$ avec un écart-type de $0,34 \text{ m an}^{-1}$. Considérant l'incertitude moyenne des taux de migration diachroniques, le pourcentage du secteur ayant des taux d'évolution supérieurs à $0,04 \text{ m an}^{-1}$ (i.e. les zones en accumulation) est de 44 % comparativement à seulement 6,8 % ayant des taux inférieurs à $-0,04 \text{ m/an}$ (i.e. les zones en érosion). Le reste de ce secteur d'étude (49,2 %) est considéré comme stable.

De manière générale, l'ensemble du secteur LT est en accumulation continue depuis 1956 (tableau 13). Les valeurs maximales d'évolution côtière sont observées dans le secteur sud, soit lors de la période de 1956 à 2019 (fig. 34A). Le taux de migration maximal de $2,18 \text{ m an}^{-1}$ est mesuré pour une terrasse de plage où passait autrefois un ruisseau. L'érosion la plus importante ($-1,62 \text{ m an}^{-1}$) est observée entre 2010 et 2019 pour une terrasse de plage du secteur nord (fig. 34D).

Pour chacun des sous-secteurs, la variabilité est faible, et ce, malgré une quantité de données différente pour chaque période d'étude. Les coefficients de variance se trouvent entre 0,10 et 0,44. La différence des périodes d'étude s'observe davantage au niveau des coefficients d'asymétrie. La période de 1956 à 2019 a une asymétrie positive, qui s'illustre par une concentration de faibles taux d'accumulation et un peu de taux d'accumulation élevés. La période de 1990 à 2019 a une asymétrie négative qui s'illustre aussi par une concentration de taux d'accumulation faibles, mais une petite quantité de taux d'érosion élevés qui témoignent d'évènements érosifs ponctuels, mais significatifs. Les périodes de 1957 et 2010 à 2019 ont une distribution de données s'approchant davantage d'une distribution normale.

Tableau 13. Résumé des taux d'évolution diachroniques pour les sous-secteurs du secteur LT

Sous-secteur	Longueur (km)	Période d'analyse	Nombre d'années total	Taux moyen (m an^{-1})	Taux minimal (m an^{-1})	Taux maximal (m an^{-1})	Écart-type (m an^{-1})	Incertitude moyenne (m an^{-1})
A	3,9	1956-2019	63	0,44	- 0,52	2,18	0,44	0,04
B	33,5	1957-2019	62	0,27	- 0,73	1,60	0,31	0,03
C	1,4	1990-2019	29	0,16	- 1,04	0,77	0,32	0,05
D	0,5	2010-2019	9	0,27	- 1,62	1,91	0,66	0,16

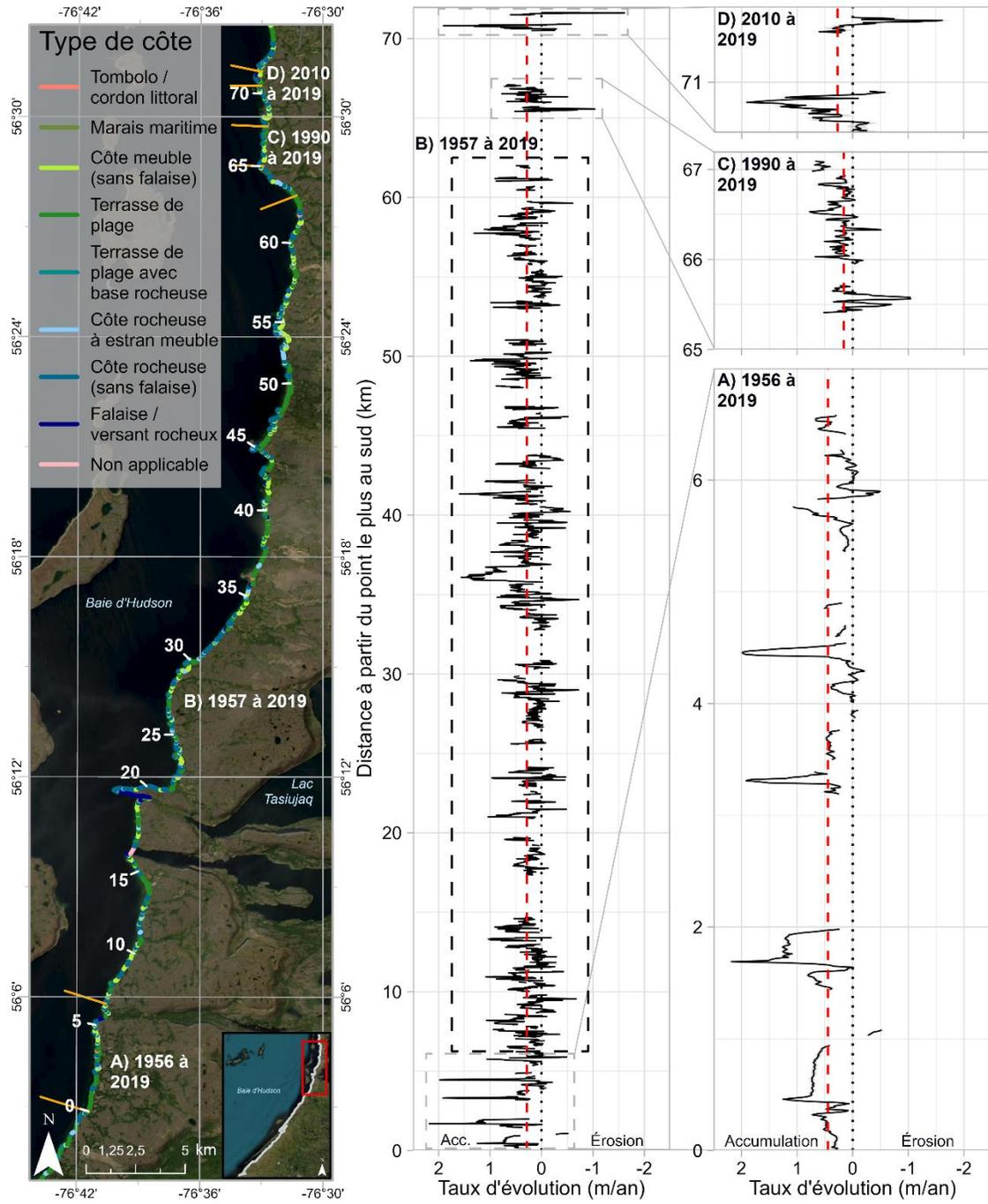


Figure 34. Carte des types de côte du secteur Lac Tasiujaq accompagnée des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m pour quatre secteurs : A) de 1956 à 2019, B) de 1957 à 2019, C) de 1990 à 2019 et D) de 2010 à 2019. Les traits rouges pointillés représentent la valeur moyenne des taux d'évolution de chaque sous-secteur

La longueur du linéaire côtier où les taux de migration ont été calculés est caractérisée par 5 types de côte différents (fig. 35). Le sous-secteur B, étant le plus long (85 % de la région d'étude), est le seul présentant les 5 types de côte (fig. 35B).

Un type de côte se démarque des autres : tombolo / cordon littoral. Bien que ce type de côte ne caractérise que 0,25 % de la région d'étude et n'a été évalué que par la période de 1957 à 2019, l'entièreté de ses taux d'accrétion se trouve entre 1,11 et 1,42 m an⁻¹. Il est caractérisé par le taux de migration moyen le plus élevé avec $1,27 \pm 0,03$ m an⁻¹ (fig. 35B).

Les types de côte caractérisant des segments de l'ensemble des périodes couvertes par les données historiques sont les côtes meubles et les terrasses de plage. Ensemble, ces types de côte couvrent 70,9 % du linéaire côtier où ont été calculés les taux d'évolution. Pour les périodes de 1956 et 1957 à 2019, l'ensemble du linéaire côtier décrit par les côtes meubles et les terrasses de plage avait un taux d'accumulation moyen variant entre 0,24 m an⁻¹ et 0,66 m an⁻¹ (fig. 35A et B). L'intervalle interquartile des taux d'évolution pour ces types de côte pour les périodes de 1956 et 1957 à 2019 varie de 0,05 à 0,75 m an⁻¹. Pour les périodes de 1990 et 2010 à 2019, les taux moyens d'évolution sont plus faibles pour les terrasses de plage (i.e. 0,43 m an⁻¹ et 0,32 m an⁻¹ respectivement), voire même négatifs pour les côtes meubles (i.e. -0,11 m an⁻¹ et -0,25 m an⁻¹ respectivement) (fig. 35C et D). Toutefois, la longueur du linéaire côtier analysé qui est couvert par ces types de côte pour ces deux périodes ne représente que 3,23 % de la longueur totale.

Les taux d'évolution côtière des côtes rocheuses à estran meuble ont été analysés à partir des données historiques de 1956, 1957 et 1990 (fig. 35A, B et C). Ce type de côte caractérisant 3,5 % du linéaire côtier analysé est stable ou légèrement en accumulation (-0,02 à 0,18 m an⁻¹).

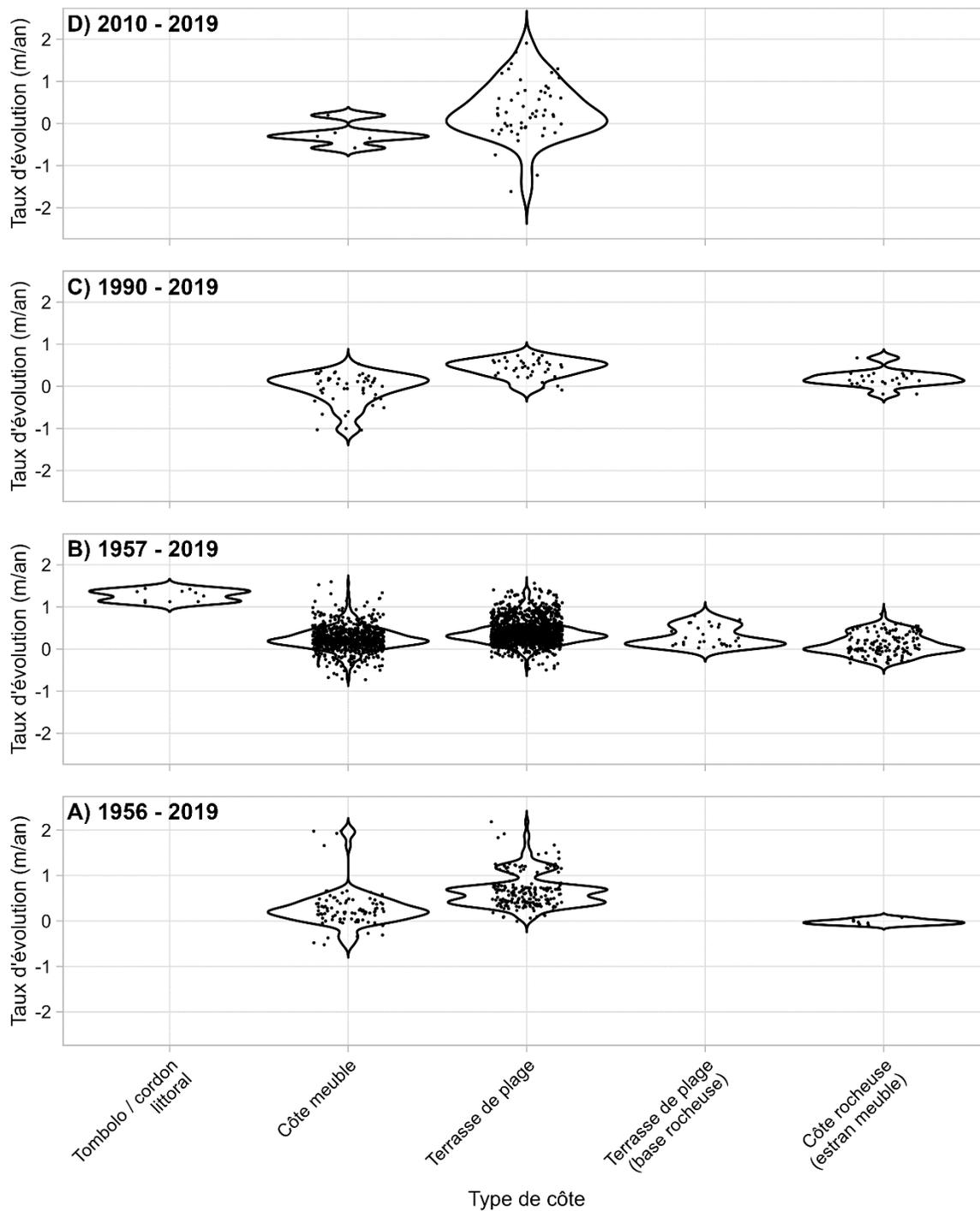


Figure 35. Distribution des taux d'évolution diachroniques en fonction du type de côte pour le secteur Lac Tasiujaq, en A) pour la période de 1956 à 2019, en B) pour la période de 1957 à 2019, en C) pour la période de 1990 à 2019 et en D) pour la période de 2010 à 2019

3.3.4 Secteur Umiujaq

L'analyse de l'évolution côtière du secteur UM couvre une période de 62 ans sous-divisée en périodes variant de 3 à 26 ans grâce à des photographies aériennes historiques de 1957, 1983, 1993, 2003, 2010 et 2015, de l'imagerie satellitaire récente de 2019, ainsi qu'un levé photogrammétrique de 2022. La longueur de linéaire côtier couverte par les données historiques est de 3,6 km de manière continue (tableau 14). Les photographies aériennes de ce secteur se chevauchent et ont permis d'effectuer une analyse diachronique ainsi qu'une analyse générale de la période d'étude (fig. 36B et C). L'analyse diachronique a été réalisée pour chaque paire de dates consécutives à l'aide du calcul des taux de migration des extrémités (méthode EPR; fig. 36B). Les taux de migration pondérés (méthode WLR) ont pu également être calculés pour la période de 1957 à 2019 (fig. 36C).

Le taux de migration pondéré moyen pour le secteur UM pour la période de 1957 à 2019 est de $0,15 \pm 0,69$ m an⁻¹ avec un écart-type de $0,29$ m an⁻¹. Considérant l'incertitude moyenne de $0,69$ m an⁻¹, 3,9 % de la côte est en accumulation, comparativement à 0,3 % qui est en érosion. Le reste de ce secteur d'étude, soit 95,8 %, est considéré comme stable. La zone influençant à la hausse cette incertitude est celle tout juste au sud de l'infrastructure maritime. De par sa nature rocheuse et non végétalisée, positionner le trait de côte à cet endroit était incertain. Cet obstacle a engendré une importante variabilité dans la position du trait de côte, ce qui influence l'incertitude moyenne du calcul des taux de migration.

En observant les taux d'évolution diachroniques pour la période de 1957 à 2022, il est évident que ce secteur n'a pas toujours été d'une stabilité telle que semble l'indiquer les pourcentages énoncés ci-haut (tableau 14 et fig. 36B). Les périodes de 1983 à 1993 ainsi que de 2015 à 2019 présentent des taux de migration de, respectivement, $-0,52 \pm 0,17$ m an⁻¹ et de $-0,50 \pm 0,41$ m an⁻¹. Pour la période de 1983 à 1993, ces taux de reculs semblent en partie liés à l'incertitude de positionnement du trait de côte sur la plateforme rocheuse au sud de l'infrastructure maritime (fig. 36B). Malgré cela, 38,8 % du linéaire côtier analysé pour cette période a des taux d'érosion significatifs, soit de moins de $-0,17$ m an⁻¹ (i.e. incertitude des

taux de cette période). La majorité de ce linéaire se trouve entre 0,5 km et 2,5 km à partir du sud du secteur. Une période de stabilité, voire d'accrétion de 1993 à 2015 caractérise le secteur UM (tableau 14). Les intervalles interquartiles de ces trois périodes (1993-2003, 2003-2010, 2010-2015) varient de $-0,29 \text{ m an}^{-1}$ à $0,85 \text{ m an}^{-1}$ avec des incertitudes variant de $0,16 \text{ m an}^{-1}$ à $0,32 \text{ m an}^{-1}$. La période de 2015 à 2019 est plus dynamique avec 37,4 % du linéaire côtier analysés en érosion (taux $< -0,41 \text{ m an}^{-1}$), et 10,2 % en accumulation. Les zones présentant des taux négatifs pour cette période sont distribuées de manière uniforme à travers le secteur d'étude, mais le nord de l'infrastructure maritime est majoritairement en érosion (fig. 36B). La dynamique érosive de ce sous-secteur s'exprime dans les taux de migration pondérés couvrant la période complète de 1957 à 2019 (fig. 36C). La période de 2019 à 2022 est relativement stable avec 76,6 % de valeurs incluses dans l'intervalle d'incertitude de $\pm 0,59 \text{ m an}^{-1}$.

Tableau 14. Résumé des taux d'évolution diachroniques pour le secteur Umiujaq

Sous-secteur	Longueur (km)	Période d'analyse	Nombre d'années total	Taux moyen (m an^{-1})	Taux minimal (m an^{-1})	Taux maximal (m an^{-1})	Écart-type (m an^{-1})	Incertitude moyenne (m an^{-1})
A	3,6	1957-1983	26	0,46	- 1,97	4,75	0,94	0,09
		1983-1993	10	- 0,52	- 5,30	2,47	1,14	0,17
		1993-2003	10	- 0,02	- 5,89	2,76	1,09	0,16
		2003-2010	7	0,61	- 2,95	9,87	1,39	0,22
		2010-2015	5	0,45	- 4,35	5,16	1,09	0,32
		2015-2019	4	- 0,50	- 5,91	5,21	1,30	0,41
		2019-2022	3	0,08	- 5,64	4,91	1,24	0,59
		1957-2019	62	0,15	- 0,63	1,54	0,38	0,04

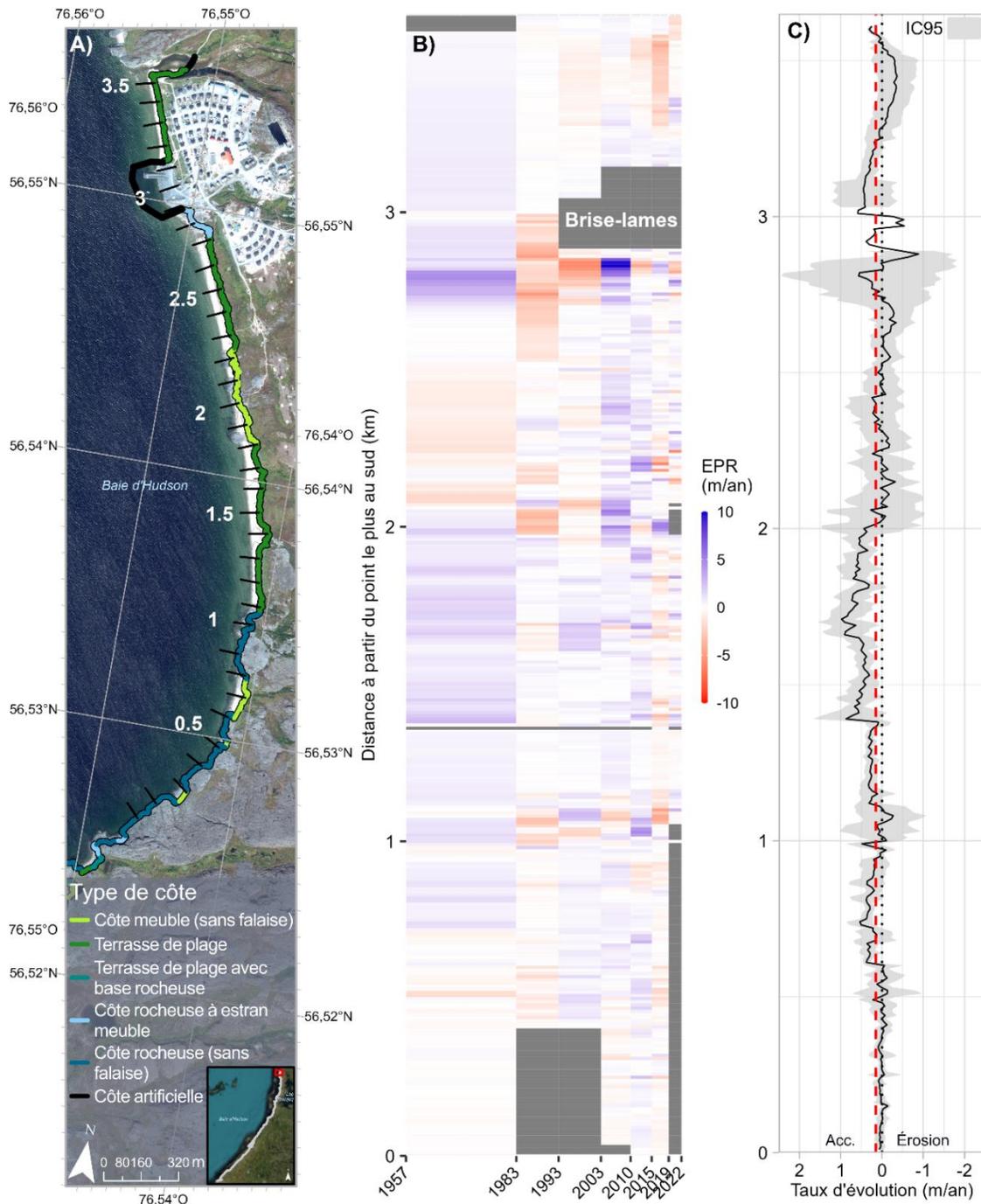


Figure 36. Carte des types de côte du secteur Umiujaq (A), une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et les taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1957 à 2019, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)

La longueur du linéaire côtier où les taux de migration pondérés ont été calculés pour le secteur UM est caractérisée par 5 types de côte (fig. 37). Il faut d'abord mentionner que l'asymétrie et la variance de la distribution des taux d'évolution associés au type de côte artificielle, caractérisées par des coefficients de -1,14 et de 0,12 respectivement, sont liées principalement à la création du brise-lames en deux phases (2001 et 2008) et à sa forme asymétrique (Clerc *et al.*, 2011). Le déplacement non-uniforme du trait de côte entre la période précédant et suivant la construction du brise-lames est à l'origine de cette variabilité.

Les côtes meubles (c-à-d., côte meuble et terrasse de plage) présentent des taux d'évolution pondérés moyens, respectivement de 0,21 et $0,17 \pm 0,69$ m an⁻¹. La variance et la forme de leur distribution sont similaires (coefficient de variance de 0,07 et 0,10 ; coefficient d'asymétrie de 0,10 et 0,32).

Les côtes rocheuses à estran meuble ont la distribution la plus variable, avec un coefficient de variance de 0,16, malgré une concentration de taux d'évolution pondérés entre -0,16 m an⁻¹ et 0,24 m an⁻¹, soit un intervalle de 0,40 m an⁻¹. Le taux d'évolution pondéré moyen pour ce type de côte est très stable, avec une valeur de $0,01 \pm 0,69$ m an⁻¹.

Les côtes rocheuses à estran rocheux ont la distribution la moins variable, avec un coefficient de variance faible (0,02 ; type non représenté sur la figure). Le linéaire côtier caractérisé par ce type de côte a un taux d'évolution pondéré moyen de $0,06 \pm 0,69$ m an⁻¹, où la moitié a un taux d'évolution allant de -0,02 m an⁻¹ et 0,11 m an⁻¹, ce qui en fait un environnement très stable.

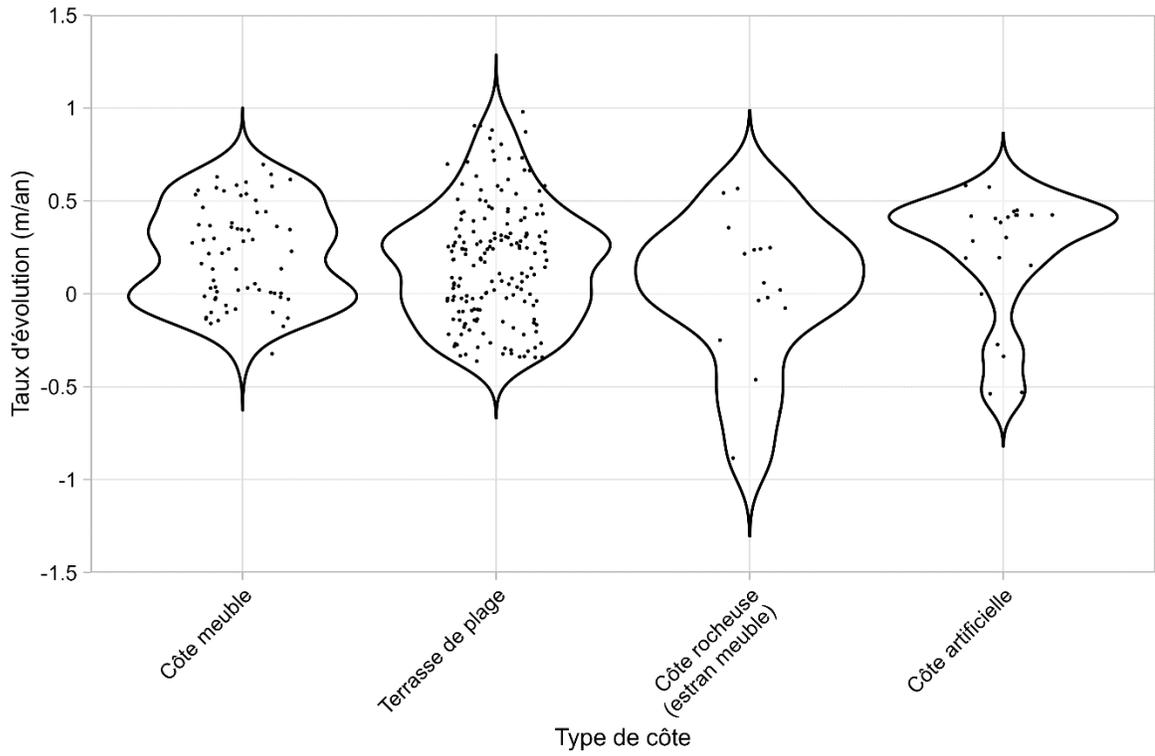


Figure 37. Distribution des taux d'évolution côtière pondérés en fonction du type de côte pour le secteur Umiujaq pour la période de 1957 à 2019

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La discussion contextualise les résultats présentés au chapitre précédent et met en lumière les différentes conditions influençant l'évolution côtière de la région de W-K à Umiujaq. Elle aborde, dans un premier temps, la tendance générale de l'évolution du littoral de la région d'étude. La variabilité spatio-temporelle des conditions hydrodynamiques et leur influence sur l'exposition et l'évolution de la côte des différents secteurs à l'étude sont ensuite discutées. La quatrième section résume, en suivant un gradient sud-nord, les différentes variables hydro- et morfo-dynamiques ayant un impact dominant sur l'évolution du littoral à travers la région d'étude. Enfin, les limites du projet et des pistes de solution sont discutées.

4.1 TENDANCE GÉNÉRALE DE L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE

La tendance générale de l'évolution de cette région côtière de 340 km semble appuyer différentes études pan-arctiques qui identifient les côtes du nord canadien comme étant stables ou en progradation (Irrgang *et al.*, 2022; Lantuit *et al.*, 2012) et d'autres qui soulignent que la côte de la baie d'Hudson est relativement peu sensible à l'érosion (Hachem & Bleau, 2020). Les taux d'évolution moyens de chaque secteur de la région d'étude en fonction de leur période d'analyse sont tous supérieurs ou égaux à 0 m an⁻¹ (fig. 38). Toutefois, en affinant la résolution spatio-temporelle de l'analyse, on remarque que l'évolution côtière de cette région est plus variable que ce que le portrait général nous indique. Bien que la majorité des secteurs soit en progression significative, on observe des événements d'érosion imprévisibles et majeurs. D'autres secteurs de la région ont des périodes d'érosion entrecoupées de périodes stables, tandis que certains sont généralement stables. Toutefois, la

variabilité spatiale de l'évolution côtière de la région de W-K à Umiujaq ne suit pas un gradient latitudinal et n'exprime pas de tendance à travers la période d'étude.

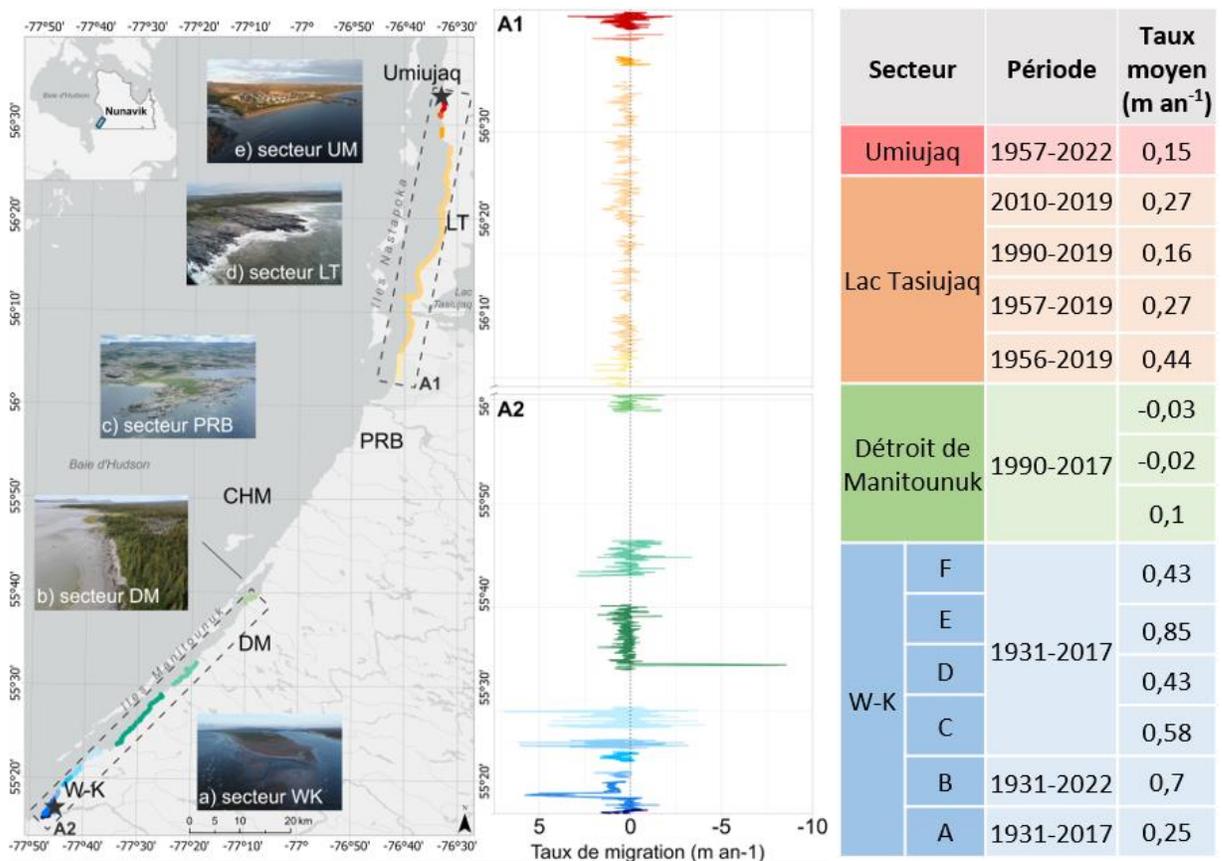


Figure 38. Carte de localisation des zones d'analyse des taux d'évolution pour chaque secteur de la région d'étude et représentation spatiale de ces taux pour les secteurs Umiujaq (rouge) et Lac Tasiujaq (orange) en A1 et détroit de Manitounuk (vert) et W-K (bleu) en A2. Le tableau de droite présente un résumé des taux moyens pour chaque secteur selon leur période d'étude.

L'analyse de différentes variables telles que la géomorphologie, le climat de vagues et de tempêtes, les niveaux d'eau, la glace de mer et même le relèvement isostatique a permis d'identifier que l'évolution côtière de cette région n'est pas influencée par une seule variable, mais plutôt que certaines variables dominant selon la latitude.

4.2 VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

4.2.1 Climat de vagues

Par sa localisation sur la côte de la baie d'Hudson et par son régime marégraphique microtidal, la dynamique côtière de la région de W-K à Umiujaq est dominée par les vagues (L'Hérault *et al.*, 2017). Les hauteurs moyennes des vagues modélisées étant toutes inférieures à 1 m et leur période moyenne avoisinant les 4 s nous indiquent que les vagues de la côte est de la baie d'Hudson sont des vagues gravitaires générées localement et fortement influencées par le vent (Ch.3 (3.2.2) - fig. 20 (p.63); Bosboom & Stive, 2022; Dodet *et al.*, 2018). Pour la région de W-K à Umiujaq, la présence des îles Manitounuk et Nastapoka, et dans une moindre mesure les îles Belcher, réduit la formation des vagues et de houle de grande amplitude, limitant la hauteur et l'énergie des vagues à la côte (Hachem & Bleau, 2020; Neumeier *et al.*, 2023).

La hauteur moyenne des vagues de tempêtes modélisées varie de 2,8 m à 3,5 m pour une période moyenne variant entre 8,7 s et 9,7 s, avec les vagues les plus énergétiques pour les secteurs nord (Ch.3 (3.2.4) - fig. 27 (p.78)). Il s'agit également de vagues gravitaires. L'augmentation de leur hauteur et l'allongement de leur période indique seulement qu'elles sont créées par des vents de plus forte intensité.

La direction des vagues par rapport à l'orientation de la côte influence son exposition aux processus hydrodynamiques (Burvingt *et al.*, 2017; Harley *et al.*, 2017; Masselink *et al.*, 2016). De manière générale, la côte de la région de W-K à Umiujaq a une orientation ouest-nord-ouest à nord-ouest et est donc exposée aux vagues dominantes en conditions normales et tempétueuses. Un segment côtier orienté face aux vagues dominantes recevra un maximum d'énergie et sera plus exposé à un transport de sédiments vers le large, qui sera d'autant plus important plus la hauteur et la période des vagues sera grande, soit en conditions tempétueuses (Bosboom & Stive, 2022; Harley *et al.*, 2017; Masselink *et al.*, 2016). Ceci dit, des vagues déferlant à la côte avec un angle d'incidence oblique, environnant les 45°, ont le

potentiel le plus élevé de mobilisation des sédiments de manière longitudinale (Bosboom & Stive, 2022; Burvingt *et al.*, 2017). Ceux-ci sont ensuite transportés le long de la côte via le courant de dérive littorale ou vers le large (Bosboom & Stive, 2022; Burvingt *et al.*, 2017; Harley *et al.*, 2017; Masselink *et al.*, 2016).

Selon leur orientation, les secteurs W-K et Petite-Rivière-à-la-Baleine (PRB) sont les plus exposés aux conditions de vagues du large, bien que ce fait ne s'exprime pas à travers les taux d'évolution côtière historiques positifs de W-K (Ch.3 (3.3.1)). Leur orientation face au nord-ouest induit un angle d'incidence des vagues moyennes d'environ 30° et de 23° pour les vagues de tempêtes, toutes deux provenant de manière dominante de l'ouest-nord-ouest (Ch.3 (3.2.2 et 3.2.4)). L'embouchure de la PRB a une orientation face au ouest-nord-ouest, exposant la flèche littorale volumineuse aux vagues du large. Toutefois, aucune donnée d'évolution historique du littoral n'est disponible pour ce secteur, nous empêchant d'évaluer l'impact de cette exposition.

Les secteurs Déroit de Manitounuk (DM) et Lac Tasiujaq (LT) sont considérés comme protégés grâce à la barrière topographique induite par la présence des îles Manitounuk et Nastapoka. Dans le secteur DM, l'énergie des vagues de direction ouest (278°) en conditions normales (Ch.3 (3.2.2) – fig. 20 (p.63)) est réduite par la bathymétrie locale et par leur diffraction autour des îles rocheuses (Neumeier *et al.*, 2023). Selon des observations à l'extrémité sud du secteur DM et des conditions tempétueuses modélisées par Neumeier *et al.* (2023), cette atténuation est moins importante pour les vagues de tempêtes de direction nord-ouest, puisqu'elles sont perpendiculaires aux îles et peuvent traverser cette barrière avec un minimum de réfraction au niveau des ouvertures qui les séparent. Ces ouvertures exposent des segments côtiers à l'intérieur du détroit de Manitounuk à des conditions de vagues plus énergétiques, considérant que la direction moyenne des vagues de tempêtes modélisées est du ouest-nord-ouest (284°) (Ch.3 (3.2.4) – fig. 27 (p.78)).

Le secteur LT est aussi marqué par la présence des îles Nastapoka orientées selon un axe nord-sud à plus ou moins 6 km au large. Les résultats du modèle WW3 au large des îles montrent que la direction moyenne des vagues de ce secteur en conditions normales est,

comme au sud, de l'ouest et de l'ouest-nord-ouest en conditions tempétueuses. En se basant sur la modélisation de Neumeier *et al.* (2023), on peut supposer que le secteur LT est exposé aux vagues d'ouest qui pourraient atteindre la côte de manière parallèle via les passages entre les îles Nastapoka. Ce secteur bénéficierait, toutefois, d'une protection des vagues de tempêtes d'ouest-nord-ouest par leur atténuation consécutive de leur diffraction à l'approche des îles.

Les îles Nastapoka s'étendent jusqu'au secteur Umiujaq, mais elles sont marquées par une ouverture parfaitement alignée avec la direction moyenne des vagues de 264° (Ch.3 (3.2.2) – fig. 20 (p.63)). C'est d'ailleurs à cet endroit qu'est situé le segment côtier le plus actif du secteur, soit la terrasse de plage au nord de l'infrastructure maritime. Puisque la direction ouest-sud-ouest des vagues moyennes est perpendiculaire aux îles Nastapoka, il est probable que les vagues puissent traverser cette barrière d'îles au niveau des ouvertures qui les séparent avec un minimum de réfraction et un maximum d'énergie. Néanmoins, l'impact des îles Manitounuk et Nastapoka sur la déformation horizontale des vagues dans le modèle WW3, avec sa résolution de 10 km, ne peut pas être confirmé.

Bien que la direction des vagues au large soit modélisée avec WW3, il est difficile de connaître exactement l'angle de déferlement et l'exposition de la côte sans connaître la bathymétrie. À titre d'exemple, bien que le secteur W-K soit le plus exposé aux vagues du large, l'étude de Neumeier *et al.* (2023) a montré que la bathymétrie de la zone côtière à la hauteur de la communauté atténue l'énergie des vagues du large. La présente étude ne permet donc pas de connaître exactement l'impact de l'orientation des vagues à la côte et les mouvements de transport sédimentaire engendrés à fine échelle (i.e. au niveau de chaque segment de côte) dans la région d'étude. Cependant, les vagues au large modélisées avec WW3 permettent de mettre en évidence un gradient latitudinal général et d'illustrer son impact potentiel sur l'évolution du littoral. Les résultats du modèle montrent que par leur hauteur, leur période et leur direction, les vagues seraient plus énergétiques à Umiujaq (nord) qu'à W-K (sud), si on ignore l'atténuation possible des îles Nastapoka sur le climat de vagues d'Umiujaq.

4.2.2 Régime de tempêtes

Les tempêtes identifiées selon le proxy de la hauteur significative des vagues au large sont présentes pour les mois d'été, mais dominant à l'automne, entre septembre et décembre (Ch.3 (3.2.4) – fig. 28 (p.80)). La direction dominante des vents lors des tempêtes est de l'ouest et du nord-ouest, tout comme la direction moyenne des vagues (Ch.3 (3.2.4) - fig. 27 (p.78); 4.2.1; Neumeier *et al.*, 2023). Pour les secteurs sud (W-K et DM), les tempêtes ayant des vents générant les vagues les plus énergétiques proviennent de l'ouest, puisque le fetch disponible au développement des vagues du nord-ouest est limité par la présence des îles Belcher à 100 km au large dans cette direction (Neumeier *et al.*, 2023).

L'intensité du vent et des tempêtes est influencée par la saisonnalité de la baie d'Hudson. À l'automne, l'air se refroidit plus rapidement que l'eau, générant un flux de chaleur sensible et d'humidité de la baie d'Hudson vers l'atmosphère, accentuant l'intensification des tempêtes, des vents et des vagues, tant au large qu'à la côte (Gachon *et al.*, 2003; Neumeier *et al.*, 2023). À l'hiver (janvier à mi-mai), puisque la baie d'Hudson est recouverte entièrement par la glace de mer, les échanges entre l'eau et l'atmosphère sont interrompus, l'air demeure froid et se stabilise (Savard *et al.*, 2014). Le dénombrement des tempêtes selon les critères hydrodynamiques et la méthode de dépassement de seuil (Ch.2 (2.3.4)) montre qu'aucune tempête ne se produit lors des mois de février à juin (Ch.3 (3.2.4) – fig. 28 (p.80)). Ces résultats sont en accord avec les observations de Savard *et al.* (2014) et Savard (2016) qui montrent que les dépressions atmosphériques affectent tout de même la côte est de la baie d'Hudson en hiver, mais la présence de glace inhibe significativement leur intensification (Savard, 2016; Savard *et al.*, 2014).

La variabilité interannuelle de la température de l'air est importante pour cette région de la côte est de la baie d'Hudson. Pour la période de 1982 à 2023, la température de l'air présente une légère tendance à la hausse pour les communautés de W-K ($\beta = 0,03$; $R^2 = 0,16$; $p\text{-value} < 0,001$; fig. 39A; Charron, 2015). Cette tendance annuelle est toutefois non-significative pour le secteur Umiujaq ($\beta = 0,03$; $R^2 = 0,03$; $p\text{-value} > 0,001$; fig. 39B). Cette

hausse des températures est généralisée pour l'ensemble des mois dans le secteur sud (W-K; Annexe-E (E.1)), tandis qu'elle est davantage présente pour les mois de janvier, juin et octobre pour le secteur nord (Umiujaq; Annexe-E (E.2)). Ces variations de la température de l'air influencent la durée de la saison englacée et la concentration de glace de mer (e.g. hiver 2010-2011; Ch.3 (3.2.1)).

En cohérence avec l'étude de Barrette *et al.* (2020), les résultats présentés au chapitre précédent (Ch.3 (3.2.1) - fig. 19A (p.61)) ne montrent pas de tendance annuelle à la baisse du nombre de jours englacés (concentration de glace > 20%) pour la période de 1991 à 2020, malgré une hausse de la température de l'air. La tendance est possiblement camouflée à travers la variabilité mensuelle. En effet, annuellement, la réduction de la concentration de glace de mer s'exprime surtout lors des mois de juin, juillet, novembre et décembre, soit les mois de fonte et d'englacement (Barrette *et al.*, 2020). De tels changements au niveau de la glace de mer vont influencer le régime de tempêtes en augmentant la période d'échanges de chaleur et d'humidité entre l'eau et l'atmosphère, favorisant possiblement la formation ou l'alimentation de systèmes cycloniques (Hachem & Bleau, 2020; Savard, 2016; Savard *et al.*, 2014). Les résultats issus des données de vagues au large du modèle WW3 montrent déjà cette tendance à la hausse du nombre de tempête annuel pour la période de 1982 à 2023 (Ch.3 (3.2.4) – fig. 26 (p.77)). Toutefois, cette variabilité interannuelle du nombre de tempêtes doit être prise avec un bémol considérant qu'à partir de 2005, il s'agit de projections climatiques et non d'observations.

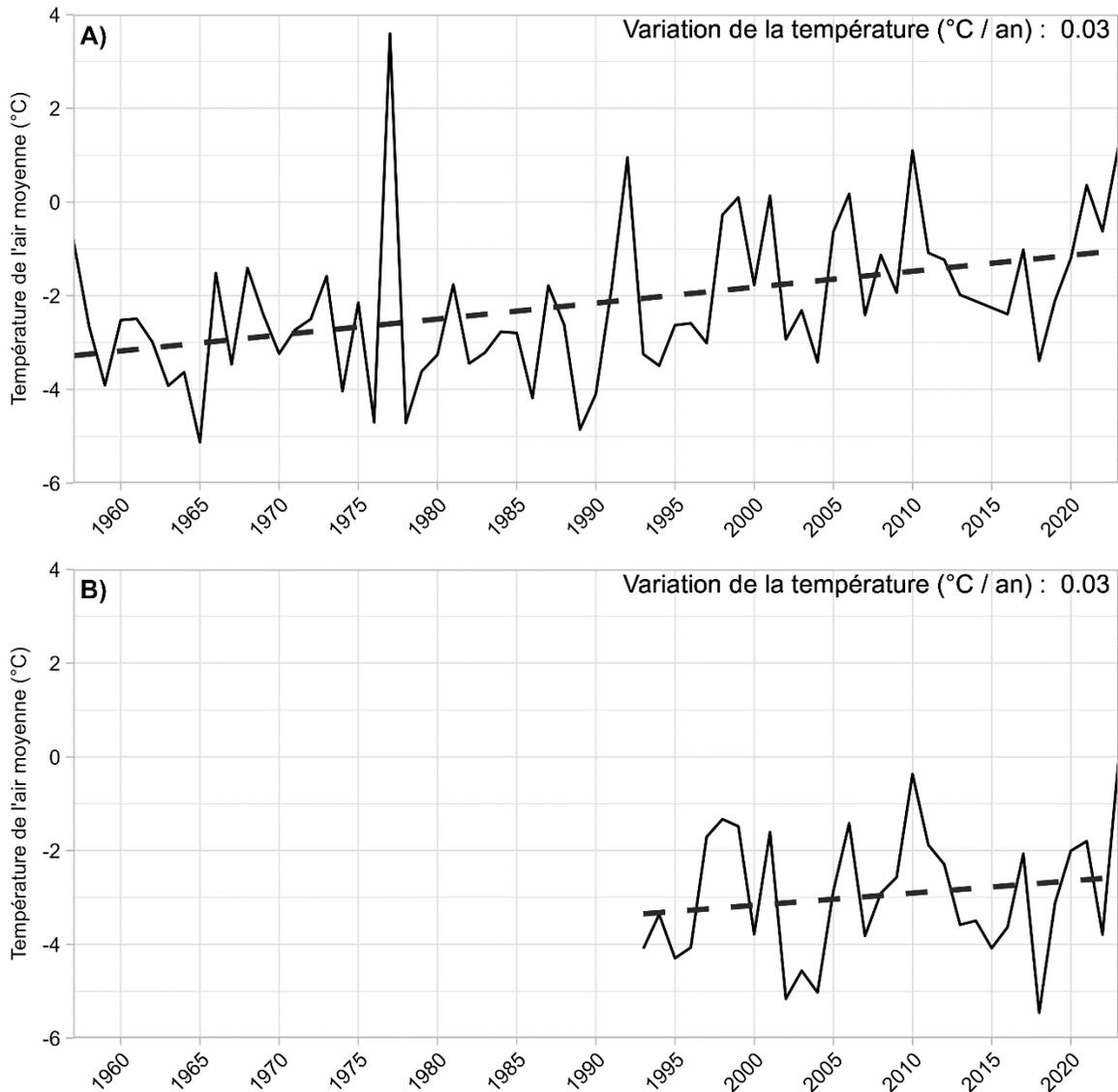


Figure 39. Température de l'air journalière (sans la nuit) annuelle moyenne pour les communautés de A) Whapmagoostui-Kuujuarapik et B) Umiujaq (source des données : ECCC, 2023)

L'allongement de la saison d'eau libre risque aussi d'amplifier et de prolonger jusqu'au début de l'hiver, soit en décembre et en janvier, la période maximale de tempêtes qui se produit présentement à l'automne (Neumeier *et al.*, 2023; Savard *et al.*, 2014). Selon les données de modélisation hydrodynamique WW3 forcée par les simulations climatiques atmosphériques, ce décalage serait déjà entamé : ce n'est qu'en 2023 qu'une tempête a été

prédite pour le mois de janvier. Un décalage de la période de tempêtes impactera la saison de formation de glace côtière qui se produira dorénavant dans des conditions hautement énergétiques (Neumeier *et al.*, 2023; Savard, 2016). La présence de glaces non-consolidées dans des conditions tempétueuses risque aussi d'affecter l'érosion des plages et de l'arrière-plage par le biais de poussées glacielles initiées par le vent (Boisson, 2019).

Considérant la dimension des systèmes dépressionnaires, il est attendu que la variabilité spatiale du nombre de tempêtes annuel soit faible à travers la région d'étude (Ch.3 (3.2.4) - fig. 26 (p.77)). Ce résultat est cohérent avec l'analyse de Savard *et al.* (2014) qui mentionne que par la vitesse plus lente de déplacement des tempêtes en baie d'Hudson que dans le golfe du Saint-Laurent et Terre-Neuve, les tempêtes se maintiennent plus longtemps dans cette région. Ceci favorise la régénération et le redéveloppement des systèmes dépressionnaires, provoquant des tempêtes de dimension importante, de durée plus longue, mais généralement moins intenses qu'au niveau du golfe du Saint-Laurent et de l'Atlantique Nord-Ouest (Savard *et al.*, 2014).

Néanmoins, la variabilité interannuelle pour l'ensemble de la région est importante et semble illustrer un cycle depuis la fin des années 1990 (Ch.3 (3.2.4) - fig. 26 (p.77)). Cette cyclicité est possiblement liée à des variations climatiques mondiales mieux connues sous le nom de téléconnexions. Les systèmes dépressionnaires de la baie d'Hudson semblent être influencés par l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) et la *Baffin Island West Atlantic* (BWA) (Hurrell, 1995; Savard *et al.*, 2014). La BWA correspond à l'anomalie de la hauteur géopotentielle 500-hPa au niveau de l'île de Baffin et de l'Atlantique Ouest, soit la différence entre la hauteur actuelle et la valeur moyenne de la période de 1971 à 2011 (Shabbar *et al.*, 1997). Dans l'ensemble, l'intensité des tempêtes est plus élevée et leur vitesse de déplacement est plus lente lorsque l'anomalie BWA est grande. La corrélation est moins forte avec les variations de l'ONA.

4.2.3 Variations du niveau d'eau en conditions énergétiques

À partir des données du modèle WW3, les niveaux d'eau en conditions de tempêtes suivent une tendance similaire aux niveaux d'eau maximums quotidiens : les niveaux d'eau au repos (*SWL*) sont supérieurs pour les secteurs au sud en comparaison aux secteurs au nord, tendance qui est à l'inverse en ce qui concerne l'influence des vagues à la côte ($R_{2\%}$). Ces résultats sont cohérents avec la variabilité latitudinale du marnage qui atteint des valeurs maximales de 2 m pour W-K et de 1,4 m pour Umiujaq (Pêches et Océans Canada, 2023). Les niveaux d'eau totaux moyens lors des tempêtes varient peu à travers la région d'étude : 0,62 m à 0,81 m. Toutefois, les *SWL* du modèle WW3 n'incluent pas l'influence de la pression atmosphérique. Cette dernière peut avoir un impact significatif sur les niveaux d'eau totaux, particulièrement à l'est de la baie d'Hudson lors des tempêtes. Dans un régime marégraphique microtidal comme celui de la région d'étude, la surcote générée par des dépressions atmosphériques a la capacité de surpasser plus aisément les variations marégraphiques que dans un régime macrotidal (Hachem & Bleau, 2020; Thieler et Hammar-Klose, 2000 dans Koroglu *et al.*, 2019; Neumeier *et al.*, 2023; Savard *et al.*, 2014).

Puisque cette étude n'inclut pas l'influence des variations de pression atmosphérique sur les niveaux d'eau, il est possible que cette variable influence la variabilité de l'évolution côtière entre W-K et Umiujaq. En effet, sans l'influence de la pression atmosphérique, les *NET* et *SWL* sont majoritairement supérieurs au sud de la région. Pourtant, le secteur Umiujaq (nord) est caractérisé par plus d'érosion que le secteur W-K (sud). Pour cette région, Neumeier *et al.* (2023) et Savard (2016) ont montré que les variations atmosphériques étroitement liées à la présence de tempêtes pouvaient engendrer des surcotes de respectivement 1,4 m à 1,5 m à W-K et Umiujaq, ce qui pourrait influencer le *NET* et son impact à la côte. En fait, en considérant cette surcote de 1,5 m ainsi qu'un *NET* moyen de 0,79 m lors des tempêtes, il est possible que le pied de la terrasse de plage au nord du secteur d'Umiujaq, qui est à environ 2 m d'élévation, soit aisément atteint par les vagues lors des tempêtes.

L'occurrence de tempêtes est aussi liée à des vents importants en baie d'Hudson. En fait, Savard *et al.* (2014) mentionne que le rôle du vent domine par rapport aux variations de la pression atmosphérique en ce qui concerne le développement de surcote à Umiujaq. Selon leur direction et leur force, les vents peuvent influencer les niveaux d'eau en générant une surcote lorsque leur direction est face à la côte ou une décote si leur direction est opposée. Pour la côte est de la baie d'Hudson, cette variable est non-négligeable.

La force et la durée d'action du vent influence aussi la capacité de formation des vagues hautes et énergétiques. D'ailleurs, les années 1999, 2001 et 2003 sont aussi caractérisées des hauteurs de vagues maximales les plus élevées, qui étaient supérieures à Umiujaq (Ch.3 (3.2.2)). Ceci souligne l'importance de l'influence des vagues à la côte, via le jet de rive ($R_{2\%}$), dans les niveaux d'eau atteints pour les secteurs nord. Contrairement aux conditions normales où les niveaux d'eau au repos (*SWL*) ont une contribution supérieure sur les niveaux d'eau totaux (*NET*), en conditions tempétueuses, la contribution du jet de rive est majeure.

Le relèvement isostatique, toujours actif dans la région d'étude, contribuera à réduire l'impact des surcotes en diminuant le niveau moyen de la mer d'au moins 6,3 cm pour W-K à 16,6 cm pour Umiujaq d'ici 2100 (Ch.1 (1.2); James *et al.*, 2021). Néanmoins, l'allongement de la période d'eau libre et son impact sur la fréquence et l'intensité des tempêtes risque de dominer (Neumeier *et al.*, 2023; Savard, 2016). L'impact des changements climatiques sur les variations de la pression atmosphérique et sur l'intensification des vents va augmenter la fréquence d'événements de vagues hautement énergétiques. Les modèles indiquent que l'allongement de la durée où les vents propices au développement de vagues hautement énergétiques, ainsi que le niveau de la marée et de la surcote auront des impacts à la côte supérieurs à la baisse du niveau marin relatif, et ce pour l'ensemble de la région de W-K à Umiujaq (Neumeier *et al.*, 2023; Savard, 2016; Savard *et al.*, 2014).

4.3 INFLUENCE POTENTIELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET HYDRODYNAMIQUES SUR L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE

Pour les secteurs de W-K et d'Umiujaq, la haute résolution temporelle des données a permis une meilleure analyse de l'impact des variables hydrodynamiques sur l'évolution côtière. Pour le secteur de W-K au sud, les périodes clés d'érosion sont de 1931 à 1954 pour les terrasses de plage du sous-secteur A et de 2010 à 2017 pour un segment de côte rocheuse à estran meuble du sous-secteur D (tableau 15; Ch.3 (3.3.1)). Pour le secteur d'Umiujaq au nord, les périodes clés d'érosion des côtes meubles sont de 1983 à 1993 et de 2010 à 2019. Pour la période de 2010 à 2015, l'érosion était localisée au niveau de la terrasse de plage au nord de l'infrastructure maritime, tandis que de 2015 à 2019, la côte a reculé de manière généralisée et aux taux les plus élevés de la période d'étude (tableau 15; Ch.3 (3.3.4)).

L'érosion survenue entre 2010 et 2015 est possiblement étroitement liée aux conditions climatiques et hydrodynamiques extrêmes. L'année 2010 a été la plus chaude pour la période de 1993 à 2022 avec une moyenne de température journalière (de 8h à 18h) de $-0,37^{\circ}\text{C}$ à Umiujaq et de $1,10^{\circ}\text{C}$ à W-K (selon les données climatiques de ECCC (2023); fig. 39 (p.107)). L'englacement de l'hiver 2010-2011 a aussi été le plus court pour la période de 1991 à 2020 dans la région d'étude (Ch.3 (3.2.1)), tandis qu'un record minimal de glace de mer a été observé en Arctique en 2012. Les résultats du modèle WW3 ne tiennent cependant pas compte des forçages atmosphériques réels qui ne peuvent pas être bien représentés en mode prédictif. Néanmoins, ils montrent des hauteurs de vagues moyennes les plus élevées en 2012 et des hauteurs de vagues maximales en 2011, avec des valeurs supérieures pour le secteur Umiujaq (tableau 15; Ch.3 (3.2.2)). Il est impossible de savoir si les niveaux d'eau maximums moyens ont suivi cette tendance, puisque les données de cette variable ne sont pas disponibles après 2004. Puisque l'année 2010 est celle ayant eu l'englacement le plus court et un maximum d'érosion, il est possible d'émettre l'hypothèse que les vagues étaient aussi à leur maximum. De nouvelles simulations WW3, forcées par des réanalyses climatiques, permettraient de confirmer cette hypothèse.

À l'exception de la période de 2010 à 2015, les périodes de recul de la côte ne coïncident pas avec des périodes aux conditions hydrodynamiques les plus énergétiques. Toutefois, selon les prédictions de la modélisation WW3, les années où la région d'étude aurait eu le plus grand nombre de tempêtes sont de 2015 à 2018, avec un maximum de tempêtes atteint en 2018 (tableau 15; Ch.3 (3.2.4)). Cette période ayant aussi enregistré les taux de reculs maximaux pour les secteurs W-K et Umiujaq, il est possible d'émettre l'hypothèse que l'évolution côtière des secteurs sud et nord de la région de W-K à Umiujaq ne dépend pas que des conditions hydrodynamiques extrêmes, mais aussi de la fréquence des conditions tempétueuses auxquelles elle est exposée. En effet, des tempêtes de faible intensité ou de courte durée peuvent provoquer des dommages cumulatifs si elles surviennent de manière répétitive et rapprochée (Splinter *et al.*, 2014 ; Ropars, 2014). Néanmoins, un manque de données historiques pour les secteurs DM, PRB et LT nous limite dans l'extrapolation de cette hypothèse à l'ensemble de la région d'étude. De plus, il serait nécessaire de refaire la modélisation des vagues avec des réanalyses climatiques afin de confirmer plus précisément le nombre de tempêtes survenues.

La hausse des températures de l'air n'influence pas que la concentration de la glace de mer et les conditions hydrodynamiques. Elle a un impact non-négligeable sur les côtes à pergélisol résiduel à discontinu riche en glace, comme celles du sud de la région d'étude. En fait, déjà au début des années 2000, il a été identifié que le réchauffement des mois d'été était possiblement la cause principale de la dégradation du pergélisol du détroit de Manitousuk, et ce, depuis les années 1950 (Beaulieu & Allard, 2003). Le pergélisol côtier dégradé est ensuite mobilisé par les vagues et les courants, affectant le recul de la côte (Beaulieu & Allard, 2003).

Pour les côtes à dominance sédimentaire de la région d'étude, dont environ 7% sont caractérisées de sédiments silto-argileux (Ch.3 (3.1)), l'influence des précipitations n'est pas à négliger. Une augmentation de la teneur en eau de ce type de sol peut provoquer le déclenchement de mouvements de terrain (Wieczorek, 1996). Cette saturation du sol peut être engendrée par une augmentation des précipitations annuelles sous forme de pluie ou de

neige, augmentation qui s’observe déjà au Nunavik depuis 1981 (Charron, 2015), ainsi que par la fonte accélérée du manteau neigeux provoquée par des températures de l’air plus élevées. Toutefois, un manque de données historiques des précipitations de la période du passé récent limite l’établissement de liens entre des événements de pluie et de fonte rapide de neige et le recul de la côte.

Tableau 15. Périodes de faible englacement, de vagues hautement énergétiques, de tempêtes nombreuses, ainsi que périodes clés d’érosion et d’accrétion (suite à la prochaine page)

	Courte période glace	H_s moyennes les plus élevées	H_s max les plus élevées	NET max les plus élevés	Période forte en tempêtes	Période érosion		Période accrétion
1931						W-K-A		
//								
1954						DM-B (Beaulieu et Allard, 2003)	UM	W-K
//								
1985				X				
1986								
1987								
1988								
1989								
1990								
1991								
1992								
1993								
1994					X			
1995								
1996								
1997								
1998		X			X (UM)			
1999	X		X	X				
2000								
2001	X		X	X				
2002								
2003			X	X		DM-A (glissement de terrain)		
2004					X			
2005		X						
2006						DM-B		
2007				Non-disponible				

	Courte période glace	H_s moyennes les plus élevées	H_s max les plus élevées	NET max les plus élevés	Période forte en tempêtes	Période érosion			Période accrétion			
2008				<i>Non-disponible</i>		W-K-D	DM-B	UM (Nord)				
2009												
2010	X											
2011			X									
2012		X										
2013												
2014												
2015												
2016												
2017					X						UM	
2018												
2019									X			
2020												W-K
2021												
2022												

4.4 VARIABLES DOMINANTES POUR L'ÉVOLUTION CÔTIÈRE DE CHAQUE SECTEUR À L'ÉTUDE

La côte de la région de W-K à Umiujaq n'évolue pas de manière uniforme ni selon un gradient latitudinal. Les facteurs influençant l'évolution de ce littoral varient selon les secteurs.

Whapmagoostui-Kuujuarapik

Le secteur le plus méridional, autour des communautés W-K, a une réponse différente de celle de son secteur voisin. Ce secteur n'a pas enregistré d'érosion majeure depuis 1954, et ce, malgré des valeurs de niveau d'eau au repos supérieures au reste de la région, une dominance de côtes sédimentaires, des conditions hydrodynamiques et de tempêtes similaires à celles du secteur du détroit de Manitousuk et moins énergétiques que les secteurs plus au nord, et surtout sans aucune barrière topographique à l'ouest. C'est en fait la zone qui progresse le plus rapidement, soit à un rythme moyen de $0,54 \text{ m an}^{-1}$. Ce secteur est riche en

sédiments sableux alimentés par un grand affluent, la Grande-Rivière-à-la-Baleine, situé juste au sud. Cet apport sédimentaire semble être le facteur dominant influençant l'évolution côtière de ce secteur. Il favorise la formation de côtes progressives de type flèche et cordon littoral, tombolo et terrasse de plage. Ainsi, malgré des prévisions de conditions de vagues plus énergétiques pour les années futures avec l'influence des changements climatiques, le secteur de Whapmagoostui-Kuujjuarapik ne semble pas à risque d'érosion significative pour l'instant (Hachem & Bleau, 2020).

Détroit de Manitounuk

Le secteur du détroit de Manitounuk a des conditions de vagues et de niveau d'eau au repos similaires au secteur W-K, mais profite d'une protection supplémentaire grâce aux îles Manitounuk localisées de 1 à 3 km au nord-ouest (L'Hérault *et al.*, 2017; Neumeier *et al.*, 2023). Selon l'orientation des tempêtes, la hauteur des vagues du large peut être réduite de plus de 1,5 m grâce à cette barrière topographique, induisant des vagues de tempête moyennes ne dépassant pas 1 m à 1,2 m et atteignant une hauteur maximale ponctuelle de plus de 2 m (Neumeier *et al.*, 2023). L'impact de ce relief insulaire n'est pas inclus dans l'analyse ici, puisque les points de données modélisées sélectionnés sont localisés du côté ouest de ces îles.

Néanmoins, malgré des conditions hydrodynamiques parmi les moins énergétiques de la région ainsi qu'une barrière atténuant l'énergie des vagues de tempêtes de direction ouest (Neumeier *et al.*, 2023), le secteur du détroit de Manitounuk enregistre les taux et les pourcentages les plus élevés d'érosion côtière de la région d'étude (Ch.3 (3.3.2)). Ce secteur enregistre de l'érosion depuis les années 1950 à des taux augmentant graduellement de $-0,65 \text{ m an}^{-1}$ à $-1,05 \text{ m an}^{-1}$ de 1950 à 1995, pour ralentir à des taux de $-0,70 \text{ m an}^{-1}$ pour la période de 1990 à 2017 (Beaulieu & Allard, 2003; Ch.3 (3.3.2)). La géomorphologie de ce secteur, soit des falaises basses, des marais maritimes et des reliefs de pergélisol en dégradation, caractérisés par des sédiments silto-argileux déposés par la mer de Tyrell lors de la déglaciation de l'inlandsis Laurentidien, semble être à l'origine de l'évolution côtière dans ce secteur. La dégradation du pergélisol par la hausse des températures s'observe déjà depuis

1950 (Beaulieu & Allard, 2003). Avec l'augmentation des conditions météorologiques extrêmes, telles qu'une hausse des températures et des précipitations, ainsi que l'accélération de la fonte du manteau neigeux (Barrette *et al.*, 2020; Logan *et al.*, 2011), la stabilité des côtes à sédiments fins de ce secteur sera d'autant plus compromise (Beaulieu & Allard, 2003; Piliouras *et al.*, 2023).

L'augmentation de la teneur en eau du sol par une hausse des précipitations, la fonte rapide de la neige et la fonte de la glace de pergélisol vulnérabilise la stabilité du sol de cette région subarctique. Ce type de conditions météorologiques combiné à la géomorphologie de sédiments fins du sud de la région de W-K à Umiujaq peut provoquer d'importants mouvements de terrain comme celui s'étant produit au début des années 2000 au sud du secteur DM et ceux ayant eu lieu en 2021 et 2022 respectivement dans la Grande-Rivière-à-la-Baleine et la Petite-Rivière-à-la-Baleine. Cependant, une analyse des données météorologiques ou de réanalyses climatiques (p.ex. ERA5) permettrait de confirmer la cause de ces événements. Selon des modèles de prévisions climatiques, une hausse de la température de l'air jusqu'à 5°C en hiver et 2,7°C en été, ainsi que l'augmentation des précipitations, jusqu'à 25 à 45 % en hiver, sont prévues pour cette région du Nunavik d'ici 2050 (Logan *et al.*, 2011). De tels changements augmenteront sans doute le risque d'érosion côtière pour ce secteur de la côte est de la baie d'Hudson.

Lac Tasiujaq

Considérant la similarité des conditions hydrodynamiques des secteurs Lac Tasiujaq et Umiujaq, leurs différents rythmes d'évolution sont surprenants. Près de 44% du littoral étudié du secteur du Lac Tasiujaq progresse contre 6,8% qui s'érode, avec des niveaux d'eau, des hauteurs et des périodes de vagues de tempête similaires à ceux d'Umiujaq. La géomorphologie de ce secteur influence ces taux. La côte du secteur LT est caractérisée de manière dominante par des affleurements rocheux, associés au revers de cuestas, entrecoupés de plages de poches. Ce type de système semble favoriser la capture de sédiments et contribuer à protéger le littoral meuble des climats de vagues énergétiques. Les plages de

poches, généralement de forme concave, sont propices à une dynamique de sédimentation (Bosboom & Stive, 2022).

Dans une mesure similaire au secteur DM, les côtes du secteur LT bénéficieraient de la protection qu'offrent les îles Nastapoka pour des conditions de tempêtes provenant du ouest-nord-ouest (Fraser *et al.*, 2005; Hachem & Bleau, 2020). La présence de ces îles permet de réduire le fetch à maximum 15 km au lieu de 120 km comme c'est le cas pour le secteur PRB. Néanmoins, les taux de progradation de la côte du secteur LT demeurent inférieurs à ceux des secteurs méridionaux.

Umiujaq

Le secteur Umiujaq est aussi localisé à l'est des îles Nastapoka. Toutefois, à la hauteur de la communauté, une large ouverture (~ 2 km) sépare les îles. Les vagues moyennes d'orientation ouest-sud-ouest peuvent traverser la barrière d'îles avec un minimum de réfraction et déferler avec un maximum d'énergie au segment côtier le plus actif de ce secteur : la terrasse de plage au nord de l'infrastructure maritime. Toutefois, tout comme pour le secteur LT, un manque de données hydrodynamiques de l'intérieur du détroit de Nastapoka ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

Les îles Nastapoka apportent aussi une protection hivernale, en favorisant la prise d'une glace côtière stable et en limitant un apport de glace de la baie d'Hudson lors du dégel au printemps (Clerc *et al.*, 2012). Toutefois, le détroit de Nastapoka emprisonne les glaces du lac Tasiujaq dérivant du sud vers le nord suite à leur évacuation au printemps (Clerc *et al.*, 2012). Cette dynamique glacielle fait perdurer la saison de glaces mobiles printanières dans le secteur Umiujaq, exposant les côtes meubles à l'érosion par des poussées glacielles initiées par le vent (Boisson, 2019; Clerc *et al.*, 2012). Le vent idéal pour initier ces mouvements est un vent de l'ouest et du sud-ouest, soit une direction dominante pour les mois de fonte de glace (juin et juillet) à Umiujaq (Ch.1 (1.4) ; Annexe-A (A.2)).

Bien qu'en conditions normales les niveaux d'eau soient inférieurs à Umiujaq que dans les secteurs sud, lors des tempêtes, l'apport supplémentaire généré par les vagues à la côte

induit des niveaux d'eau supérieurs pouvant aller jusqu'à atteindre le pied de la terrasse de plage (~ 2 m d'élévation) située au nord de l'infrastructure maritime. L'impact du vent sur les vagues et les niveaux d'eau totaux de ce secteur est supérieur à l'impact des variations de la pression atmosphérique (Savard *et al.*, 2014). Ainsi, avec des vents soufflant à une vitesse moyenne de 23,3 km/h (soit 1,7 fois supérieur aux vitesses enregistrées à W-K), une saison d'eau libre légèrement plus longue et des conditions de tempête plus dynamiques, les conditions hydrodynamiques et météorologiques énergétiques semblent être les principaux moteurs des changements côtiers du secteur Umiujaq.

Ces conditions ne génèrent pas de l'érosion côtière de manière continue, mais peuvent induire des périodes d'érosion maximale lorsque des tempêtes significatives, mais de courtes durées se produisent de manière consécutive, comme entre 2015 et 2019. Cette zone pourrait être plus vulnérable à des conditions hydrodynamiques tempétueuses plus fréquentes en raison des changements climatiques (Splinter *et al.*, 2014; Ropars, 2014).

4.5 LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS

4.5.1 Manque de données historiques

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de l'évolution du littoral de W-K à Umiujaq au Nunavik analyse différentes variables pouvant être à l'origine des changements côtiers. Toutefois, par manque de données historiques, l'évolution côtière d'un peu plus de 246 km n'a pas été analysée. Ce linéaire correspond à une partie du détroit de Manitounuk, l'entièreté du secteur PRB et une partie du secteur LT. La variabilité géomorphologique et hydrodynamique de ces différents secteurs ne permet pas d'extrapoler de tendances évolutives. Considérant la variabilité spatiale des taux d'évolution du secteur DM et les conditions de vagues parmi les plus énergétiques de la région pour le secteur PRB, ces deux secteurs seraient à privilégier dans l'acquisition de données historiques pour améliorer la résolution spatiale de l'étude.

Afin de pallier à l'absence de données historiques pour le secteur PRB, l'outil CoastSat pourrait être utilisé (Vos *et al.*, 2019). Cet outil libre d'accès utilise des techniques de télédétection pour tracer automatiquement la côte avec une précision de 10 à 15 m sur de l'imagerie satellitaire Landsat et Sentinel-2, et mesurer l'évolution côtière d'une région déterminée par l'utilisateur. La précision des résultats d'évolution du littoral obtenus via l'outil CoastSat est significativement moindre que celle obtenue dans cette étude, mais ces données permettraient d'avoir un aperçu du dynamisme côtier du secteur PRB.

4.5.2 Manque de données en zone côtière

Les données hydrodynamiques utilisées dans cette étude sont issues d'une modélisation au large des côtes. Toutefois, des conditions hautement énergétiques au large ne sont pas toujours synonymes de conditions énergétiques à la côte (Masselink *et al.*, 2016). Divers processus d'atténuation peuvent se produire entre les deux, diminuant l'énergie des vagues et modifiant leur direction. Avoir des données des conditions hydrodynamiques en zone côtière, via des bouées ou des capteurs de pression mesurant la hauteur des vagues, améliorerait la compréhension des conditions hydrodynamiques morphogènes pour cette région d'étude. Elles permettraient aussi de combler le manque de connaissances sur l'impact des reliefs insulaires sur le climat de vagues au niveau du détroit de Manitousuk et de Nastapoka. De plus, afin d'avoir un portrait plus adéquat de la période récente, il serait pertinent de refaire des simulations avec la modélisation WW3 entre 2005 et 2023 à partir des forçages atmosphériques basés sur des réanalyses climatiques qui assimilent les observations des stations météorologiques et satellitaires.

La région souffre aussi d'un manque de données bathymétriques en zone côtière. L'accès à ces données favoriserait une meilleure compréhension des processus de déformation horizontale de la houle (réfraction, diffraction et réflexion), permettant de mieux anticiper la direction et l'angle avec lequel les vagues déferlent à la côte. Ces données contribueraient à une meilleure compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire, des courants de dérive littorale et du déplacement des sédiments à travers la région d'étude

permettant d'approfondir l'étude de l'évolution du littoral. Ce type d'analyses à plus grande échelle à l'aide de données hydro- et morpho-dynamiques en zone côtière pourrait se concentrer sur les secteurs présentant le plus grand risque d'érosion, soit le secteur Umiujaq et le détroit de Manitousuk.

Des données de pente des plages amélioreraient les connaissances concernant l'impact des vagues à la côte et l'identification adéquate des zones à risque d'érosion et de submersion. Avec le développement de méthodes de télédétection pour l'extraction de la bathymétrie par satellite (Knudby *et al.*, 2016 ; Ma *et al.*, 2020), on s'attend à ce que ces données soient de plus en plus accessibles dans un avenir rapproché.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les changements climatiques augmentent l'intensité des conditions hydrodynamiques et la durée de la saison des tempêtes en réduisant la concentration et l'épaisseur de la glace de mer, ainsi que la durée de la saison englacée. Ces changements dans les conditions hydrodynamiques exposent les côtes meubles, d'autant plus celles caractérisées de pergélisol, aux risques d'érosion côtière. Selon la géomorphologie du littoral et le contexte local, l'exposition des côtes arctiques et subarctiques aux risques côtiers ne sera pas la même. Le littoral de pergélisol riche en glace bordant l'océan arctique, particulièrement au niveau de la mer de Beaufort et de l'Alaska serait le plus à risque d'érosion, tandis que les côtes de l'arctique et du subarctique canadien sont considérées comme étant généralement stable ou en progression grâce au relèvement isostatique et à la dominance rocheuse des côtes. Toutefois, le nombre d'études couvrant les littoraux arctiques et subarctiques diffère, ces derniers ayant été davantage négligés. C'est notamment le cas de la baie d'Hudson, qui, bien que considérée en région subarctique, son climat et son environnement s'apparentent aux conditions froides de l'Arctique.

Cette étude a tenté de diminuer cet écart en étudiant la variabilité spatio-temporelle de l'évolution côtière d'une région du subarctique canadien. L'objectif principal était d'expliquer la variabilité de l'évolution côtière sur un gradient latitudinal de Whapmagoostui-Kuujuarapik à Umiujaq au Nunavik à travers la compréhension du rôle de la typologie du littoral et des processus hydrodynamiques auquel il est exposé. Pour ce faire, une caractérisation éco-géomorphologique de la côte, un portrait des conditions hydrodynamiques et l'analyse de l'évolution historique du littoral ont été réalisés pour les 340 km de linéaire côtier qui définissent cette région.

L'évolution côtière de cette région est très variable, contrairement à ce qui est rapporté dans la littérature. La majeure partie de la côte progresse de manière significative ou demeure

stable, influencée par le relèvement isostatique et l'apport de sédiments provenant de grands affluents. Certains segments côtiers sont plutôt en érosion de manière continue ou discontinue dus soit au type de côte et aux conditions météorologiques, soit à des conditions hydrodynamiques énergétiques. Il est intéressant de noter que cette variabilité n'est pas corrélée à la latitude et n'évolue pas de manière progressive dans la région. Elle est davantage influencée par des caractéristiques locales que par des variations latitudinales ou régionales.

Ces conclusions ne font que renforcer l'importance d'améliorer nos connaissances sur la dynamique côtière du Nunavik à une échelle locale. Si les différences locales sont si importantes pour ce relativement court littoral de 340 km, cette variabilité s'observe probablement, sinon davantage, pour les 10 000 km de côtes du Nunavik. De plus, une meilleure compréhension de l'évolution des côtes à pergélisol discontinu ou isolé en dégradation que sont celles de la côte est de la baie d'Hudson offre une fenêtre sur le comportement futur des côtes arctiques. Ces côtes actuellement caractérisées de pergélisol continu seront possiblement à un stade discontinu au cours des prochaines années. Mieux comprendre le comportement des côtes subarctiques de pergélisol discontinu face aux conditions hydrodynamiques et météorologiques affectées par les changements climatiques favorisera l'anticipation des schémas évolutifs futurs des côtes arctiques.

L'étude de la variabilité de l'évolution du littoral de cette région du Nunavik a été réalisée à grande échelle, mais avec des données ne permettant pas de couvrir l'entièreté du linéaire côtier et ne permettant pas de résoudre l'impact de la topographie insulaire et de la déformation des conditions hydrodynamiques en zone côtière. Afin de mieux comprendre les facteurs locaux influençant l'évolution du littoral, il importe d'améliorer la résolution spatio-temporelle des données en zone côtière pour documenter davantage les conditions menant à des événements d'érosion. Des données à plus haute résolution telles que celles fournies par les nouvelles constellations de satellites d'observation de la Terre (e.g. PlanetScope, Worldview-Legion), et idéalement *in situ*, pourraient se concentrer au niveau des secteurs plus dynamiques comme le secteur d'Umiujaq. Une étude plus approfondie des conditions ayant provoquées les importants glissements de terrain dans les sédiments post-glaciaires fins

de la Grande-Rivière-à-la-Baleine et la Petite-Rivière-à-la-Baleine lors des années 2021 et 2022 serait intéressante afin de pouvoir anticiper de tels évènements en zone côtière de sédimentologie similaire comme le détroit de Manitounuk. L'amélioration des connaissances sur la dynamique côtière et les conditions influençant l'évolution du littoral est essentielle au Nunavik afin de fournir un cadre solide pour le développement côtier et marin futur et assurer la sécurité alimentaire et la protection des infrastructures communautaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allard, M., Caron, S., & Bégin, Y. (1996). Climatic and Ecological Controls on Ice Segregation and Thermokarst: the Case History of a Permafrost Plateau in Northern Quebec. *Permafrost Ad Periglacial Processes*, 7, 207–227.
- Allard, M., Michaud, Y., Ruz, M.-H., & Héquette, A. (1998). Ice foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a subarctic microtidal environment, Manitousuk Strait, northern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35, 965–979.
- Andrews, J., Babb, D., & Barber, D. G. (2018). Climate change and sea ice: Shipping in Hudson Bay, Hudson Strait, and Foxe Basin (1980–2016). *Elementa Science of the Anthropocene*, 6(19), 1–23. <https://doi.org/10.1525/elementa.281>
- Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). (2019). *Arctic Climate Change - Update 2019*, 11 p.
- Aré, F. E. (1988). Thermal abrasion of sea coasts (part I). *Polar Geography and Geology*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.1080/10889378809377343>
- Arsenault, E., Drejza, S., Friesinger, S., Blain, M., Savoie-Ferron, F., Houde-Poirier, M., Fraser, C. Marie, G. et P. Bernatchez (2021). *Cartographie des types de côtes du Québec maritime – Rapport méthodologique*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, septembre 2021, 74 p.

- Autret, R., Didier, D., Suanez, S., Stéphan, P., Ammann, J., Baudry, J., Erlingsson, B., & Sigurðarson, S. (2023). Cliff-top boulder morphodynamics on the high-energy volcanic rocky coast of the Reykjanes Peninsula (SW Iceland). *Marine Geology*, 456, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106984>
- Barnhart, K. R., Overeem, I., & Anderson, R. S. (2014). The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts. *Cryosphere*, 8(5), 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1777-2014>
- Barrette, C., Brown, R., Way, R., Mailhot, A., Diaconescu, E.P., Grenier, P., Chaumont, D., Dumont, D., Sévigny, C., Howell, S., Senneville, S. (2020). *Chapter 2: Nunavik and Nunatsiavut regional climate information update*. Dans Ropars, P., Allard, M., Lemay, M. (eds.), *Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy, an integrated regional impact study (IRIS) of climate change and modernization, second iteration*. ArcticNet Inc, Québec, Canada, 58 p.
- Beaulieu, N. (1997). *Évolution d'un rivage subarctique soumis au relèvement glacio-isostatique, Détroit de Manitousuk, Hudsonie* [Mémoire]. Université Laval, 165 p + cartes.
- Beaulieu, N., & Allard, M. (2003). The impact of climate change on an emerging coastline affected by discontinuous permafrost: Manitousuk Strait, northern Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(10), 1393–1404. <https://doi.org/10.1139/e03-056>
- Béland, C., Moisset, S., Lamarre, M.E. et Bernatchez, P. 2023. Développement d'un indice de vulnérabilité morphosédimentaire aux déversements d'hydrocarbures pour le Saint-Laurent : rapport méthodologique final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements climatiques, de la Faune et des Parcs et au Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes, mars 2023, 151 p. + annexes.

- Bernatchez P. et S. Drejza (2015). *Réseau de suivi de l'érosion côtière du Québec maritime - Guide pour les utilisateurs*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière. Université du Québec à Rimouski, octobre 2015, 52 p.
- Bernier, M., Latapie, R., Poulin, J., Gignac, C., Thériault, D., & Gauthier, Y. (2015). *Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk*. Rapport de recherche n. 1627 remis au Ministère des Transports du Québec, Projet de recherche CC09.1, INRS, Québec, 26 p.
- Boisson, A. (2019). *Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik, Québec, Canada* [Doctorat en sciences géographiques]. Université Laval, 267p.
- Boisson, A., & Allard, M. (2020a). Morphological and evolutionary patterns of emerging Arctic coastal landscapes: the case of northwestern Nunavik (Quebec, Canada). *Arctic Science*.
- Boisson, A., & Allard M. (2020b). Boulder barricades in an emerging hypertidal environment: the case of Ungava Bay, northern Quebec, Canada. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 102(1), 33-56.
- Boisson, A., Allard, M., & Sarrazin, D. (2020a). Permafrost aggradation along the emerging eastern coast of Hudson Bay, Nunavik (northern Québec, Canada). *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 128–140. <https://doi.org/10.1002/ppp.2033>
- Boisson, A., Didier, D., & Allard, M. (2020b). Contrasting shoreline changes in the communities of Nunavik (northern Quebec, Canada), 1955 to 2020. *AGU Fall Meeting, Online Everywhere*, December 1-17.
- Bosboom, J., et Stive, M. J. F. (2022). *Coastal dynamics*. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 579 p.

- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. (2017). Classification of beach response to extreme storms. *Geomorphology*, 295, 722–737. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.022>
- Cai, L., Yan, L., Ni, J., & Wang, C. (2015). Assessment of ecological vulnerability under oil spill stress. *Sustainability (Switzerland)*, 7(10), 13073–13084. <https://doi.org/10.3390/su71013073>
- Castanedo, S., Juanes, J. A., Medina, R., Puente, A., Fernandez, F., Olabarrieta, M., & Pombo, C. (2009). Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects: Application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain). *Journal of Environmental Management*, 91(1), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.013>
- Charron, I. (2015). *Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik*. Ouranos, Montréal, 86 p.
- Chenthamil Selvan, S., Kankara, R. S., & Rajan, B. (2014). Assessment of shoreline changes along Karnataka coast, India using GIS & Remote Sensing techniques. *Indian Journal of Marine Sciences*, 43(7), 6.
- Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.-S., & Duhamel-Beaudry, E. (2012). *Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik : Quaqtqaq, Umiujaq et Kuujjuaq*. Rapport de recherche no R1389 remis au Ministère des Transports du Québec, au Consortium OURANOS et au Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Nord Canada. Institut national de la recherche scientifique, 30 septembre 2012, 186 p.
- Debortoli, N. S., Clark, D. G., Ford, J. D., Sayles, J. S., & Diaconescu, E. P. (2019). An integrative climate change vulnerability index for Arctic aviation and marine transportation. *Nature Communications*, 10(2596), 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10347-1>

- Depellegrin, D., & Pereira, P. (2016). Assessing oil spill sensitivity in unsheltered coastal environments: A case study for Lithuanian-Russian coasts, South-eastern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.005>
- Didier, D., Boisson, A. (2021) Multi-decadal shoreline migration in Nunavik communities. *UArctic Congress*. Reykjavik.
- Didier, D., Caulet, C., Bandet, M., Bernatchez, P., Dumont, D., Augereau, E., Floc'h, F., & Delacourt, C. (2020). Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system. *Continental Shelf Research*, 192(104024), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104024>
- Didier, D., Noah, T., Bhatia, M., Jourdain Bonneau, C., Pijamini, S., Qaunaq, J., Binette, S. & Hough, A. (2023). The effects of coastal storms on deltaic beaches in cabin areas, Ausuittuq, Nunavut; Sijjavu Qanutigi Mallingnu Nungutauvalianinga Qauyisaqniq Illuralaaravitinni Ammalu Sinittaraiqvitinni, Asuittuq, Nunavut. In Barnard *et al.* (2024). Annual Scientific Meeting 2023 Conference Book of Abstract. *Arctic Science*, 10(1), 2-21. <https://doi.org/10.1139/as-2024-0002>
- Dionne, J. C. (2004). Âge et taux moyen d'accrétion verticale des schorres du Saint-Laurent estuarien, en particulier ceux de Montmagny et de Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 58(1), 73-108.
- Dodet, G., Bertin, X., Bouchette, F., Ardhuin, F., Castelle, B., & Chailan, R. (2018). Caractérisation du climat de vagues le long des côtes de France métropolitaine : variabilité et tendances à long-terme. *XVIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, 37–46. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.005>
- Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). (2016). *A field guide to oil spill response on marine shorelines*. Polaris Applied Sciences, S3 Environment Inc., Ottawa, 223 p.

- Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). (2023). Données climatiques historiques. [En ligne], https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/, récupérées le 30 novembre 2023.
- Environnement Canada. (2012). *Shoreline Segmentation Method Document*. Version 6, eSPACE, 162 p.
- EUMSTAT OSI SAF Global sea ice concentration climate data record 1978-2020 (v3.0, 2022), OSI-450-a. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Données extraites de Marine Data Store (MDS) : 1991-2020. DOI :10.48670/moi-00136, récupérées le 3 novembre 2023.
- Fattal, P., Maanan, M., Tillier, I., Rollo, N., Robin, M., & Pottier, P. (2010). Coastal vulnerability to oil spill pollution: The case of Noirmoutier Island (France). *Journal of Coastal Research*, 26(5), 879–887. <https://doi.org/10.2112/08-1159.1>
- Fulton, R. J. (1989). *Quaternary geology of Canada and Greenland: Vol. K-1*. Geological Survey of Canada, 839 p.
- Gachon P.; Laprise, R.; Zwack, P. and Saucier, F.J., 2003. The effects of interactions between surface forcing in the development of a model-simulated polar low in Hudson Bay, *Tellus A*, Vol 55, No. 1, pp. 61-87, ISSN 0280–6495.
- Gibbs, A. E., Erikson, L. H., Jones, B. M., Richmond, B. M., & Engelstad, A. C. (2021). Seven decades of coastal change at barter island, alaska: Exploring the importance of waves and temperature on erosion of coastal permafrost bluffs. *Remote Sensing*, 13(4420), 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs13214420>
- Gouvernement du Québec. (1998). *Convention de la Baie-James et du Nord québécois et conventions complémentaires*. Québec, 754 p.

- Grottoli, E., & Ciavola, P. (2019). The Role of Detailed Geomorphic Variability in the Vulnerability Assessment of Potential Oil Spill Events on Mixed Sand and Gravel Beaches: The Cases of Two Adriatic Sites. *Frontiers in Earth Science*, 7(242), 1–15. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00242>
- Guimont, P., & Laverdière, C. (1980). Le sud-est de la mer d'Hudson : un relief de cuesta. In: McCann, S. B. (eds.), *The Coastline of Canada*. Geological Survey of Canada, 80-10, 303-309.
- Gundlach, E. R., & Hayes, M. O. (1978). Vulnerability of Coastal Environments to Oil Spill Impacts. *Marine Technology Society Journal*, 12(4), 18–27.
- Hachem, S., & Bleau, S. (2020). *Impact des changements climatiques sur l'environnement maritime et côtier du Nunavik : synthèse des connaissances*. Rapport présenté au Ministère des transports du Québec, Ouranos, Montréal, 70 p. + annexes.
- Hapke, C. J., Himmelstoss, E. A., Kratzmann, M. G., & Thieler, E. R. (2011). *National Assessment of Shoreline Change : Historical Shoreline Change along the New England and Mid-Atlantic Coasts*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1118, 57 p.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Kinsela, M. A., Middleton, J. H., Mumford, P. J., Splinter, K. D., Phillips, M. S., Simmons, J. A., Hanslow, D. J., & Short, A. D. (2017). Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Nature Scientific Reports*, 7(6033), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05792-1>
- Harris, S. A., French, H. M., Heginbottom, J. A., Johnston, G. H., Ladanyi, B., Segó, D. C., & van Everdingen, R. O. (1988). *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. Conseil national de recherches Canada, Ottawa, 156 p.
- Hill, P. R., Meulé, S., & Longuépée, H. (2003). Combined-flow processes and sedimentary structures on the shoreface of the wave-dominated Grande-Rivière-de-la-Baleine delta. *Journal of Sedimentary Research*, 73(2), 217–226.

- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide Open-File Report 2021-1091*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021-1091, 104 p.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269, 676–679.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). *IPCC Special Report – Emissions scenarios*. Cambridge University Press, 20 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Section dans : *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au 6e Rapport d'évaluation du GIEC, [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Genève, Suisse, 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Irrgang, A. M., Bendixen, M., Farquharson, L. M., Baranskaya, A. V., Erikson, L. H., Gibbs, A. E., Ogorodov, S. A., Overduin, P. P., Lantuit, H., Grigoriev, M. N., & Jones, B. M. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3, 39–54. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1>
- James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., & Craymer, M. (2021). *Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG national crustal velocity model*. Geological Survey of Canada, 23 p.
- Knudby, A., Ahmad, S. K. & Ilori, C. (2016). The potential for Landsat-based bathymetry in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(4), 367-378. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1177452>
- Koroglu, A., Ranasinghe, R., Jiménez, J. A., & Dastgheib, A. (2019). Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*, 178(104799), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>

- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 5(3), 259-263.
- Kranck, E. H. (1951). On the geology of the east coast of Hudson Bay and James Bay. *Acta Geographica*, 11, 1-71.
- Lantuit, H., Overduin, P. P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D., Brown, J., Cherkashov, G., Drozdov, D., Donald Forbes, L., Graves-Gaylord, A., Grigoriev, M., Hubberten, H. W., Jordan, J., Jorgenson, T., Ødegård, R. S., Ogorodov, S., Pollard, W. H., Rachold, V., ... Vasiliev, A. (2012). The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines. *Estuaries and Coasts*, 35, 383–400. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9362-6>
- Lavoie, C., Allard, M., & Duhamel, D. (2012). Deglaciation landforms and C-14 chronology of the Lac Guillaume-Delisle area, eastern Hudson Bay: A report on field evidence. *Geomorphology*, 159–160, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.015>
- Lavoie, C., Allard, M., & Hill, P. R. (2002). Holocene deltaic sedimentation along an emerging coast: Nastapoka River delta, eastern Hudson Bay, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39, 505–518. <https://doi.org/10.1139/e01-079>
- L'Hérault, E., & Allard, M. (2018). *Production de la 2ième approximation de la carte de pergélisol du Québec en fonction des paramètres géomorphologiques, écologiques, et des processus liés au climat : rapport final*. Centre d'études nordiques, Université Laval. Rapport remis au ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, mars 2018, 61p.
- L'Hérault, E., Boisson, A., Allard, M., Aubé-Michaud, S., Sarrazin, D., Roger, J., & Barrette, C. (2017). *Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat*. Rapport final. Réalisé pour le compte du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 160 p.

- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., & Houle, D. (2011). *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Ouranos et MRNF, 55 p + annexes.
- Luijendijk, A. P., Kras, E., Dagalaki, V., Morelissen, R., Hoteit, I., & Ranasinghe, R. (2022). Regime Shifts in Future Shoreline Dynamics of Saudi Arabia. *Frontiers in Marine Science*, 8(798657), 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.798657>
- Ma, Y., Xu, N., Liu, Z., Yang, B., Yang, F., Wang, X. H. & Li, S. (2020). Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets. *Remote Sensing of Environment*, 50(112047). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112047>
- Manson, G. K., Couture, N. J., & James, T. S. (2019). *CanCoast 2.0: data and indices to describe the sensitivity of Canada's marine coasts to changing climate*. Geological Survey of Canada, 18 p.
- Manson, G. K., Solomon, S. M., Forbes, D. L., Atkinson, D. E., & Craymer, M. (2005). Spatial variability of factors influencing coastal change in the Western Canadian Arctic. *Geo-Marine Letters*, 25, 138–145. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0195-9>
- Marin, P., & Filion, L. (1992). Recent Dynamics of Subarctic Dunes as Determined by Tree-Ring Analysis of White Spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research*, 38, 316–330.
- Massé, A. et M. Villeneuve (2013). *Infrastructures maritimes du Nunavik – Modélisation numérique des marées et des ondes de tempête dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava*. Rapport présenté à Ouranos, Le Groupe-Conseil LaSalle Inc., 45 pages. + annexes.
- Massé, A. et N. Gallant (2016). *Marée et ondes de tempêtes dans la baie d'Hudson, la baie James, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava – Modélisation numérique des niveaux d'eau actuels et futurs dus aux changements climatiques*. Rapport présenté à Ouranos, LaSalle NHC, Montréal, 31 pages. + annexes.

- Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M., & Conley, D. (2016). The extreme 2013/2014 winter storms: Hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*, 378–391. <https://doi.org/10.1002/esp.3836>
- Mudryk, L. R., Dawson, J., Howell, S. E. L., Derksen, C., Zagon, T. A., & Brady, M. (2021). Impact of 1, 2 and 4 °C of global warming on ship navigation in the Canadian Arctic. *Nature Climate Change*, *11*(8), 673–679. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01087-6>
- 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 Transports du Québec, Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xvi + 121 p.
- Niang, A. J. (2020). Monitoring long-term shoreline changes along Yanbu, Kingdom of Saudi Arabia using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Taibah University for Science*, *14*(1), 762–776. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1773623>
- Owens, E. H. (2010). *Primary shoreline types of the Canadian North*. Prepared for eSPACE, Polaris Applied Sciences, Inc., mars 2010, 60 p.
- Pearce, T., Ford, J. D., Duerden, F., Smit, B., Andrachuk, M., Berrang-Ford, L., & Smith, T. (2011). Advancing adaptation planning for climate change in the Inuvialuit Settlement Region (ISR): A review and critique. *Regional Environmental Change*, *11*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0126-4>
- Pêches et Océans Canada. (2023). Table des marées et courant du Canada. Service hydrographique du Canada, Ottawa.
- Pérez-Alberti, A., Pires, A., Freitas, L., Rodrigues, C., & Chaminé, H. I. (2011). GIS Mapping and Shoreline Change Analysis along the Rocky Coast of Galicia (NW Spain): Preliminary Approach, 10 p.

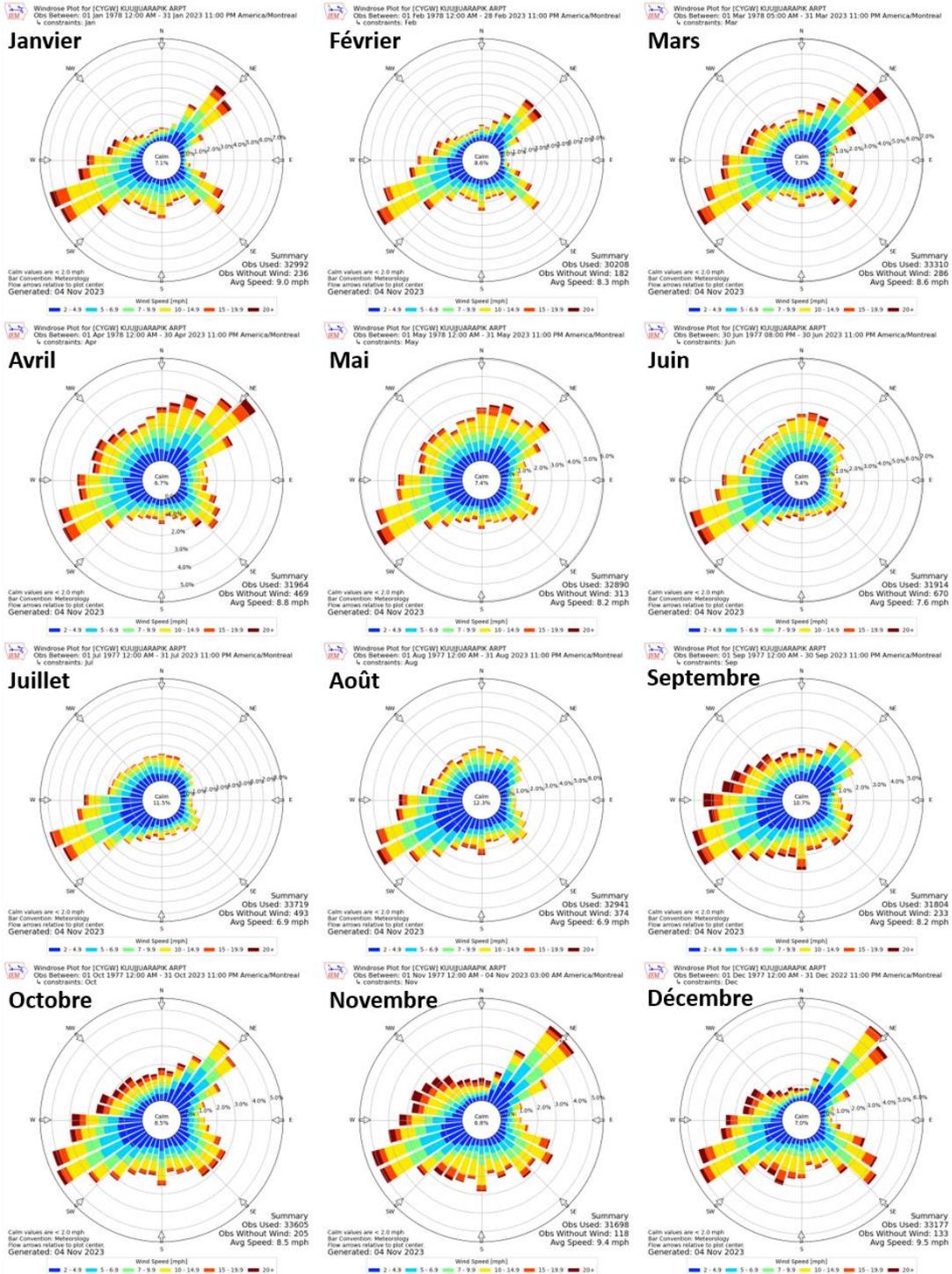
- Piliouras, A., Jones, B. M., Clevenger, T., Gibbs, A. E., & Rowland, J. C. (2023). Variability in terrestrial characteristics and erosion rates on the Alaskan Beaufort Sea coast. *Environmental Research Letters*, 18(114050), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad04b8>
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth and Environment*, 3(168), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Roberge, M. (1998). Morpho-stratigraphie d'un delta moderne en régression forcée, Grande rivière de la Baleine, Hudsonie. Mémoire de maîtrise, département d'Océanographie, Université du Québec à Rimouski.
- Robin, C. M. I., Craymer, M., Ferland, R., James, T. S., Lapelle, E., Piraszewski, M., & Zhao, Y. (2020). *NAD83v70VG: a new national crustal velocity model for Canada*. Geomatics Canada, Open-File 0062, <https://doi.org/10.4095/327592>
- Rocchini, D., & Di Rita, A. (2005). Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, 25(2), 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.03.002>
- Rocchini, D., Metz, M., Frigeri, A., Delucchi, L., Marcantonio, M., & Neteler, M. (2012). Robust rectification of aerial photographs in an open source environment. *Computers and Geosciences*, 39, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.06.002>
- Ropars, Y. (2014). *Étude sur la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux niveaux d'eau extrêmes en conditions de changement climatique*. Rapport remis au Ministère des Transports du Québec, CIMA +, 45 pages. + annexes.
- 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(1–2), 449–466. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2592-3>

- Ruz, M.-H., & Allard, M. (1994). Foredune development along a subarctic emerging coastline, eastern Hudson Bay, Canada. *Marine Geology*, *117*, 57–74.
- Ruz, M.-H., & Allard, M. (1995). Sedimentary structures of cold-climate coastal dunes, Eastern Hudson Bay, Canada. *Sedimentology*, *42*, 725–734.
- Ruz, M.-H., Allard, M., Michaud, Y., & Hequette, A. (1998). Sedimentology and Evolution of Subarctic Tidal Flats Along a Rapidly Emerging Coast, Eastern Hudson Bay, Canada. *Journal of Coastal Research*, *14*(4), 1242–1254.
- Ruz, M. H., & Beaulieu, N. (1998). Coastal erosion on a rapidly emerging coast: Manitounuk, Canada. *Annales de Géographie*, *600*, 160–178.
<https://doi.org/10.3406/geo.1998.20843>
- Ruz, M.-H., Michaud, Y., Allard, M., Sutherland, T., & Ardiles, B. (1994). *Morpho-sédimentologie et évolution des estrans de la partie centrale du détroit de Manitounuk, Hudsonie*. Commission Géologique du Canada, Dossier public 2882, 57 p. + annexes.
- Saucier, F. J., Senneville, S., Prinsenber, S., Roy, F., Smith, G., Gachon, P., Caya, D., & Laprise, R. (2004). Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. *Climate Dynamics*, *23*(3–4), 303–326.
<https://doi.org/10.1007/s00382-004-0445-6>
- Savard, J.-P. (2016). *Impacts des changements climatiques sur le régime des tempêtes et les niveaux d'eau extrêmes dans la baie d'Hudson, la baie James et le détroit d'Hudson*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources Naturelles Canada, Montréal, Ouranos, 82 p.
- Savard, J.-P., Gachon, P., Rosu, C., Aider, R., Martin, P., & Saad, C. (2014). *Impact des changements climatiques sur le régime des tempêtes, les niveaux d'eau et les vagues dans le Nunavik*. Rapport d'étude pour le Ministère des Transports du Québec, Montréal, octobre, 2014, 109 p.

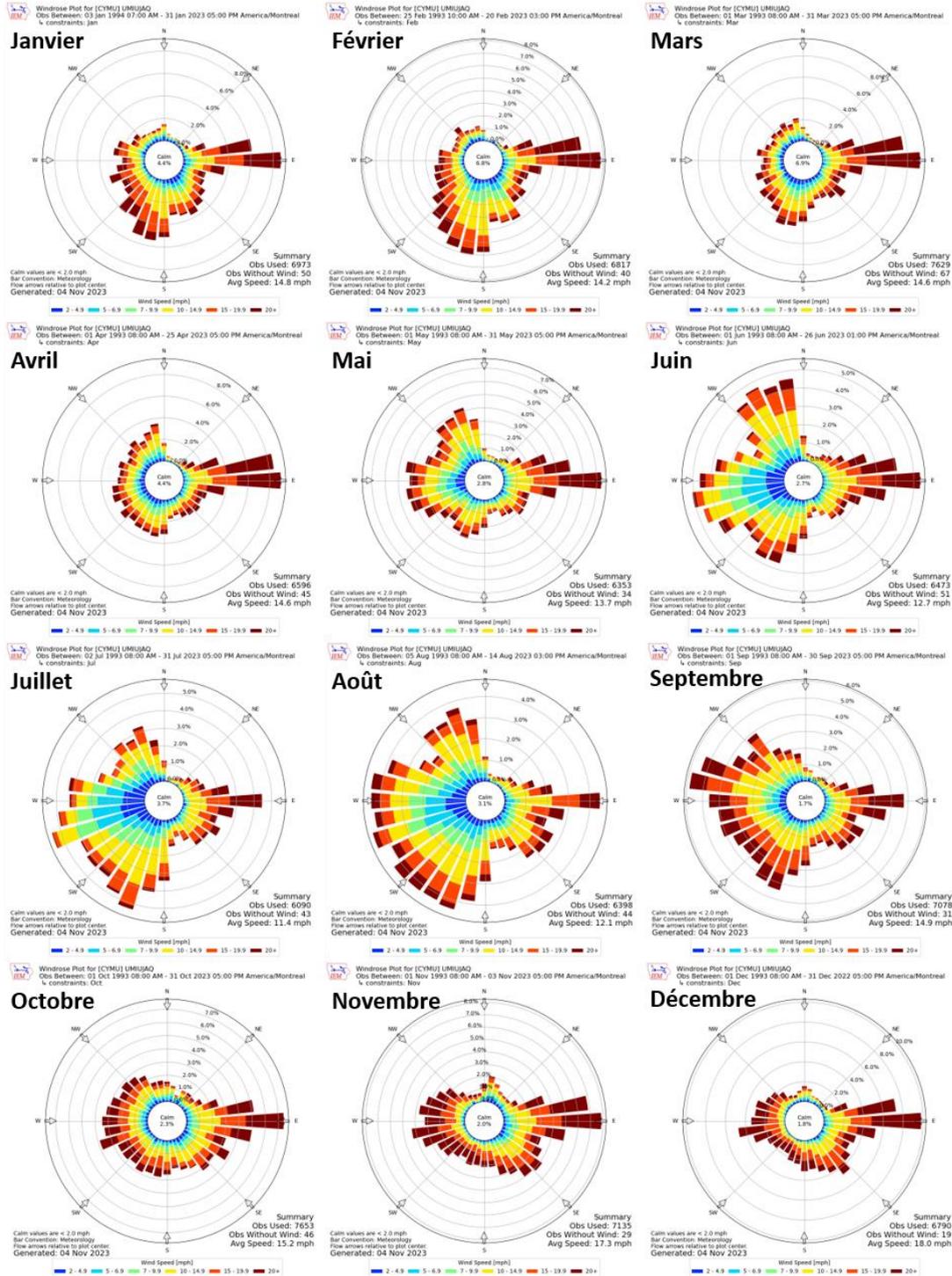
- Senneville, S. (2018). *Modélisation des glaces de rive à fine échelle à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik en contexte des changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk*. Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 67 p.
- Senneville, S., & St-Onge Drouin, S. (2013). *Rapport final : Étude de la variation des glaces dans le système couplé océan-glace de mer de la baie d'Hudson*. Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec et Ouranos, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 63 p.
- Shabbar, A., Higuchi, K., Skinner, W., & Knox, J. L. (1997). The association between the BWA index and winter surface temperature variability over eastern Canada and west Greenland. *International Journal of Climatology*, *17*, 1195–1210.
- Singh, R. K., Vader, A., Mundy, C. J., Soreide, J. E., Iken, K., Dunton, K. H., Castro de la Guardia, L., Sejr, M. K. & Bélanger, S. (2022). Satellite-derived photosynthetically available radiation at the coastal Arctic seafloor. *Remote Sensing*, *14*(20), 1-33. <https://doi.org/10.3390/rs14205180>
- Sorgente, R., La Guardia, D., Ribotti, A., Arrigo, M., Signa, A., Pessini, F., Oliva, G., Pes, A., Perilli, A., & Di Maio, A. (2020). An operational supporting system for oil spill emergencies addressed to the the Italian coast guard. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(1035), 1–14. <https://doi.org/10.3390/jmse8121035>
- Splinter, K. D., Carley, J. T., Golshani, A. & Tomlinson, R. (2014). A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion. *Coastal Engineering*, *83*, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.001>
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, *53*(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122(104528), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Wadhams, P., Squire, V. A., Goodman, D. J., Cowan, A. M., & Moore, S. C. (1988). The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone. *Journal of Geophysical Research*, 93(C6), 6799–6818. <https://doi.org/10.1029/jc093ic06p06799>
- The WAVEWATCH IIIR©Development Group (WW3DG). (2016). User manual and system documentation of WAVEWATCH IIIR© version 5.16. Tech.Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp.+ annexes.
- Wheeler, J. O., Hoffman, P. F., Card, K. D., Davidson, A., Sanford, B. V., Okulitch, A. V., Roest, W. R. (1997). Carte géologique du Canada. Ressources Naturelles Canada.
- Wieczorek, G.F. (1996). Chapitre 4 – Landslide triggering mechanisms, Transportation Research Board, Turner, K.A. et Schuster, R. L. Landslides: Investigation and Mitigation. TRB Special Report 247, pp. 76-90.
- Wynja, V., Demers, A. M., Laforest, S., Lacelle, M., Pasher, J., Duffe, J., Chaudhary, B., Wang, H., & Giles, T. (2015). Mapping coastal information across Canada’s northern regions based on low-altitude helicopter videography in support of environmental emergency preparedness efforts. *Journal of Coastal Research*, 31(2), 276–290. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00059.1>
- Zagórski, P., Rodzik, J., Moskalik, M., Strzelecki, M. C., Lim, M., Błaszczuk, M., Promińska, A., Kruszewski, G., Styszyńska, A., & Malczewski, A. (2015). Multidecadal (1960-2011) shoreline changes in Isbjørnhamna (Hornsund, Svalbard). *Polish Polar Research*, 36(4), 369–390. <https://doi.org/10.1515/popore-2015-0019>

ANNEXE-A



A.1 Vitesse et direction des vents mensuels pour le secteur de W-K à partir des données de la station météorologique de l'aéroport, mis sous forme de graphique par le Iowa Environmental Mesonet (<https://mesonet.agron.iastate.edu/>)



A.2 Vitesse et direction des vents mensuels pour le secteur d'Umiujaq à partir des données de la station météorologique de l'aéroport, mis sous forme de graphique par le *Iowa Environmental Mesonet* (<https://mesonet.agron.iastate.edu/>)

ANNEXE-B

B.1 Attributs de la variable Type de côte

Code	Description	Définition proposée
ART	Côte artificielle	Correspond à : Côte à remblai et zone portuaire La côte est dite artificielle lorsqu'il n'est plus possible de distinguer le type de côte qui était présent avant les modifications anthropiques. Les côtes à remblai et les zones portuaires sont indiquées comme des côtes artificielles (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
CR	Côte rocheuse (sans falaise)	Inclut les plateformes et les rampes rocheuses (< 35°) (Owens, 2010).
CR_EM	Côte rocheuse à estran meuble	Plateforme, rampe ou falaise rocheuse caractérisée d'une zone intertidale meuble.
CM	Côte meuble (sans falaise)	Inclut les talus meubles (< 35°).
FR	Falaise/versant rocheux(se)	Côte rocheuse ayant une pente > 35° (Owens, 2010).
FM	Falaise meuble	Côte de sédiments non-consolidés ayant une pente > 35° avec ou sans végétation à son sommet (Environnement Canada, 2012).
FL	Flèche littorale	Accumulation de sable ou de gravier qui s'attache d'un côté à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à celle-ci. L'extrémité est libre (Bernatchez & Drezja, 2015).
TO-CL	Tombolo / cordon littoral	Accumulation de sable ou de gravier qui relie la côte à un îlot souvent rocheux ou deux îlots rocheux entre eux. Le cordon littoral peut ne pas être attaché à la côte et est souvent parallèle à celle-ci (Bernatchez & Drezja, 2015).
TP	Terrasse de plage	Accumulation de sable ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées. Peut être suivie en arrière-côte par une falaise morte ou une surface plane (Bernatchez & Drezja, 2015).
TP-BR	Terrasse de plage avec base rocheuse	Terrasse de plage caractérisée d'une plateforme rocheuse au niveau de la zone intertidale et/ou supratidale.
DEL	Delta	Forme d'accumulation localisée à l'embouchure de cours d'eau importants.
DUN	Dunes	Forme mise en place par des processus éoliens. Peut être recouverte de végétation ou non.
MM	Marais maritime	Correspond à : côte à marais maritime, à marais maritime à base rocheuse ou marécage intertidale (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
NA	Non applicable	Correspond à : non applicable, exutoire de cours d'eau ou chenal de marée (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
ND	Non déterminé	Correspond à : non déterminé (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).

B.2 Attributs de la variable Type de zone intertidale

Code	Description	Définition proposée
ECE	Exutoire de cours d'eau / delta	Les exutoires de cours d'eau incluent tout écoulement qui croise la côte. Il peut s'agir de rivières, de ruisseaux, de canaux de drainage pluvial liés à l'aménagement de la zone terrestre (agriculture, noyau urbain, réseau routier, etc.) (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
BVA	Estran vaseux / argileux	Estran dominé par des sédiments d'argile et de silt (< 0.0625 mm). Il peut y avoir une présence de sédiments grossiers < 10% (Environnement Canada, 2012).
BS	Estran sableux	Estran dominé par des sédiments sableux (diamètre entre 0.0625 mm et 2 mm). Il peut y avoir une présence de sédiments grossiers < 10% (Environnement Canada, 2012).
BSMG	Estran à sédiments mixtes et grossiers	Estran composé de sédiments sableux et fins avec une dominance de sédiments grossiers (>10%), peu importe la combinaison (gravier, cailloux, galets et blocs) (Environnement Canada, 2012).
BSMG-B	Estran à sédiments mixtes grossiers avec blocs	Idem que BSMG, mais présence de blocs significative.
PFR	Plateforme rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente inférieure à 5° (Owens, 2010).
RR	Rampe rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente entre 5° et 35 ° (Owens, 2010).
BB	Barricade de blocs	Une crête de blocs déposés dans la zone intertidale par les mouvements de glace (Environnement Canada, 2012).
NA	Non applicable	Segment dont le type de côte n'est pas applicable, soit parce qu'il ne s'agit pas d'une limite géomorphologique (arête) ou qu'il présente un segment qui se trouve dans l'eau (contour de brise-lames et certains épis etc.) (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
ND	Non déterminé	Segment où il est impossible de déterminer le type de côte à partir des données disponibles (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).

B.3 Attributs de la variable Type de zone supratidale (suite à la prochaine page)

Code	Description	Définition proposée
ECE	Exutoire de cours d'eau / delta	Les exutoires de cours d'eau incluent tout écoulement qui croise la côte. Il peut s'agir de rivières, de ruisseaux, de canaux de drainage pluvial liés à l'aménagement de la zone terrestre (agriculture, noyau urbain, réseau routier, etc.) (Arsenault <i>et al.</i> , 2021).
BEVA	Berge vaseuse/argileuse	Présent surtout dans les environnements riverains (Environnement Canada, 2012).
PS	Haut de plage sableux	Haut de plage de sable (taille granulométrique de 0.0625 mm à 2 mm). Accepte un < 10% de sédiments d'autres tailles granulométriques (Environnement Canada, 2012).
PCG	Haut de plage de cailloux / galets	Haut de plage où les sédiments dominants sont des cailloux (4 à 64 mm) et galets (64 à 256 mm). Les espaces entre les sédiments grossiers ne sont pas remplis par des sédiments fins comme du sable (ceux-ci doivent être < 10% du haut de plage). C'est ce qui le distingue d'un haut de plage à sédiments mixtes (Environnement Canada, 2012).
PB	Haut de plage de blocs	Accumulation non-consolidée de blocs de roches (> 256 mm de diamètre) où la proportion de blocs est supérieure à 25% (si < 25%, on parle d'un haut de plage de sédiments mixtes). Ils sont souvent caractérisés par un fond de cailloux/galets (Environnement Canada, 2012).
PSM	Haut de plage de sédiments mixtes	Haut de plage de sable et de sédiments de taille granulométrique différente. La proportion de sédiments qui ne sont pas du sable doit être supérieure à 10% (Environnement Canada, 2012).
BV	Berge végétalisée	Principalement pour les côtes de rivières et non océaniques. Terrain végétalisé surélevé situé au niveau des berges d'une rivière ou d'un cours d'eau (Environnement Canada, 2012).
FM	Falaise meuble	Falaise de sédiments non consolidés caractérisée ou non par une couche de végétation en son sommet. Différence avec les falaises de toundra est l'absence de toundra et de tourbe au sommet de la falaise (Environnement Canada, 2012).
PFR	Plateforme rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente inférieure à 5° (Owens, 2010).
RR	Rampe rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente entre 5° et 35° (Owens, 2010).
FR	Falaise rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente supérieure à 35° (Owens, 2010).
BTI	Basse toundra inondée	Côte basse, à faible pente, inondée par les marées hautes de fortes eaux et par lors de tempêtes. Patron de végétation de toundra parsemé d'étangs peu profonds et de polygones de coins de glace (Environnement Canada, 2012).
FT-PG	Falaise de toundra pauvre en glace	Falaise de sédiments non consolidés sous une couche de végétation de toundra et de tourbe (Environnement Canada, 2012).
FT-RG	Falaise de toundra riche en glace	Falaise sédimentaire riche en glace. Caractérisée par un tapis de toundra, de la tourbe et peu de sédiments. Généralement située derrière une plage de sable ou de gravier (Environnement Canada, 2012).
MM	Marais maritime	Type de côte dominé par la végétation herbacée, submergé à marée haute et lors des marées hautes de fortes eaux. Relief assez plat, substrat généralement fin. Moins d'eau que dans les tourbières et les étangs (Environnement Canada, 2012).
TOURB	Côte de tourbe	Ce type de côte est dominé par la tourbe, un substrat fibreux, spongieux et compressible, formé par la décomposition incomplète de la végétation. Environnement saturé d'eau. Accumulations de tourbe ont lieu dans des environnements protégés à faible énergie et ont lieu suite à l'érosion de la toundra. Couleur brun foncé à noir (Environnement Canada, 2012).

Code	Description	Définition proposée
SAP	Structure anthropique perméable	Les structures anthropiques perméables sont caractérisées par des matériaux de tailles variées qui laissent des espaces vides entre les différents éléments les rendant perméables à l'eau et à l'huile (ex. Blocs, cailloux, pneus, bois, structures à base sédimentaires). Ces structures incluent les brise-lames, les épis, enrochement, rip-rap, etc. (ECCC, 2016).
SAI	Structure anthropique imperméable	Structures anthropiques stables construites à partir de matériaux imperméables comme le béton, le métal, le plastique et le bois. Elles sont souvent verticales ou inclinées et exemptes de trous, ce qui permet au pétrole et à l'eau de rester en surface. Ces structures peuvent inclure les quais et marinas, des rampes de mise à l'eau, certains brise-lames et certains murs de protection (ECCC, 2016).

B.4 Attributs de la variable Type d'arrière-plage (suite à la prochaine page)

Code	Description	Définition proposée
FOR	Forêt	Surface surélevée où la végétation arborescente est dominante (> 25 %) (Environnement Canada, 2012).
HERB	Zone herbacée	Surface dominée par de la végétation herbacée (> 25%) (Environnement Canada, 2012).
POLCG	Polygones de coins de glace	Se produit lorsque l'eau s'infiltre dans des fractures dans le sol et prend de l'expansion lors de la période de gel. En prenant de l'expansion, ces coins de glace poussent le sol vers le haut formant ainsi une série de polygones de forme irrégulière. 3 types de polygones : ceux remplis d'eau (contour surélevé par la pression de l'expansion de la glace), ceux végétalisés (lorsque la végétation a pris la place de l'eau au centre du polygone) et ceux séchés (non-végétalisés, mais le polygone reste visible) (Environnement Canada, 2012).
SD	Surface dénudée	Surface exposée ou sédiments non-consolidés surélevés. Peut être partiellement végétalisé (Environnement Canada, 2012).
TERAR	Terrain d'arbrisseaux (Shrubland)	Surface dominée par de la végétation arbustive/buissonnante (> 25%) (Environnement Canada, 2012).
MAR	Marécage	Étangs d'eau stagnante peu profonde, dans un environnement caractérisé par une végétation arbustive et arborescente. Se distingue des marais maritimes par une proportion plus importante d'eau et par une végétation qui n'est pas à dominance herbacée (Environnement Canada, 2012).
MH	Milieu humide	Surface végétalisée où la concentration en eau dans le sol est importante, mais insuffisante pour former des étangs ou des mares de thermokarst.
TOUN	Toundra	Végétation herbacée variée (arbustes nains, herbes, mousses et lichens) qui recouvre > 25%. Ces surfaces peuvent être caractérisées par des polygones de coin de glace. On retrouve ce type de côte dans les environnements de pergélisol (Environnement Canada, 2012).
BRYO	Bryoïde	Surface dominée par les bryophytes et les lichens. On inclut dans ces environnements la végétation courte comme les lichens, les bryophytes (mousses, plantes hépatiques, sphaignes et cornifle) (Environnement Canada, 2012).
PLEAU	Plan d'eau	Lac, rivière, cours d'eau.

Code	Description	Définition proposée
BUT	Buttes de pergélisol	Aussi appelé palse, il s'agit d'une petite butte rencontrée souvent en milieu périglaciaire, en contexte de pergélisol intermittent. Ces buttes ou paises contiennent un cœur de glace recouvert de sol. On les trouve souvent dans les tourbières (Harris <i>et al.</i> , 1988).
PLPERG	Plateaux de pergélisol	"Étendue de tourbe surélevée et au sommet généralement plat, dominant la majeure partie d'une tourbière et contenant de la glace de ségrégation qui peut pénétrer jusqu'au sol minéral sous-jacent" (Harris <i>et al.</i> , 1988).
MARKAR	Mares de thermokarst	Série de lacs de plus ou moins grande superficie causée par la fonte du pergélisol, à la manière similaire de la dissolution du calcaire dans des environnements karstiques.
PFR	Plateforme rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente inférieure à 5° (Owens, 2010).
RR	Rampe rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente entre 5° et 35° (Owens, 2010).
FAR	Falaise rocheuse	Côte rocheuse ayant une pente supérieure à 35° (Owens, 2010).
FAM	Falaise meuble	Côte de sédiments non-consolidés ayant une pente > 35° avec ou sans végétation à son sommet (Environnement Canada, 2012).
TAM	Talus meuble	Côte de sédiments non-consolidés ayant une pente supérieure à 5° et inférieure à 35°.
DUN	Dunes	Forme mise en place par des processus éoliens. Peut être recouverte de végétation ou non.
ZART	Zone artificialisée	Zone où l'on retrouve des habitations, des routes ou autre infrastructure humaine.

B.5 Attributs de la variable État de la côte (Arsenault *et al.*, 2021)

Code	Description	Définition proposée
ACC	Accumulation	Segment où l'interprétation de données antérieures permet d'affirmer que la position de la côte progresse vers la mer.
VIVE	Active ou vive (- de 25% végé.)	Talus vif dont le recouvrement végétal est inférieur à 25% et/ou processus d'érosion observés.
SV	Semi-végétalisé (entre 25 et 75%)	Talus vif ou dont le recouvrement végétal se situe entre 25 et 75% et/ou les signes de processus d'érosion ne sont observés que partiellement.
STABLE	Stable ou végétalisé (+75%)	Côte où le recouvrement végétal est supérieur à 75% et/ou peu ou aucun signe de processus d'érosion n'est observé ou qui est artificialisé (même s'il l'artificialité est en piètre état).
NA	Non applicable	Segment où l'état de la côte ne peut pas être défini puisque les processus d'érosion n'affectent pas ce segment.
ND	Non déterminé	Segment où il est impossible de déterminer l'état de la côte à partir des données disponibles.

B.6 Attributs de la variable de Pente (Environnement Canada, 2012)

Code	Description	Définition proposée
F	Faible ; < 5°	Inclut les plateformes rocheuses, les battures et estrans plats et les marais maritimes.
M	Moyenne ; entre 5° et 35°	Inclut les rampes rocheuses et certaines côtes de toundra.
E	Élevée ; > 35°	Inclut les falaises rocheuses, meubles et de toundra.
T	Terrasses ; en escalier	Combinaison de falaises et de plats.
NA	Non applicable	
ND	Non déterminé	Quand il est impossible d'estimer la pente.

B.7 Attributs de la variable Type d'artificialité (Arsenault *et al.*, 2021 ; suite à la prochaine page)

Code	Description	Définition proposée
AP	Accès à la plage	Ouvrage ayant comme fonction de permettre l'accès à la plage.
BAR	Barrage	Ouvrage traversant un cours d'eau et permettant de contrôler le niveau d'eau.
BLA	Brise-lame attaché	Brise-lames attaché à la côte ayant comme fonction principale de protéger un havre où diverses tailles de bateaux peuvent être amarrés, Peut-être de forme rectiligne ou angulaire.
BL	Brise-lame	Ouvrage aménagé au large, parallèlement à la ligne de rivage, généralement composé de pierres imbriquées avec un certain angle qui vise à atténuer l'énergie des vagues et provoquer le dépôt de sédiments dans l'espace entre l'ouvrage et la ligne de rivage.
CAISS	Caissons	Ouvrage aménagé sur la côte, composé de caissons de bois ou de métal remplis avec des pierres (Sous-type de mur de protection).
DIG	Digue	Remblai longitudinal généralement composé de terre compactée, de pierres ou de structures de béton visant à contrôler la submersion.
ECORG	Écran organique	Technique artisanale composée d'amas de matière organique, de branches ou de troncs d'arbres, plus ou moins agencés ensemble sur la ligne de rivage ou sur le talus côtier.
ENRO	Enrochement	Ouvrage recouvrant le talus côtier, composé de blocs de pierre disposés et imbriqués et dont l'objectif est d'arrêter le recul du trait de côte et de dissiper une partie de l'énergie des vagues.
EPIB	Épis de bois	Ouvrage aménagé sur l'estran, perpendiculairement à la ligne de rivage, composé généralement de pieux de bois et dont l'objectif est de capter les sédiments transportés par les courants littoraux. Les épis maritimes peuvent être perméables ou imperméables permettant ou non le passage de la dérive littorale et du transport sédimentaire le long de la côte.
EPIR	Épis rocheux	Ouvrage aménagé sur l'estran, perpendiculairement à la ligne de rivage, composé généralement de pierres et dont l'objectif est de capter les sédiments transportés par les courants littoraux. Les épis maritimes peuvent être perméables ou imperméables permettant ou non le passage de la dérive littorale et du transport sédimentaire le long de la côte.
BATI	Bâtiment	Infrastructure bâtie, comme une maison, un cabanon ou tout autre bâtiment.

Code	Description	Définition proposée
GAB	Gabion	Ouvrage côtier, composé de casiers de fils de fer entrelacés et remplis avec des pierres.
JERO	Jetée rocheuse	Ouvrage généralement rectiligne et aménagé perpendiculairement à la ligne de rivage, de plus grande envergure qu'un épi imperméable, visant principalement à contrôler la dérive littorale ou à empêcher l'accumulation de sédiments à l'exutoire d'une rivière. Une jetée a généralement pour effet de créer une nouvelle cellule hydrosédimentaire.
MURB	Mur de béton	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en béton, visant à arrêter le recul du trait de côte.
MURBB	Mur de blocs de béton	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en bloc de béton visant à arrêter le recul du trait de côte.
MURBO	Mur de bois	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en bois, visant à arrêter le recul du trait de côte.
MURM	Mur de métal	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en métal, visant à arrêter le recul du trait de côte.
MURPI	Mur de pierres	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en pierres, visant à arrêter le recul du trait de côte.
MURPN	Mur de pneus	Ouvrage vertical aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, fait en pneus, visant à arrêter le recul du trait de côte.
PONC	Ponceau	Ouvrage servant de petit pont, constitué d'au moins un tuyau transversal généralement fait en béton, en acier galvanisé ou en polyéthylène haute densité qu'on recouvre de gravier ou d'autres matériaux, qui permet à l'eau de ruissellement ou au cours d'eau de s'écouler sous une route, une voie ferrée ou tout autre structure.
PORTQ	Infrastructure portuaire / quai	Différents types d'ouvrages ou d'infrastructures utilisés à l'intérieur d'une zone portuaire.
RAME	Rampe de mise à l'eau	Ouvrage en béton ou en bois qui permet la mise à l'eau des bateaux.
RESE	Recharge sédimentaire	Technique consistant à déposer des sédiments d'emprunt sur la plage afin d'augmenter sa hauteur et sa largeur. Le but est d'augmenter la capacité de dissipation de l'énergie des vagues et de rééquilibrer le bilan sédimentaire de la cellule hydrosédimentaire.
REMB	Remblai	Technique de terrassement consistant à ajouter et compacter du matériel sédimentaire sur un terrain afin de le surélever, de combler un creux ou d'augmenter la superficie pour soutenir le développement anthropique.
ROPC	Remblai (OPC)	Ouvrage de protection côtière consistant à ajouter du matériel sédimentaire d'emprunt sur la haute-plage, le haut-estran ou le talus côtier sans effectuer de reprofilage.
RIRA	Rip-Rap	Revêtement de matériaux grossiers, généralement de la taille des galets et petits blocs, disposés en pente douce sur une plage, afin de stabiliser le profil de plage et de maintenir les matériaux en place.

B.8 Attributs de la variable Regroupement de l'artificialité (Arsenault *et al.*, 2021)

Code	Description	Définition proposée
PSB	Protection de submersion	Ouvrage qui vise à contrôler la submersion des zones terrestres par les eaux marines. Regroupement de : Digue
PBC	Protection de blocs	Ouvrage qui a pour objectif de protéger la côte de l'érosion par les processus marins. Regroupement de : Enrochement, Blocs déversés et Rip-Rap
MUR	Mur de protection	Ouvrage vertical qui a pour objectif de protéger la côte de l'érosion par les processus marins. Regroupement de : Mur de béton, Mur de blocs de béton, Mur de bois, Mur de métal, Mur de pierres, Mur de pneus, Caissons et Gabion.
SSD	Structure de sédimentation	Ouvrage qui a pour objectif, ou comme effet, de provoquer l'accumulation de sédiments transportés par les courants littoraux. Regroupement de : Épis rocheux, Épis de bois et Brise-lame
TCE	Traverse de cours d'eau	Infrastructures côtières associés aux affluents d'un plan d'eau marin. Regroupement de : Barrage et Ponceau
TDO	Technique douce	Aménagement anthropique visant à recréer des milieux naturels résilients capable de résister aux principaux assauts des aléas côtiers. Regroupement de : Écran organique, Végétalisation et Capteurs de sable
RSD	Recharge sédimentaire	Ouvrage correspondant à déposer des sédiments d'emprunts sur la côte dans le but d'augmenter la capacité de dissipation de l'énergie des vagues et de rééquilibrer le bilan sédimentaire. Regroupement de : Recharge sédimentaire et Remblai (OPC)
OVP	Ouvrage portuaire	Infrastructure située en zone portuaire (actuelle ou parfois désaffectée) Regroupement de : Jetée rocheuse, Brise-lame attaché et Infrastructure portuaire/quai
REM	Remblai	Technique de terrassement consistant à ajouter et compacter du matériel sédimentaire sur un terrain afin de le surélevé, de combler un creux ou d'en augmenter la superficie pour soutenir le développement anthropique.
AU	Autre	Infrastructures anthropiques diverses présentes le long du linéaire côtier ayant entre autres pour objectif de faciliter l'accessibilité aux zones littorales ou son utilisation. Regroupement de : Non déterminé, Accès à la plage, Rampe de mise à l'eau, Fondation de bâtiment, Escalier et Autre

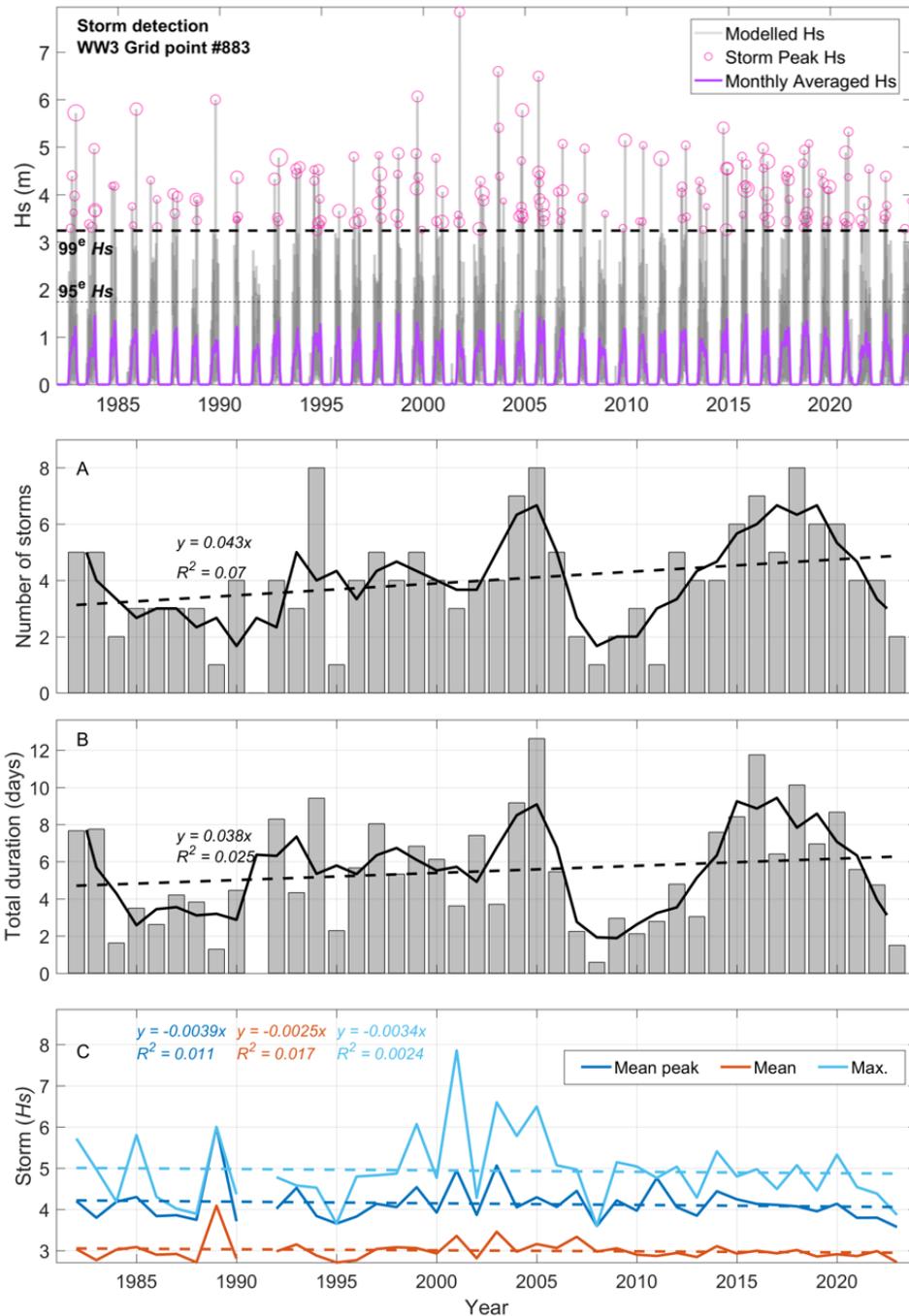
B.9 Attributs de la variable Catégorie de l'artificialité (Arsenault *et al.*, 2021)

Code	Description	Définition proposée
OPCR	Ouvrage de protection - structure rigide	Ouvrages côtiers ayant comme objectif de protéger la côte de l'érosion à l'aide de structure rigides verticales ou en pente.
OPCD	Ouvrage de protection - technique douce	Ouvrages côtiers ayant comme objectif de protéger la côte de l'érosion à l'aide d'aménagements divers, en augmentant notamment la capacité de dissipation de l'énergie des vagues, en rééquilibrant le bilan sédimentaire ou par la stabilisation naturelle de la côte.
INFC	Infrastructure côtière	Infrastructure située le long du linéaire côtier et ayant comme objectif de soutenir le développement anthropique ou l'occupation du territoire.
INFP	Infrastructure portuaire	Infrastructure situé le long du linéaire côtier et ayant comme objectif de soutenir les activités maritimes liées à la navigation. Inclut les infrastructures permettant l'accès à l'eau pour les bateaux (que ce soit pour l'accoster ou le mettre à l'eau).

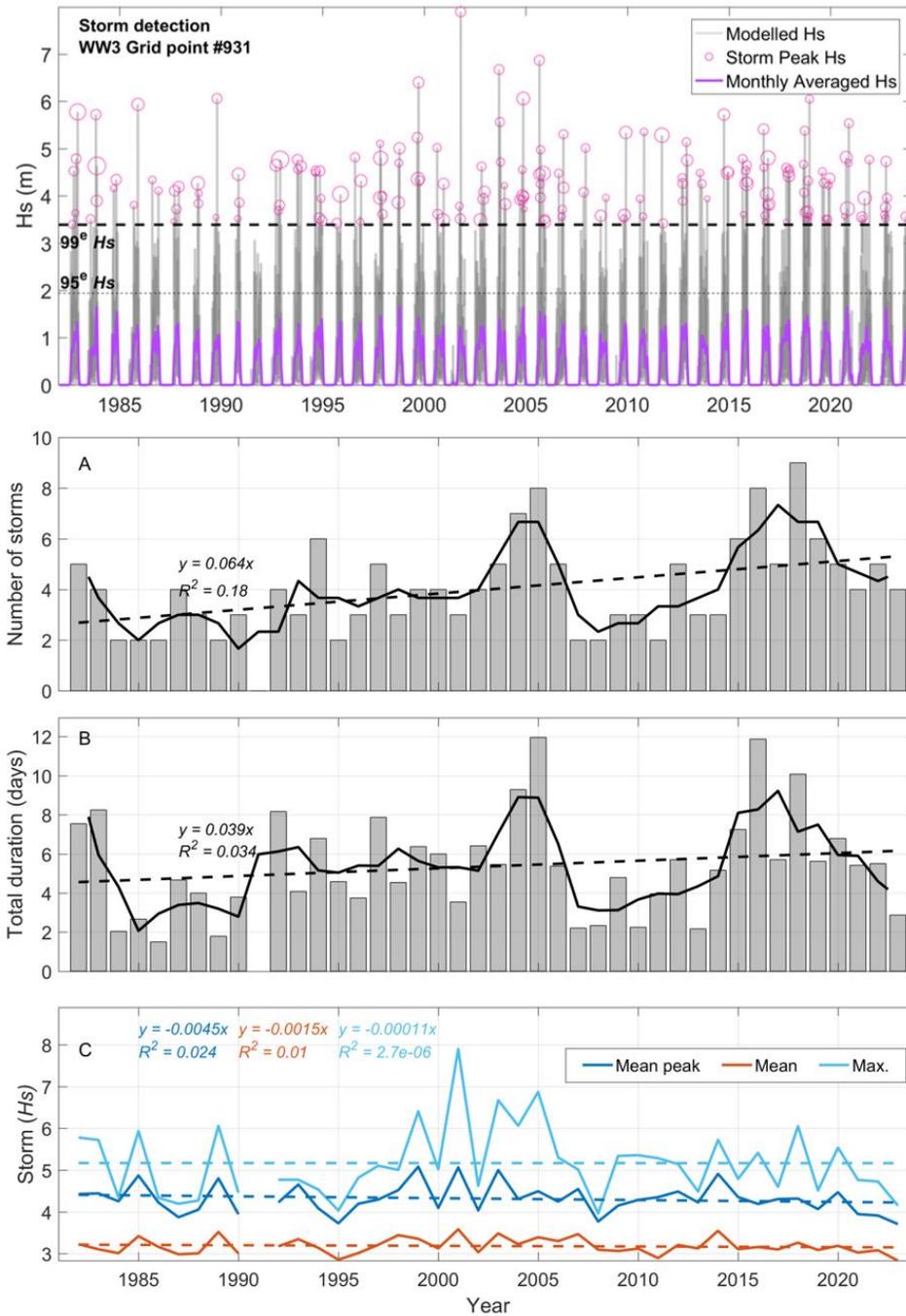
B.10 Attributs de la variable Accessibilité (Environnement Canada, 2012; L'Hérault *et al.*, 2017)

Code	Description	Note méthodologique
BOAT	Bateau	Moyen de transport commun. Peut être limité par la présence de hauts fonds, d'eau peu profonde, de larges estrans et de barricades de blocs.
FOOT	Marche	Peu fréquent, sauf à proximité des communautés et d'infrastructures. Présence de routes ou de chemins nécessaire.
VOIT	Voiture	
VTT	Véhicule tout-terrain	
HELI	Hélicoptère	L'hélicoptère est le moyen de transport à privilégier puisqu'il est le plus rapide et le mieux adapté.
HYDAV	Hydravion	Limité par la présence de barricades de blocs (boulder barricades) et par la superficie d'eau libre.
MACH	Machinerie lourde	Peu fréquent, sauf à proximité des communautés et d'infrastructures. Présence de routes ou de chemins nécessaire.

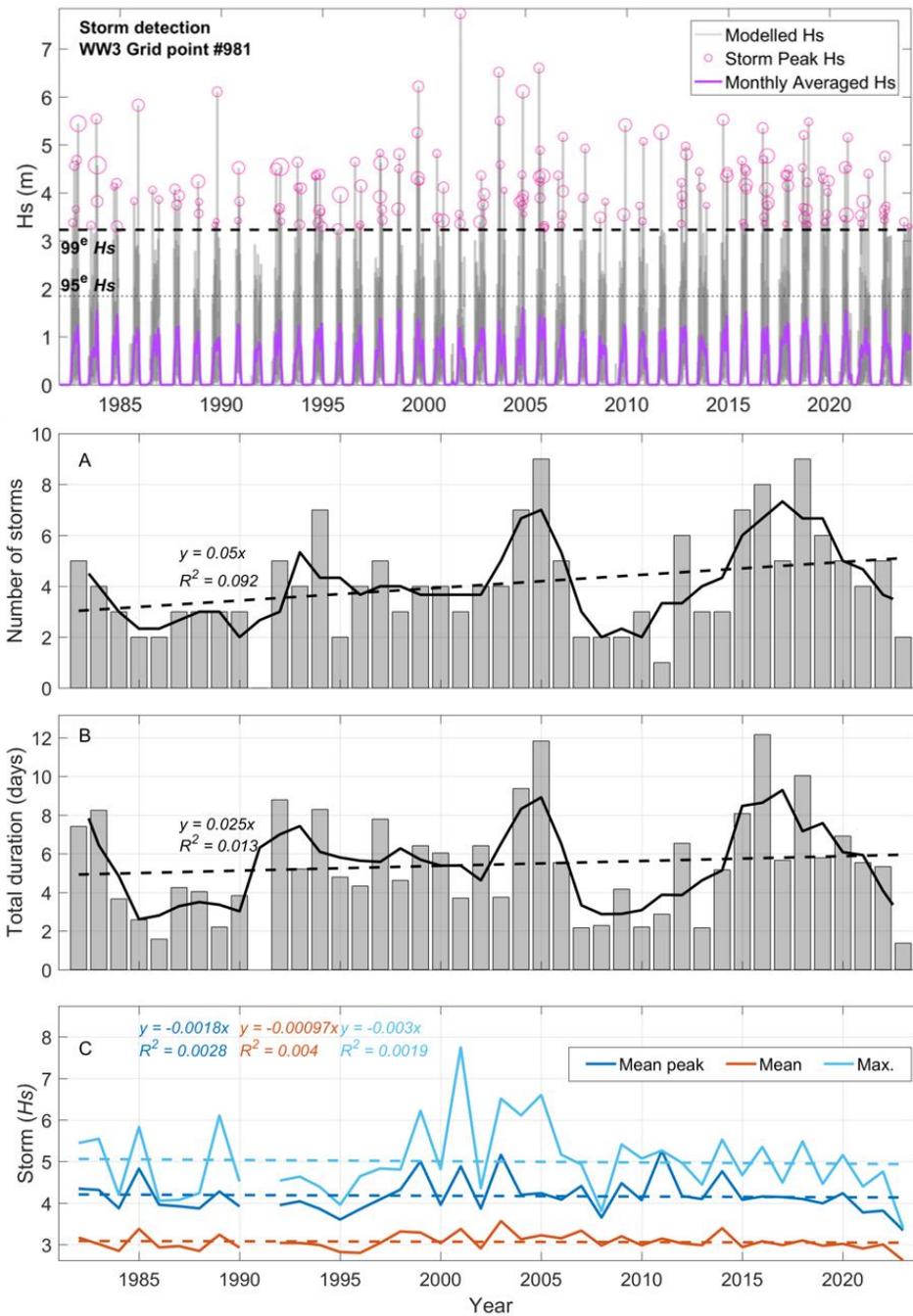
ANNEXE-C



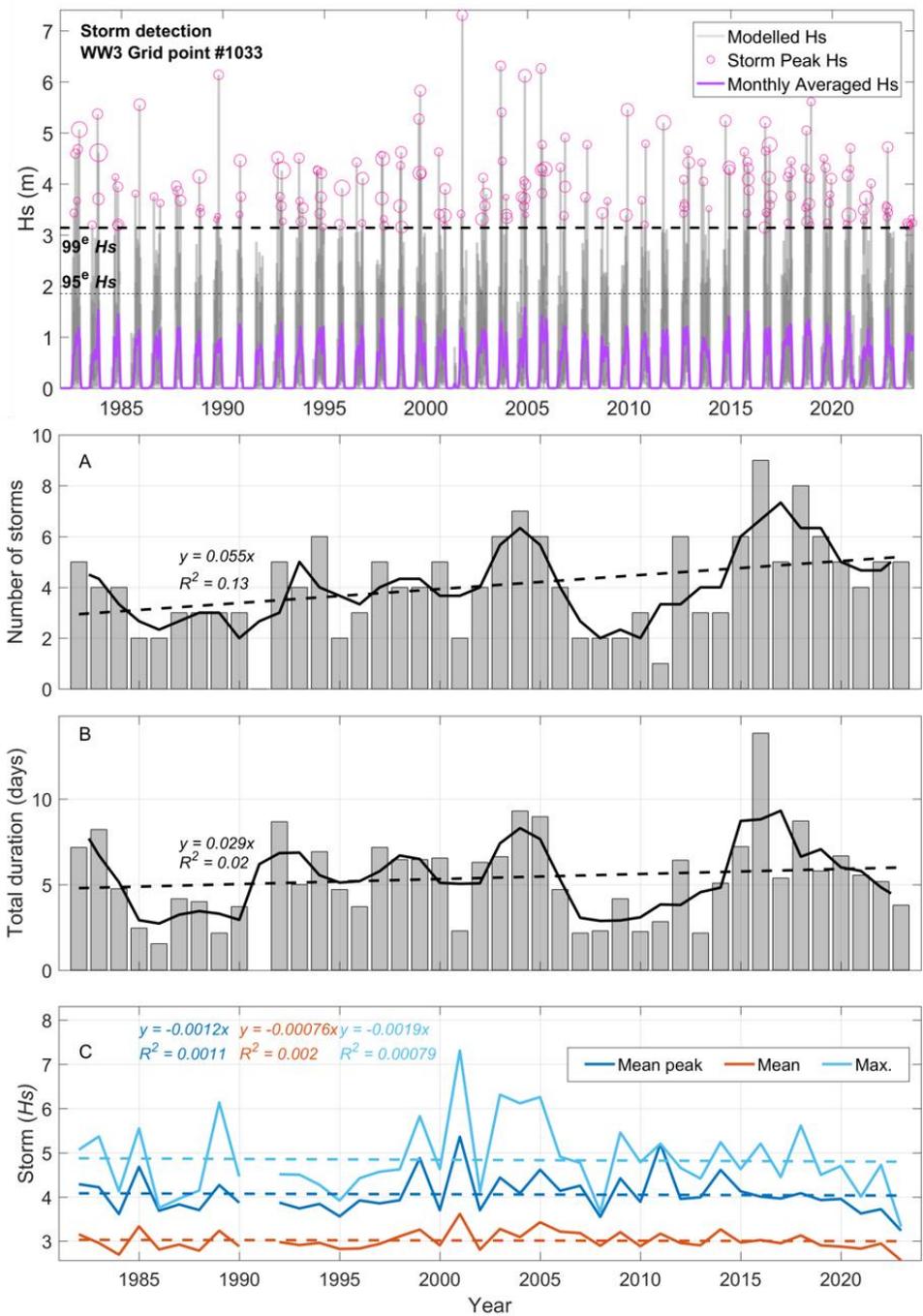
C.1 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #883 (W-K)



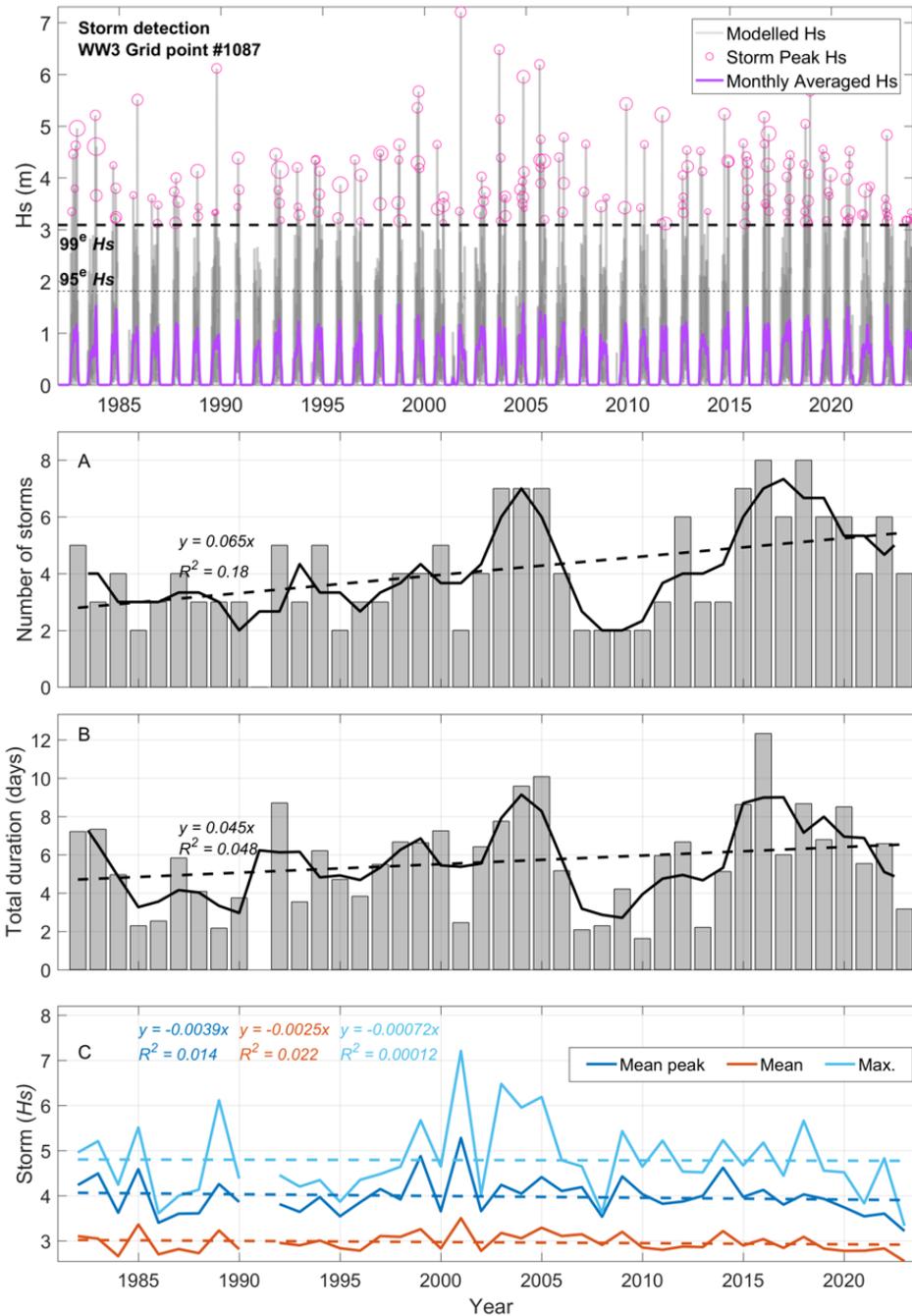
C.2 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #931 (W-K)



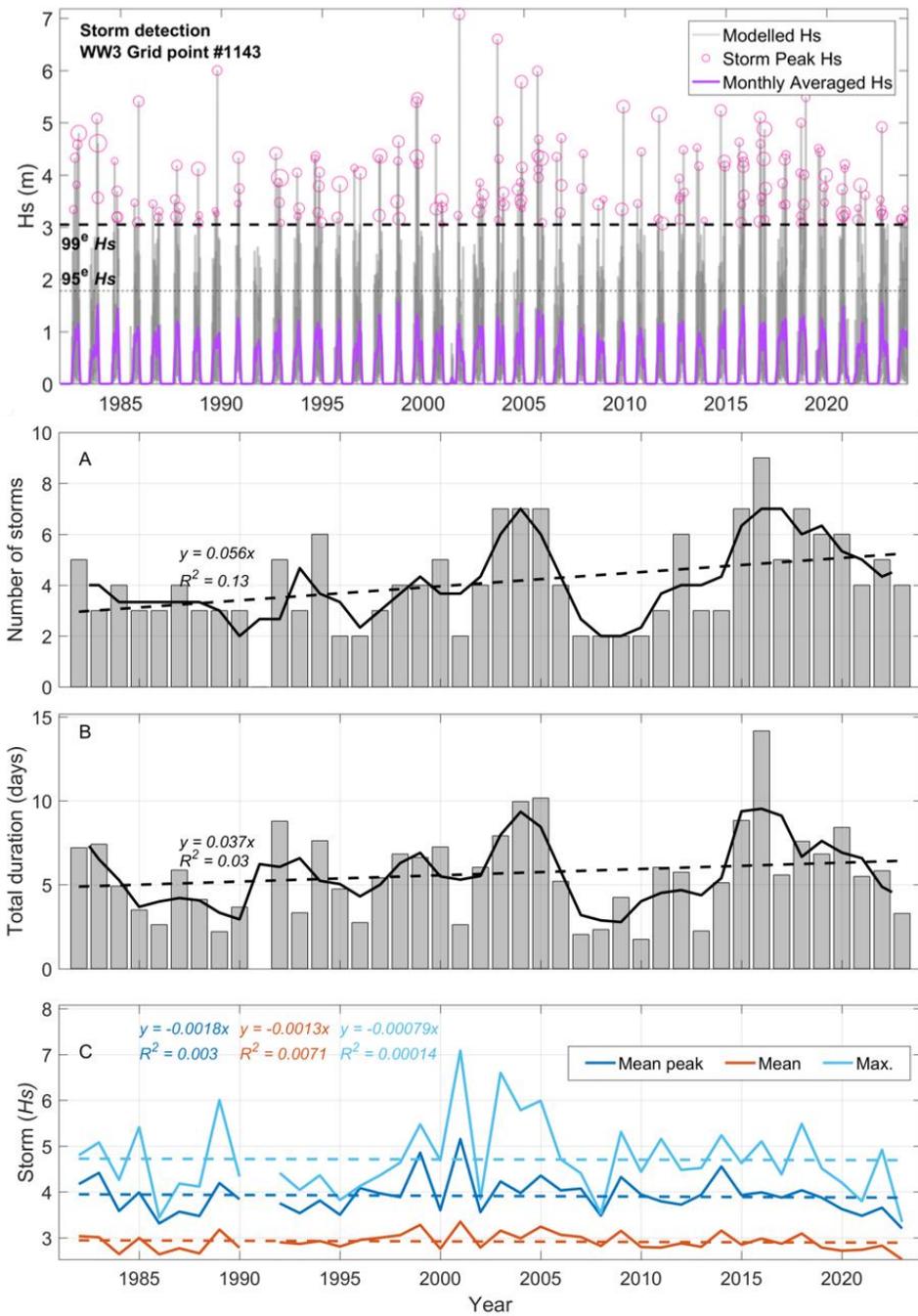
C.3 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #981 (DM)



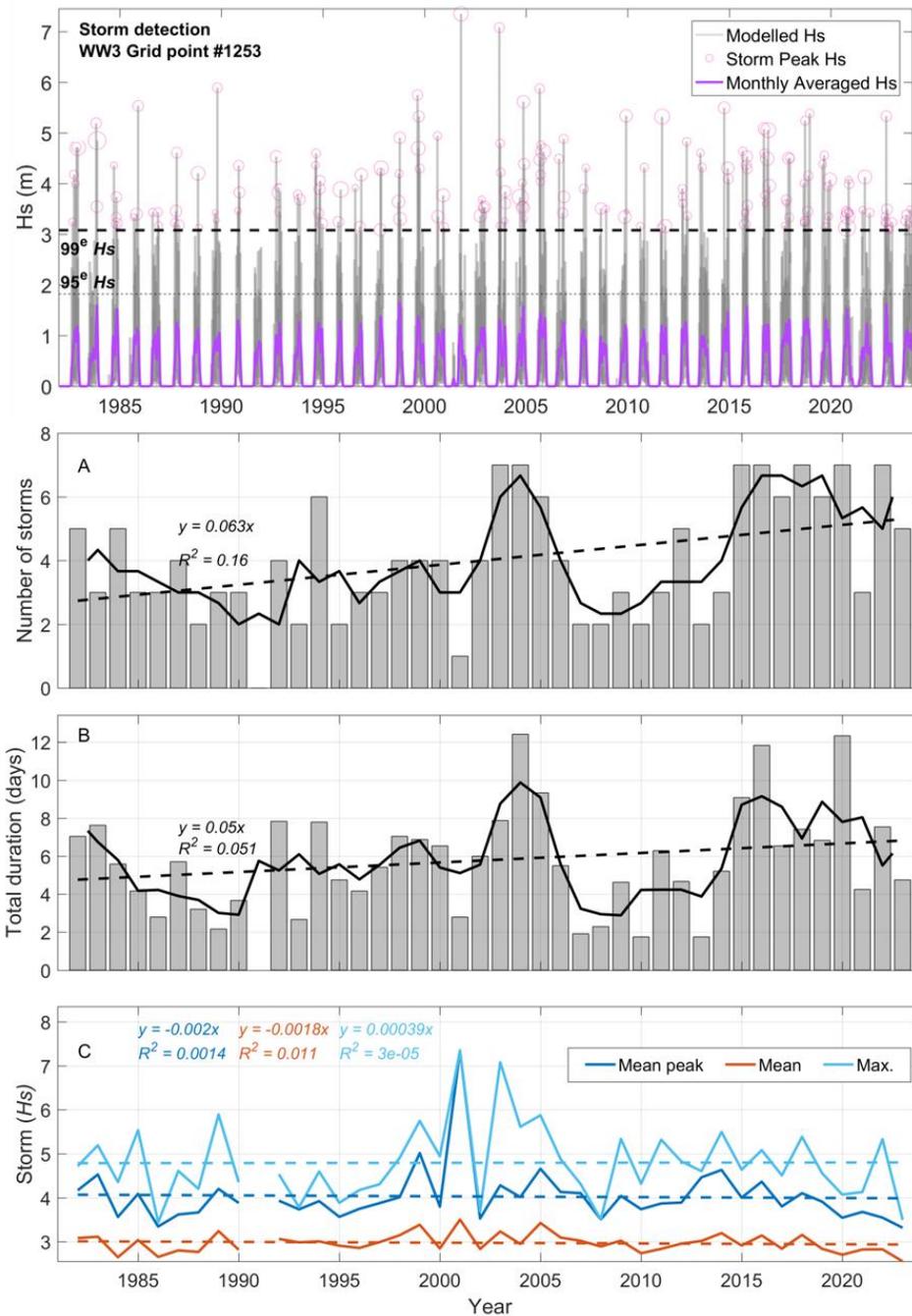
C.4 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1033 (DM)



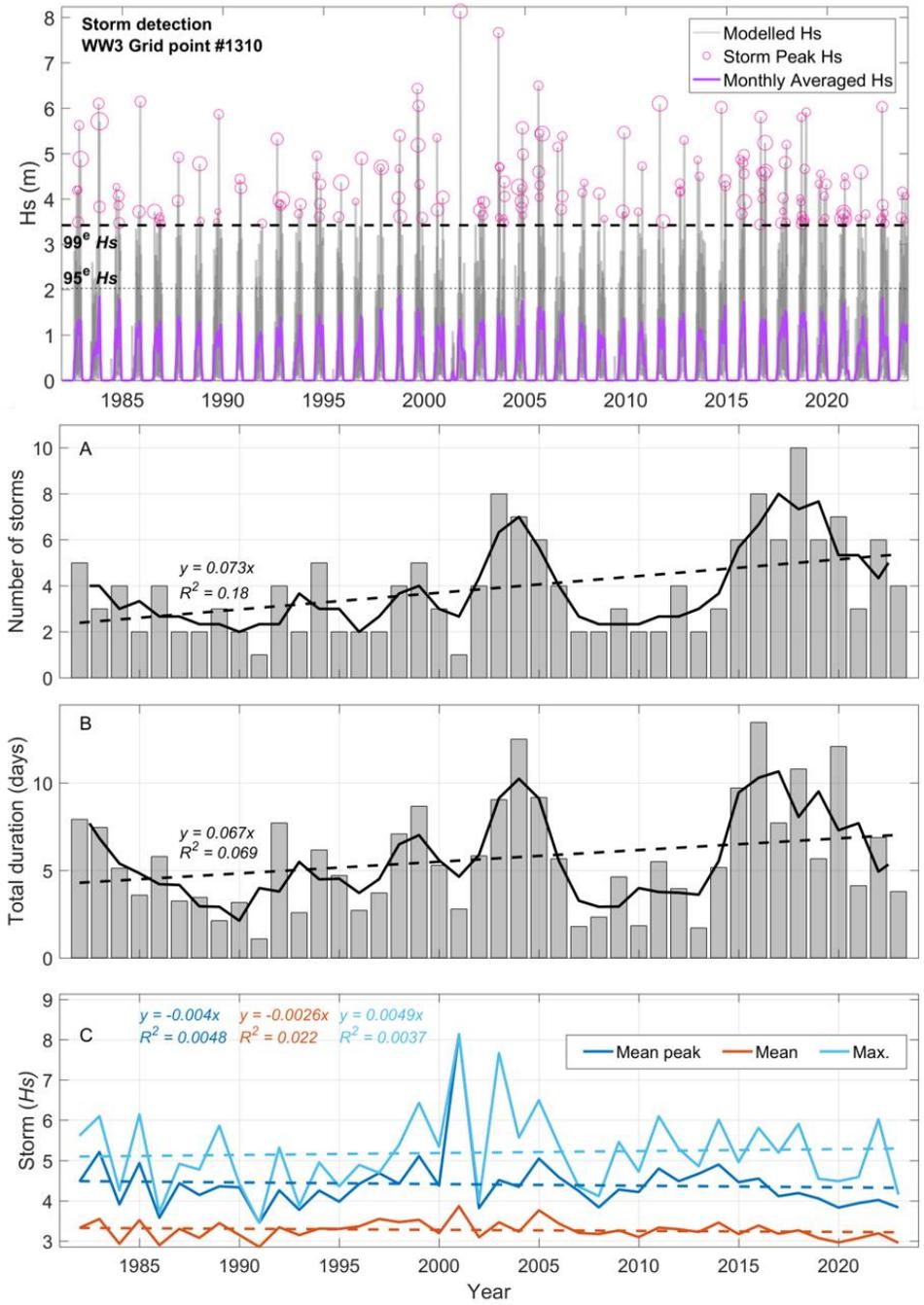
C.5 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1087 (DM)



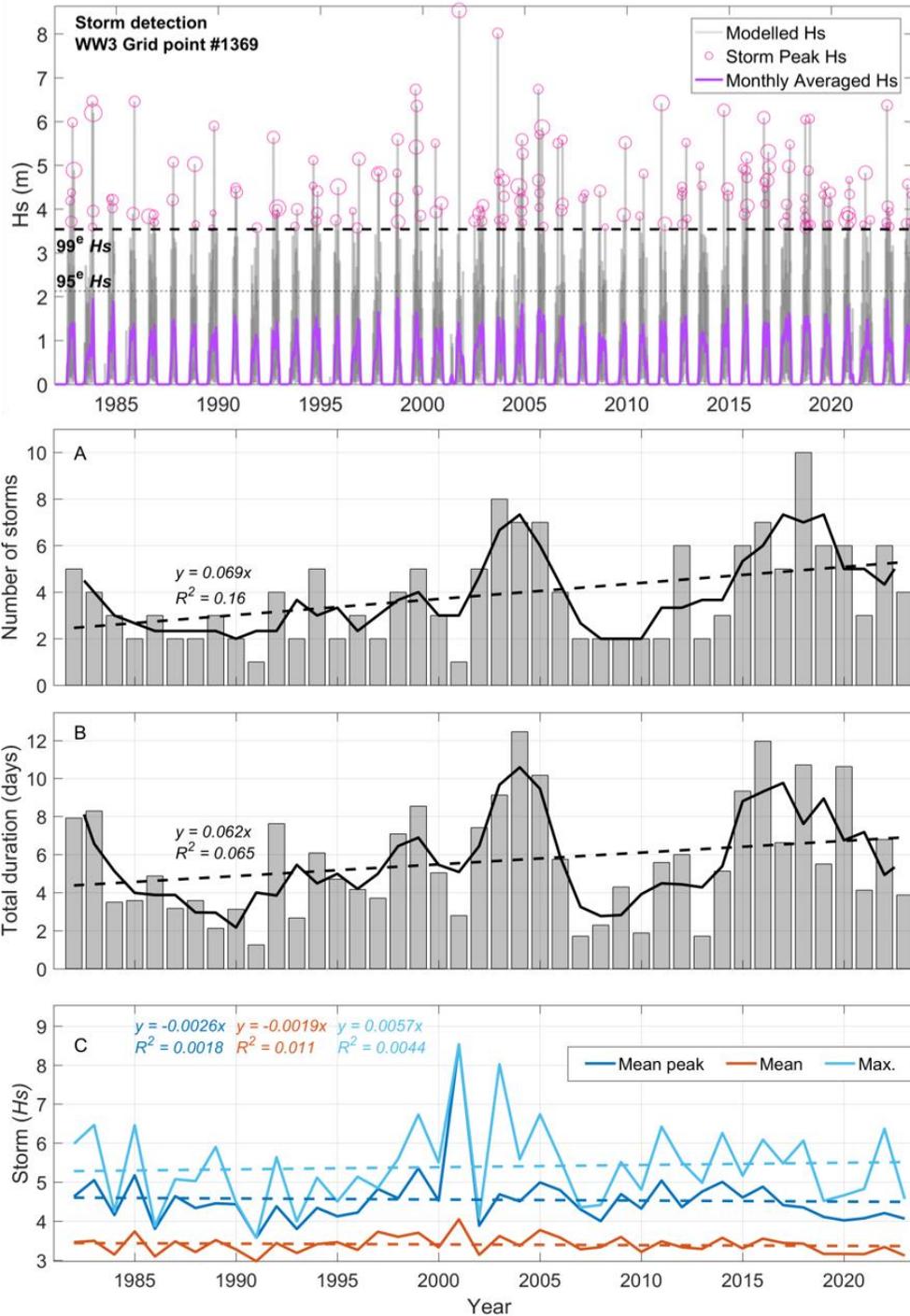
C.6 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1143 (DM)



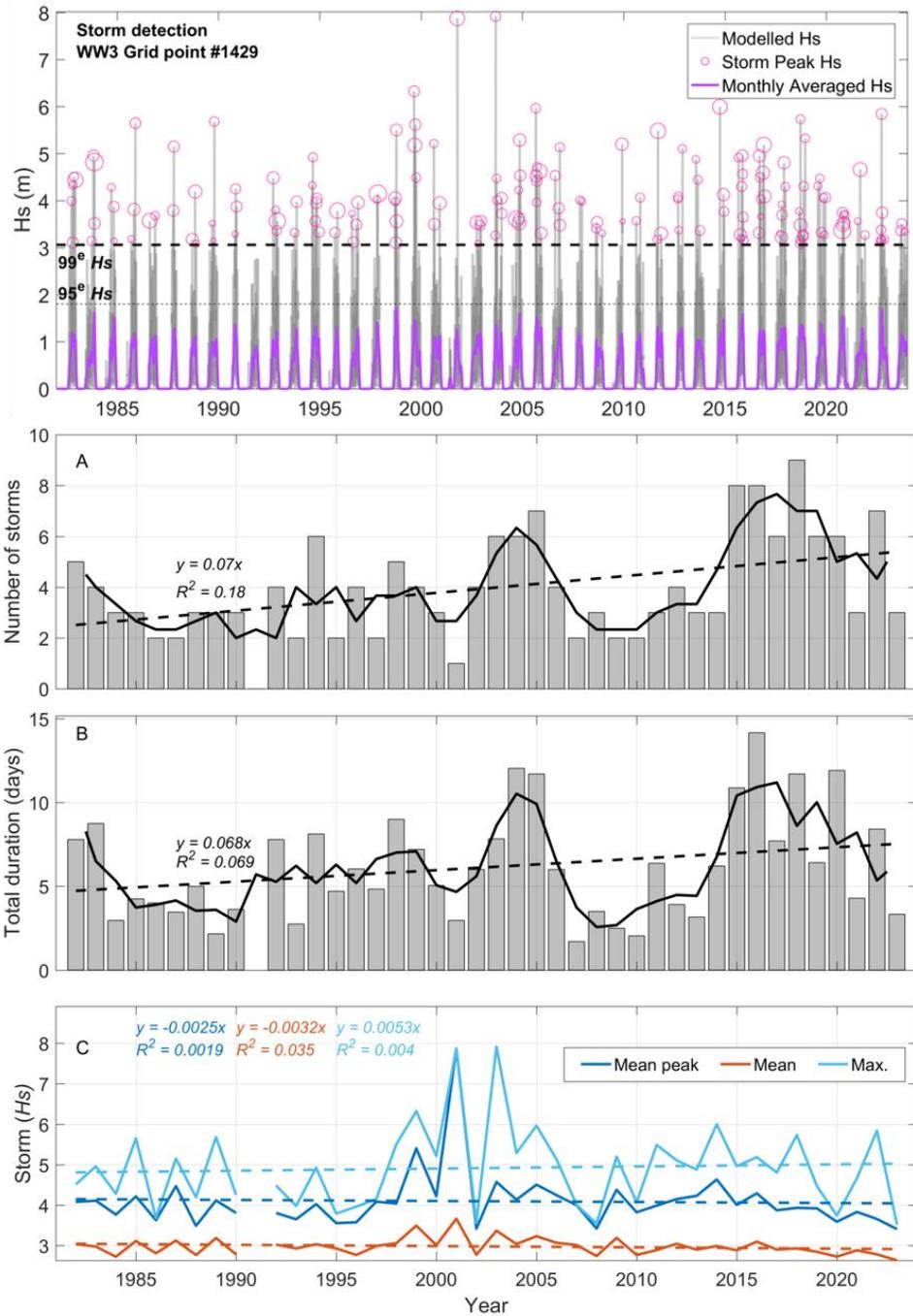
C.7 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1253 (PRB)



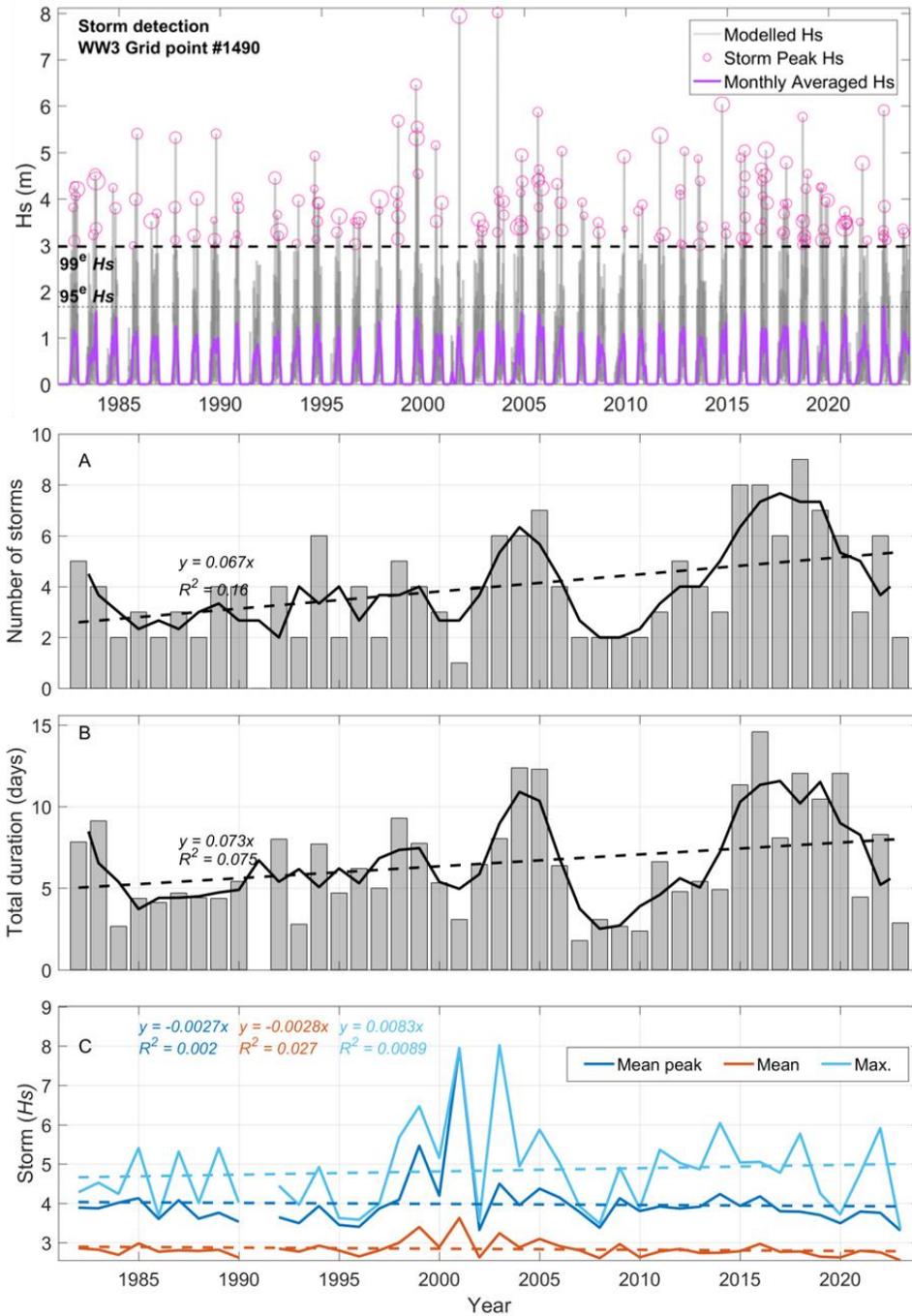
C.8 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1310 (PRB)



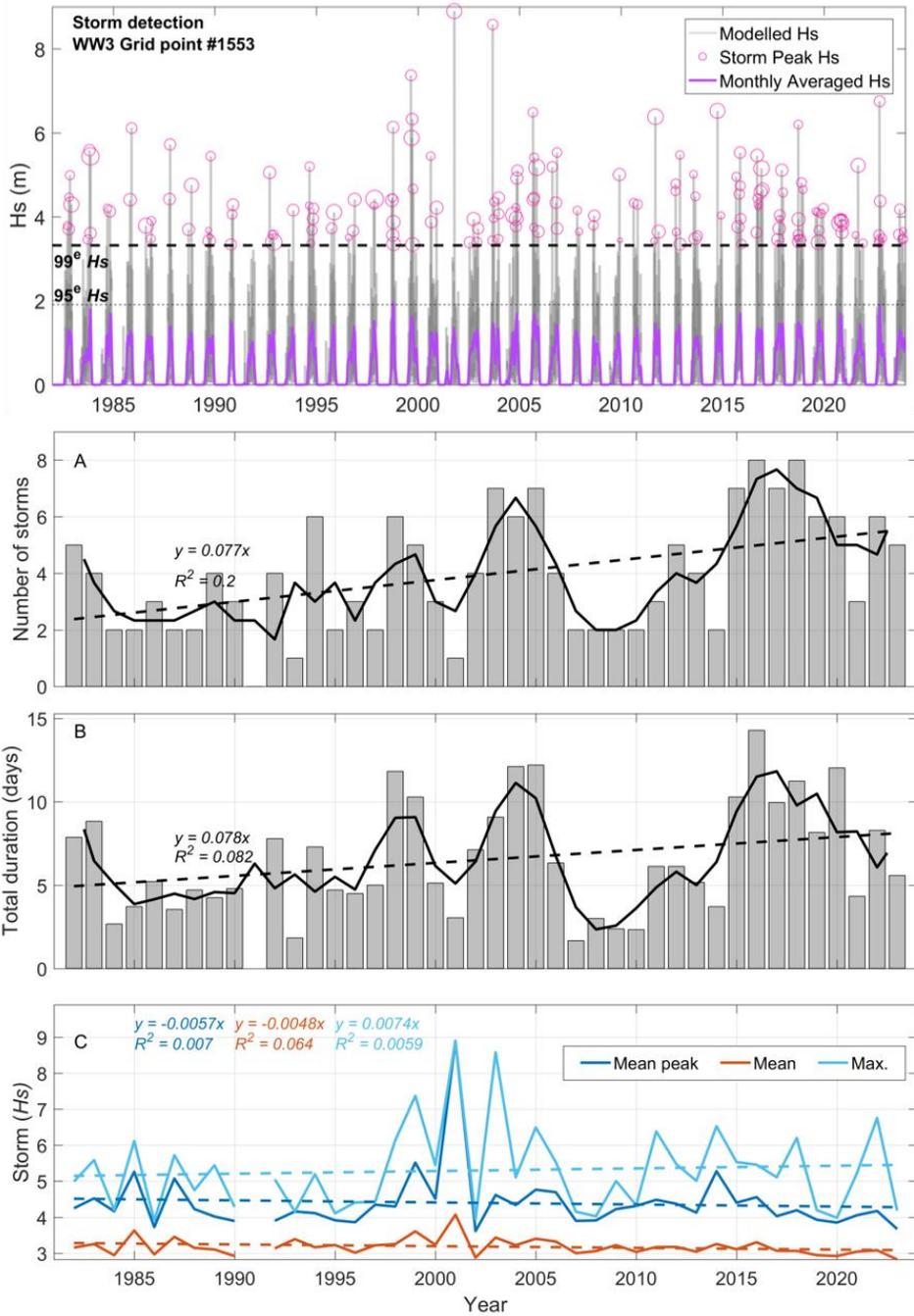
C.9 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1369 (PRB)



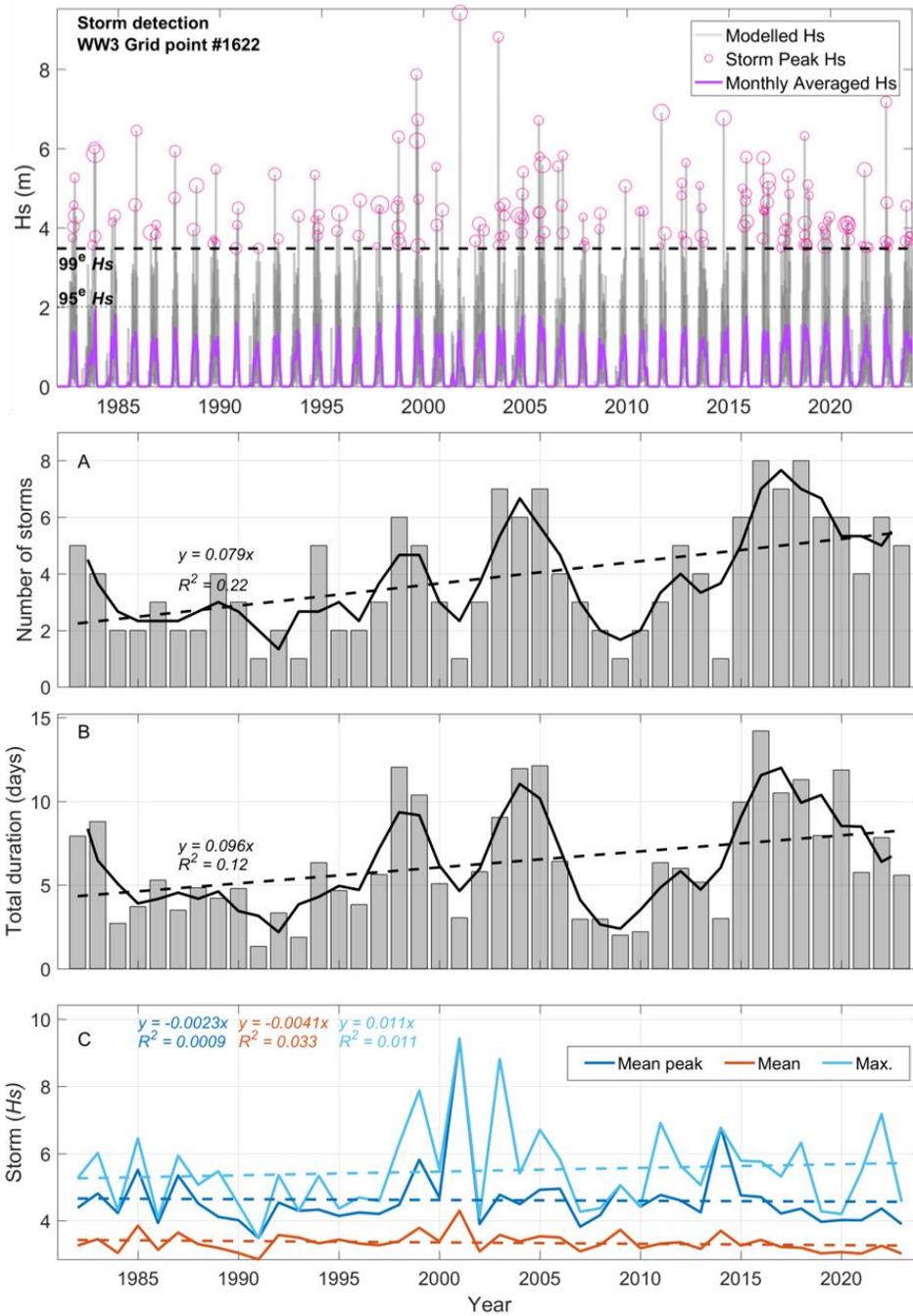
C.10 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1429 (LT)



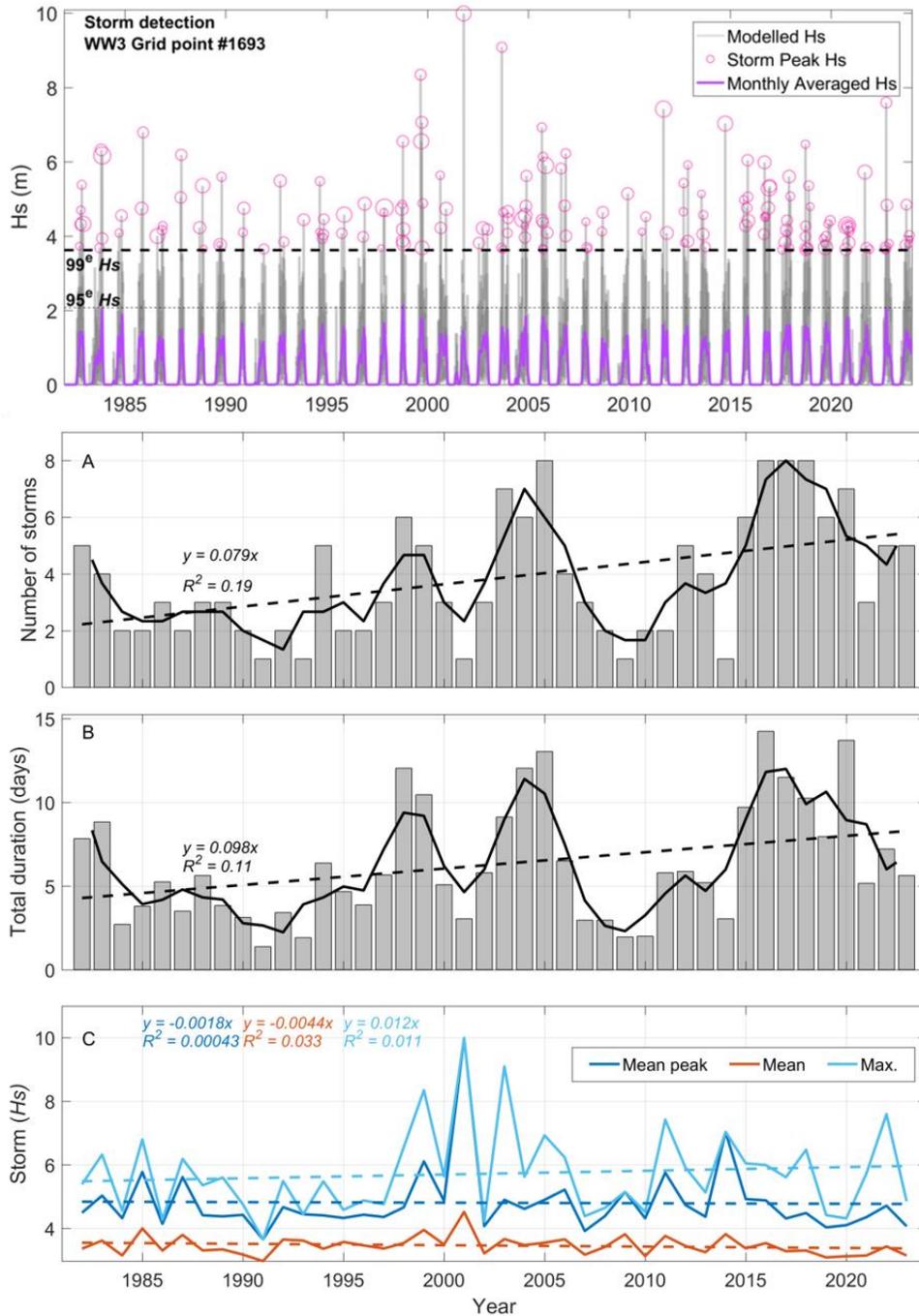
C.11 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1490 (LT)



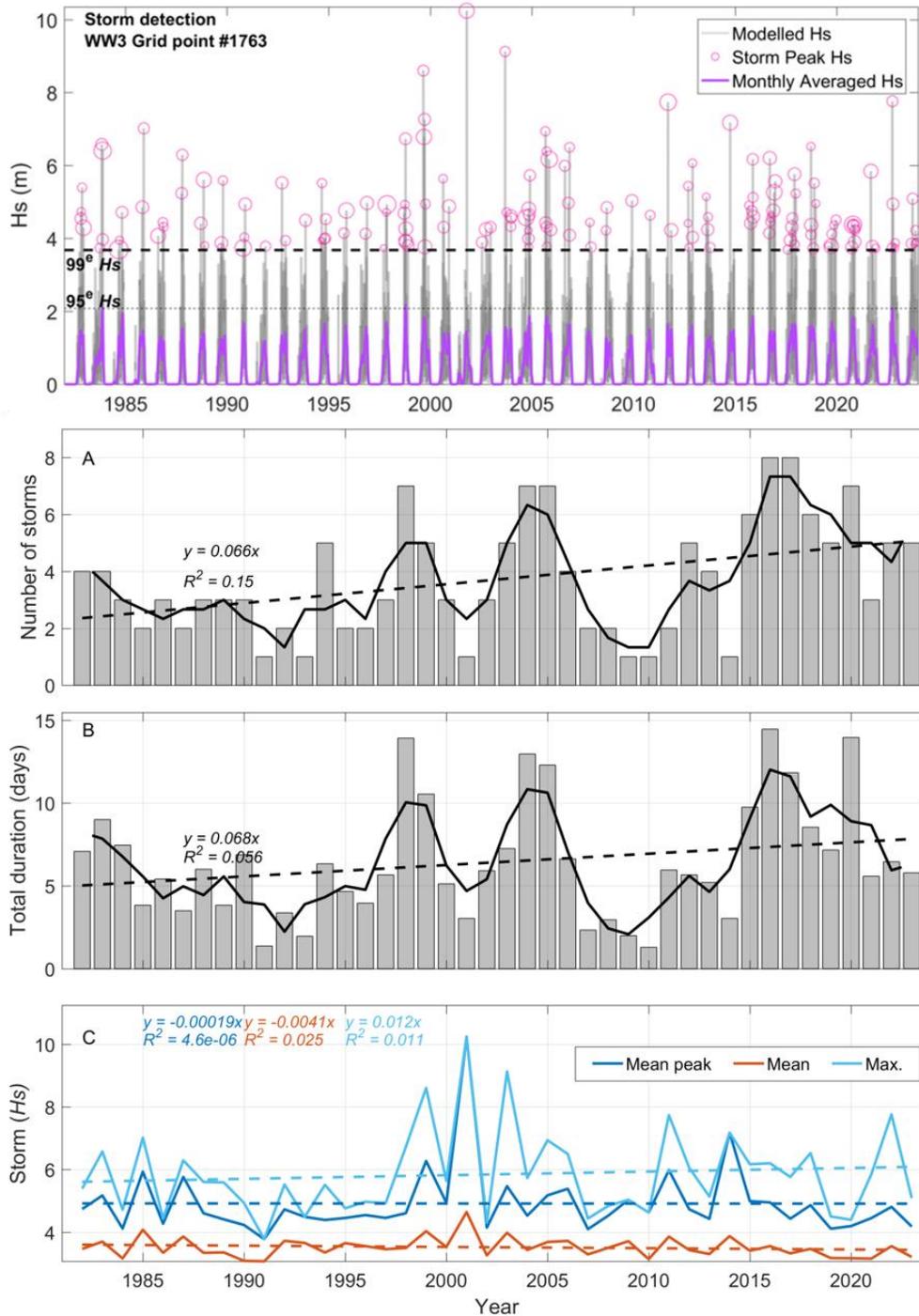
C.12 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1553 (LT)



C.13 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1622 (LT)

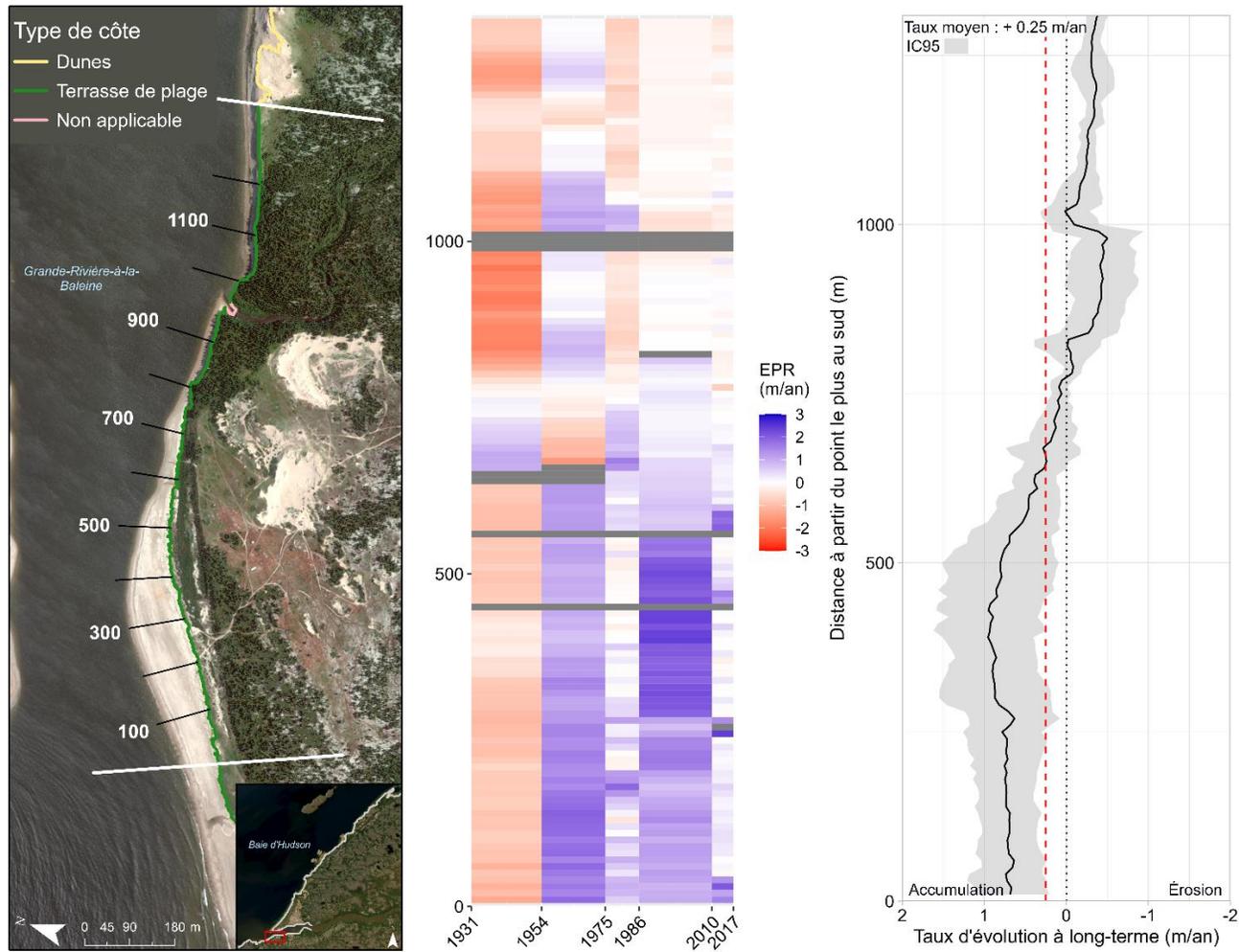


C.14 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1693 (LT)

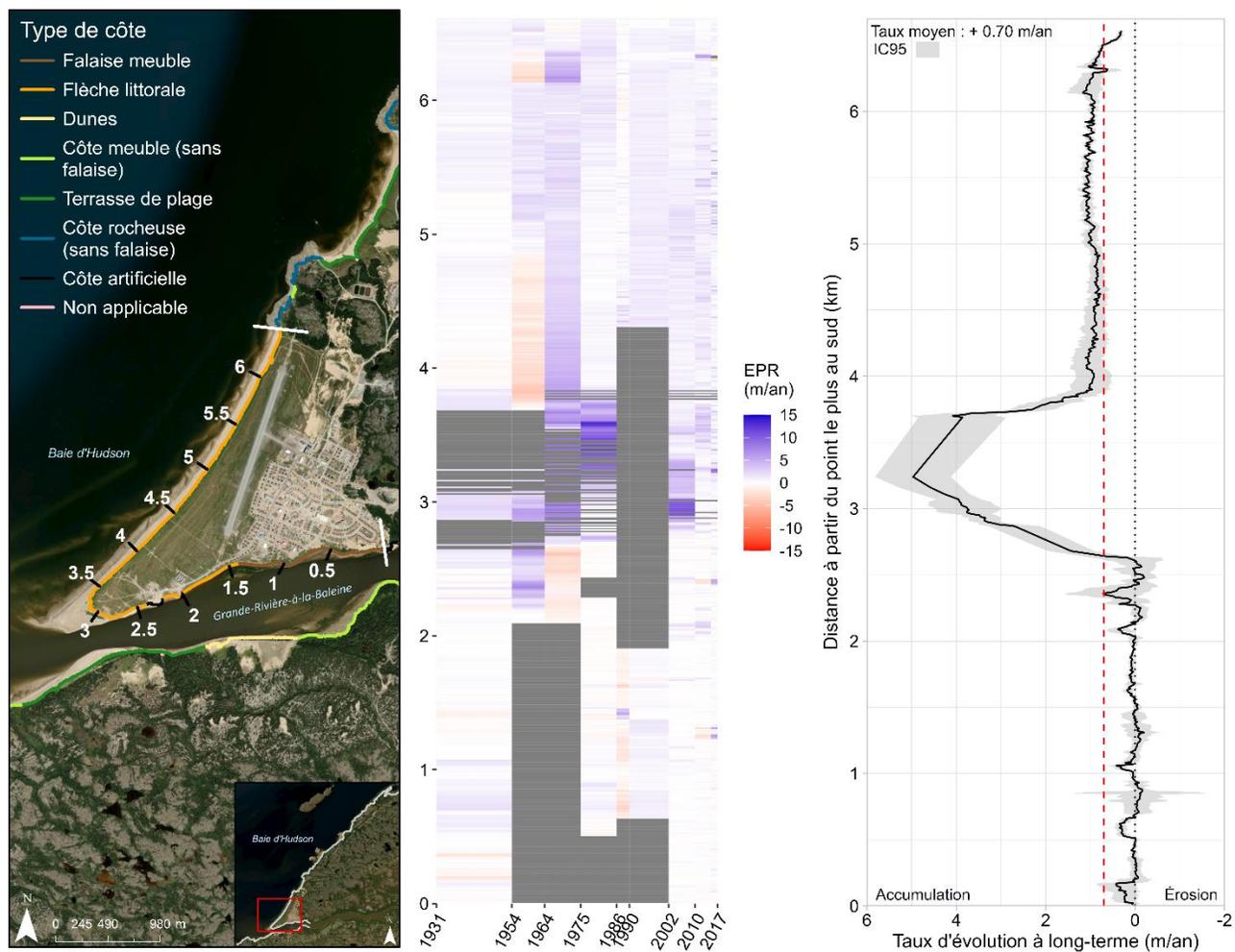


C.15 Hauteur significative des vagues et tempêtes détectées selon la méthode des seuils (haut), le nombre de tempêtes (A), leur durée totale par année (en jours) (B) et la hauteur moyenne, maximale et maximale moyenne des vagues de tempêtes pour la période 1982 à 2023 pour le point de grille WW3 #1763 (UM)

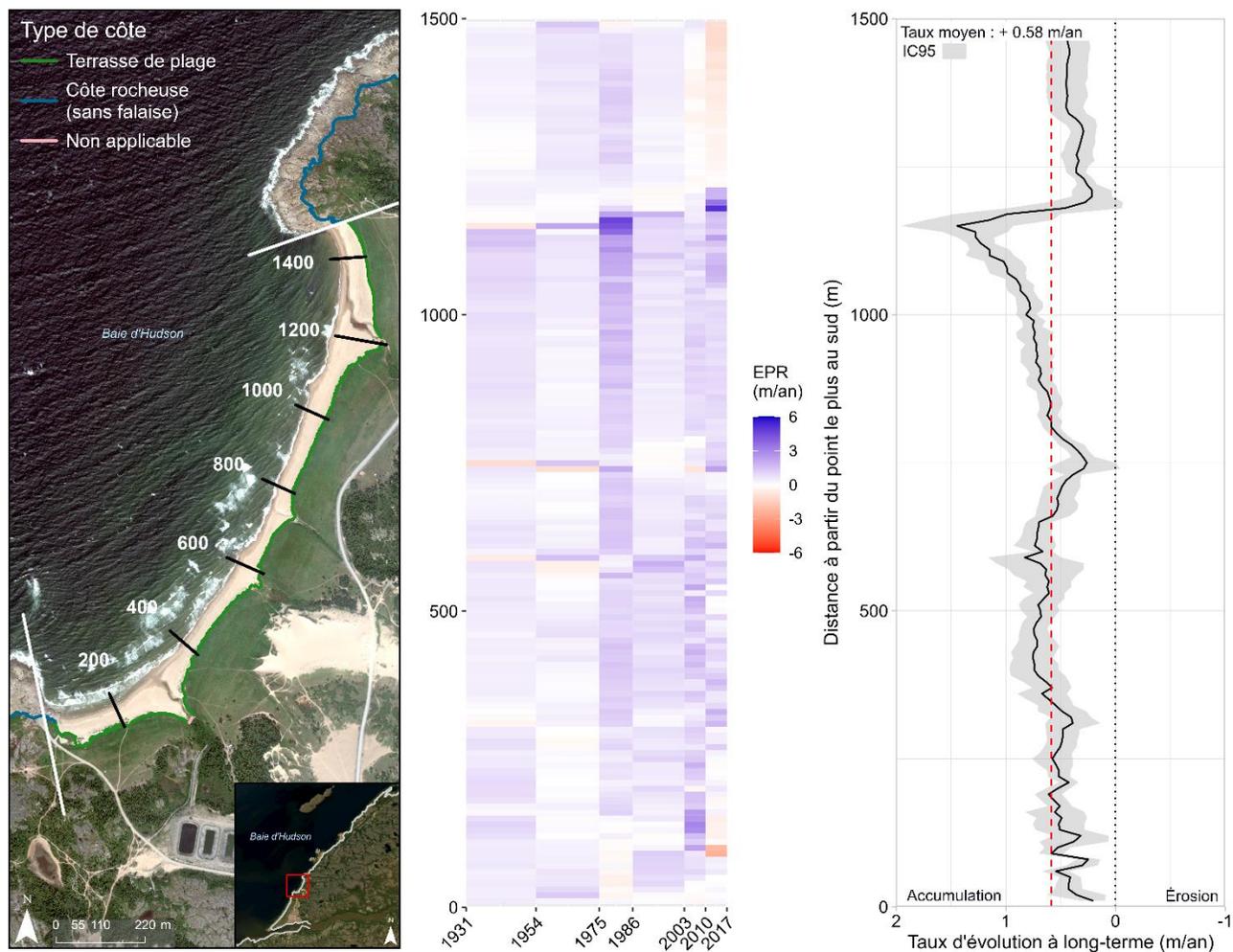
ANNEXE-D



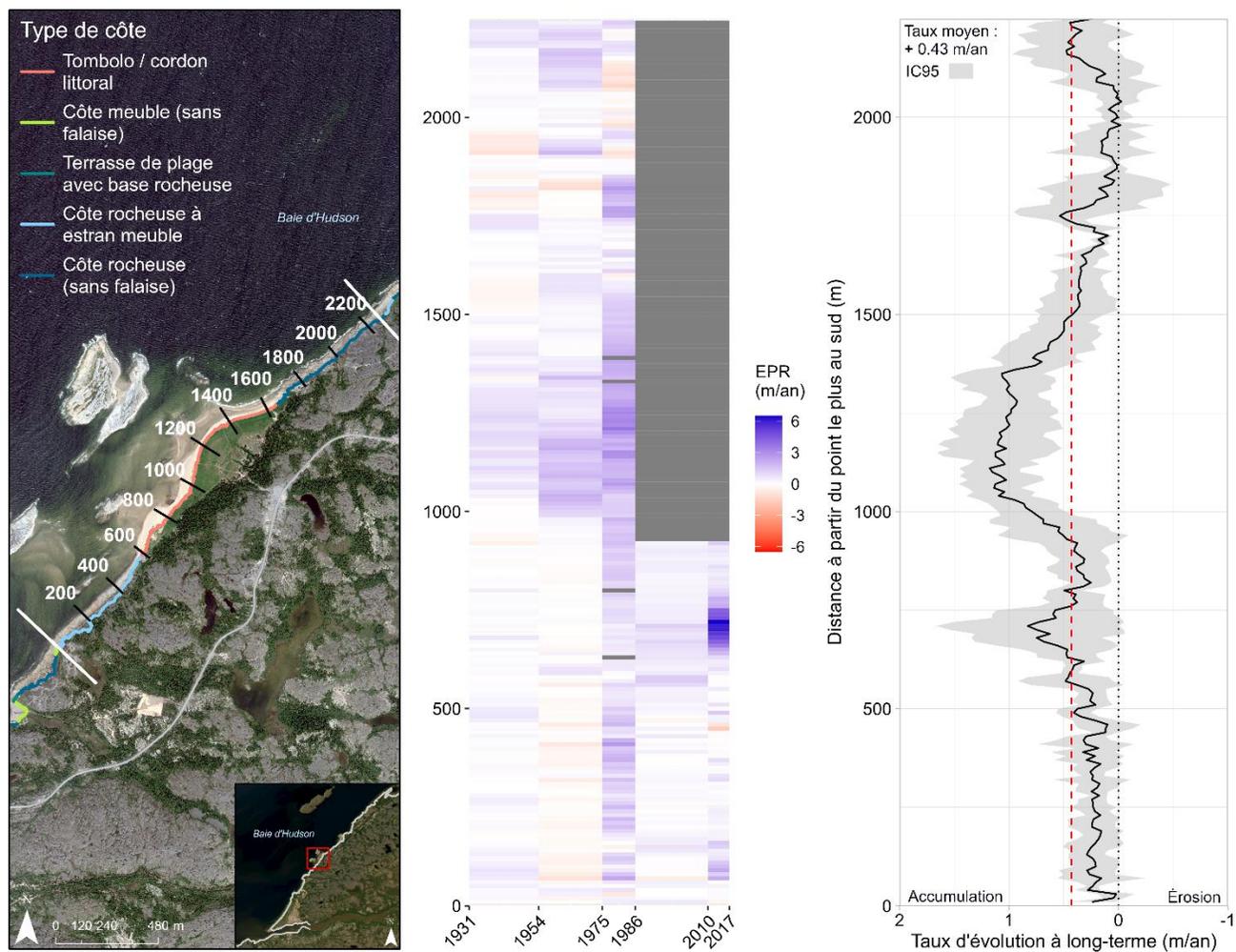
D.1 Carte des types de côte du sous-secteur A du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)



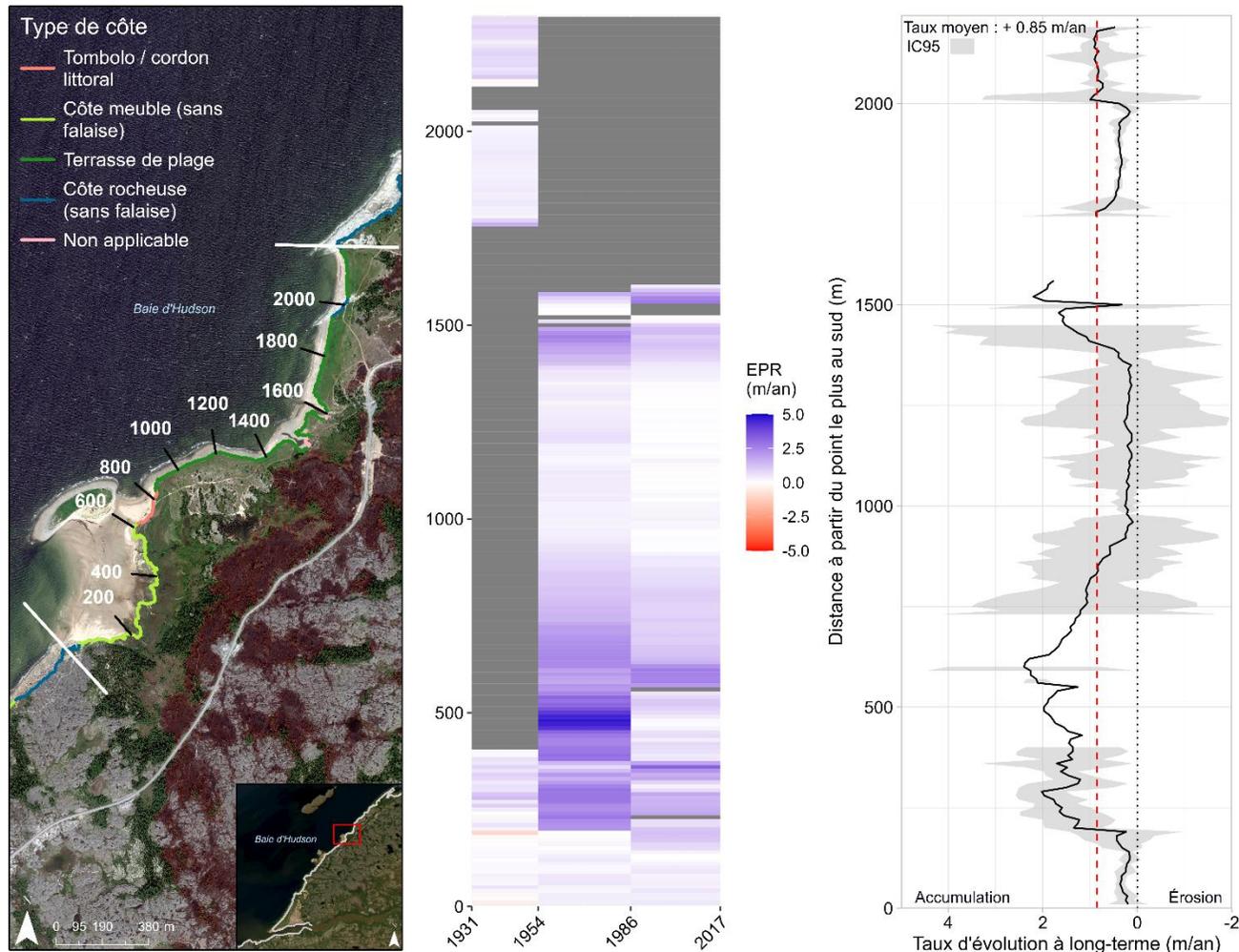
D.2 Carte des types de côte du sous-secteur B du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)



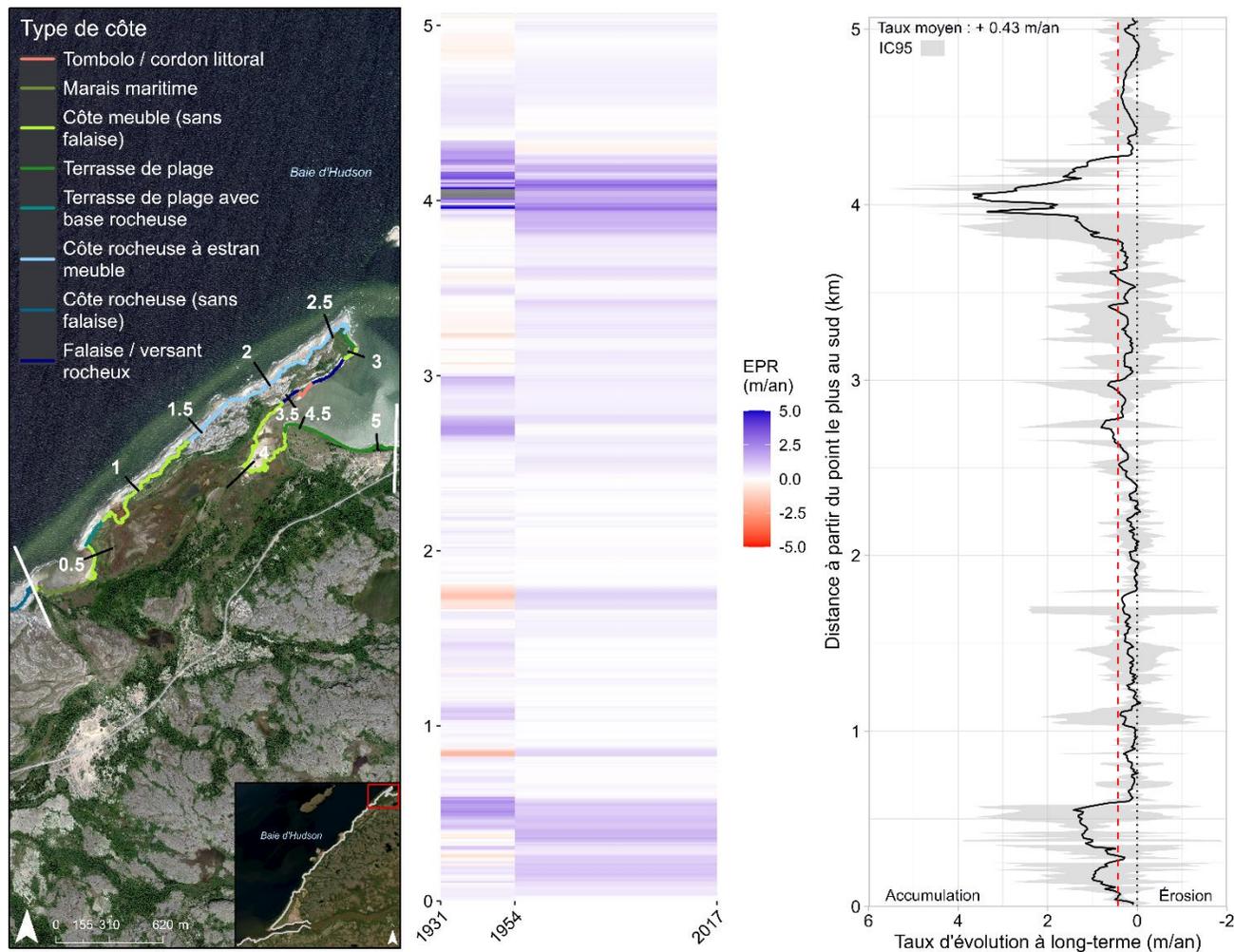
D.3 Carte des types de côte du sous-secteur C du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)



D.4 Carte des types de côte du sous-secteur D du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)

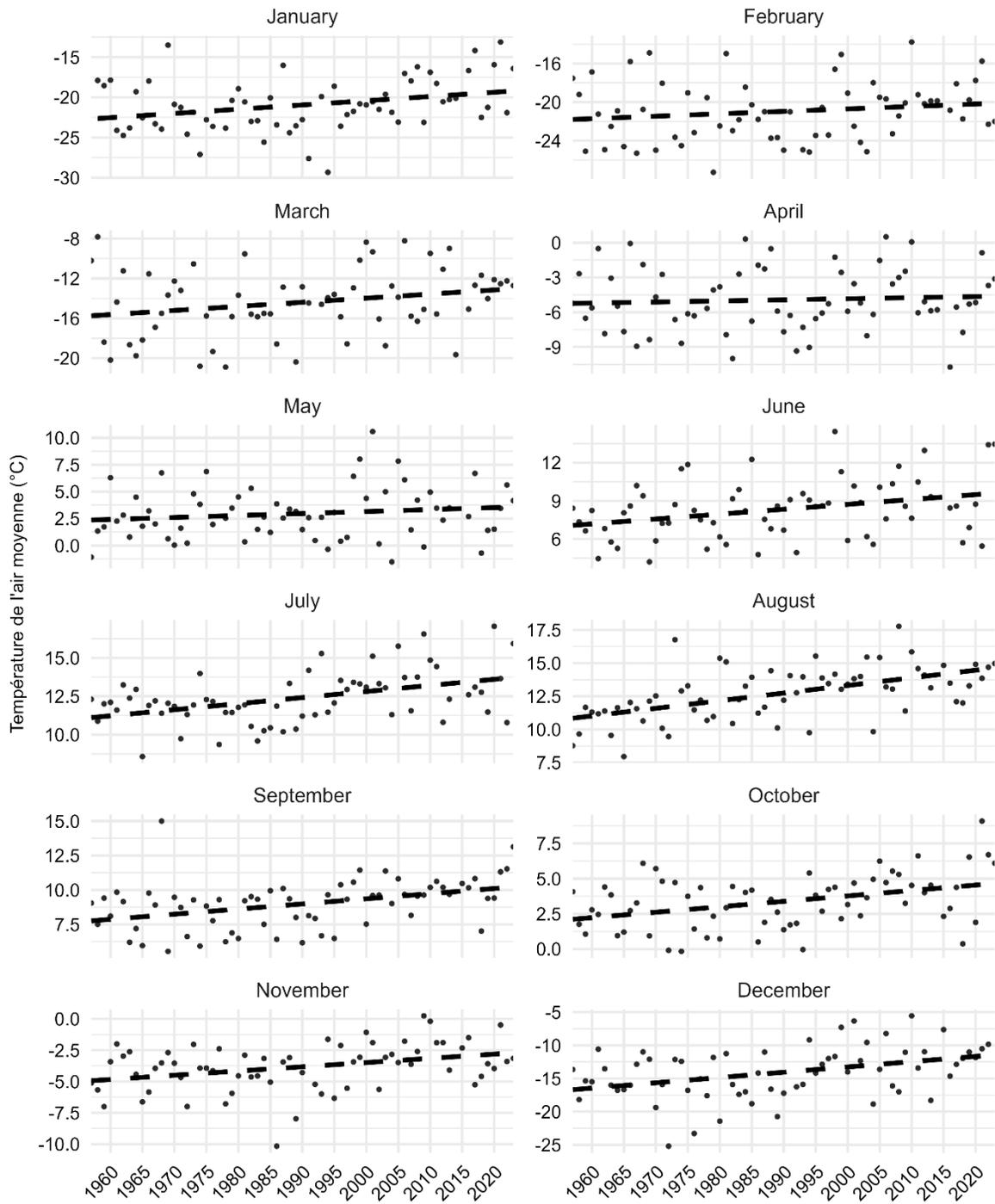


D.5 Carte des types de côte du sous-secteur E du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)

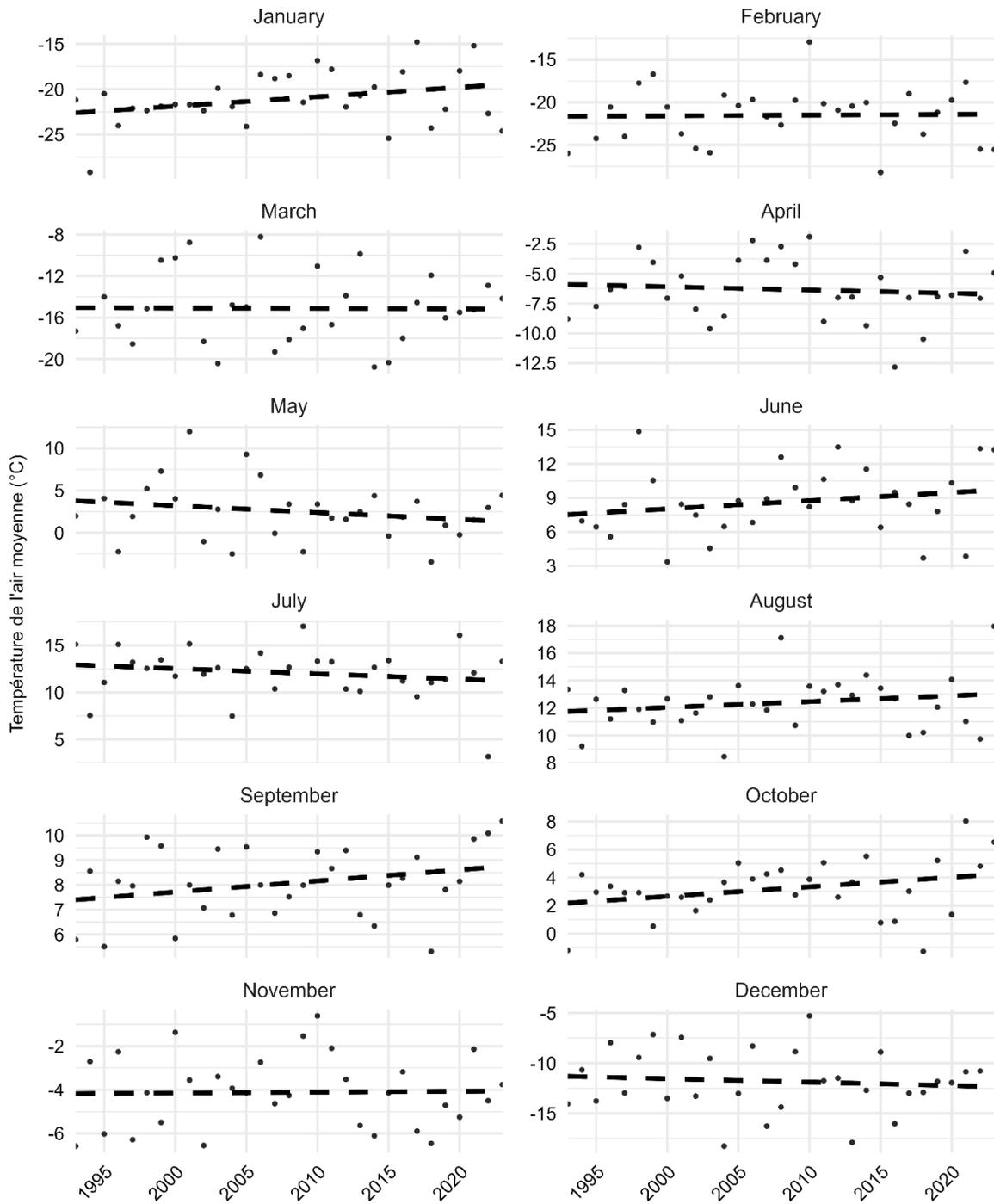


D.6 Carte des types de côte du sous-secteur F du secteur W-K (A), accompagnée d'une matrice spatio-temporelle des taux d'évolution diachroniques calculés tous les 10 m (EPR) (B), et des taux d'évolution pondérés (WLR) pour la période de 1931 à 2017, avec l'intervalle de confiance 95 % en gris et le taux d'évolution moyen représenté par le trait rouge pointillé (C)

ANNEXE-E



E.1 Température de l'air journalière (sans la nuit) mensuelle moyenne pour W-K pour la période de 1957 à 2023 (Source des données : ECCC, 2023)



E.2 Température de l'air journalière (sans la nuit) mensuelle moyenne pour Umiujaq pour la période de 1993 à 2023 (Source des données : ECCC, 2023)