

**SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE
VAGUES A L'AIDE DE CAMÉRAS ET D'IMAGERIE
SATELLITAIRE A PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES
MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJJUARAPIK,
UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DÉCEPTION, QUAQTAQ ET
AUPALUK (2017-2020)**

PROJET CC09.2

Monique Bernier, Jimmy Poulin, Yves Gauthier et Tahiana Ratsimbazafy

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9



Rapport de recherche final R2067

Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec, Direction générale des structures, Sous-ministériat à l'ingénierie et aux infrastructures

Mars 2021

Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Québec 

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec, Direction générale des structures, Sous-ministériat à l'ingénierie et aux infrastructures dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 et a été financé par le Fonds vert.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

L'interprétation des photographies étant subjective selon l'interprète, la prise de vue et les conditions environnementales, les dates indiquées dans ce rapport sont à titre indicatif et peuvent occasionnellement différer des dates réelles. De plus, une réinterprétation des photos utilisées lors des rapports précédents du projet afin d'uniformiser l'analyse peut avoir occasionné des différences entre les dates présentées dans ce rapport et celles présentées dans les rapports précédents.

© INRS, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-961-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2022

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Administration régionale Kativik (ARK) pour leur support au projet, plus particulièrement Mmes Véronique Gilbert et Gaëlle Baïlon-Poujol du service des ressources renouvelables, de l'environnement, du territoire et des parcs, ainsi que le personnel du service Transport tant à Kuujjuaq que dans les communautés. i.

Merci également aux deux gérants qui se sont succédés à la station de recherche du Centre d'études nordiques à Kuujjuarapik, MM. Sidney Arruda et Patrick Lacerte, votre aide a été précieuse. Il est également important de souligner l'aide logistique immense apportée par le personnel de Glencore – Mine Raglan pour les travaux réalisés à la Baie Déception.

Nous tenons aussi à remercier les trois chargées de projet qui se sont succédées au ministère du Transport pour leur leadership et leur collaboration, Mmes Anick Guimond, géographe, Geneviève Trudel, biologiste, et Frédérique Gosselin Lessard, ingénieure. Nous remercions également pour leurs encouragements et bons conseils les ingénieurs Christian Poirier et Philippe-Hubert Roy-Gosselin du ministère du Transport et madame Stéphanie Bleau d'Ouranos, tous membres du comité de suivi.

Finalement, plusieurs étudiants de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) ne figurant pas comme auteurs de ce rapport final ont participé à ce projet. Il est important de souligner la contribution de M. Romain Latapie au niveau de la méthode de redressement des photographies et la mise en place du système de caméras à Aupaluk et de M. David Éthier pour son travail sur le traitement des images satellitaires et le calcul du fetch.

SOMMAIRE

Problématique

Dans le cadre d'une initiative de recherche du ministère des Transports du Québec (MTQ) visant à étudier la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik et les changements climatiques débutée en 2009, l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) Centre Eau Terre Environnement a obtenu un financement d'Affaires autochtones et du Nord Canada de 2009 à 2012 pour procéder à l'installation et à la maintenance de systèmes de caméras dans les villages de Kuujuaq, Quaqaq et Umiujaq (Clerc et al., 2012). Ces caméras ont permis de documenter le comportement de la glace près des infrastructures maritimes de ces trois villages. En 2015, l'INRS a reçu le mandat du ministère des Transports du Québec d'étendre le réseau de caméras aux villages de Kuujuaapik, Ivujivik, Aupaluk et à la Baie Déception, de même que de procéder à l'entretien et la mise à niveau des systèmes d'Umiujaq et de Quaqaq (Projet CC09.1) afin de poursuivre le projet entamé en 2009 (Bernier et al., 2017). Ce réseau de caméras s'est alors vu attribuer l'appellation Réseau CAIMAN pour CAMéras aux Infrastructures MARitime du Nunavik.

En 2017, afin de poursuivre les travaux d'entretien, d'acquisition et de traitement de données sur les conditions de glace au Nunavik entamés dans le cadre du projet CC09.1, le MTQ a mandaté à nouveau l'INRS pour réaliser le projet de recherche CC09.2 intitulé « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques: Kuujuaapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk (2017-2020) ». Afin d'améliorer la couverture de suivi des glaces, deux sites additionnels ont été instrumentés dans les villages nordiques de Kuujuaapik et de Quaqaq. Ces deux nouveaux sites localisés sur les îles Gillis et Hearn sont situés à proximité des instruments déployés en mer pour le projet CC16.1 de suivi des conditions de vagues (marégraphe, profileur de courant, ...) intitulé « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques ». Ce projet est aussi mandaté par le MTQ, mais réalisé par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER).

Objectifs

Le projet CC09.2 poursuit trois objectifs principaux. Tout d'abord, il s'agit de poursuivre la documentation historique des conditions d'englacement et de fonte de la glace de rive au voisinage de six infrastructures maritimes du Nunavik pour la période 2017-2020, soit : Kuujuaapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk. Deux types de données ont été utilisées pour la documentation : des photographies acquises par des caméras in-situ installées à proximité des sites d'étude (les caméras du réseau CAIMAN) et des images satellites acquises dans le spectre du visible. Le second objectif s'inscrit en

continuité du premier et consiste à acquérir des données sur les conditions de glace pour de nouveaux sites à Kuujjuarapik et Quaqtq afin d'alimenter un modèle numérique de vagues. De nouvelles caméras ont été installées à cette fin. La documentation de ces nouveaux sites s'est faite de la même façon que les sites à proximité des infrastructures maritimes. Le troisième objectif principal est de valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues.

Quatre objectifs plus spécifiques ont été déterminés afin d'orienter les travaux à faire pour atteindre les objectifs généraux. Ces objectifs spécifiques sont :

1. Maintenir en bon état de fonctionnement les systèmes de suivi des glaces par caméras au voisinage des infrastructures maritimes de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtq et Aupaluk;
2. À partir des photos et des images satellitaires, établir les dates d'englacement et de fonte ainsi que les concentrations de glace pour ces six sites pour la période 2017-2020;
3. À partir des photos et des images satellitaires, produire les cartes de glace et déterminer le fetch et les concentrations de glace pour les deux nouveaux sites de Kuujjuarapik et Quaqtq (dédiés à l'étude des vagues) pour la période 2017-2020;
4. À l'aide de l'imagerie satellite radar, estimer les patrons de vague (hauteur, direction, période) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année en 2017-2018 et 2018-2019, à des fins de validation des modèles de vague.

Méthodologie

L'utilisation du réseau de caméras CAIMAN pour l'observation des conditions de glace impliquait l'installation de nouvelles caméras à Kuujjuarapik et Quaqtq à l'été 2017 ainsi que l'entretien annuel des caméras existantes à Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception et Aupaluk de même que celles déjà en place près des infrastructures maritimes de Kuujjuarapik et Quaqtq. Les caméras installées sont de marque Reconyx, modèle PC800. Leur rapport coût/résolution-fiabilité est excellent. Deux caméras par site ont été installées pour offrir une sécurité en cas de panne et augmenter le champ de visée. Les caméras sont alimentées par une batterie 12V qui est maintenue chargée par un panneau solaire. Pour chaque site, l'endroit exact où les caméras ont été installées a été déterminé en tenant compte des objectifs recherchés par le projet et des commentaires de personnes locales. Les détails techniques concernant l'installation des caméras et les copies des autorisations obtenues des autorités locales ou régionales sont disponibles dans le rapport technique 1 du présent projet (Poulin et al., 2017).

A la fin de chaque été, entre la mi-août et le début d'octobre, une visite des différents systèmes de caméras du Réseau était faite afin de réaliser l'entretien, la réparation des équipements et la collecte des photos enregistrées depuis la dernière visite ainsi que de s'assurer que les équipements étaient fonctionnels avant la saison d'englacement. La section 1.3.2.1 de ce rapport montre l'emplacement des caméras et la vue offerte par chacune d'elle. De manière

générale, peu de bris ou d'interruptions ont été observés sur les systèmes. L'état des systèmes suite à chaque entretien a été décrit dans des rapports techniques remis au ministère (Poulin et al., 2017; Poulin et al., 2019; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2021). Les caméras ont acquis plus de 256 000 photographies de l'automne 2016 à l'automne 2020.

Les photographies des caméras in situ captent les conditions de glace uniquement au voisinage des infrastructures maritimes et sur la portion de la baie présente dans le champ de vision de la caméra (quelques km²). Par contre, les images satellitaires optiques permettent de voir l'évolution spatiale et temporelle de la couverture de glace sur de grandes superficies lorsqu'il n'y a pas de couverture nuageuse. Des images gratuites provenant des satellites optiques Sentinel-2 (Européen) et Landsat-8 (Américain) ont donc été analysées pour déterminer la présence de glace ou non à proximité des six sites à l'étude pour la période 2017 à 2020. Elles ont aussi servi à déterminer la longueur de la période d'englacement à chacun des six sites pour la période d'octobre 2013 à août 2020. Pour les sites de Kuujjuarapik et de Quaqtq, les images ont été classifiées (glace, eau, nuages) et les classifications seront fournies à l'ISMER qui pourra les utiliser pour calculer les concentrations de glace sur les domaines couverts par leurs modèles de vague. En utilisant les images classifiées et les données météorologiques mesurées à Kuujjuarapik et Quaqtq, il a été aussi possible de calculer le fetch pour les sites de mouillage aux dates d'acquisition des images. Le calcul est relativement simple: à partir du site du mouillage des instruments, la distance à l'obstacle le plus proche, dans la direction du vent, est le fetch. Une routine a été développée afin d'automatiser le calcul.

D'autre part, afin d'évaluer le potentiel des images radar pour évaluer la hauteur et la direction des vagues le long des côtes, des images Radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite canadien RADARSAT-2 de l'Agence spatiale canadienne (ASC) ont été obtenues exclusivement pour ce projet de recherche via une entente de collaboration entre l'INRS et l'ASC (programme SOAR). Les données utilisées comportent la phase et l'amplitude du signal rétrodiffusé et sont dites polarimétriques (Quad-Pol). Suite à une revue de la littérature sur les méthodes d'extraction des paramètres de vagues à partir d'images satellitaires radar, une approche méthodologique a été retenue (Poulin et al., 2018). L'approche a été testée et adaptée pour les images Quad-Pol du satellite RADARSAT-2 de l'automne 2018 et 2019.

Résultats

Tous les systèmes de caméras du réseau ont été entretenus annuellement et ont bien fonctionné dans l'ensemble. Considérant les 16 caméras utilisées pendant les trois ans du projet CC09.2, et les 12 déjà en place lors de l'hiver 2016-2017, c'est un total de 240 saisons qui pouvaient être observées par les caméras du réseau CAIMAN et seulement 41 ont été perdues. Les caméras Reconyx ont été fiables et elles ont fonctionné 97% du temps. D'ailleurs, les systèmes installés dans les communautés de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Quaqtq et Aupaluk étaient toujours fonctionnels après l'entretien effectué en

septembre 2020. Les sites instrumentés afin de répondre aux objectifs 3 et 4 de ce projet sur des îles à proximité des villages de Quaqtac et Kuujuarapik ont toutefois été démontés à l'automne 2020 en raison de l'incertitude liée à la pérennité du réseau et de la difficulté d'accès à ces sites. Le matériel démonté de l'île Gillis est entreposé dans un garage du Centre d'études nordiques à Kuujuarapik. Pour le matériel de l'île Hearn, les caméras ont été réinstallées à Quaqtac sur le site en place depuis 2009 en remplacement des caméras qui y avaient été volées. Le reste du matériel a été donné à la municipalité de Quaqtac pour un projet d'installation de matériel de communication radio VHF. Les sites de la Baie Déception ont été retirés pour les mêmes raisons et le matériel a été envoyé à l'Administration régional Kativik à Kuujuaq.

Les photos ont permis de documenter l'évolution des conditions des glaces de rive dans un contexte de changement climatique et les conditions de glace qui peuvent représenter un risque pour ces ouvrages côtiers pour les six (6) sites à l'étude. Les photos horaires permettent de bien distinguer l'arrivée et le départ de la glace, ainsi que la présence de blocs en dérive qui peuvent représenter un risque pour l'infrastructure maritime. Par contre, il est essentiel de déterminer des procédures précises et un vocabulaire commun, afin d'éviter l'incertitude au niveau du choix de la date exacte d'englacement et de fonte. Les images satellitaires viennent compléter l'information des photos en fournissant une vue plus régionale des conditions de glace. Par contre, rares sont les images acquises sans la présence de nuages ou de brume pendant les périodes critiques (englacement et fonte) et qui permettent de voir la zone observée par la caméra. Les séries de données pluriannuelles des sites à l'étude a permis de faire les constats suivants :

À Kuujuarapik, le secteur de l'infrastructure maritime située au nord du village est relativement calme. L'infrastructure donne accès à une baie peu profonde, laquelle est protégée de la baie d'Hudson par les îles Manitounouk et, plus près de la côte, par des hauts fonds. La mer n'y est pas particulièrement agitée à l'automne car les vents viennent généralement du sud et du sud-est, donc en provenance de la côte. L'englacement s'y fait majoritairement sur place, la jeune glace se fixant de la côte jusqu'aux îles Manitounouk en très peu de temps. La mise en place du couvert de glace semble très liée aux températures mesurées. Pour les cinq périodes d'englacement observées, le couvert s'est fixé le jour où le cumul des DJG est passé au-dessus de 250. Au printemps, le couvert se dégrade thermiquement et s'érode de la berge vers le large. La glace étant homogène à la formation, la fonte se déroule assez graduellement jusqu'à ce que la glace pourrie se détruise. Les vents dominant de l'ouest et du nord lors du printemps apporte parfois de grande quantité de glace à l'intérieur du détroit mais ceux-ci ne présentent pas de risque pour l'infrastructure maritime. Le site nouvellement instrumenté sur l'île Gillis montre une dynamique totalement différente. La région couverte par les caméras semble peu profonde et encline à beaucoup de turbulence. Durant les mois d'automne, plusieurs tempêtes ont été observées depuis 2017 avec des vagues venant déferler sur la pointe de l'île, parfois presque jusqu'aux caméras. Les tempêtes observées sont presque exclusivement le résultat de vents occidentaux. L'englacement au nord-est de

l'île Gillis est le résultat d'une suite répétée de production de glace laquelle est ensuite repoussée vers le large. Le secteur est également alimenté en glace du large par des vents de l'ouest. Lorsque le vent passe au sud ou à l'est, la glace est repoussée vers le large et la production de nouvelle glace débute à nouveau. En raison de ces mouvements, le couvert ne se fixe que vers la mi-janvier. Durant l'hiver, des mouvements et des décrochements de la banquise peuvent survenir à quelques reprises. Ceux-ci surviennent principalement au nord et à l'ouest de l'île. Le secteur à l'est situé entre l'île Gillis, l'île Bill of Portland et le village de Kuujuarapik demeure généralement épargné par ces décrochements. Au printemps, lorsque la glace est mobilisée, des suites de mouvements similaires à ceux de l'englacement sont observés : les vents du nord et de l'ouest poussent la glace du large vers l'île alors que les vents du sud la repousse vers le large. La glace mobile peut être observée pendant plusieurs semaines.

À Umiujaq, l'infrastructure maritime est également protégée de la baie d'Hudson par les îles Manitounouk mais elle est plus exposée à l'intérieur du détroit. La glace est peu mobile lors de sa mise en place, la nouvelle glace se transformant en nilas puis en jeune glace. Une fois la jeune glace présente, des mouvements, généralement est-ouest, sont parfois observés mais sans grande intensité et les floes n'ont pas tendance à se fracturer. Au printemps, le couvert se dégrade sur place pendant quelques semaines avant d'être mobilisé, la perte de banquise se faisant du nord vers le sud. Au moment d'être mobilisée, la banquise est dans un état avancé de dégradation ce qui fait qu'elle se fracture rapidement pour former des floes de plus petites tailles, lesquels posent moins de risque pour l'infrastructure maritime. Si des niveaux d'eau élevés et des vents forts de l'ouest sont observés, le risque peut devenir accru pour l'infrastructure maritime. Celle-ci n'est généralement protégée que par un cordon de glace étroit et peu épais, conséquence de la faible amplitude des marées. Les durées des périodes d'englacement et de fonte furent très variables au cours des 11 dernières années et ne montrent pas de tendance particulière. La durée du couvert fixe montre quant à elle une augmentation relativement significative de l'ordre de 30% au cours de la même période.

À Ivujivik, les premières observations de nouvelles glaces sont généralement annonciatrices d'arrivée massive de glaces exogènes. La mise en place du couvert de glace est beaucoup dépendante de la direction des vents. En effet, la glace qui formera la banquise hivernale est généralement produite dans la passe Digges puis poussée dans la baie d'Ivujivik par des vents du nord. Le couvert est habituellement stable à partir de la mi-décembre. En absence de vent du nord, la mise en place de la banquise s'en trouve retardée. Dans la passe Digges, la banquise demeure fixe rarement plus de six semaines. Pendant cette période, à l'embouchure de la baie, juste au nord de la pointe d'Ivujivik, une polynie d'environ 100 m par 50 m apparaît de façon temporaire mais récurrente. Cette polynie est un signe de la fragilité de la banquise à l'interface baie/passe et est impliquée dans les fractures survenant à l'embouchure de la baie. Au printemps, la dégradation de la banquise dans la baie est principalement thermique. Plus elle perd de la résistance, plus la composante mécanique entre en jeu, les vents dominants du nord-est à cette

période venant constamment pousser les floes de la passe contre la banquise, lesquels s'enfoncent de plus en plus profondément à l'intérieur de celle-ci. Selon la tendance des cinq dernières années, la durée de la période entre la première apparition d'eau et l'évacuation (premier jour à l'eau libre) a augmenté de 300%, soit une augmentation de près de 40 jours. La durée du couvert de glace permanent a quant à elle diminué d'autant de jours.

À la Baie Déception, la première apparition de glace survient dans une plage temporelle d'un peu plus d'un mois, soit de la troisième semaine d'octobre à la quatrième semaine de novembre. Le couvert de glace se fixe quant à lui de la dernière semaine de novembre à la troisième semaine de décembre. Depuis l'installation des caméras, il est possible de constater une mise en place plus tardive du couvert de glace. Durant l'hiver, le couvert de glace demeure stable malgré le passage répété des bateaux. Au printemps, la glace se détériore sur place plusieurs semaines avant la première apparition d'eau. Suite à cela, moins d'une semaine est généralement nécessaire à l'évacuation de la glace. Le trafic maritime contribue possiblement à l'évacuation rapide en fracturant le couvert de glace déjà affaibli ce qui permet à de grands morceaux de banquise de se détacher et d'être mobilisés.

À Quaqtak, les premières observations de glaces se produisent généralement la dernière semaine de novembre ou la première semaine de décembre. Par la suite, survient un apport de glaces exogènes en provenance du détroit d'Hudson poussées par les vents dominants du nord-ouest. Ces glaces peuvent se limiter à la baie Diana ou pénétrer dans l'anse de la Mission si le couvert n'est pas déjà en place. La banquise se consolide ensuite et demeure stable pour l'hiver. Lors de la fonte, la banquise régresse sur deux fronts dans la baie Diana, à l'est et à l'ouest de l'île Hearn, en direction du sud. Lorsque les deux régions se rejoignent et permettent la circulation de glace au sud de l'île Hearn, le niveau de risque augmente dans l'anse de la Mission en raison des floes qui peuvent être poussés sur une longue distance par les vents du nord-ouest, prédominant également au printemps. Il est fréquent que des blocs de glace s'échouent dans la zone intertidale et contre les infrastructures maritimes. Ces blocs peuvent dépasser aisément les 5 m d'épaisseur, et même les 10 m. Néanmoins, la faible profondeur devant les infrastructures de même que les hauts fonds devant l'infrastructure la plus récente offrent une bonne protection contre les glaces épaisses arrivant du large.

À Aupaluk, les premières observations de nouvelle glace ont généralement lieu lors d'un cycle de vives-eaux pendant les deuxième ou troisième semaine d'octobre. Malgré la configuration de l'estran qui favorise la production de glace, l'amplitude des marées et les forces du flux et du reflux créent du mouvement qui retarde la mise en place du couvert, lequel devient fixe vers la première semaine de décembre. Au printemps, la banquise se dégrade thermiquement. La première apparition d'eau hors de l'estran survient généralement lors de la deuxième ou troisième semaine de juin, aidé par l'arrivée d'eau douce d'un ruisseau au fond de l'anse Funnel. Par la suite, au fil des marées hautes, l'eau finie par soulever et désagréger des parties du couvert de glace présent sur

l'estran et peu de temps est nécessaire avant que l'ensemble de la banquise soit mobilisé. Suite à cela, les marées hautes ramènent à l'occasion des petits floes et des blocs de glace autour et dans l'infrastructure maritime. La longueur de l'estran et l'amplitude plus faible des marées de vives-eaux à cette période offrent cependant une protection contre l'arrivée de blocs de grandes épaisseurs. Les trois saisons de fonte analysées ont montré une diminution du temps nécessaire à l'évacuation de la glace suite à la première observation d'eau. La dernière observation de glace semble également survenir plus tôt.

Pour les deux nouveaux sites de **Kuujuarapik et Quaqtac** instrumentés en 2017 et dédiés à l'étude des vagues, les images satellitaires ont été classifiées afin de produire des cartes montrant la présence ou l'absence de glace. En superposant les grilles de modélisation des vagues, il est possible de calculer, pour chaque maille, la concentration de glace présente au moment de l'acquisition de l'image. Cette information pourra être utilisée dans le cadre du projet CC16.1 mené à l'ISMER comme intrant au modèle de vagues ou pour l'analyse des résultats de ce dernier. Les images classifiées ont également servi à déterminer la valeur du fetch au moment où les images ont été acquises. L'intérêt était particulièrement porté aux périodes où la glace est présente.

Le potentiel des images RSO a été testé pour estimer les patrons de vague (hauteur, direction) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année et ce afin de comparer les résultats aux modèles de vague. La méthode retenue étant innovatrice, des modifications ont été faites afin de rencontrer les besoins du projet et de l'adapter aux données du satellite RADARSAT-2. Les images RS-2 acquises à l'automne 2018 ont pu être traitées et comparées avec les données de hauteur et de direction des vagues mesurées par les AWAC mis en place dans le cadre du projet CC016.1. Il appert que des RMSE élevées et des biais importants sont observés tant pour les hauteurs que pour les directions des vagues. Cela s'expliquerait par la proximité des côtes et l'importance des masses terrestres entrant dans les calculs des estimations. Des ajustements pourraient être faits sur la méthode proposée lorsque les données in situ (mesures des AWAC) de l'automne 2019 auront été recueillies par l'équipe du projet CC016.1.

Conclusions

Le maintien et l'entretien des systèmes de caméra mises en place dans les années précédentes a permis de maximiser les investissements et les retombées de connaissances pour le Ministère, mais également pour les organismes partenaires du milieu local (les villages nordiques, les membres des associations de pêcheurs et chasseurs) et régional (l'Administration régionale de Kativik). Les observations effectuées ont permis de poursuivre le développement de la connaissance sur les caractéristiques et l'évolution des conditions de glaces de rive au Nunavik, qui sont essentielles pour évaluer les risques pour les ouvrages côtiers, pour la navigation et pour la circulation de la population sur le couvert de glace lors de la pratique des activités de subsistance dans un contexte de changements climatiques.

De plus, les observations sur les glaces ont été et seront utilisées dans le cadre du projet de recherche CC16.1 (prolongé jusqu'en mars 2022 à cause des contraintes liées à la Covid-19 pour la campagne terrain de l'été 2020), afin de calibrer et valider le modèle de vagues en milieu côtier. En retour, les données in-situ des AWAC qui seront éventuellement récupérées pourront permettre d'effectuer une meilleure validation des précisions sur les directions et les hauteurs des vagues dominantes dérivées du traitement d'images radar polarimétriques comme celles de RADARSAT-2 ou de la constellation RADARSAT (RCM).

Aussi, une fois les projets de recherche CC09.2 et CC16.1 complétés, les données recueillies permettront d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques, ce qui devrait faire l'objet d'un futur projet. Les observations sur les glaces pourront servir dans le cadre d'un exercice visant à édicter des normes guidant la construction ou l'entretien des infrastructures maritimes au Nunavik. De plus, les données recueillies et les résultats obtenus peuvent servir à tous les partenaires autant publics que privés impliqués dans la conception et/ou l'entretien d'infrastructures maritimes au Nunavik (Administration régionale Kativik, ministère des Transports, compagnies privées, etc.). Les photos et les cartes numériques seront transmises au ministère des Transports en parallèle au dépôt du rapport final, selon une modalité à préciser (support physique ou transfert électronique).

Finalement, afin d'assurer la pérennité du réseau CAIMAN, lequel a été majoritairement financé par le ministère des Transports et l'Administration Régionale Kativik, ainsi que la prise en charge graduelle du réseau par les communautés, une proposition intitulée « *Programme de formation et de partage des connaissances en soutien à l'appropriation efficace du réseau CAIMAN par les Nunavimmiut* » a été soumise par l'INRS au Programme d'application des connaissances polaires de Savoir Polaire Canada en 2019, mais l'évaluation a été retardée de 18 mois à cause de la pandémie. Une mise à jour du budget et des lettres d'appui a été demandée en février 2021, mais due à un court délai les lettres du ministère et de l'ARK n'ont pu être renouvelées. Si approuvé, le projet débiterait en septembre 2021 et assurerait un financement pour trois ans. Sinon, l'Administration régionale Kativik et l'INRS poursuivront leurs démarches pour l'appropriation du réseau CAIMAN par les Nunavimmiut.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce projet a permis de poursuivre avec succès la documentation historique des conditions de glace de rive au voisinage de six infrastructures maritimes du Nunavik pour la période 2017-2020, soit : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk. Cette documentation a été réalisée en utilisant deux types d'information ayant des échelles différentes, soit des photographies acquises à proximité du rivage et des images de haute résolution spatiale (10 à 30 m) des satellites Landsat-8 et Sentinel-2. Les photographies ont été acquises par les caméras du réseau de Caméras aux Infrastructures Maritimes du Nunavik (CAIMAN). Dans le cadre du projet, deux nouveaux sites ont été ajoutés au réseau, soit un sur une île au large de Kuujjuarapik et un autre sur l'île Hearn près du village de Quaqtac. Pour ces deux nouveaux sites, une méthode d'estimation des patrons de vagues (hauteur, direction) en utilisant des images du satellite Radarsat-2 a été testée.

Tous ces sites ont été entretenus annuellement et ont bien fonctionné dans l'ensemble. 83% des données attendues ont été acquises et récupérées. Parmi les données manquantes, 68% sont associées à une cause connue (vol, vandalisme, problème d'alimentation, etc.) et 32% proviennent d'arrêts inattendus des caméras. Les caméras utilisées dans le cadre du projet étaient des Reconyx PC800. En raison des vols survenus en cour de projet, des caméras de marque SpyPoint ont également été utilisées. Ces caméras n'ont pas très bien fonctionné, causant 54% des pertes de données en raison d'arrêts inattendus même si elles ne représentaient que 5% de l'ensemble des caméras. Les caméras Reconyx ont fonctionné 97% du temps. Malgré ces problèmes, en faisant l'acquisition à toutes les heures durant le jour, les caméras ont acquis près de 256 000 photos depuis l'automne 2016 (les photographies de 2016 ont été récupérées en 2017 lors de la première année du projet).

Les séries de données pluriannuelles des sites à l'étude ont permis de dégager des constats sur le processus d'englacement principal et le processus de fonte principal pour chacun des sites. Ces constats sont énumérés dans le tableau qui suit.

Pour les deux nouveaux sites de Kuujjuarapik et Quaqtac instrumentés en 2017 et dédiés à l'étude des vagues, 700 images satellitaires ont été classifiées afin de produire des cartes montrant la présence ou l'absence de glace. Ces cartes ont servi à déterminer la valeur du fetch au moment où les images ont été acquises. L'intérêt était particulièrement porté aux périodes où la glace est présente. Les images sans couvert nuageux en période d'englacement et de fonte ne sont toutefois pas très fréquentes. Ainsi, peu de valeurs réelles de fetch ont pu être calculées (6%), soit en raison du couvert nuageux au-dessus du site de mouillage (61%) ou parce que le site était recouvert de glace (29%). Les valeurs de fetch partielles forment la balance, soit 4% des cas. Les images classifiées pourront également servir à calculer des concentrations de glace en superposant les grilles de modélisation des vagues.

SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE VAGUES A L'AIDE DE CAMERAS ET D'IMAGERIE SATELLITAIRE A PROXIMITE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJUARAPIK, UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DECEPTION, QUAQTAQ ET AUPALUK (2017-2020)

Site	Description	Processus d'englacement principal	Processus de fonte principal
Kuujuarapik	Calme et peu profond, protégé	Sur place, rapide	Dégradation thermique suivi d'un apport fréquent de glaces externes
	<i>Tendance : Les observations faites dans le secteur de l'infrastructure maritime semblent montrer une mise en place de plus en plus hâtive du couvert de glace fixe. Quant à la durée du couvert de glace permanent, elle semble s'allonger, récupérant quelques jours à l'automne et quelques jours au printemps.</i>		
Île Gillis	Peu profond, turbulent	Suite répétée de production/décrochement de glace + apport de glaces externes	Décrochement et vas-et-viens
	<i>Note : Les pressions glacielles lors de la fonte peuvent créer des empilements de plusieurs mètres de haut au nord-est de l'île Gillis</i>		
Umiujaq	Légèrement exposé	Stable: nouvelle glace, nilas, jeune glace	Dégradation thermique suivi d'une mobilisation nord-sud.
	<i>Tendance : La durée du couvert fixe montre une augmentation relativement significative de l'ordre de 30% au cours des 11 dernières années.</i>		
Ivujivik	Fond de baie	Apport de glaces exogènes par les vents du nord	Dégradation thermique accélérée par les floes poussés dans la baie
	<i>Tendance : Selon la tendance des cinq dernières années, la durée de la période entre la première apparition d'eau et l'évacuation (premier jour à l'eau libre) a augmenté de 300%, soit une augmentation de près de 40 jours. La durée du couvert de glace permanent a quant à elle diminuer d'autant de jours.</i>		
Baie Déception	Fjord profond	Sur place, du fond vers l'embouchure	Dégradation thermique et mobilisation
	<i>Tendance : Depuis l'installation des caméras, il est possible de constater une mise en place plus tardive d'une quinzaine de jours du couvert de glace.</i>		
Quaqtaq	Exposé	Apport de glaces exogènes par les vents nord-ouest	Dégradation thermique suivi d'une circulation de glaces
	<i>Note : Lors de la fonte, il est fréquent que des blocs de glace s'échouent dans la zone intertidale et contre les infrastructures maritimes. Ces blocs peuvent dépasser aisément les 5 m d'épaisseur, et même les 10 m. Néanmoins, la faible profondeur devant les infrastructures de même que les hauts fonds devant l'infrastructure la plus récente offrent une bonne protection contre les glaces épaisses arrivant du large.</i>		
Aupaluk	Long estran, fortes marées	Sur place et apport exogène, au gré des marées	Dégradation thermique, mobilisé par les marées
	<i>Notes : Les trois saisons de fonte analysées ont montré une diminution du temps nécessaire à l'évacuation de la glace suite à la première observation d'eau. La dernière observation de glace semble également survenir plus tôt.</i>		

Le potentiel des images RSO a été testé pour estimer les patrons de vagues (hauteur, direction) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année et ce afin de comparer les résultats aux modèles de vagues. La méthode retenue étant innovatrice, des modifications ont été faites afin de rencontrer les besoins du projet et de l'adapter aux données du satellite RADARSAT-2. Les images RS-2 obtenues ont toutes été traitées. Celles acquises à l'automne 2018 ont pu être traitées et comparées avec les données de hauteur et de direction des vagues mesurées par les AWAC mis en place dans le cadre du projet CC016.1. Il appert que des RMSE élevées et des biais importants ont été observés tant pour les hauteurs que pour les directions des vagues. Des ajustements pourraient être faits sur la méthode proposée lorsque les données des AWAC de l'automne 2019 auront été recueillies par l'équipe du projet CC016.1.

Depuis 2009, les caméras ont acquis près de 500 000 photos, ce qui en fait une base d'information de premier plan sur les conditions de glace de rive au Nunavik. Il sera donc profitable de maintenir les efforts et les fonds nécessaires à l'entretien du réseau de caméras afin de poursuivre l'observation de l'environnement dans ces sites dans un contexte de changement climatique. La pérennité du réseau CAIMAN passant possiblement par une prise en charge partielle ou complète par les autorités nordiques, une proposition de recherche a été soumise au Programme d'application des connaissances polaires de Savoir Polaire Canada en 2019. Toutefois, les résultats sont attendus qu'au printemps 2021. Si elle est financée, un programme de formation destiné aux communautés du Nunavik serait mis en place afin que des membres de chacune d'elles soient en mesure de prendre en charge certains équipements scientifiques déployés dans leur communauté, dont les caméras du réseau CAIMAN. Sinon, l'Administration régionale Kativik et l'INRS poursuivront leurs démarches pour financer et réaliser la prise en charge par les Nunavimmiut.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	37
1.1 Mise en contexte et problématique	37
1.2 Objectifs	38
1.3 Méthodologie	41
1.3.1 Réseau de caméras in situ	41
1.3.2 Images satellitaires	54
1.3.3 Potentiel de l'imagerie radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues	59
2. BILAN DES CONDITIONS DE GLACE DE RIVE OBSERVÉES AUX SITES À L'ÉTUDE ENTRE 2017 ET 2020	63
2.1 Description du régime des glaces à Kuujjuarapik.....	65
2.1.1 Site de l'infrastructure maritime	65
2.1.2 Site de l'île Gillis	76
2.2 Description du régime des glaces à Umiujaq	87
2.2.1 Hiver 2019-2020	87
2.2.2 Sommaire	99
2.3 Description du régime des glaces à Ivujivik	103
2.3.1 Hiver 2019-2020	103
2.3.2 Sommaire	113
2.4 Description du régime des glaces à la Baie Déception	116
2.4.1 Hiver 2019-2020	116
2.4.2 Sommaire	127
2.5 Description du régime des glaces à Quaqtaq	129
2.5.1 Hiver 2019-2020	129
2.5.2 Sommaire	139
2.6 Description du régime des glaces à Aupaluk	141
2.6.1 Hiver 2019-2020	142
2.6.2 Sommaire	153

3. CALCUL DU FETCH À PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRES POUR QUAQTAQ ET KUUJJUARAPIK	155
4. VALIDATION DU POTENTIEL DE L'IMAGERIE RADAR POUR DÉTERMINER LES CARACTÉRISTIQUES DU FRONT DE VAGUES.....	157
4.1 Traitements et résultats	157
4.2 Validations.....	162
4.2.1 Hauteur des vagues	162
4.2.2 Direction des vagues	165
4.3 Sommaire	165
5. DIFFUSION DES PHOTOGRAPHIES ET DES INFORMATIONS DÉRIVÉES	168
6. CONCLUSION.....	169
7. RÉFÉRENCES	174
ANNEXE A.....	176
ANNEXE B.....	200

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Positions des instruments installés en 2017 à Kuujjuarapik.....	42
Tableau 2 : Positions des instruments installés en 2017 à Quaqtq	44
Tableau 3 : Description des problèmes rencontrés par le réseau de caméras et nombre de saisons perdues en raison de ces problèmes.	54
Tableau 4 : Résolution spatiale et fréquence d'acquisition pour les satellites utilisés	54
Tableau 5 : Nombre d'images satellitaires classifiées pour les sites de Quaqtq et de Kuujjuarapik	55
Tableau 6 : Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Kuujjuarapik.....	61
Tableau 7 : Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Quaqtq.....	62
Tableau 8 : Critères utilisés afin de décrire l'englacement et le retrait des glaces	64
Tableau 9 : Disponibilité des données des caméras et des images satellitaires pour les sites à l'étude	64
Tableau 10 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2015 et août 2020	73
Tableau 11 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Kuujjuarapik depuis octobre 2015	73
Tableau 12 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik entre octobre 2017 et août 2020.....	85
Tableau 13 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras situées sur l'île Gillis au large de Kuujjuarapik depuis octobre 2017	85
Tableau 14 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Umiujaq entre octobre 2016 et août 2020.....	99
Tableau 15 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Umiujaq depuis octobre 2016.....	99
Tableau 16 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Ivujivik entre octobre 2015 et août 2020	113

Tableau 17 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Ivujivik depuis leur installation en 2015 ..	113
Tableau 18 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de la Baie Déception entre octobre 2015 et août 2020	126
Tableau 19 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à la Baie Déception depuis leur installation en 2015	126
Tableau 20 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de Quaqtac entre octobre 2015 et août 2020 ..	139
Tableau 21 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Quaqtac depuis octobre 2015	139
Tableau 22 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Aupaluk entre octobre 2015 et août 2020	152
Tableau 23 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Aupaluk depuis octobre 2015.....	152
Tableau 24 : Signification des paramètres utilisés pour la comparaison des hauteurs de vagues	162
Tableau 25 : Valeur des RMSE obtenus lors de la comparaison avec les hauteurs de vagues extraites sur les images à Kuujjuarapik.....	163
Tableau 26 : Valeur des RMSE obtenus lors de la comparaison avec les hauteurs de vagues extraites sur les images à Quaqtac.....	163

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Villages nordiques et région possédant des sites à l'étude	39
Figure 2 Régions couvertes par les deux caméras installées sur l'île Gillis dans le secteur de Kuujjuarapik (77°51.196' O; 55°20.319' N)	42
Figure 3 Vues des caméras de l'île Gillis près de Kuujjuarapik. L'emplacement approximatif du mouillage est indiqué sur la photo de gauche	43
Figure 4 Aperçu des équipements installés à l'île Gillis, Kuujjuarapik	43

Figure 5	Régions couvertes par les deux caméras installées sur l'île Hearn dans le secteur de Quaqtq.....	44
Figure 6	Vues des caméras de l'île Hearn (photos prises le 27 sept. 2017). L'emplacement approximatif du mouillage est indiqué sur la photo de gauche.....	44
Figure 7	Aperçu des équipements installés à l'île Hearn, Quaqtq	45
Figure 8	Emplacement des caméras pour le site de Kuujjuarapik de même que l'orientation approximative de chacune des caméras.....	46
Figure 9	Régions couvertes par les caméras de Kuujjuarapik.....	46
Figure 10	Emplacement des caméras pour le site d'Umiujaq de même que l'orientation approximative de chacune des caméras.....	47
Figure 11	Régions couvertes par les caméras d'Umiujaq.....	47
Figure 12	Emplacement des caméras pour le site d'Ivujivik de même que l'orientation approximative de chacune des caméras.....	48
Figure 13	Régions couvertes par les caméras d'Ivujivik.....	48
Figure 14	Emplacement des caméras pour le site de la Baie Déception de même que l'orientation approximative de chacune des caméras	49
Figure 15	Prises de vue la caméra du site #1. La caméra étant mobile, les vues peuvent être modifiées.....	49
Figure 16	Prise de vue des caméras du site #2. La caméra Reconyx offre la vue de droite.....	50
Figure 17	Région couverte par les caméras du site #3. La caméra Reconyx offre la vue en rouge.....	50
Figure 18	Emplacement des caméras pour le site de Quaqtq de même que l'orientation approximative de chacune des caméras.....	51
Figure 19	Prise de vue des caméras de Quaqtq.....	51
Figure 20	Orientation des caméras présentes à Aupaluk.....	52
Figure 21	Régions couvertes par les caméras d'Aupaluk.....	52
Figure 22	Étendue des domaines de modélisation de l'ISMER pour chacun des sites (source du fond de carte : ESRI).....	55

Figure 23 Exemples de particularités (nuages, ombres, fractures) présentes sur une image optique Landsat-8 du 26 mars 2020 au large de Kuujjuarapik et d'Umiujaq	57
Figure 24 Classification de l'eau libre, de la glace et des nuages sur l'image Landsat-8 du 26 mars 2020 au large de Kuujjuarapik et d'Umiujaq	58
Figure 25 Schématisation de la routine de calcul du fetch à partir des images satellitaires classifiées et des données météorologiques	59
Figure 26 Évolution de l'englacement 2019 à Kuujjuarapik (A- 29 novembre 2019, B- 10 décembre 2019, C- 12 décembre 2019)	66
Figure 27 Image satellitaire montrant le détroit de Nastapoka et la baie d'Hudson devant Kuujjuarapik lors de l'englacement 2019 (Landsat-8, 14 décembre 2019)	67
Figure 28 Degrés-jour de gel à Kuujjuarapik du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2010-2020)	68
Figure 29 Degrés-jour de gel à Kuujjuarapik lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2010-2020)	68
Figure 30 Évènements de fonte durant l'hiver 2020 à Kuujjuarapik (A- photo du 23 janvier 2020, B- image Sentinel-2 du 24 février 2020).....	69
Figure 31 Évolution de la fonte 2020 à Kuujjuarapik (A- 12 avril 2020, B- 5 juin 2020, C- 15 juin 2020, D- 27 juin 2020)	71
Figure 32 Degrés-jour de fonte à Kuujjuarapik du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2011 à 2020)	72
Figure 33 Degrés-jour de fonte à Kuujjuarapik du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2011 à 2020)	72
Figure 34 Variation de la date de mise en place du couvert de glace permanent à Kuujjuarapik dans le secteur de l'infrastructure maritime depuis 2015	75
Figure 35 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Kuujjuarapik dans le secteur de l'infrastructure maritime depuis 2015.....	75
Figure 36 Épisodes de vents observés à proximité de l'île Gillis à l'automne 2019 (15 novembre 2019, 8 décembre 2019)	77
Figure 37 Évolution de l'englacement 2019 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- 15 décembre 2019, B- 16 décembre 2019, C- 19 décembre 2020, D- 22 décembre 2019, E- 24 décembre 2019, F- 8 janvier 2020).....	78

Figure 38	Évolution des conditions du couvert de glace durant l'hiver 2020 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- 31 janvier 2020, B- 14 mars 2020, C- 20 avril 2020)	80
Figure 39	Images satellitaires acquises lors de l'hiver 2020 montrant le secteur au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- Landsat-8, 31 janvier 2020; B- Sentinel-2, 15 mars 2020; C- Landsat-8, 20 avril 2020).....	81
Figure 40	Évolution de la fonte 2020 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A-1er mai 2020, B-20 mai 2020, C-28 mai 2020, D-4 juin 2020, E- 12 juin 2020, F-15 juin 2020)	83
Figure 41	Images satellitaire montrant la baie d'Hudson devant Kuujjuarapik lors de la fonte 2020 (A-Landsat-8, 27 avril 2020; B-Sentinel-2, 14 mai 2020; C- Sentinel-2, 1 ^{er} juin 2020;D- Sentinel-2, 28 juin 2020)	84
Figure 42	Évolution de l'englacement 2019 à Umiujaq (A-20 novembre 2019, B-6 décembre 2019, C-14 décembre 2019, D-16 décembre 2019).....	89
Figure 43	Images satellitaires acquises lors de l'englacement 2019 montrant le détroit de Nastapoka devant Umiujaq (A- Sentinel-2, 6 décembre 2019; B- Landsat-8, 14 décembre 2019; C- Sentinel-2, 29 décembre 2019)	89
Figure 44	Degrés-jour de gel à Umiujaq du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2010-2020)	90
Figure 45	Degrés-jour de gel à Umiujaq lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2010-2020)	90
Figure 46	Observations hivernales à Umiujaq en 2020 (A- 24 janvier 2020, B- 27 février 2020)	91
Figure 47	Observations hivernales à Umiujaq montrant la présence d'eau depuis 2010 (A- 25 janvier 2010, B- 13 février 2012, C- 5 janvier 2015, D- 17 février 2017)	92
Figure 48	Images du satellite Sentinel-2 montrant la présence d'eau lors des quatre dernières années (A- 17 février 2017; B- 19 février 2018; C- 30 janvier 2019, D- 27 février 2020)	93
Figure 49	Évolution de la fonte 2020 à Umiujaq (A- 16 mai 2020, B- 25 mai 2020, C- 26 mai 2020, D- 1 ^{er} juin 2020, E- 6 juin 2020)	96
Figure 50	Images satellitaire montrant le détroit de Nastapoka devant Umiujaq lors de la fonte 2020 (A- Landsat-8, 13 mai 2020; B- Sentinel-2, 1 ^{er} juin 2020; C- Sentinel-2, 21 juin 2020).....	97

Figure 51 Degrés-jour de fonte à Umiujaq du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2011 à 2020)	98
Figure 52 Degrés-jour de fonte à Umiujaq du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2011 à 2020)	98
Figure 53 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Umiujaq depuis 2009	102
Figure 54 Variation de la durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière à Umiujaq depuis 2013.	102
Figure 55 Évolution de l'englacement 2019 à Ivujivik (A-3 décembre 2019, B-10 décembre 2019, C-11 décembre 2019, D-15 décembre 2019)	105
Figure 56 Degrés-jour de gel à Ivujivik du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2010-2020)	106
Figure 57 Degrés-jour de gel à Ivujivik lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2010-2020)	106
Figure 58 Observations hivernales à Ivujivik en 2020 (A- 30 janvier 2020, B- 10 février 2020, image Sentinel-2; C- 15 février 2020, image Sentinel-2; D- 23 février 2020, image Sentinel-2; E- 15 mars 2020, image Landsat-8)	108
Figure 59 Évolution de la fonte 2020 à Ivujivik (A- 29 avril 2020, B- 6 mai 2020, C- 15 mai 2020, D- 3 juin 2020, E- 24 juin 2020)	111
Figure 60 Images satellitaires montrant la baie d'Ivujivik et la passe Digges lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 30 avril 2020; B- Sentinel-2, 15 mai 2020; C- Landsat-8, 3 juin 2020; D- Sentinel-2, 24 juin 2020)	111
Figure 61 Degrés-jour de fonte à Ivujivik du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2011 à 2020)	112
Figure 62 Degrés-jour de fonte à Ivujivik du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2011 à 2020)	112
Figure 63 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Ivujivik depuis 2015	115
Figure 64 Variation de la durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière à Ivujivik depuis 2016 ...	115
Figure 65 Évolution de l'englacement 2019 à la Baie Déception (A-14 novembre 2019, B-24 novembre 2019, C-11 décembre 2019, D-12 décembre 2019)	118

Figure 66	Image satellitaire acquises lors de l'englacement 2019 montrant des signes de nouvelles glaces dans la Baie Déception (Landsat-8, 19 novembre 2019)	119
Figure 67	Degrés-jour de gel à Salluit et à la Baie Déception du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2014-2020).....	120
Figure 68	Degrés-jour de gel à Salluit et à la Baie Déception lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2014-2020)	120
Figure 69	Observations hivernales à la Baie Déception en 2020 (A- 25 janvier 2020, Sentinel-2; B- 22 février 2020, image Sentinel-2; C- 20 mars 2020, image Sentinel-2; D- 20 avril 2020, image Sentinel-2;E- 20 mai 2020, image Landsat-8)	121
Figure 70	Évolution de la fonte 2020 à la Baie Déception (A- 14 juin 2020, B- 20 juin 2020, C- 25 juin 2020, D- 3 juillet 2020, E- 9 juillet 2020)	123
Figure 71	Images satellitaires montrant la Baie Déception lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 16 juin 2020; B- Sentinel-2, 18 juin 2020; C- Landsat-8, 21 juin 2020; D- Sentinel-2, 24 juin 2020; E- Sentinel-2, 28 juin 2020; F- Sentinel-2, 14 juillet 2020)	124
Figure 72	Degrés-jour de fonte à Salluit et à la Baie Déception du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2015 à 2020)	125
Figure 73	Degrés-jour de fonte à Salluit et à la Baie Déception du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2015 à 2020).....	125
Figure 74	Variation de la date de mise en place du couvert de glace permanent à la Baie Déception.....	128
Figure 75	Variation de la durée du couvert de glace permanent à la Baie Déception depuis 2015	128
Figure 76	Évolution de l'englacement 2019 à Quaqtq (A-12 novembre 2019, B-8 décembre 2019, C-14 décembre 2019, D-16 décembre 2019, E-30 décembre 2019)	131
Figure 77	Degrés-jour de gel à Quaqtq du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2010-2020)	132
Figure 78	Degrés-jour de gel à Quaqtq lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2010-2020).....	132
Figure 79	Observations hivernales à Quaqtq en 2020 (A- 30 mars 2020, B- 18 avril 2020).....	133

Figure 80	Images satellitaires acquises lors de l'hiver 2020 montrant une partie de la baie Diana au large de Quaqtac (A- Landsat-8, 30 mars 2020; B- Sentinel-2, 18 avril 2020).....	133
Figure 81	Évolution de la fonte 2020 à Quaqtac (A- 29 avril 2020, B- 5 mai 2020, C- 31 mai 2020, D- 13 juin 2020, E- 28 juin 2020, F-4 juillet 2020)	136
Figure 82	Images satellitaires montrant la baie Diana devant Quaqtac lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 6 mai 2020; B- Sentinel-2, 20 juin 2020; C- Landsat-8, 25 juin 2020, D- Landsat-8, 4 juillet 2020).....	137
Figure 83	Degrés-jour de fonte à Quaqtac du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2011 à 2020)	138
Figure 84	Degrés-jour de fonte à Quaqtac du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2011 à 2020)	138
Figure 85	Épaisseur des blocs de glace échoués près des infrastructures maritimes à Quaqtac (28 juin 2017).....	141
Figure 86	Évolution de l'englacement 2019 à Aupaluk (A-3 novembre 2019, B-12 novembre 2019, C-22 novembre 2019, D-30 novembre 2019, E-2 décembre 2019)	144
Figure 87	Images satellitaires montrant la baie devant Aupaluk lors de l'englacement 2019 (A- Sentinel-2, 17 novembre 2019; B- Sentinel-2, 30 novembre 2019; C- Sentinel-2, 2 décembre 2019).....	145
Figure 88	Degrés-jour de gel à Aupaluk du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} janvier (2010-2020)	146
Figure 89	Degrés-jour de gel à Aupaluk lors des saisons hivernales du 1 ^{er} octobre au 1 ^{er} juin (2010-2020)	146
Figure 90	Images satellitaires et photos montrant la baie devant Aupaluk lors de l'hiver 2020 (A- Sentinel-2, 13 février 2020; B- Sentinel-2, 11 mars 2020; C- 11 mars 2020; D- Sentinel-2, 13 avril 2020).....	147
Figure 91	Évolution de la fonte 2020 à Aupaluk (A- 26 mai 2020, B- 11 juin 2020, C- 18 juin 2020, D- 21 juin 2020)	149
Figure 92	Images satellitaires montrant la baie devant Aupaluk lors de la fonte 2020 (A- Landsat-8, 26 mai 2020; B- Sentinel-2, 26 mai 2020; C- Landsat-8, 11 juin 2020, D- Landsat-8, 18 juin 2020)	150
Figure 93	Degrés-jour de fonte à Aupaluk du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} juillet (2011 à 2020)	151

Figure 94	Degrés-jour de fonte à Aupaluk du 1 ^{er} mai au 1 ^{er} septembre (2011 à 2020)	151
Figure 95	Variation de la durée entre la première apparition d'eau et le premier jour en eau libre.....	154
Figure 96	Variation de la date des dernières observation de glace à Aupaluk	154
Figure 97	Exemple de valeur réelle de fetch déterminée à partir des images satellitaires (image Sentinel-2, 16 décembre 2018)	156
Figure 98	Exemple de valeur partielle de fetch déterminée à partir des images satellitaires (image Sentinel-2, 12 octobre 2018)	156
Figure 99	Pente en distance extraite de la scène RADARSAT-2 acquise le 6 octobre 2018 à 22h48 UTC montrant la baie d'Hudson au large de Kuujjuarapik.	158
Figure 100	Pente en azimuth extraite de la scène RADARSAT-2 acquise le 6 octobre 2018 à 22h48 UTC montrant la baie d'Hudson au large de Kuujjuarapik.	159
Figure 101	Pente et directions des vagues sur l'image RADARSAT-2 du 2018-10-04 (Quaqtaq). L'arc en noire en haut à gauche indique la forme des vagues après avoir été diffracté sur son déplacement depuis l'Est vers l'ouest.....	160
Figure 102	Hauteur des vagues extraites de l'image RADARSAT-2 du 4 octobre 2018 au large de Quaqtaq	161
Figure 103	Longueurs d'ondes des vagues extraites sur l'image du 4 octobre 2018 au large de Quaqtaq.	161
Figure 104	Validation des hauteurs de vagues pour le site à Kuujjuarapik pour l'automne de l'année 2018.	164
Figure 105	Validation des hauteurs de vagues pour le site à Quaqtaq pour l'automne de l'année 2018.	164
Figure 106	Validation des directions de vagues pour les sites de Kuujjuarapik (A) et Quaqtaq (B) pour l'automne de l'année 2018.	166
Figure 107	Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik de 2015 à 2020. ..	177
Figure 108	Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois de janvier, février et mars.....	178

Figure 109	Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois d'avril, mai et juin.	179
Figure 110	Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois de juillet, août et septembre.....	180
Figure 111	Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois d'octobre, novembre et décembre.	181
Figure 112	Origine et vitesse des vents à Umiujaq de 2015 à 2020.....	182
Figure 113	Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois de janvier, février et mars.....	183
Figure 114	Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois d'avril, mai et juin.....	184
Figure 115	Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois de juillet, août et septembre.....	185
Figure 116	Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois d'octobre, novembre et décembre.	186
Figure 117	Origine et vitesse des vents à Ivujivik de 2015 à 2020.	187
Figure 118	Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois de janvier, février et mars.....	188
Figure 119	Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois d'avril, mai et juin.....	189
Figure 120	Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois de juillet, août et septembre.....	190
Figure 121	Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois d'octobre, novembre et décembre.	191
Figure 122	Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2019.....	192
Figure 123	Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2020.....	193
Figure 124	Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2020 par saisons.	194
Figure 125	Origine et vitesse des vents à la Baie Déception lors des mois d'octobre, novembre et décembre.	194
Figure 126	Origine et vitesse des vents à Quaqtac de 2015 à 2020.	195

SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE VAGUES A L'AIDE DE CAMERAS ET D'IMAGERIE
SATELLITAIRE A PROXIMITE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJJUARAPIK, UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DECEPTION, QUAQTAQ ET
AUPALUK (2017-2020)

Figure 127	Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois de janvier, février et mars.....	196
Figure 128	Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois d'avril, mai et juin.....	197
Figure 129	Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois de juillet, août et septembre.....	198
Figure 130	Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois d'octobre, novembre et décembre.....	199

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler (Profileur de courant à onde acoustique par effet Doppler)
ASC	Agence Spatiale Canadienne
AWAC	Acoustic Wave and Currents
CAIMAN	CAMéras aux Infrastructures MAritimes du Nunavik
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ISMER	Institut des sciences de la mer
L8	Landsat-8
MTQ	Ministère des Transports du Québec
RS2	RADARSAT-2
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
S2	Sentinel-2
SAR	Synthetic Aperture Radar (radar à ouverture synthétique)
UQAR	Université du Québec à Rimouski

GLOSSAIRE

Tiré de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes/glossaire.html>

Concentration des glaces	
Banquise consolidée	Glace flottante dont la concentration est de 10/10 et où les floes ont été soudés par le gel.
Banquise compacte	Glace flottante dont la concentration est de 10/10 et où il n'y a pas d'eau visible.
Banquise très serrée	Banquise dont la concentration est de 9/10 à moins de 10/10.
Banquise serrée	Banquise dont la concentration est de 7/10 à 8/10 et qui est composée de floes dont la plupart sont en contact.
Banquise lâche	Banquise dont la concentration est de 4/10 à 6/10 avec de nombreux chenaux et polynies; les floes ne sont généralement pas en contact les uns avec les autres.
Banquise très lâche	Banquise dont la concentration est de 1/10 à 3/10 et où il y a plus d'eau que de glace.
Eau libre	Grande étendue d'eau librement navigable dans laquelle la glace de mer est présente à des concentrations inférieures à 1/10. Aucune glace d'origine terrestre n'est présente.
Eau bergée	Zone d'eau librement navigable dans laquelle il y a des glaces d'origine terrestre. Il peut y avoir d'autres types de glaces, mais leur concentration totale est inférieure à 1/10.
Eau libre de glace	Aucune glace n'est présente; s'il y a de la glace de quelque type que ce soit, ce terme ne doit pas être employé.
Types de glace de mer	
Stades de formation de la glace de mer	Nouvelle glace Nilas Jeune glace Glace de première année Vieille glace
Nouvelle glace	Terme général s'appliquant à toute glace formée récemment. Ce terme recouvre ceux de frasil, sorbet, gadoue et shuga, lesquels correspondent à différents aspects de la glace formée par des cristaux encore faiblement soudés entre eux par le gel (ou pas du tout, le cas échéant) et n'ayant un aspect défini que lorsqu'ils flottent en surface.
Sorbet	Stade de la congélation postérieur au frasil ; les cristaux commencent à s'agglutiner pour former en surface une couche épaisse comme de la soupe. À ce stade, la mer réfléchit peu la lumière et prend une apparence mate.
Gadoue	Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou la glace ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.
Shuga	Accumulation de morceaux de glace blanche et spongieuse ayant quelques centimètres de diamètre; ils se forment à partir de sorbet ou de gadoue et, quelquefois, de glace de fond remontant à la surface.

SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE VAGUES A L'AIDE DE CAMERAS ET D'IMAGERIE SATELLITAIRE A PROXIMITE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJUARAPIK, UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DECEPTION, QUAQTAQ ET AUPALUK (2017-2020)

Nilas	Couche de glace mince et élastique, ondulant facilement sous les vagues et la houle et formant, sous la pression, des avancées en forme de « doigts » entrecroisés. Cette couche a une surface mate et peut atteindre 10 cm d'épaisseur. On distingue le nilas sombre et le nilas clair.
Nilas clair	Nilas ayant plus de 5 cm d'épaisseur et plus claire que le nilas sombre.
Nilas sombre	Nilas ayant moins de 5 cm d'épaisseur et une couleur très sombre.
Jeune glace	Glace au stade de transition entre le nilas et la glace de première année, d'une épaisseur de 10 à 30 cm. Elle peut être divisée en glace grise et en glace blanchâtre.
Forme de glace	
Glace en crêpes	Morceaux de glace plutôt circulaires, ayant de 30 cm à 3 m de diamètre et jusqu'à 10 cm d'épaisseur, avec des bords relevés du fait du frottement des morceaux les uns contre les autres. Ils peuvent se former par houle faible à partir de sorbet, de gadoue ou de shuga ou du fait de la fragmentation de glace vitrée ou de nilas, ou encore à partir de glace grise s'il y a une forte houle ou de grosses vagues. La glace en crêpes se forme aussi parfois en profondeur, à l'interface entre deux masses d'eau ayant des caractéristiques physiques différentes, d'où elle remonte en surface. Elle peut rapidement couvrir de grandes étendues d'eau.
Glaçon	Tout fragment de glace relativement plat mesurant moins de 20 m d'extension.
Petit glaçon	Glaçon de moins de 2 m d'extension horizontale.
Floe	Tout fragment de glace relativement plat mesurant 20 m d'extension ou plus.
Sarrasins (Brash)	Accumulation de glaces flottantes composées de fragments qui n'ont pas plus de 2 m d'extension et qui proviennent de la destruction d'autres formes de glace.
Autres termes relatif aux glaces	
Banquise/pack	Terme utilisé au sens large pour désigner toute zone de glace autre que la banquise côtière, quelle que soit sa forme ou sa disposition. Lorsque les concentrations sont élevées, par exemple 7/10 ou plus, on utilise normalement le terme « pack »; sinon, on parle de « banquise ».
Crête (Glacé)	Ligne ou mur de glace brisée qui est soulevée par la pression. Peut être récente ou érodée. Le volume correspondant de glace brisée poussée vers le bas par la pression au-dessous d'une crête est appelé « quille de glace ».
Glace pourrie	Glace criblée de trous de fonte et à un stade avancé de désintégration.
Hummock	Monticule de glace brisée qui a été soulevée par la pression. Il peut être récent ou érodé. Le volume de glace brisée qui s'est enfoncé sous l'effet de la pression et se trouve submergé sous le hummock est appelé « bummock ».
Polynie	Toute ouverture de forme non linéaire entourée de glace. Les polynies peuvent contenir des sarrasins ou être couvertes de nouvelle glace, de nilas ou de jeune glace; les sous-mariniers les appellent des claires-voies.
Divers	

SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE VAGUES A L'AIDE DE CAMERAS ET D'IMAGERIE SATELLITAIRE A PROXIMITE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJJUARAPIK, UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DECEPTION, QUAQTAQ ET AUPALUK (2017-2020)

Degré-jours de gel	Les degrés-jours de gel (DJG) commencent à s'accumuler lorsque la température moyenne quotidienne descend sous 0 °C : si un jour la température moyenne est -21 °C, par exemple, il élève la valeur DJG annuelle de 21. Les jours où la température moyenne est de 0 °C ou plus, ils ne contribuent pas à la somme annuelle. Dans le cadre de ce rapport, les DJG sont comptabilisés à partir du 1 ^{er} octobre de chaque année.
Degré-jours de fonte	Dérivé du concept de DJG, les DJF s'accumulent lorsque la température moyenne quotidienne dépasse 0°C. Dans le cadre de ce rapport, les DJF sont comptabilisés à partir du 1 ^{er} mai de chaque année.

Pour d'autres définitions sur les types de glace, se référer au site web susmentionné.

TABLEAU DE L'ÉCHELLE BEAUFORT

Force	Vitesse du vent (Km/h)	Appellation	Effets observés sur mer	Effets observés sur terre
0	< 1	Calme	La surface de la mer est unie comme un miroir, mais pas forcément plane.	La fumée s'élève verticalement.
1	1 à 5	Très légères brises	Il se forme des rides ressemblant a des écailles de poisson, mais sans écume.	La fumée, mais non la girouette, indique la direction du vent.
2	6 à 11	Légère brise	Vaguelettes courtes mais plus accusées. Leur crête a une apparence vitreuse mais elles ne déferlent pas. Par bonne visibilité, la ligne d'horizon est toujours très nette.	On sent le vent sur le visage; les feuilles frémissent et les girouettes bougent.
3	12 à 19	Petite brise	Très petites vagues. Les crêtes commencent à déferler. écume d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars.	Feuilles et brindilles bougent sans arrêt. Les petits drapeaux se déploient.
4	20 à 28	Jolie brise	Petites vagues devenant plus longues. Moutons franchement nombreux.	Poussières et bouts de papier s'envolent. Les petites branches sont agitées.
5	29 à 38	Bonne brise	Vagues modérées prenant une forme plus nettement allongée. Formation de nombreux moutons. Parfois quelques embruns.	Les petits arbres feuillus se balancent. De petites vagues avec crête se forment sur les eaux intérieures.
6	39 à 49	Vent frais	De grosses vagues, ou lames, commencent à se former. Les crêtes d'écume blanche sont parfois plus étendues. Habituellement, quelques embruns.	Les grosses branches sont agitées. On entend le vent siffler dans les fils téléphoniques et l'usage du parapluie devient difficile.
7	50 à 61	Grand frais	La mer grossit. L'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent.	Des arbres tout entiers s'agitent. La marche contre le vent devient difficile.
8	62 à 74	Coup de vent	Lames de hauteur moyenne et plus allongées. De la crête	De petites branches se cassent. La marche

SUIVI DES CONDITIONS DES GLACES DE RIVE ET DE VAGUES A L'AIDE DE CAMERAS ET D'IMAGERIE SATELLITAIRE A PROXIMITE D'INFRASTRUCTURES MARITIMES AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : KUUJJUARAPIK, UMIUJAQ, IVUJIVIK, BAIE DECEPTION, QUAQTAQ ET AUPALUK (2017-2020)

			commencent à se détacher des tourbillons d'embruns. Nettes traînées d'écume orientées dans le lit du vent.	contre le vent devient presque impossible.
9	75 à 88	Fort coup de vent	Grosses lames, épaisses traînées d'écume dans le lit du vent. La crête des lames commence à vaciller, s'écrouler et déferler en rouleaux. Les embruns peuvent réduire la visibilité.	Peut endommager légèrement les bâtiments (bardeaux de toitures).
10	89 à 102	Tempête	Très grosses lames à longues crêtes en panache, épaisses traînées d'écume. La surface des eaux semble blanche. Le déferlement en rouleaux devient intense et brutal. Visibilité réduite.	Déracine les arbres et endommage sérieusement les bâtiments.
11	103 à 117	Violente tempête	Lames exceptionnellement hautes. Mer complètement recouverte de bancs d'écume. Visibilité réduite.	Dégâts considérables.
12	118 à 133	Vent d'ouragan	L'air est plein d'écume et d'embruns. La mer est entièrement blanche, du fait des bancs d'écume dérivants. Visibilité très fortement réduite.	Rare. Possibilité de grands étendus de dommages à la végétation et de dommages structuraux importants.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Dans le cadre d'une initiative de recherche du ministère des Transports du Québec (MTQ) visant à étudier la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik et les changements climatiques débutée en 2009, l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) Centre Eau Terre Environnement a obtenu un financement d'Affaires autochtones et du Nord Canada de 2009 à 2012 pour procéder à l'installation et à la maintenance de systèmes de caméras dans les villages de Kuujuaq, Quaqaq et Umiujaq (Clerc et al., 2012). Ces caméras ont permis de documenter le comportement de la glace près des infrastructures maritimes de ces trois villages. Deux modèles de caméra ont été installés dans chacun des villages, soit un modèle « caméra de chasse » (Reconyx) et un modèle composé d'un appareil photo traditionnel fixé dans un boîtier étanche (Harbortronics).

En 2015, l'INRS a reçu le mandat du ministère des Transports du Québec d'étendre le réseau de caméras aux villages de Kuujuaapik, Ivujivik, Aupaluk et à la Baie Déception, de même que de procéder à l'entretien et la mise à niveau des systèmes d'Umiujaq et de Quaqaq (Projet CC09.1) afin de poursuivre le projet entamé en 2009 (Bernier et al., 2017). Les caméras de marque Reconyx ayant bien performées dans le cadre du premier projet, il a été convenu de n'utiliser que le modèle Reconyx (PC800) pour la suite. Dans les villages où des caméras étaient déjà en place, la mise à niveau a consisté à remplacer les caméras Harbortronics ou Reconyx PC85 par des Reconyx PC800. Ce réseau de caméra mis à jour s'est vu attribuer l'appellation Réseau CAIMAN pour CAMéras aux Infrastructures MARitime du Nunavik.

En 2017, afin de poursuivre les travaux d'entretien, d'acquisition et de traitement de données sur les conditions de glace au Nunavik entamés dans le cadre du projet CC09.1, le MTQ a mandaté à nouveau l'INRS pour réaliser le projet de recherche CC09.2 intitulé « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques: Kuujuaapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk (2017-2020) ». Afin d'améliorer la couverture de suivi des glaces, deux sites additionnels ont été instrumentés dans les villages nordiques de Kuujuaapik et de Quaqaq. Ces deux nouveaux sites localisés sur les îles Gillis et Hearn correspondent à l'emplacement des instruments déployés en mer pour le suivi des conditions de vagues (marégraphe, profileur de courant, ...) dans le cadre du projet de recherche CC16.1 intitulé « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques ». Ce projet est aussi mandaté par le MTQ, mais réalisé par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER).

Le projet CC09.2 permet donc de poursuivre la documentation historique des processus d'englacement et de fonte initiée depuis 2009, permettant ainsi d'avoir des données sur une plus longue série temporelle pour certains sites d'observation. Le maintien et l'entretien des systèmes de caméra mis en place dans les années précédentes permettent de maximiser davantage les investissements et les retombées de connaissances pour le Ministère, mais également pour les organismes partenaires du milieu local et régional.

Les observations effectuées permettront également de poursuivre le développement de la connaissance sur les caractéristiques et l'évolution des conditions de glaces de rive au Nunavik, qui sont essentielles pour évaluer les risques pour les ouvrages côtiers, pour la navigation et pour la circulation de la population sur le couvert de glace lors de la pratique des activités de subsistance dans un contexte de changements climatiques.

Les observations sur les glaces seront aussi utilisées dans le cadre du projet de recherche CC16.1, afin de calibrer et valider le modèle de vagues en milieu côtier. Aussi, une fois les projets de recherche CC09.2 et CC16.1 complétés, à partir des données recueillies, il sera possible d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques, ce qui devra faire l'objet d'un autre projet.

De plus, les observations sur les glaces pourront servir dans le cadre d'un exercice visant à édicter des normes guidant la construction ou l'entretien des infrastructures maritimes au Nunavik. Le projet de recherche aura des bénéfices pour tous les partenaires autant publics que privés impliqués dans la conception et/ou l'entretien d'infrastructures maritimes au Nunavik (Administration régionale Kativik, MTQ, compagnies privées, etc.).

1.2 Objectifs

Le projet poursuit trois objectifs principaux. Tout d'abord, il s'agit de poursuivre la documentation historique des conditions de glace de rive au voisinage des six infrastructures maritimes du Nunavik suivantes pour la période 2017-2020 : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (Figure 1). Cette documentation proviendra principalement de deux types de données : des photographies acquises par des caméras installées à proximité des sites d'étude et des images satellites acquises dans le spectre du visible. Le second objectif s'inscrit en continuité du premier et consiste à acquérir des données sur les conditions de glace pour de nouveaux sites à Kuujjuarapik et Quaqtac afin d'alimenter un modèle numérique de vagues. De nouvelles caméras ont été installées à cette fin. La documentation de ces nouveaux sites se fera de la même façon que les sites à proximité des infrastructures maritimes. Le troisième objectif principal est de valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues.

Des objectifs plus spécifiques ont été déterminés afin de d'orienter les travaux à faire pour atteindre les objectifs généraux. Ces objectifs spécifiques sont :

1. Maintenir en bon état de fonctionnement les systèmes de suivi des glaces par caméras au voisinage des infrastructures maritimes de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk;
2. À partir des photos et des images satellitaires, établir les dates d'englacement et de fonte ainsi que les concentrations de glace pour ces six sites pour la période 2017-2020;
3. À partir des photos et des images satellitaires, produire les cartes de glace et déterminer le fetch et les concentrations de glace pour les deux nouveaux sites de Kuujjuarapik et Quaqtaq (dédiés à l'étude des vagues) pour la période 2017-2020;
4. À l'aide de l'imagerie satellite radar, estimer les patrons de vague (hauteur, direction, période) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année en 2017-2018 et 2018-2019, à des fins de validation des modèles de vague.



Figure 1 Villages nordiques et région possédant des sites à l'étude

1.3 Méthodologie

Dans le cadre de ce projet de recherche, les données sur les observations des conditions de glace à proximité des sites à l'étude sont de deux types : photographies provenant d'un réseau de caméras *in situ* et des images satellites (Landsat-8 et Sentinel-2).

1.3.1 Réseau de caméras *in situ*

L'utilisation du réseau de caméras pour l'observation des conditions de glace impliquait l'installation de nouvelles caméras à Kuujjuarapik et Quaqtq (section 1.3.1.1) ainsi que l'entretien des caméras existantes à Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception et Aupaluk de même que celles déjà en place près des infrastructures maritimes de Kuujjuarapik et Quaqtq (section 1.3.1.2).

1.3.1.1 Mise en place des caméras à Kuujjuarapik et Quaqtq

La première étape du projet a consisté en la mise en place, à l'été 2017, de systèmes de caméras autonomes aux deux nouveaux sites à l'étude, soit Kuujjuarapik et Quaqtq, et ce, afin d'être en mesure de documenter les conditions de glace pour l'hiver 2017-2018 et les suivants.

Les caméras choisies sont de marque Reconyx, modèle PC800, soit le même modèle que les caméras en place aux six autres sites depuis 2017. Leur rapport coût/résolution-fiabilité est excellent. Deux caméras par site ont été installées pour offrir une sécurité en cas de panne et augmenter le champ de visée. Les caméras sont alimentées par une batterie 12V qui est maintenue chargée par un panneau solaire (Figures 4 et 7).

Pour chaque site, l'endroit exact où les caméras ont été installées a été déterminé en tenant compte des objectifs recherchés par le projet et des commentaires de personnes locales. Par la suite, les demandes d'autorisations pour permettre l'occupation de ces sites ont été effectuées auprès des autorités compétentes du Nunavik et d'Eeyou Istchee. Les deux nouveaux sites instrumentés (Quaqtq et Kuujjuarapik) étant situés sur des îles présentes dans l'Accord sur les revendications territoriales des Inuit du Nunavik (ARTIN) signé en 2006, l'autorisation de la Commission de la région marine du Nunavik chargée de l'examen des répercussions (CRMNER) a été nécessaire afin d'accéder aux îles et d'y installer du matériel.

Les détails techniques concernant l'installation des caméras et les copies des autorisations obtenues sont disponibles dans le rapport technique 1 du présent projet (Poulin et al., 2017).

1.3.1.1.1 Site de Kuujjuarapik (île Gillis)

L'île Gillis est un îlot rocheux présentant très peu de relief. La possibilité d'installer les caméras avec une vue plongeante était donc impossible. Le choix final du site fut déterminé en fonction de l'élévation du terrain et de la distance de l'installation par rapport à la berge. Le point le plus haut était situé à environ 200m de la berge dans la direction du mouillage alors que le site sélectionné est situé à environ 100m. La différence d'élévation entre les deux sites est d'environ 3m (5,5 m vs 2,5 m). La position des deux instruments est présentée au Tableau 1 et à la Figure 2. Les coordonnées du mouillage proviennent du projet CC16.1. La Figure 2 montre également les régions couvertes par chaque caméra. Le mouillage est situé approximativement au centre du champ de vision de la caméra orientée le plus vers le nord (caméra 1). L'autre caméra (2) vise plus à l'est et présente un chevauchement avec la première caméra (Figure 3).

Tableau 1 : Positions des instruments installés en 2017 à Kuujjuarapik

Instruments	Longitude	Latitude
AWAC	77°50.616' O	55°21.157' N
Caméras	77°51.196' O	55°20.319' N

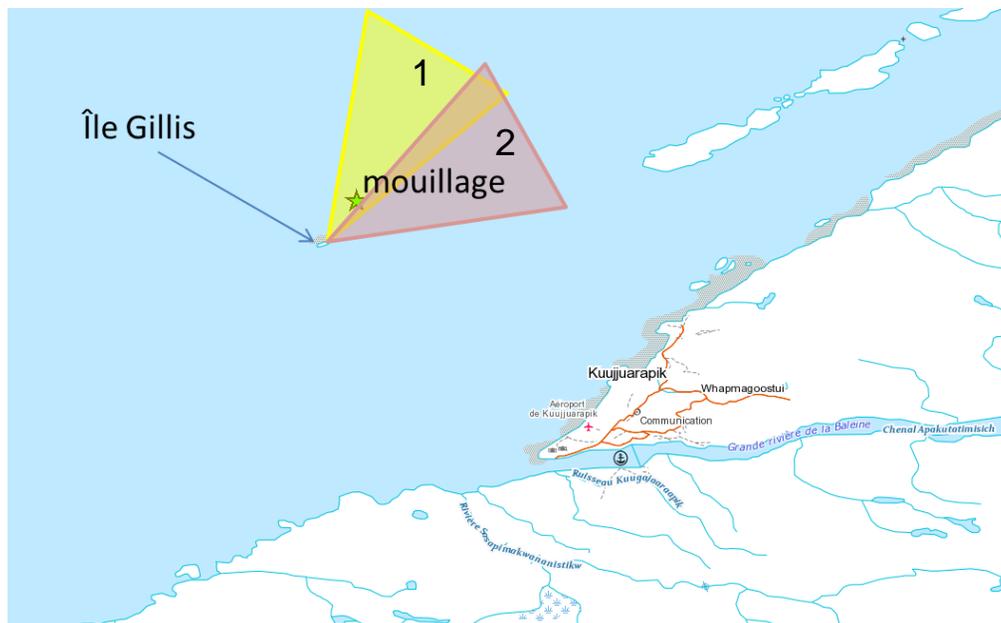


Figure 2 Régions couvertes par les deux caméras installées sur l'île Gillis dans le secteur de Kuujjuarapik (77°51.196' O; 55°20.319' N)

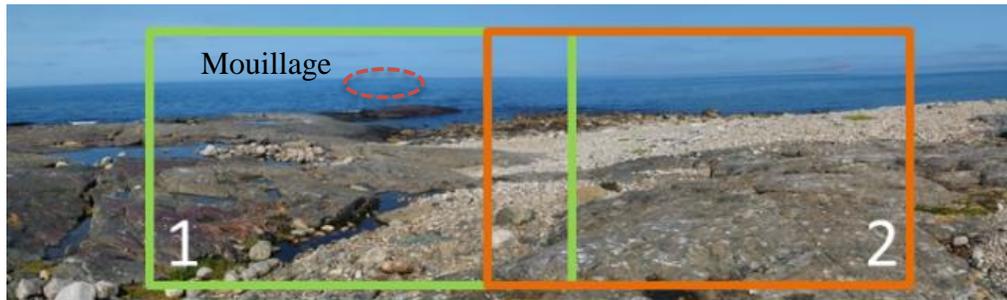


Figure 3 Vues des caméras de l'île Gillis près de Kuujjuarapik. L'emplacement approximatif du mouillage est indiqué sur la photo de gauche



Figure 4 Aperçu des équipements installés à l'île Gillis, Kuujjuarapik

1.3.1.1.2 *Quaqtaq (île Hearn)*

Contrairement au site de l'île Gillis caractérisé par l'absence de relief, l'île Hearn présente un relief accentué typique des côtes du détroit d'Hudson. Le choix du site s'est fait en considérant une vue plongeante d'une part et ne pas être inutilement haut d'autre part. Ce second point tient pour deux choses. Premièrement, plus les caméras sont hautes, plus elles ont de chances de se retrouver dans la brume si le plafond est bas. Deuxièmement, l'accessibilité d'un site en hauteur est réduite ce qui rend plus difficile d'y transporter tout le matériel. La position du site sélectionné est présentée au Tableau 2. Le site est situé à 33m d'altitude et à une distance horizontale d'environ 100m du rivage.

Une photographie du système une fois l'installation terminée est présentée à la Figure 7.

Tableau 2 : Positions des instruments installés en 2017 à Quaqtq

Instruments	Longitude	Latitude
AWAC	69°41.405' O	61°3.449' N
Caméras	69°41.195' O	61°4.012' N

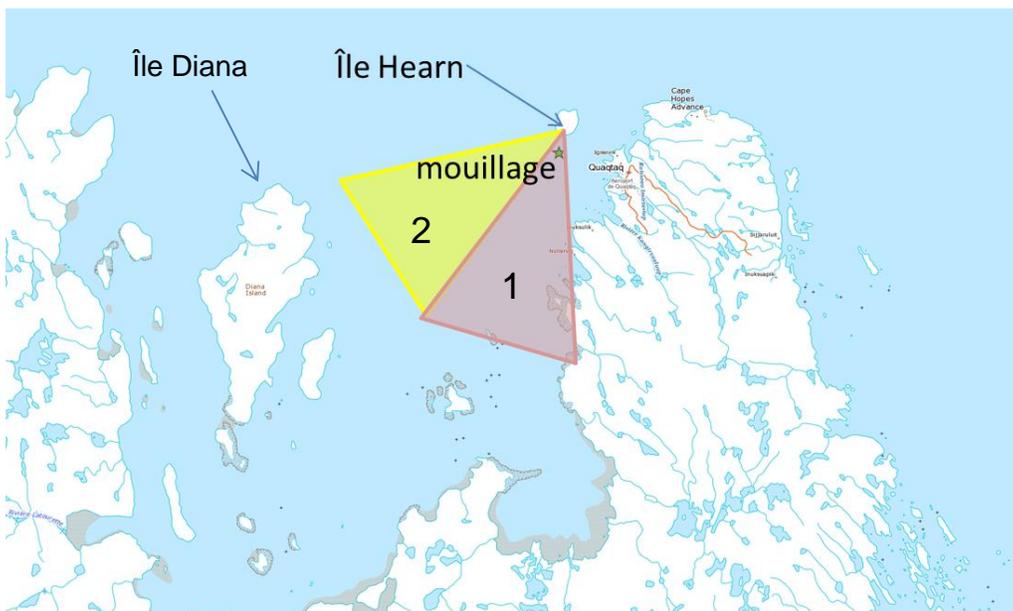


Figure 5 Régions couvertes par les deux caméras installées sur l'île Hearn dans le secteur de Quaqtq

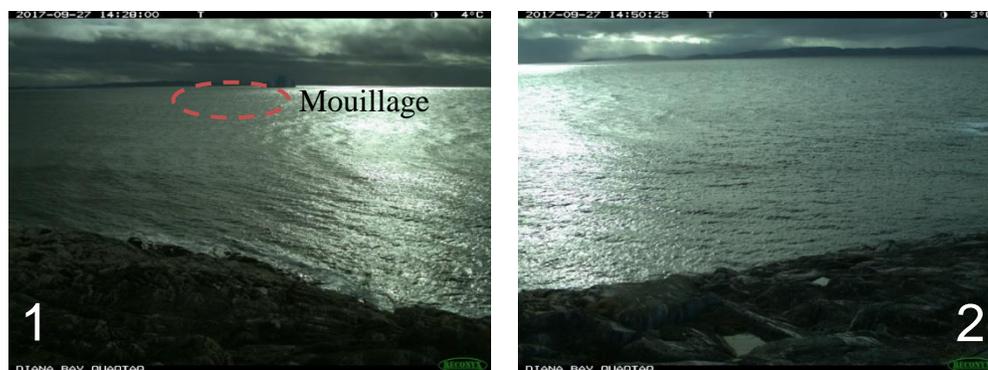


Figure 6 Vues des caméras de l'île Hearn (photos prises le 27 sept. 2017). L'emplacement approximatif du mouillage est indiqué sur la photo de gauche.



Figure 7 Aperçu des équipements installés à l'île Hearn, Quaqaq

1.3.1.2 Description des sites déjà instrumentés

À l'été 2017, les villages déjà instrumentés d'Aupaluk, Baie Déception, Ivujivik et Umiujaq ont également été visités, de même que les sites existants à Kuujjuarapik et Quaqaq (Poulin et al., 2017). Cette visite avait pour but de réaliser l'entretien, la réparation des équipements et la collecte des photos enregistrées depuis la dernière visite (réalisée en 2016) et de s'assurer que les équipements étaient fonctionnels avant la saison d'englacement. Les sections qui suivent montrent l'emplacement de ces sites et la vue offerte par les caméras.

1.3.1.2.1 Site de Kuujjuarapik

Le système de caméras de Kuujjuarapik couvre le secteur de l'infrastructure maritime situé à 13 km au nord du village. Plus précisément, les caméras sont à environ 500 m au sud de l'infrastructure (Figure 8). La caméra de droite (2) couvre l'infrastructure maritime (Figure 9).

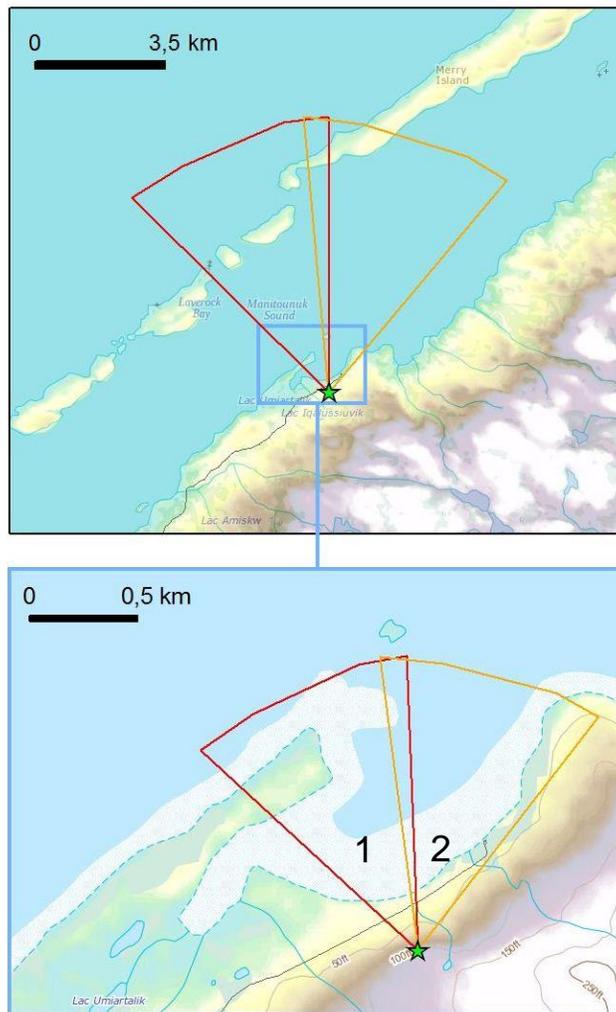


Figure 8 Emplacement des caméras pour le site de Kuujjuarapik de même que l'orientation approximative de chacune des caméras



Figure 9 Régions couvertes par les caméras de Kuujjuarapik

1.3.1.2.2 Site d'Umiujaq

À Umiujaq, les caméras sont fixées sur un poteau d'Hydro-Québec situé sur la Hudson road, environ 250 m à l'est de l'infrastructure (Figure 10). La caméra orientée davantage vers le nord couvre l'infrastructure maritime (Figure 11).

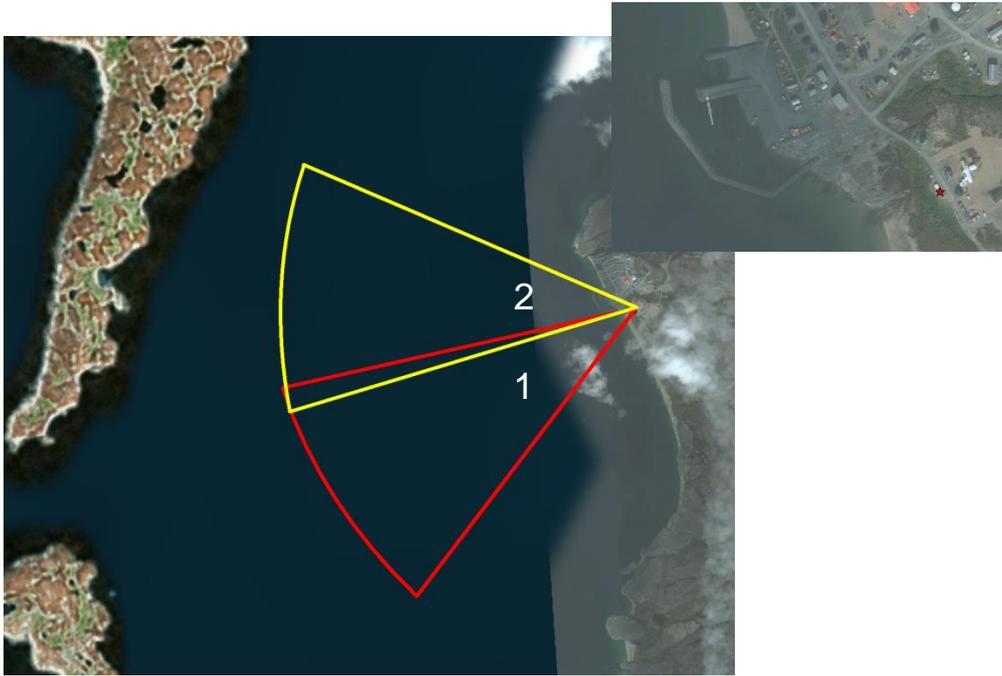


Figure 10 Emplacement des caméras pour le site d'Umiujaq de même que l'orientation approximative de chacune des caméras



Figure 11 Régions couvertes par les caméras d'Umiujaq

1.3.1.2.3 Site d'Ivujivik

Les caméras d'Ivujivik sont installées sur la rive est de la baie d'Ivujivik, face au village (Figure 12). Ce site permet une vue sur le secteur de l'infrastructure

maritime et la baie, de même que sur la passe Digges plus au nord (Figure 13). Les caméras sont situées à environ 1000 m au nord-est de l'infrastructure.

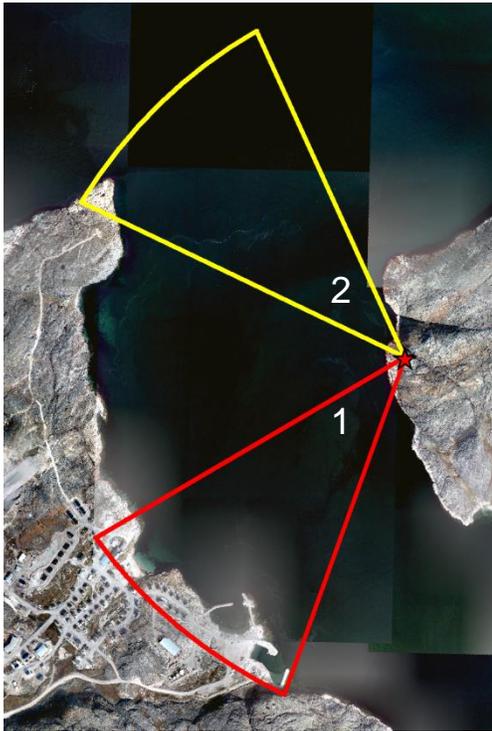


Figure 12 Emplacement des caméras pour le site d'Ivujivik de même que l'orientation approximative de chacune des caméras



Figure 13 Régions couvertes par les caméras d'Ivujivik

1.3.1.2.4 Site de Baie Déception

Le site de la Baie Déception faisant l'objet d'un autre projet de suivi de la glace en parallèle (Ice monitoring in Deception Bay with control sites in Salluit and Kangiqsujaq), les caméras ont été installées en deux sites distincts (Figure 14). À chacun de ces sites, une caméra d'une autre marque a été installée au même système afin d'en vérifier les performances. Un troisième site a été équipé d'une caméra IP liée au réseau informatique de Glencore - Mine Raglan (Figure 15). Au site numéro 2 situé au milieu de la baie, la caméra Reconyx est orientée vers l'est, soit vers l'île Moosehead (Figure 16) alors qu'au site numéro 3 situé sur la Pointe Noire, elle est orientée vers l'ouest (Figure 17).

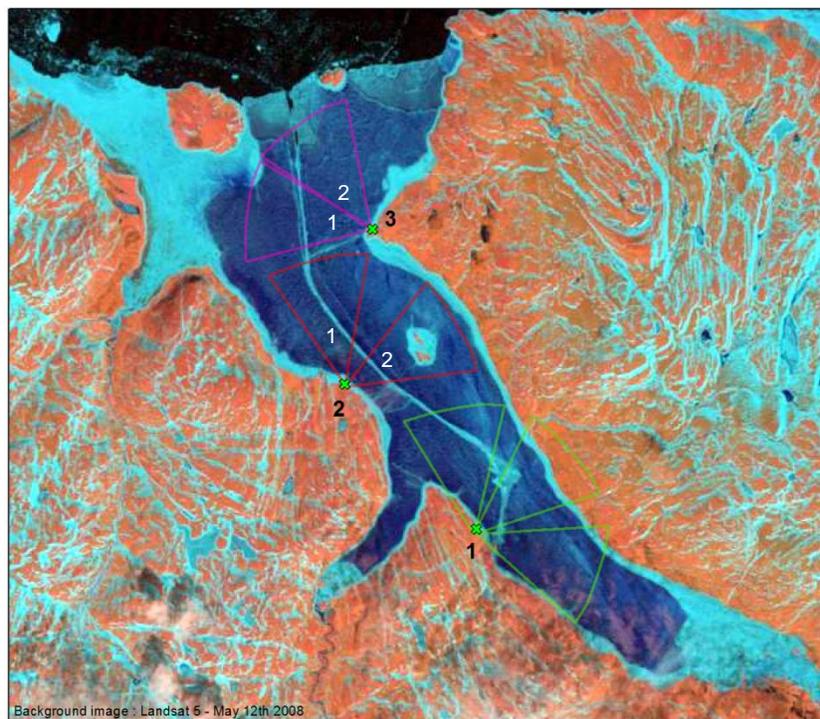


Figure 14 Emplacement des caméras pour le site de la Baie Déception de même que l'orientation approximative de chacune des caméras

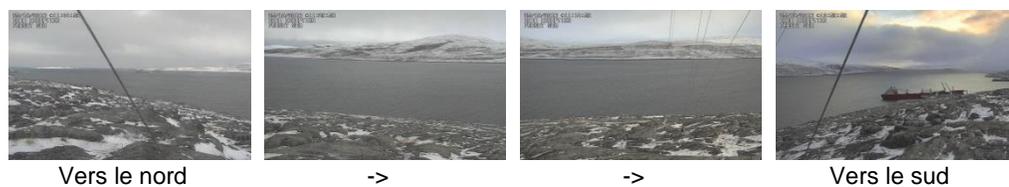


Figure 15 Prises de vue la caméra du site #1. La caméra étant mobile, les vues peuvent être modifiées.



Figure 16 Prise de vue des caméras du site #2. La caméra Reconyx offre la vue de droite.

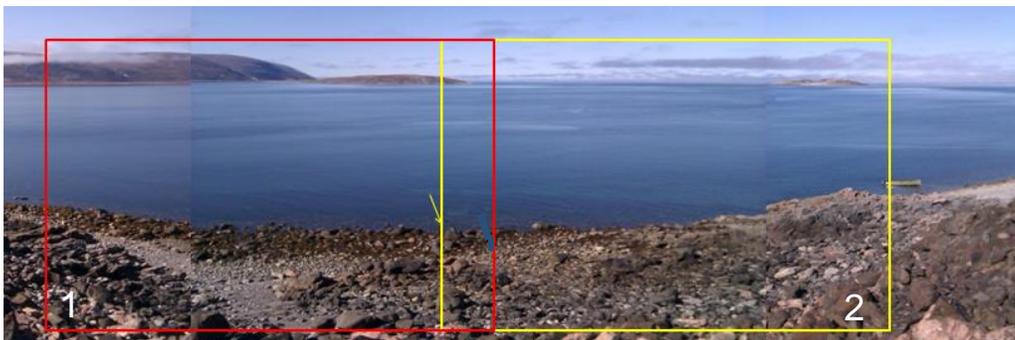


Figure 17 Région couverte par les caméras du site #3. La caméra Reconyx offre la vue en rouge.

1.3.1.2.5 Site de Quaqtq

Les caméras de Quaqtq, installées en 2009, sont situées sur la colline au nord-est du village. Elles sont à une distance d'environ 300 m de l'infrastructure la plus ancienne et de 600 m de l'infrastructure la plus récente (Figure 18). La caméra orientée vers le sud-est couvre les deux infrastructures alors que celle orientée vers l'ouest offre une vue plus large sur la baie Diana, à la limite du détroit d'Hudson (Figure 19).

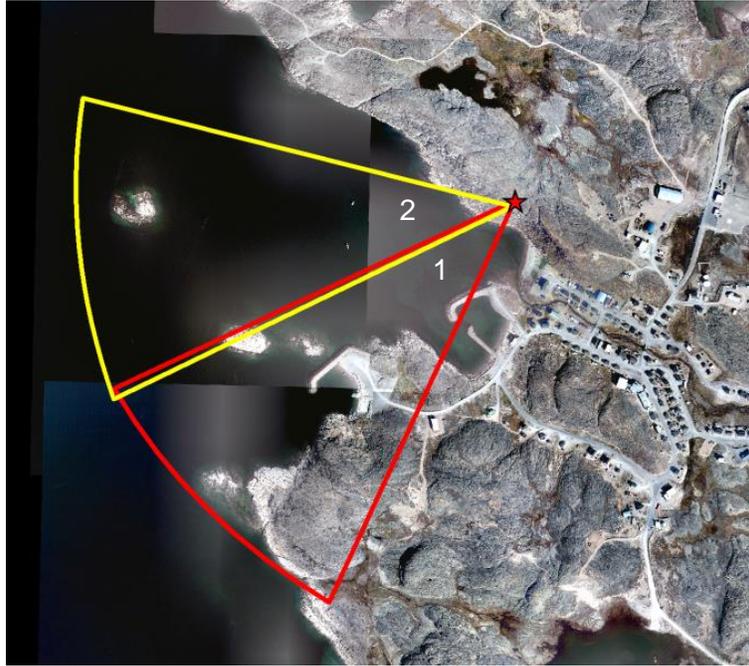


Figure 18 Emplacement des caméras pour le site de Quaqtq de même que l'orientation approximative de chacune des caméras



Figure 19 Prise de vue des caméras de Quaqtq.

1.3.1.2.6 Site d'Aupaluk

À Aupaluk, le système de caméras est installé dans une tour de la Garde Côtière du Canada d'une hauteur de 30 pieds située à 650 m au nord de l'infrastructure maritime (Figure 20). L'une des caméras est orientée vers le sud-ouest et permet de voir l'infrastructure maritime ainsi que l'Anse Funnel (caméra 1). L'autre caméra (2) est orientée à 90° de la première vers le nord-ouest et donne une vue de Hope Advance Bay (Figure 21).



Figure 20 Orientation des caméras présentes à Aupaluk



Figure 21 Régions couvertes par les caméras d'Aupaluk

1.3.1.3 Récupération des photographies

À chaque fin d'été, ou au début de l'automne, une tournée des sites permet de récupérer les photos acquises depuis l'année précédente et de s'assurer que les systèmes sont toujours en bon état. De manière générale, peu de bris ou d'interruptions sont observés sur les systèmes. Considérant les 16 caméras utilisées pendant les trois ans du projet, et les 12 déjà en place lors de l'hiver 2016-2017, c'est un total de 240 saisons qui pouvaient être observés par les caméras. Un site de caméras peut observer 8 saisons par années en raison des 2 caméras présentes. Les problèmes survenus pendant le projet ont causé la perte de 41 saisons de données (Tableau 3). Les problèmes les plus importants furent le vol des caméras à Aupaluk durant l'hiver 2017-2018 et celles de Quaқтақ durant l'hiver 2019-2020. Suite au vol des caméras survenu à Aupaluk en début de projet, des caméras de marque SpyPoint ont été installées en remplacement. Ces caméras, moins dispendieuses, ont été sélectionnées en raison de contraintes budgétaires et du risque de récurrence de vol. En retirant les problèmes dont la cause est connue de la liste des problèmes rencontrés, 13 saisons ont été perdues sur une possibilité de 212, soit 6% de perte. Sur ces 13 saisons perdues, sept l'ont été par les caméras de marque SpyPoint, utilisées comme remplacement suite au vol des caméras d'Aupaluk. Ces caméras n'ont pas eu un grand pourcentage d'efficacité, ayant fonctionnées cinq saisons sur douze (42%). Les caméras Reconyx ont, quant à elles, fonctionnées 97% du temps (194/200). Un constat sur les performances des différents modèles de caméras est présenté dans le rapport technique no.4 (Bernier et al., 2021).

Lors de la dernière campagne de terrain réalisé dans le cadre de ce projet, soit à l'automne 2020, les sites nouvellement instrumentés sur des îles à proximité des villages de Quaқтақ et Kuujuarapik ont été démontés en raison de l'incertitude lié à la pérennité du réseau et de la difficulté d'accès à ces sites. Les sites de la Baie Déception ont été retirés pour les mêmes raisons. Les autres sites dans les communautés de Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Quaқтақ et Aupaluk sont toujours en place et étaient fonctionnel suite à l'entretien effectué en 2020.

L'état des systèmes suite à chaque entretien a été décrit dans des rapports techniques remis au ministère (Poulin et al., 2017; Poulin et al., 2019; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2021). Les caméras ont acquis plus de 256 000 photographies de l'automne 2016 à l'automne 2020. Ces photographies sont accessibles aux communautés et au public en général sur le site www.caiman.ete.inrs.ca

Tableau 3 : Description des problèmes rencontrés par le réseau de caméras et nombre de saisons perdues en raison de ces problèmes.

Problème rencontré	Saisons perdues
Subtilisation des caméras au site d'Aupaluk (hiver 2017-2018)	8
Subtilisation des caméras au site de Quaḡtaḡ (hiver 2019-2020)	8
Arrêt pour des causes inconnues	13 ¹
Mauvaise manipulation des caméras	4
Problème d'alimentation	8 ²
TOTAL	41

1.3.2 Images satellitaires

Les caméras *in situ* montrent les conditions de glace uniquement au voisinage des infrastructures maritimes et sur la portion de la baie présente dans le champ de vision de la caméra (quelques km²). Les images satellitaires optiques permettent de voir l'évolution spatiale et temporelle de la couverture de glace sur de grandes superficies.

Les satellites Sentinel-2 et Landsat-8 fournissent gratuitement des images optiques à partir desquelles il est possible d'identifier la présence de glace à proximité des infrastructures maritimes lorsqu'il n'y a pas de couverture nuageuse. Des images provenant de ces deux satellites ont donc été analysées pour déterminer la présence de glace ou non à proximité des six sites à l'étude pour la période 2017 à 2020. La résolution, la fréquence et la période d'acquisition des images en fonction du satellite sont présentées au Tableau 4.

Tableau 4 : Résolution spatiale et fréquence d'acquisition pour les satellites utilisés

Satellite	Résolution	Fréquence d'acquisition
Sentinel-2	10-20 m	< 5 jours (5 jours à l'équateur)
Landsat-8	15-30 m	Tous les 16 jours ou mieux

Les images satellitaires ont servi à appuyer les observations faites sur les photographies en fournissant une prise de vue plus régionale et à évaluer la longueur des saisons d'englacement à chaque site pour la période d'octobre 2013 à août 2020. Les résultats sont présentés à la section 2 de ce rapport.

¹ 6 saisons ont été perdues par des caméras Reconyx (sur 200 saisons), 7 par des caméras SpyPoint (sur 12 saisons d'utilisation)

² 4 saisons ont possiblement été perdues suite à du vandalisme au site de l'île Gillis près de Kuujjuarapik (hiver 2019-2020)

Pour les sites de Kuujjuarapik et de Quaqtaq, les données ont été classifiées (Tableau 5) et seront fournies à l'ISMER qui pourra les utiliser pour calculer les concentrations de glace sur les domaines couverts par les modèles de vague (Figure 22).

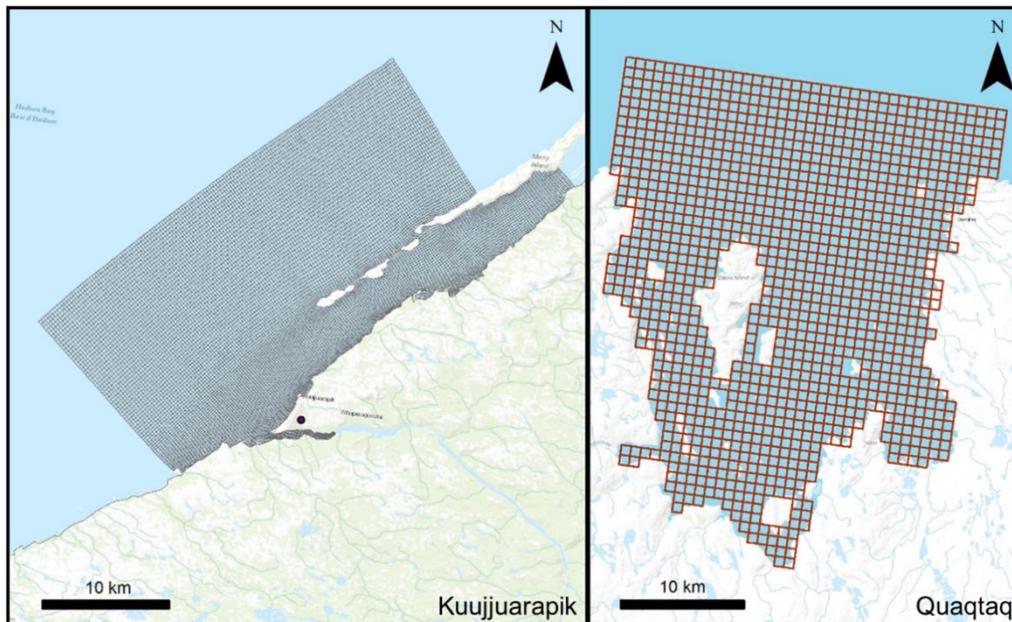


Figure 22 Étendue des domaines de modélisation de l'ISMER pour chacun des sites (source du fond de carte : ESRI)

Tableau 5 : Nombre d'images satellitaires classifiées pour les sites de Quaqtaq et de Kuujjuarapik

Satellite	Quaqtaq	Kuujjuarapik
Sentinel-2	199	329
Landsat-8	77	94
Total	276	423

1.3.2.1 Classification des conditions de glace à partir des images satellitaires

Une procédure de classification automatique (glace-eau-neige) a été utilisée pour traiter les images satellitaires (Qiu et al., 2019; Zhu et Woodcock, 2012). La procédure permet de déterminer pour chacun des pixels des images la présence de glace, d'eau ou de neige.

Durant la saison de glace, diverses situations peuvent se présenter et les images satellitaires permettent de bien le constater sur une grande étendue spatiale. À titre d'exemple, la Figure 23 montre une image Landsat-8 du 26 mars 2020 de la baie d'Hudson au large de Kuujuarapik et d'Umiujaq. Sur l'image, il est possible de remarquer différents types de nuages ainsi que l'ombre qu'ils projettent au sol. Aussi, le couvert de glace est pratiquement complet, mais mobile et une grande quantité de fractures sont visibles.

L'application de l'algorithme sur les images satellitaires a permis de séparer le contenu des images en trois différentes classes (eau, glace, nuage). Sur la Figure 24, l'image présentée à la Figure 23 a été classifiée en utilisant cet algorithme. La glace et l'eau y sont généralement bien représentées. Une partie des nuages a pu être classifiée comme glace de même que l'ombre qu'ils produisaient. Au niveau des fractures, les agrandissements permettent de remarquer différentes teintes associées à différents types de glace de même que des régions découvertes où l'eau est visible. Sur la Figure 24, ces zones d'eau et de glace sont correctement classifiées. Sur la Figure 23, la présence d'un voile nuageux peu opaque montre une des faiblesses de l'algorithme, soit la difficulté à bien identifier la glace et l'eau en présence d'un tel couvert nuageux.

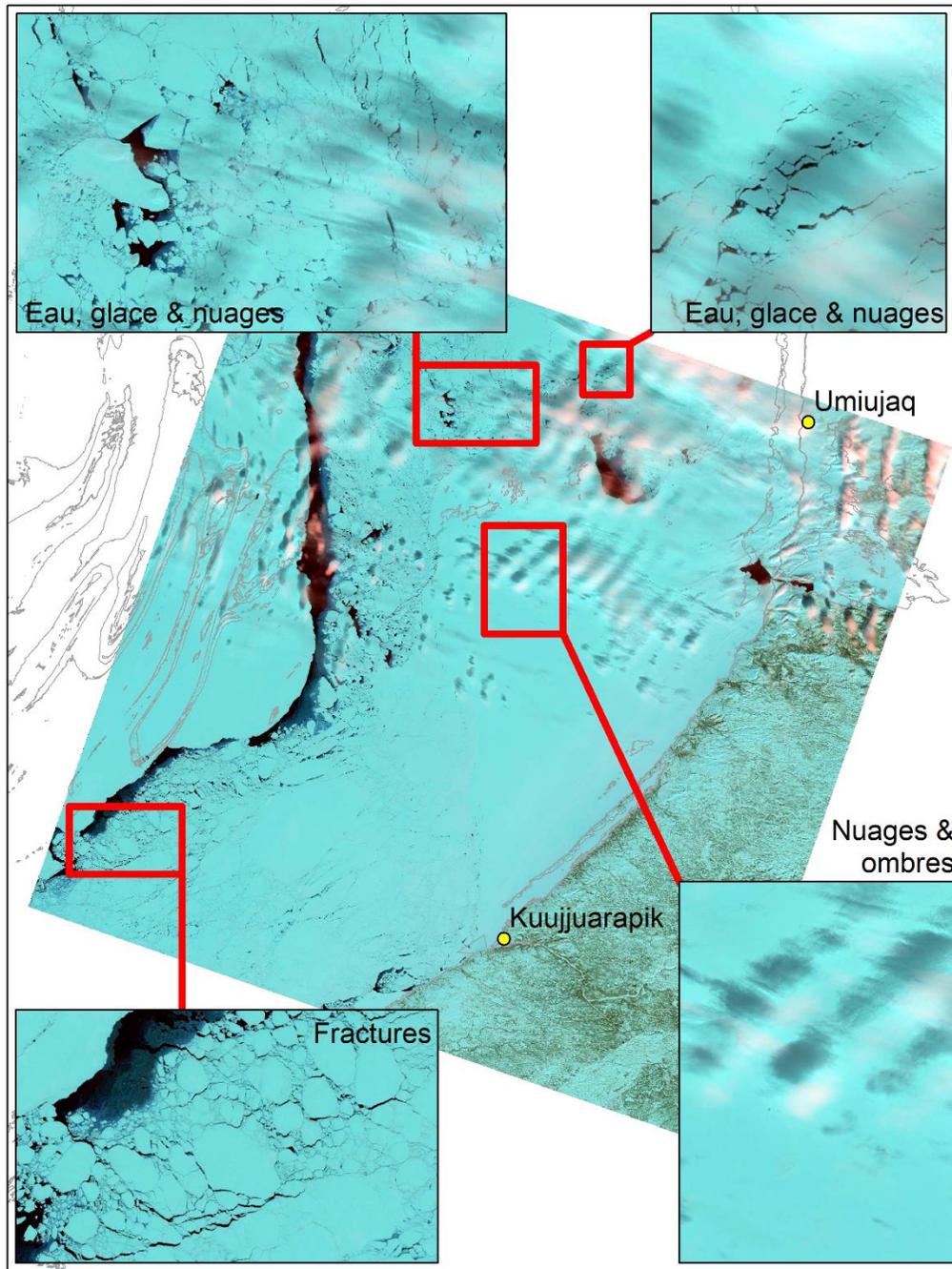


Figure 23 Exemples de particularités (nuages, ombres, fractures) présentes sur une image optique Landsat-8 du 26 mars 2020 au large de Kuujjuarapik et d'Umiujaq

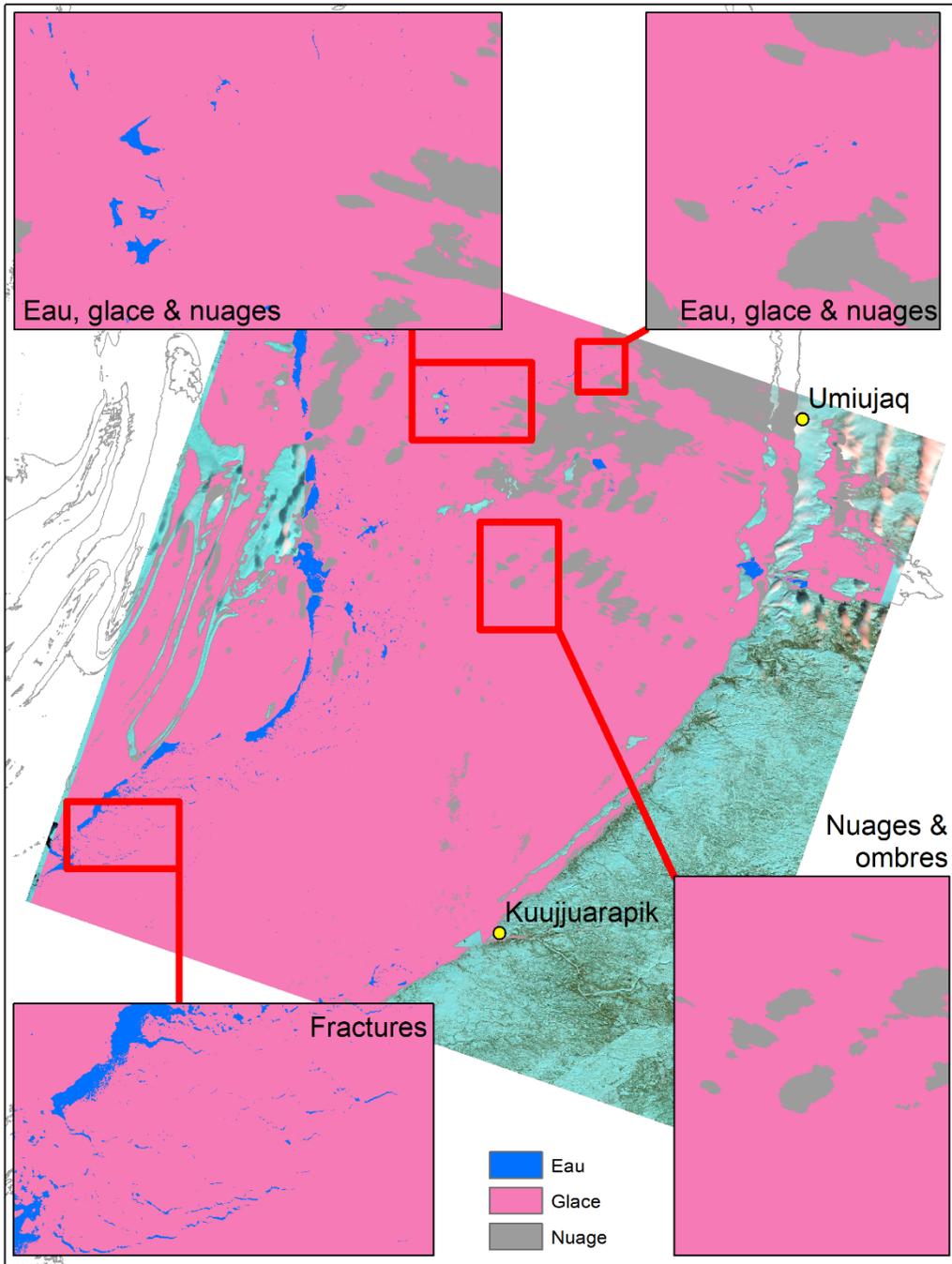


Figure 24 Classification de l'eau libre, de la glace et des nuages sur l'image Landsat-8 du 26 mars 2020 au large de Kuujjuarapik et d'Umiujaq

1.3.2.2 Calcul du fetch à partir des images satellitaires

En utilisant les images satellitaires classifiées et les données météorologiques mesurées à Kuujjuarapik et Quaqaq, il a été possible de calculer le fetch pour les sites de mouillage aux dates d'acquisition des images. Les images satellitaires classifiées sont nécessaires afin de limiter le calcul aux portions de mer où la glace est absente. Le calcul est relativement simple : à partir du site du mouillage, la distance à l'obstacle le plus proche, dans la direction du vent, est mesurée (Figure 25). Une routine a été développée afin d'automatiser le calcul.

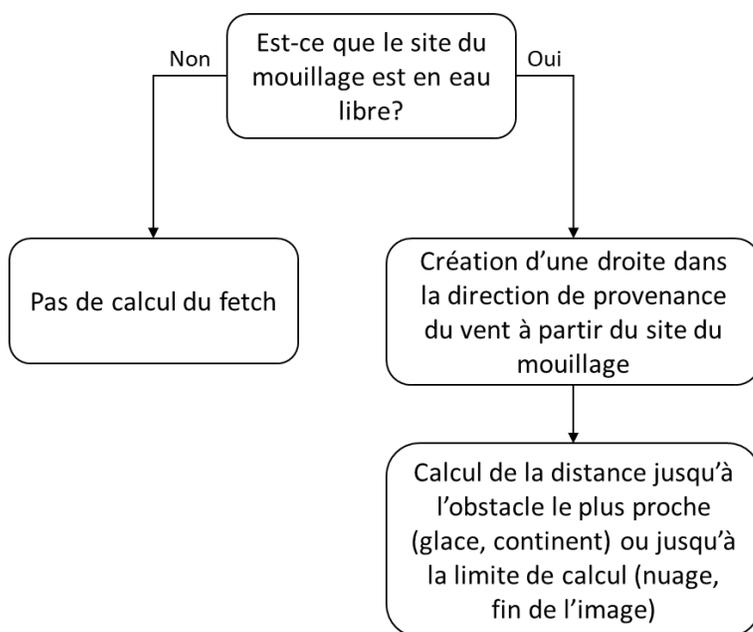


Figure 25 Schématisation de la routine de calcul du fetch à partir des images satellitaires classifiées et des données météorologiques

1.3.3 Potentiel de l'imagerie radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues

1.3.3.1 Principe de fonctionnement des radars imageurs

Les radars envoient des ondes électromagnétiques vers une cible (une portion de la surface de la Terre dans le champ de vision de l'antenne du radar) sous un angle d'incidence déterminé et reçoivent l'écho (signal caractérisé par une amplitude et/ou une phase). De plus, ils mesurent le temps d'aller-retour du signal émis. La distance de la cible du radar est déduite en sachant la vitesse

de propagation des ondes électromagnétiques. Les radars fonctionnent de cette manière pour enregistrer une image. La portion de surface terrestre constituant la cible représente un « pixel » de l'image enregistré. La valeur enregistrée pour un pixel peut être de type réel (amplitude) ou complexe (amplitude et phase) selon le type et le mode d'acquisition du capteur embarqué sur le satellite. Dans la présente étude, seuls les radars à signaux polarisés vertical et horizontal sont considérés.

Les fonctionnements des radars imageur peuvent être catégorisés en deux types : Radar à Ouverture Réelle (ROR) et Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO). Les résolutions spatiales que les ROR peuvent offrir sont de l'ordre kilométrique. Contrairement au ROR, les Radar à Synthèse d'Ouverture comme RADARSAT-1/2 (en bande-C), Sentinel-1A/1B (en bande-C), PALSAR-1/2 (en bande-L), TerraSAR-X (en bande-X) ont l'avantage de livrer une résolution spatiale plus fine selon le mode d'acquisition, pouvant aller jusqu'à 3 m comme le cas du mode *Fin* de RADARSAT-2. Ils utilisent l'effet Doppler et la mesure de phase des échos provenant de la cible (portion de la surface terrestre dans le champ de vision de l'antenne du radar) afin de produire une longueur synthétique d'antenne ce qui permet d'obtenir une résolution spatiale plus fine (McCandless et Jackson 2004).

Dans la présente étude, les données utilisées comportent la phase et l'amplitude du signal rétrodiffusé. Elles proviennent des satellites RADARSAT-2 de l'Agence spatiale canadienne (ASC). Ce satellite possède un mode d'acquisition polarimétrique (Quad-Pol). Dans ce mode, les données sont enregistrées sous forme d'une matrice à élément complexe appelé Matrice de Rétrodiffusion ou Matrice de Sinclair (Ulaby et al., 2014; Ratsimbazafy et Bernier, 2015; Xie et al., 2015) et ce dans quatre canaux différents : HH, HV, VH, et VV. La première lettre dans le nom des canaux (H – horizontal, V – vertical) indique la polarisation du signal émis par le radar tandis que la deuxième indique la polarisation du signal rétrodiffusé reçu par le capteur.

Les différentes étapes réalisées afin d'atteindre les objectifs sont :

- Revue de la littérature sur les méthodes d'extraction des paramètres de vagues à partir d'images satellitaires radar (Poulin et al., 2018);
- Sélection de l'approche méthodologique à utiliser dans la détermination des paramètres des vagues sur les images Radar à Synthèse d'Ouverture (Poulin et al., 2018);
- Commander les images RADARSAT-2 auprès de l'Agence spatiale canadienne (ASC);
- Tester et adapter la méthodologie sélectionnée avec les données polarimétriques (Quad-Pol) du satellite canadien RADARSAT-2;
- Produire des cartes illustrant les caractéristiques de vagues : direction dominante, longueur d'onde dominante, hauteur significative et période dominante des vagues.

1.3.3.2 Commande d'images

L'acquisition d'images polarimétriques de RADARSAT-2 a été demandée auprès de l'ASC en octobre 2017. La demande a été acceptée au cours du mois de février 2018. Les paramètres des images demandées pour Kuujjuarapik et Quaqtq suite à l'acceptation de l'ASC sont résumés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 6 et Tableau 7).

Tableau 6 : Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Kuujjuarapik

ID	Date d'acquisition	Orbite	Orientation de vue	Mode d'acquisition	Tx	Rx
#1	2018-Sep-12 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#2	2018-Oct-06 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#3	2018-Oct-30 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#4	2018-Nov-23 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#5*	2018-Dec-17 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#6*	2019-Jun-27 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#7*	2019-Jul-21 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#8*	2019-Oct-01 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#9	2019-Oct-25 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#10	2019-Nov-18 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#11**	2019-Dec-12 22:49	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V

* : scènes qui n'ont pas pu être acquises

** : scène ajoutée ultérieurement en compensation des images non acquises

L'objectif était d'avoir des images couvrant une gamme variée de conditions de vent et si possible, couvrant le début de l'englacement. C'est pourquoi il était prévu d'utiliser des images acquises à l'automne, période où ces conditions ont le plus de chances d'être réunies. L'acquisition de ces images a débutée en septembre 2018. Au total, quatre images sur les dix planifiées sur chaque site n'ont pas pu être acquises; soient les images #5, #6, #7 et #8 pour Kuujjuarapik et #5, #6, #7, et #10 pour Quaqtq. L'acquisition des scènes du 15 décembre 2018 (Quaqtq) et du 17 décembre 2018 (Kuujjuarapik) ont échouées en raison d'une anomalie du satellite RADARSAT-2 signalée par l'ASC au cours de ce mois. Suite à ce problème technique du satellite, il fallait resoumettre à l'ASC la commande pour les autres images. En attendant la confirmation de la résolution du problème technique, nous avons manqué l'envoi de la commande à temps pour les images des mois de juin et juillet 2019. Les images (#8 du Tableau 6 et #10 du Tableau 7) ont été manquées à cause d'un conflit d'acquisition avec d'autres utilisateurs qui ont un droit prioritaire par rapport à notre acquisition.

Notons que cette priorité était connue à la signature du contrat de prêt d'images avec l'ASC.

Tableau 7 : Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Quaqtaq

ID	Date d'acquisition	Orbite	Orientation de vue	Mode d'acquisition	Tx	Rx
#1	2018-Sep-10 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#2	2018-Oct-04 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#3	2018-Oct-28 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#4	2018-Nov-21 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#5*	2018-Dec-15 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#6*	2019-Jun-25 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#7*	2019-Jul-19 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#8	2019-Sep-29 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#9	2019-Oct-23 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#10*	2019-Nov-16 22:08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V
#11**	2019-Dec-10 22 :08	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V

* : scènes qui n'ont pas pu être acquises

** : scène ajoutée ultérieurement en compensation des images non acquises

1.3.3.3 Traitements des images

Afin d'avoir un accès plus aisé aux outils logiciels, nous avons choisi d'utiliser le langage de programmation Python (source libre), avec le logiciel de l'Agence Spatiale Européen (SNAP : Sentinel Application Platform) pour le traitement des images. Les traitements effectués sont les suivants :

- Lecture et calibration des images ;
- Traitement multi-vue et filtrage : ceux-ci servent à diminuer les bruits (apparence sel-poivre observé sur les images) qui sont typiques des images radar. Les bruits sont dus aux interférences locales (au niveau des pixels) causées par les signaux rétrodiffusés par les autres cibles et qui s'ajoutent au signal rétrodiffusé mesuré;
- Calcul des images constituant la matrice de cohérence T3. Les éléments de la diagonale de cette matrice servent à calculer l'intensité totale des signaux enregistrés au capteur;
- Calcul des pentes en distance et en azimut. Des fenêtres spatiales de taille différentes ont été utilisées afin d'obtenir une résolution spatiale semblable (2.5 km) pour les paramètres des vagues (directions, hauteur, et longueur d'onde) sur les images RADARSAT-2;
- Calcul des spectres de Fourier en 2-D des sous-images pour chacune des fenêtres;
- Extraction de la direction, de la longueur d'onde, et de la hauteur des vagues dominantes dans chacune des sous-images constituant chaque image.

2. BILAN DES CONDITIONS DE GLACE DE RIVE OBSERVÉES AUX SITES À L'ÉTUDE ENTRE 2017 ET 2020

Cette section présente une synthèse des conditions de glaces de rive observées pour la période 2017-2020 pour les six sites à l'étude. Certains sites étant instrumentés depuis une plus longue période, les conditions passées peuvent également être présentées afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble de la situation. Les données proviennent des photographies obtenues par les caméras et d'images des satellites Landsat-8 et Sentinel-2 (Tableau 9). Pour chaque site, l'analyse des photographies a permis de documenter les informations suivantes lorsque cela était possible:

- Description de l'englacement et du retrait des glaces (Tableau 8):
 - Périodes de glace mobile et de glace ancrée sur la rive
 - Date moyenne, maximale et minimale de l'englacement et de la fonte des glaces
 - Méthodes de formation observées (frasil, accumulation venant du large, etc.)
 - Méthode de dégradation observées (thermique, fracture, etc.)
 - Types de glace observés (couvert rigide, empilement, frasil, etc.) lors de l'englacement et de la fonte
- Description des phénomènes rares observés tels que la présence d'iceberg, d'empilement, etc. :
 - Dates et durées
 - Localisation
 - Ampleur
- Description des glaces lors des tempêtes
 - Type de glace (frasil, plaque, accumulation, etc.)
 - Évolution et mouvements de la glace

Au niveau de l'imagerie satellitaire, leur résolution spatiale et la faible fréquence d'images sans nuage ne permettent pas une analyse aussi détaillée des conditions de glace. Leur utilisation a principalement servi à étendre à une échelle plus petite les observations faites à partir des photographies. Seuls la présence ou absence de glace ainsi que le type de couvert (partiel, complet) ont été identifiés.

Tableau 8 : Critères utilisés afin de décrire l'englacement et le retrait des glaces

Stade d'évolution du couvert de glace	Critère
Première apparition de glace	Première journée où de la nouvelle glace (ou d'un stade plus avancé) est observée sur les photographies. La glace observée doit faire partie du processus d'englacement et non pas être un évènement isolé. Pour cette raison, la gadoue n'a généralement pas été considérée comme étant la première apparition de glace.
Couvert de glace permanent	Première journée où le couvert de glace est complet et stable pour l'hiver. Seule la zone hors de l'estran est considérée.
Première apparition d'eau	Première journée où de l'eau est observé sur les photographies hors de l'estran.
Eau libre pour la première fois	Première journée où la concentration de glace est inférieure à 1/10 dans la zone d'intérêt des photographies.
Dernières observations de glace	Dernière journée où de la glace annuelle est observé sur les photographies.

Tableau 9 : Disponibilité des données des caméras et des images satellitaires pour les sites à l'étude

Site	Caméras	Landsat-8	Sentienl-2
Kuujuarapik	2015-2020	2013-2020	2017-2020
Kuujuarapik (île Gillis)	2017-2020		
Umiujaq	2009-2020	2013-2020	2017-2020
Ivujivik	2015-2020	2013-2020	2017-2020
Baie Déception	2015-2020	2013-2020	2017-2020
Quaqtaq	2009-2012, 2015-2019	2013-2020	2017-2020
Quaqtaq (île Hearn)	2017-2020		
Aupaluk	2015-2016	2013-2020	2017-2020

2.1 Description du régime des glaces à Kuujjuarapik

2.1.1 Site de l'infrastructure maritime

La description du régime des glaces pour le site de l'infrastructure maritime situé au nord du village de Kuujjuarapik repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2015 et sur les images satellitaires Landsat-8 et Sentinel-2 d'avril 2013 à décembre 2020. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La Figure 8 illustre l'emplacement des deux caméras au nord du village de Kuujjuarapik et leurs vues. L'interprétation des photographies des deux sites à Kuujjuarapik, soit les sites de l'infrastructure maritime et celui sur l'île Gillis, a été faite indépendamment l'une de l'autre en raison de la dynamique différente des deux milieux (côtier et large) et de l'absence de chevauchement ou de contiguïté entre les zones surveillées.

2.1.1.1 Hiver 2019-2020

Tel que mentionné dans le rapport technique no. 4 (Bernier et al., 2021), la caméra visant l'infrastructure maritime n'a fonctionné qu'une heure suite à l'entretien de 2019. La raison de cet arrêt n'est pas connue et n'a pas été investiguée car l'entretien a été réalisé par un collaborateur à Kuujjuarapik-Whapmagoostu en raison des défis de voyager durant la pandémie de COVID-19. Le système semble néanmoins en bon état et fonctionne toujours.

À l'automne 2019, l'englacement de la région au nord de Kuujjuarapik s'est déroulé simplement. Du sorbet fut visible pour la première fois dans la dernière semaine de novembre, soit vers le 26. Le 29 novembre, du nilas semblait aussi visible (Figure 26-A). Pendant les 10 jours suivants, du sorbet pourra être observé de plus en plus régulièrement. Les températures moyennes journalières diminueront alors progressivement passant sous les -15°C le 9 décembre. La nouvelle glace débutera alors la transition vers le stade de nilas (Figure 26-B). Avec des températures moyennes à près de -20°C , le nilas passera rapidement au stade de jeune glace qui couvrira tout le secteur. Le 12 décembre, le couvert sera complet à l'exception d'un peu d'eau à la limite de la zone intertidale (Figure 26-C). De la neige recouvre alors toute la jeune glace. Le 13 décembre, le couvert sera complètement gelé et stable pour l'hiver.

La température à l'automne 2019 a généralement suivi la moyenne des neuf (9) années précédentes (Figure 29). Les températures à partir de la 2^e semaine de novembre ont toutefois été un peu plus froides que les années précédentes mais elles se sont réchauffées ensuite jusqu'au début décembre (Figure 28). À partir de là, les températures se sont maintenues autour de la moyenne. Durant l'hiver, les températures se sont adoucies de façon générale de sorte qu'au mois d'avril, le cumul des degrés-jours de gel était le plus bas des neuf dernières années. Le cumul des DJG s'est maintenu dans les plus bas jusqu'au 1^{er} juin.

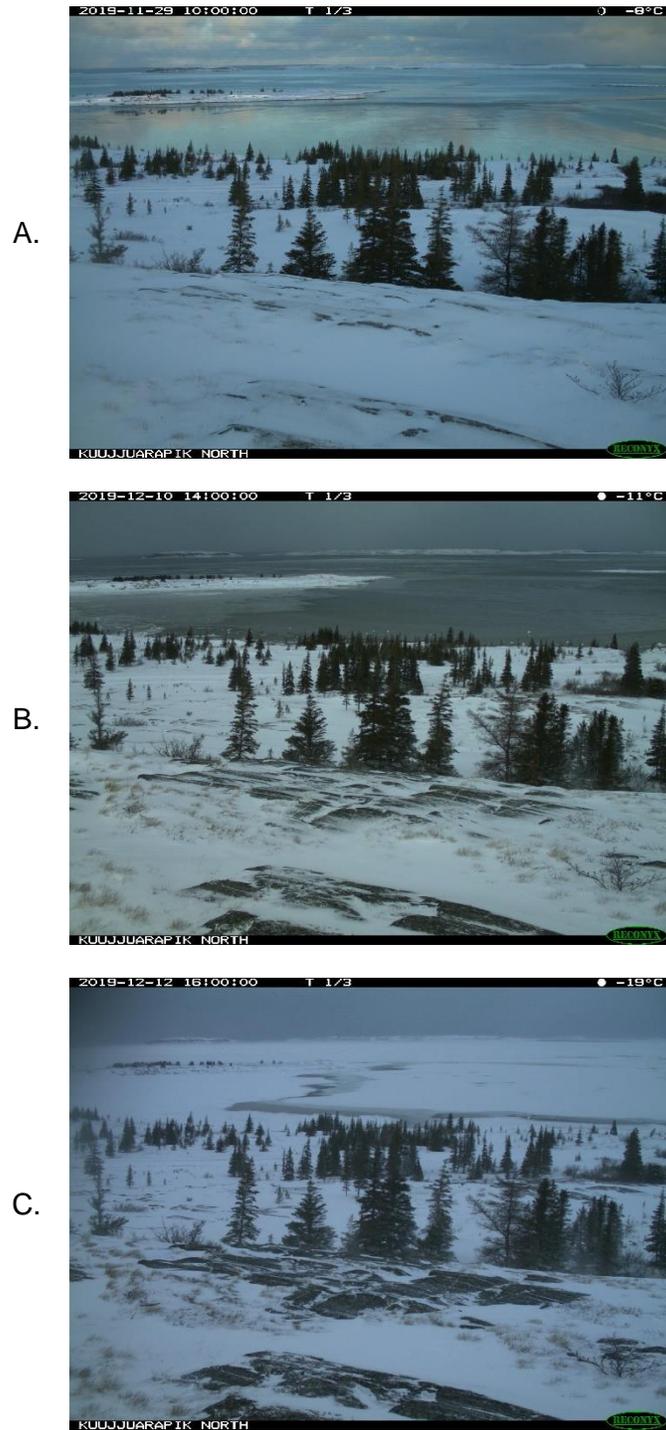


Figure 26 Évolution de l'englacement 2019 à Kuujjuarapik (A- 29 novembre 2019, B- 10 décembre 2019, C- 12 décembre 2019)



Figure 27 Image satellitaire montrant le détroit de Nastapoka et la baie d'Hudson devant Kuujjuarapik lors de l'englacement 2019 (Landsat-8, 14 décembre 2019)

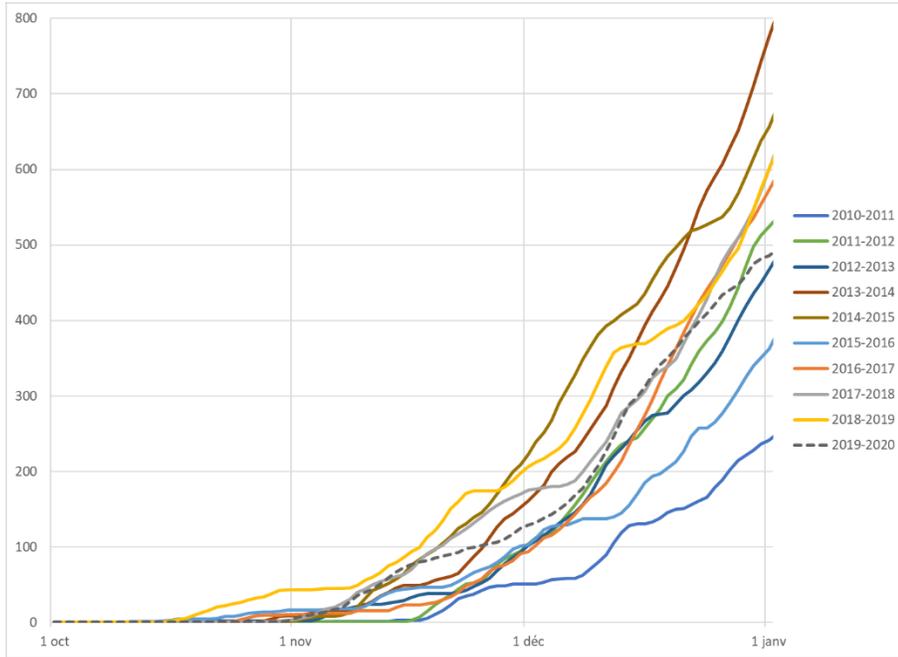


Figure 28 Degrés-jour de gel à Kuujjuarapik du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2010-2020)

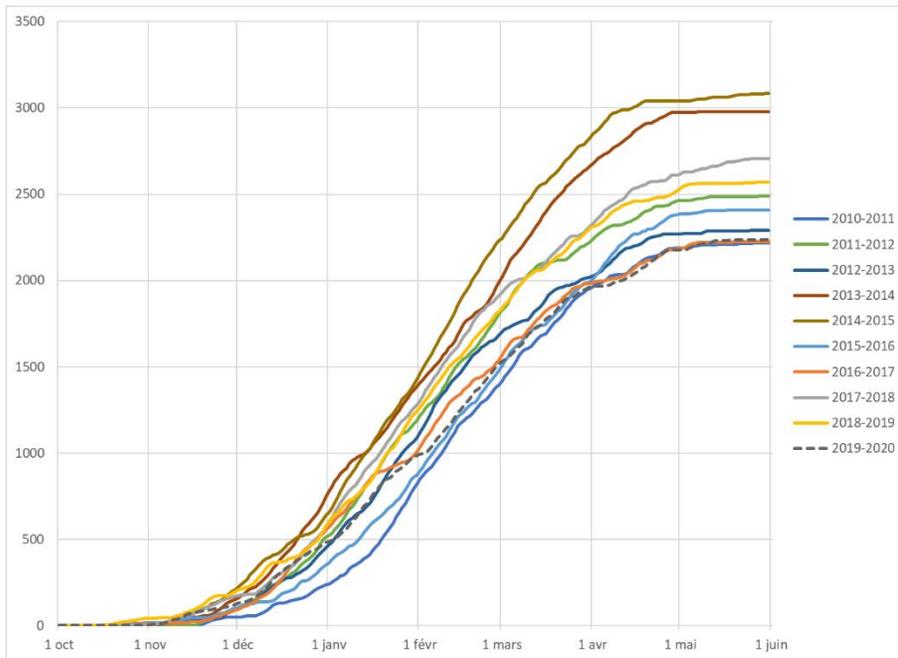


Figure 29 Degrés-jour de gel à Kuujjuarapik lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2010-2020)

Durant l'hiver 2020, de l'eau est apparue sur l'estran au sud-ouest de la baie à quelques occasions. De l'eau douce provenant entre autres de l'écoulement des lacs Umiartalik et Iqalussivik rejoint la baie à cet endroit. De l'eau apparaît donc à l'occasion à cet endroit lors de réchauffement. Le phénomène a été visible sur les photographies et sur des images satellitaires (Figure 30). Le 23 janvier, de l'eau apparaît sur le couvert de glace et de neige alors que la température est inférieure à -20°C et le ciel couvert. Il sera mentionné plus loin qu'à la même période, de l'eau est apparu sur le couvert de glace à Umiujaq. Un mois plus tard, le 24 février, de l'eau est clairement visible sur une image du satellite Sentinel-2. La température est alors autour de -15°C . Cet épisode n'est pas visible sur les photographies car il survient un peu plus profondément dans l'estran.

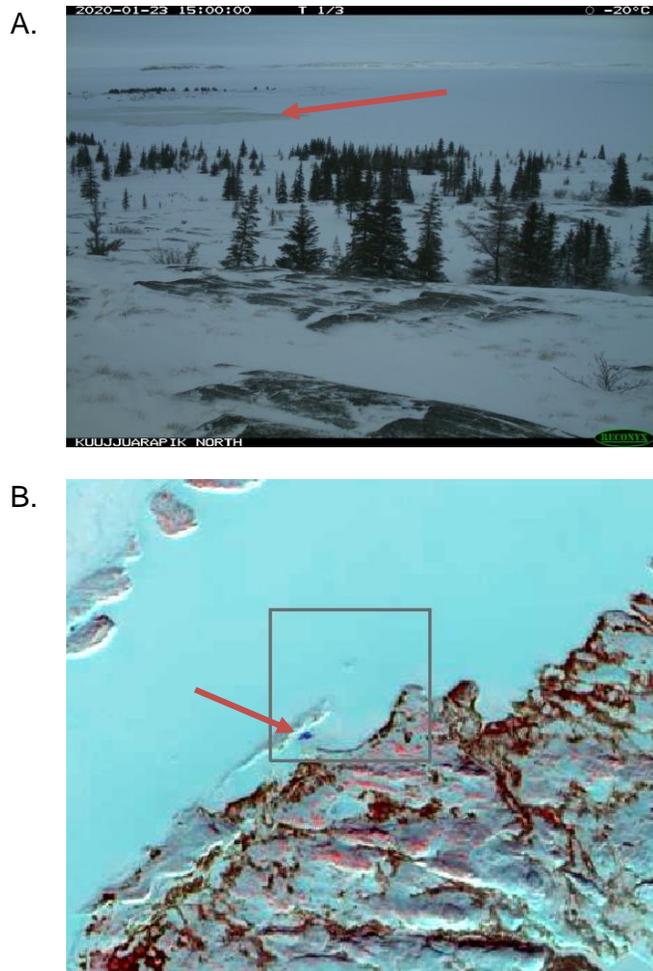


Figure 30 Évènements de fonte durant l'hiver 2020 à Kuujjuarapik (A- photo du 23 janvier 2020, B- image Sentinel-2 du 24 février 2020)

Au printemps 2020, de l'eau est apparue sur l'estran au sud-ouest de la baie le 1^{er} avril lors d'une journée où la température moyenne fut supérieure à 0°C. Cela se reproduira avec une intensité grandissante du 9 au 12 avril malgré des températures moyennes plus froides à près de -10°C (Figure 31-A). Ensuite, le phénomène ne se reproduira que très rarement pendant le mois suivant. À partir du 13 mai, la température moyenne journalière se maintiendra généralement au-dessus de 0°C ce qui provoquera la dégradation graduelle du couvert de glace. À partir du 25 mai, beaucoup d'eau sera visible dans la zone de marnage et elle progressera vers le large. Le 5 juin, de l'eau sera visible hors de la zone intertidale (Figure 31-B). La dégradation thermique se poursuivra les jours suivants alors que la banquise perdra de la superficie le long de la côte. Le 10 juin, de l'eau sera visible dans le détroit de Manitounouk. Le 13 juin, la banquise restante dans le détroit décrochera sous une jolie brise de l'ouest. Le lendemain, 14 juin, le secteur sera en eau libre alors que le vent passe au sud. Le 15 juin, le vent passant au nord ramènera des floes à la dérive qui viendront former une banquise serrée (Figure 31-C). Lors des deux jours suivants, les floes se dégraderont et se disperseront si bien que le secteur deviendra ensuite en eau libre jusqu'au 26 juin. Le 27 juin, une petite brise de l'ouest-nord-ouest ramènera un peu de glace pour former momentanément une banquise très lâche (Figure 31-D). Des glaçons seront visibles jusqu'au 30 juin suite à quoi le secteur sera en eau libre de glace pour la saison estivale.

Malgré le fait que les températures hivernales aient été plus chaudes que la moyenne, les températures au printemps ont augmentées tardivement (Figure 32). Ce n'est qu'à la mi-mai que les températures moyennes journalières ont commencées à monter au-dessus de 0°C. Jusqu'à la 2^e semaine de juin, les températures au-dessus de zéro et celles en dessous se sont succédées. À partir de ce moment, la température a augmenté considérablement de sorte que malgré un réchauffement tardif, le cumul des DGF était le plus haut des 10 années précédentes rendu à la mi-août. À partir de la pente de la série 2020 sur la Figure 33, il est possible de déduire que les températures moyennes journalières étaient, de façon répétée, plus haute que la moyenne.

A.





Figure 31 Évolution de la fonte 2020 à Kuujjuarapik (A- 12 avril 2020, B- 5 juin 2020, C- 15 juin 2020, D- 27 juin 2020)

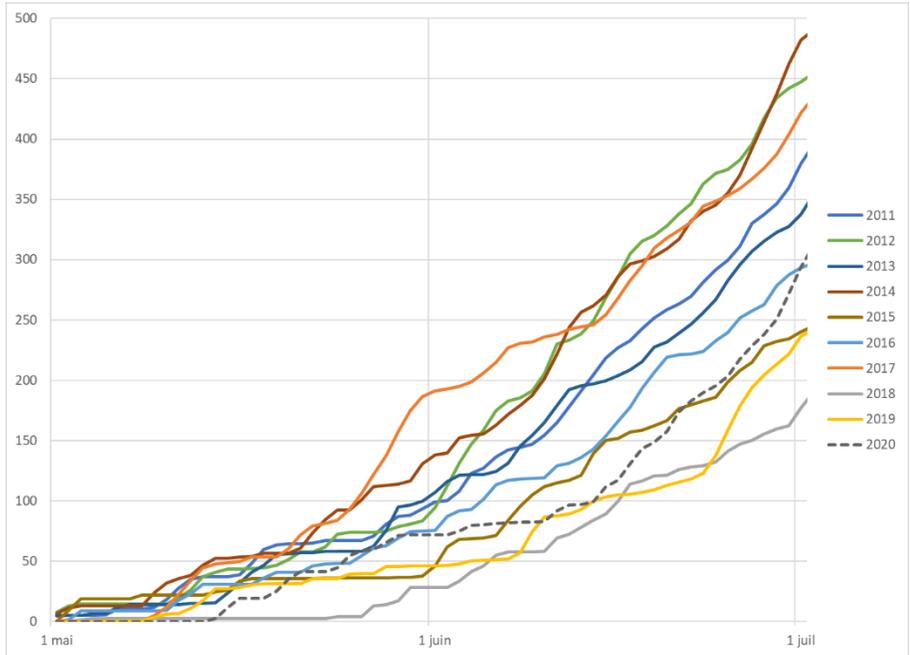


Figure 32 Degrés-jour de fonte à Kuujjuarapik du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2011 à 2020)

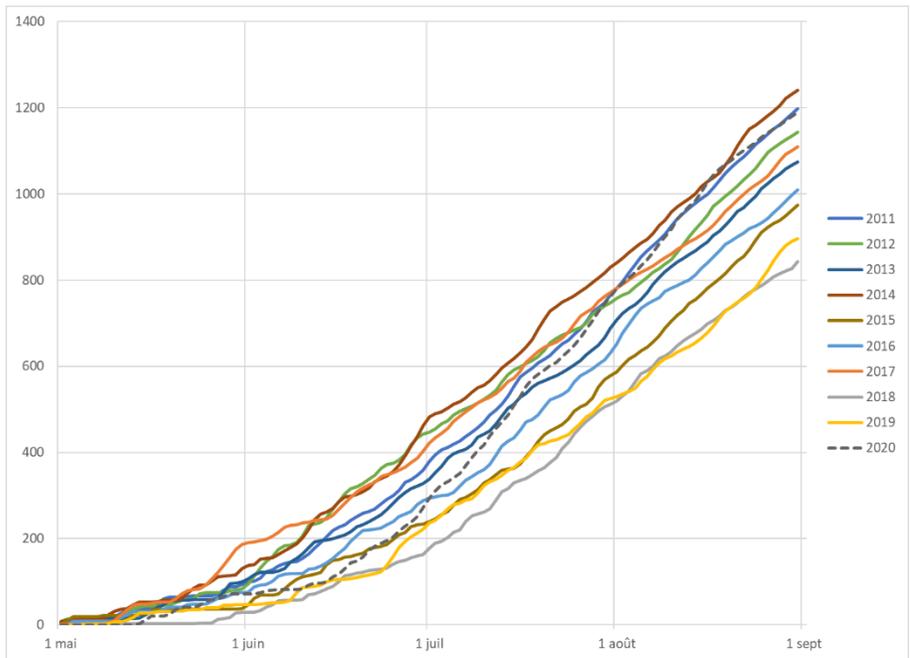


Figure 33 Degrés-jour de fonte à Kuujjuarapik du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2011 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 10 synthétise les observations faites depuis l'automne 2015 à partir des caméras installées au nord du village de Kuujjuarapik. Le Tableau 11 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 10 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2015 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	26 nov.	23 nov.	24 nov.	13 nov.	26 nov.
Couvert de glace permanent	23 déc.	15 déc.	12 déc.	7 déc.	13 déc.
Première apparition d'eau	28 mai	26 mai	12 juin	10 juin	5 juin
Eau libre pour la première fois	6 juin	5 juin	26 juin	26 juin	14 juin
Dernières observations de glace	16 juil.	9 juin	26 juin	29 juil.	30 juin

Tableau 11 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Kuujjuarapik depuis octobre 2015

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	26	22	18	24	17
Durée du couvert de glace permanent	157	162	182	187	175
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	9	10	14	16	9
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	40	4	0	33	16
Durée totale de présence de glace	232	198	214	260	217

2.1.1.2 Sommaire

Pour le secteur de l'infrastructure maritime, les premières observations de glace surviennent de façon assez constante au début de la dernière semaine de novembre sous forme de sorbet. La mer n'est pas particulièrement agitée autour de l'infrastructure à cette période car les vents viennent généralement du sud et du sud-est (Figure 111), donc en provenance de la côte. Le sorbet se transforme ensuite en nilas, les deux formes de glace étant mobile et se déplaçant avec les courants. Lorsque le nilas passe au stade de jeune glace, il se fixe pour l'hiver. La banquise hivernale est donc produite sur place par la perte de chaleur de l'eau, le processus étant intimement lié à la température de l'air. Pour les cinq périodes d'englacement observées, le couvert s'est fixé le jour où le cumul des DJG est passé au-dessus de 250 (Tableau 10, Figure 28). Les dates où le couvert s'est fixé se trouvent quant à elles dans un intervalle de 16 jours (Tableau 10).

La faible profondeur de l'eau et la présence des îles Manitounouk sont des éléments importants qui contrôlent le processus d'englacement. D'une part, la faible profondeur de l'eau diminue le volume d'eau impliqué dans le processus et accélère le refroidissement de la colonne d'eau. D'autre part, les îles créent à la fois une barrière contre les vents venant de l'ouest et du nord et offrent des points d'ancrage à la jeune glace lorsqu'elle se forme.

Au printemps, la fonte se présente tout d'abord par une perte du couvert de glace dans la zone intertidale pendant deux à trois semaines. La baie devant les caméras étant peu profonde, la zone intertidale est grande ce qui laisse place à une fonte graduelle du couvert de glace. Bien qu'il ne soit pas possible de le voir sur les photographies, le même processus devrait se reproduire le long de la côte dans le détroit de Manitounouk. Après la zone intertidale, la banquise poursuit sa fonte en s'éloignant du rivage. La glace étant homogène à la formation, la fonte se déroule assez graduellement jusqu'à ce que la glace pourrie se détruise. Les vents dominants de l'ouest et du nord lors du printemps (Figure 109) apportent parfois de grande quantité de glace à l'intérieur du détroit. Lors de la fonte, l'apparition d'eau est directement reliée aux températures ambiantes mais moins directement reliée aux valeurs absolues du cumul des DJF. En effet, les dates d'observation de la première apparition de l'eau sont associées à des valeurs diverses de DJF. Cependant, elles sont directement reliées aux températures moyennes du mois de mai. Les observations faites dans le secteur de l'infrastructure maritime semblent montrer une mise en place de plus en plus hâtive du couvert de glace fixe (Figure 34). Quant à la durée du couvert de glace permanent, elle semble s'allonger, récupérant quelques jours à l'automne et quelques jours au printemps (Figure 35).

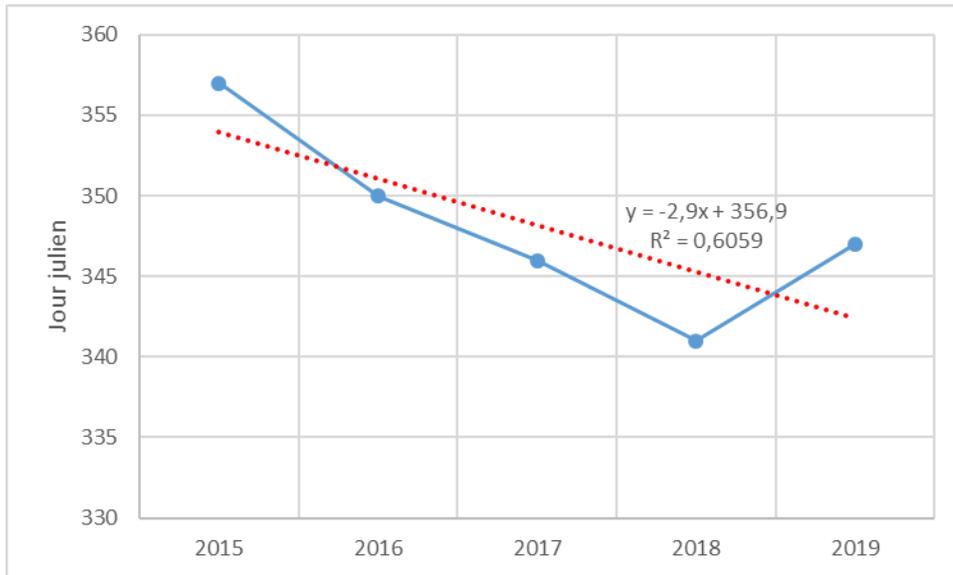


Figure 34 Variation de la date de mise en place du couvert de glace permanent à Kuujjuarapik dans le secteur de l'infrastructure maritime depuis 2015

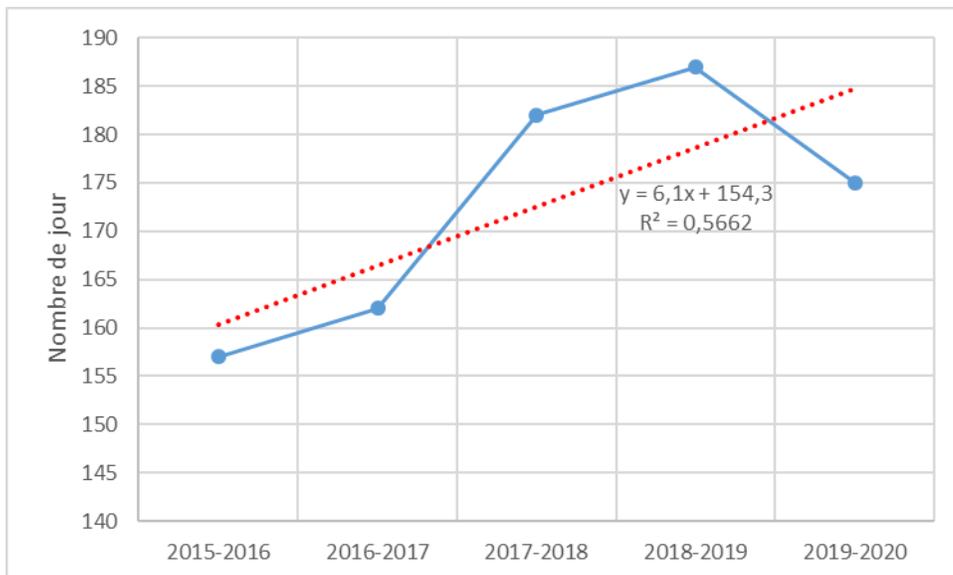


Figure 35 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Kuujjuarapik dans le secteur de l'infrastructure maritime depuis 2015

2.1.2 Site de l'île Gillis

La description du régime des glaces pour le site de l'île Gillis situé à environ 8 km au nord-ouest du village de Kuujjuarapik repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2017 et sur les images satellitaires Landsat-8 et Sentinel-2 d'avril 2013 à décembre 2020. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La section 1.3.1.1.1 décrit l'emplacement des deux caméras sur l'île Gillis et montrent la vue offerte par les caméras. L'interprétation des photographies des deux sites à Kuujjuarapik, soit les sites de l'infrastructure maritime et celui sur l'île Gillis, a été faite indépendamment l'une de l'autre en raison de la dynamique différente des deux milieux (côtier et large) et de l'absence de chevauchement ou de contiguïté entre les zones surveillées.

2.1.2.1 Hiver 2019-2020

Tel que mentionné dans le rapport technique no. 4 (Bernier et al., 2021), suite aux bris observés en 2019, la caméra visant le site de mouillage de l'ADCP n'était plus alimentée que par des piles AA. Cela avait bien fonctionné jusqu'à l'entretien 2019 et aurait pu se poursuivre jusqu'à l'entretien 2020. Cependant, la caméra a cessé de fonctionner le 29 septembre 2019. La raison de cet arrêt est inconnue. Il est cependant possible que les caméras aient été manipulées ce qui aurait eu pour effet de déconnecter une ou des piles et de couper l'alimentation. De plus, des signes de vandalisme ont été remarqués alors que les fils du panneau solaire et des caméras ont été arrachés sous le boîtier en aluminium. En raison de ces problèmes, les processus d'englacement et de fonte 2019-2020 ont été observés uniquement par l'entremise des photographies de la caméra 2 orientée vers l'île Bill of Portland (Figure 3).

La région couverte par les caméras semble peu profonde et encline à beaucoup de turbulence. Durant les mois d'octobre à décembre, plusieurs tempêtes ont été observées avec des vagues venant déferler sur la pointe de l'île Gillis. Les vents les plus forts mesurés qui ont pu être observés par les caméras l'ont été les 8 décembre 2019 et 15 novembre 2019 (Figure 36) alors qu'un grand frais de l'ouest et un vent frais du nord-ouest ont soufflés sur le secteur.

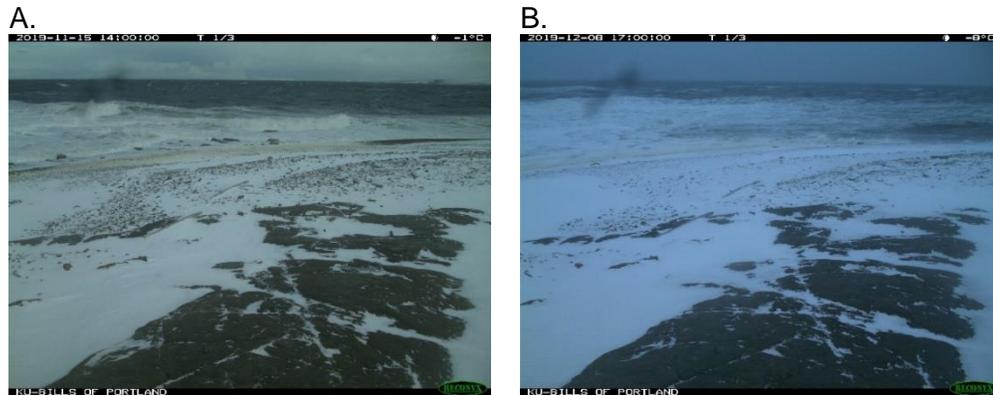


Figure 36 Épisodes de vents observés à proximité de l'île Gillis à l'automne 2019 (15 novembre 2019, 8 décembre 2019)

En 2019, les premières observations de glace sont survenues le 4 décembre alors que du sorbet était visible pendant qu'une légère brise soufflait du sud-sud-est. Pendant les jours suivants, une brise sans direction particulière soufflait et la mer agitée ne présentait pas de signe de glace. Le 8 décembre, tel que mentionné précédemment, le vent a tourné à l'ouest et un grand frais a également contribué à l'agitation de la mer qui s'est poursuivie les 9 et 10 décembre. Du 11 au 14 décembre, l'objectif de la caméra était embué si bien que le 15 décembre, le secteur est apparu dans un état avancé d'englacement, du nilas et de la jeune glace étant visible (Figure 37-A). Le lendemain, la jeune glace semblait avoir été détruite et apparaissait sous forme de sarrasin, accompagné de nilas (Figure 37-B). De la glace sous plusieurs formes sera visible les 2 journées suivantes. Le 19 décembre, une jolie brise du nord-nord-ouest poussera la glace vers l'île formant ainsi une banquise compacte devant les caméras (Figure 37-C). Le 22 décembre, le secteur fut libéré sous une jolie brise de l'est-sud-est laissant la place à la formation de nouvelle glace (Figure 37-D). Le 24 décembre, un vent du nord-ouest ramène des floes de jeune glace (Figure 37-E). Cette glace se déplacera pendant les deux jours suivants. Le 27 décembre, le vent passera à l'est-sud-est ce qui évacuera de nouveau la jeune glace. Cette séquence d'évènement se reproduira à quelques reprises jusqu'au 7 janvier 2020. Le 8 janvier à l'aube, le couvert est complet alors que le vent est passé au nord (Figure 37-F). Des mouvements sont néanmoins présents et visibles dans la banquise. Le 9 janvier, les mouvements cesseront et le couvert demeurera stable pour quelques semaines.

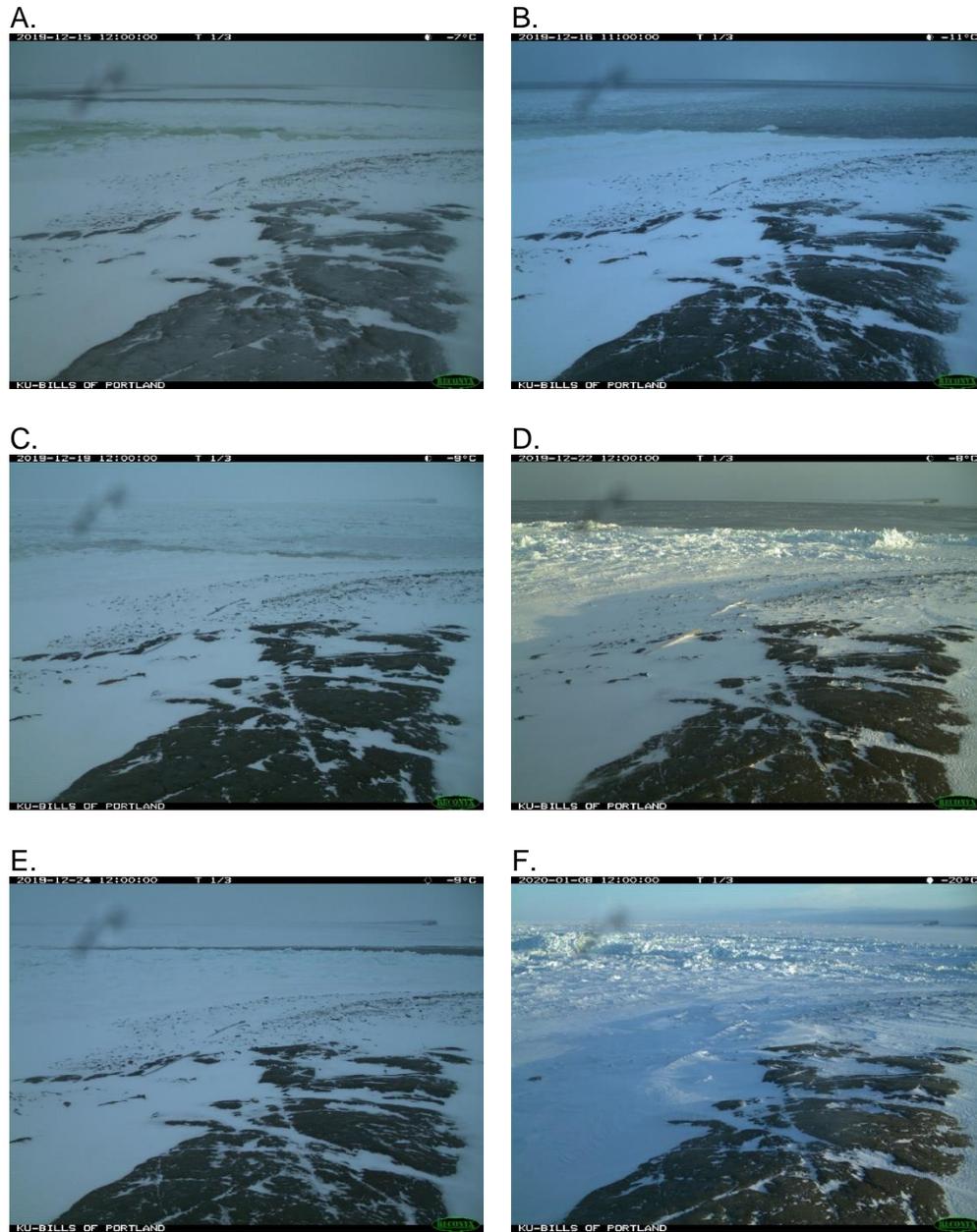


Figure 37 Évolution de l'englacement 2019 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- 15 décembre 2019, B- 16 décembre 2019, C- 19 décembre 2019, D- 22 décembre 2019, E- 24 décembre 2019, F- 8 janvier 2020)

Durant l'hiver 2020, le couvert de glace au large de l'île Gillis n'a pas été très stable. À la fin du mois de janvier et pendant la première semaine de février, une ouverture s'est produite dans le couvert de glace mais assez loin au nord-est. L'ouverture était peu visible sur les photos (Figure 38-A), il était plus aisé de l'observer sur l'imagerie satellitaire (Figure 39-A). Le 14 mars, un nouveau décrochement se produisit mais beaucoup plus près cette fois-ci (Figure 38-B). Il sera visible sur une image Sentinel-2 le 15 mars (Figure 39-B). L'ouverture se refermera en moins de deux jours. Un mois plus tard, le 20 avril, la même fracture sera exploitée et sous une jolie brise du sud-est, une ouverture se créera (Figure 38-C, Figure 39-C). Suite à cela, le couvert ne redeviendra que ponctuellement stable jusqu'à la fonte du couvert.

Tel que mentionné précédemment (section 2.1.1.1), durant l'hiver, les températures se sont adoucies de façon générale de sorte qu'au mois d'avril, le cumul des degrés-jours de gel était le plus bas des neuf dernières années (Figure 29). Cette situation peut avoir limité la croissance de la glace de même que la consolidation du couvert suite aux mouvements survenus durant l'hiver.

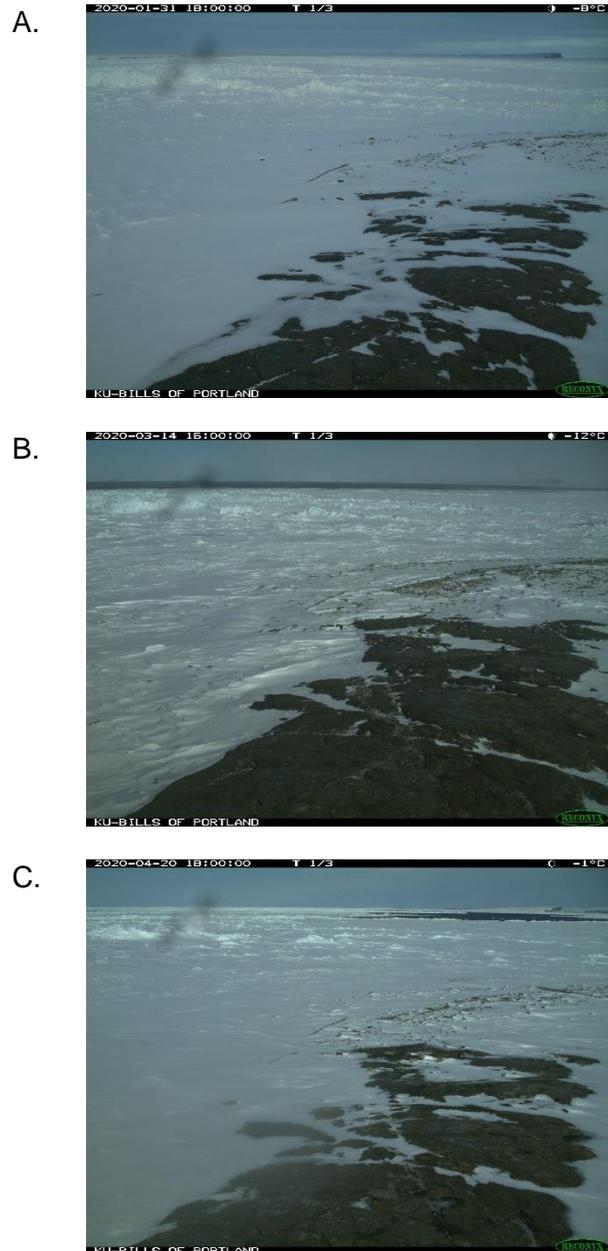


Figure 38 Évolution des conditions du couvert de glace durant l'hiver 2020 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- 31 janvier 2020, B- 14 mars 2020, C- 20 avril 2020)

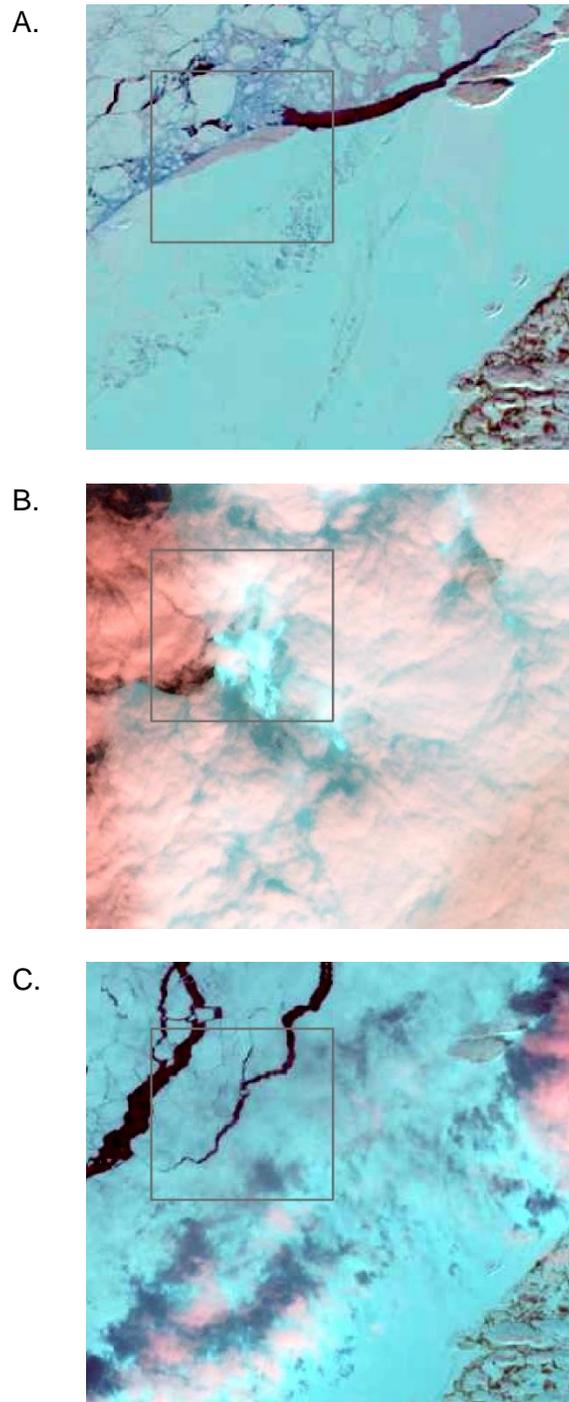


Figure 39 Images satellitaires acquises lors de l'hiver 2020 montrant le secteur au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A- Landsat-8, 31 janvier 2020; B- Sentinel-2, 15 mars 2020; C- Landsat-8, 20 avril 2020)

Les décrochements successifs survenus durant l'hiver ayant fragilisé le couvert, la date de début de la fonte est difficile à déterminer. Bien qu'il est peu probable que la fonte ait débuté lors du décrochement survenu le 20 avril alors que les températures moyennes journalières se situent aux environs de -12°C , le couvert peu stable qui fut observé les semaines suivantes ne permet pas de choisir objectivement une autre date. L'ouverture observée le 20 avril s'est couverte de jeune glace peu de temps après, soit le 22 avril alors que le vent était passé au nord. Le 27 avril, sous un vent du sud, la brèche s'ouvrira de nouveau (Figure 41-A). Elle demeurera ouverte pendant deux jours, jusqu'à ce que le vent passe à l'ouest le 29 avril. Durant les 10 jours suivant, des ouvertures seront visibles ou, en cas de fermeture, du mouvement sera visible dans le couvert déjà mobilisé (Figure 40-A). Le vent, généralement du nord, soufflera rarement plus qu'une petite brise durant cette période. Du 10 au 19 mai, le vent augmentera avec des épisodes de vent frais et il passera à l'ouest-sud-ouest. Ces changements auront pour effet de consolider le couvert et de le stabiliser (Figure 41-B). Le 20 mai, suite à une journée de vents en provenance du sud, le couvert est mobilisé de nouveau et une ouverture est créée (Figure 40-B). Le vent passant à l'ouest-nord-ouest le lendemain, l'ouverture se refermera et le couvert demeurera stable pendant 5 jours. Des températures moyennes atteignant les 10°C pendant cette période, des signes de dégradation du couvert seront de plus en plus visibles. Le 27 mai, avec une brise de l'est, la glace sera repoussée vers l'ouest. Durant les deux jours suivants, des glaces mobiles seront observées dans l'ouverture créée alors que le vent changera souvent de direction (Figure 40-C). Se fixant au nord-ouest, le vent poussera la glace qui viendra former une banquise compacte devant la caméra. À partir du 1^{er} juin, de plus en plus de couvert de glace sera graduellement mobilisé (Figure 41-C). Le 4 juin, une partie de la banquise côtière devant la caméra, fortement dégradée, se fracturera et se mettra en mouvement (Figure 40-D). Le lendemain, par une journée brumeuse de faible visibilité, peu de glaces en mouvement seront observées. Du 6 au 9 juin, avec une brise du nord, des floes en mouvements seront observés, ne formant jamais plus qu'une banquise très lâche. Le 10 juin, malgré la présence d'un peu de banquise côtière, le secteur sera en eau libre (Figure 40-E) et le demeurera jusqu'au 15 juin. Les vents n'ont alors pas de direction prédominante. Le 15 juin, une petite brise du nord poussera les glaces mobiles vers l'île formant une banquise compacte (Figure 40-F). La banquise redeviendra rapidement très lâche lorsque, le lendemain, le vent passera au sud-est. Les jours suivants, le secteur sera généralement en eau libre. Une banquise très lâche sera occasionnellement visible. Le 25 juin, des glaçons viendront s'échouer devant la caméra, le secteur sera en eau libre à ce moment (Figure 41-D). La dernière observation de glace aura lieu le 30 juin, après quoi le secteur sera en eau libre de glace pour l'été.

Au printemps 2019, les températures sont passées au-dessus de zéro assez tardivement à Kuujuarapik (Figure 32). La date d'apparition de l'eau ayant été placée tôt en raison de la réouverture d'une fracture, les faibles températures ont certainement contribué à étirer la durée de la période de glaces mobiles. En comparaison, la période de glaces mobiles a duré 71 jours en 2020 alors qu'elle avait duré 19 jours en 2018. Néanmoins, la durée de la période de présence de

glace (décembre à juin) a été pratiquement la même dans les deux cas, soit 209 jours en 2020 comparativement à 200 jours en 2018 (Tableau 13).

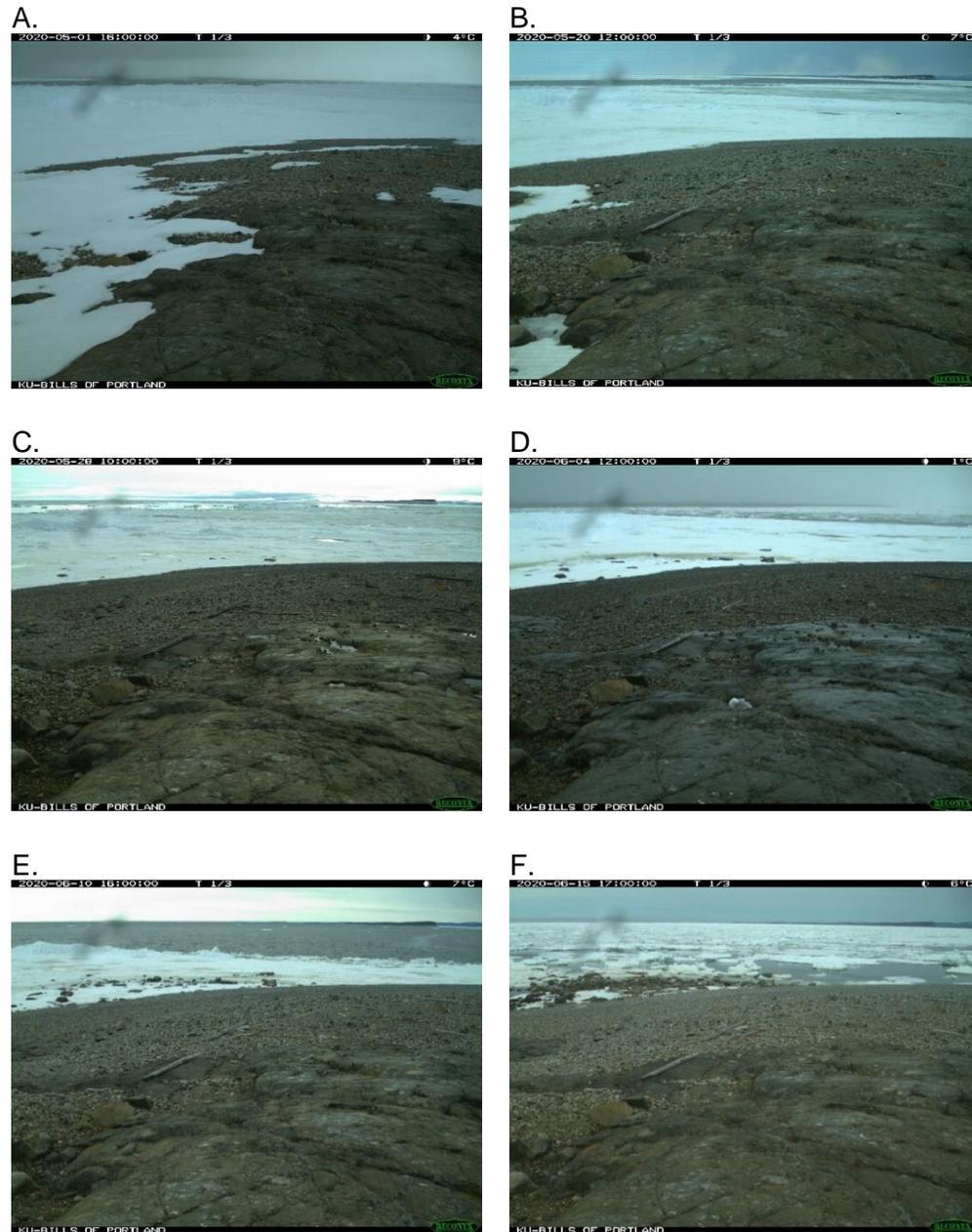


Figure 40 Évolution de la fonte 2020 au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik (A-1er mai 2020, B-20 mai 2020, C-28 mai 2020, D-4 juin 2020, E-12 juin 2020, F-15 juin 2020)

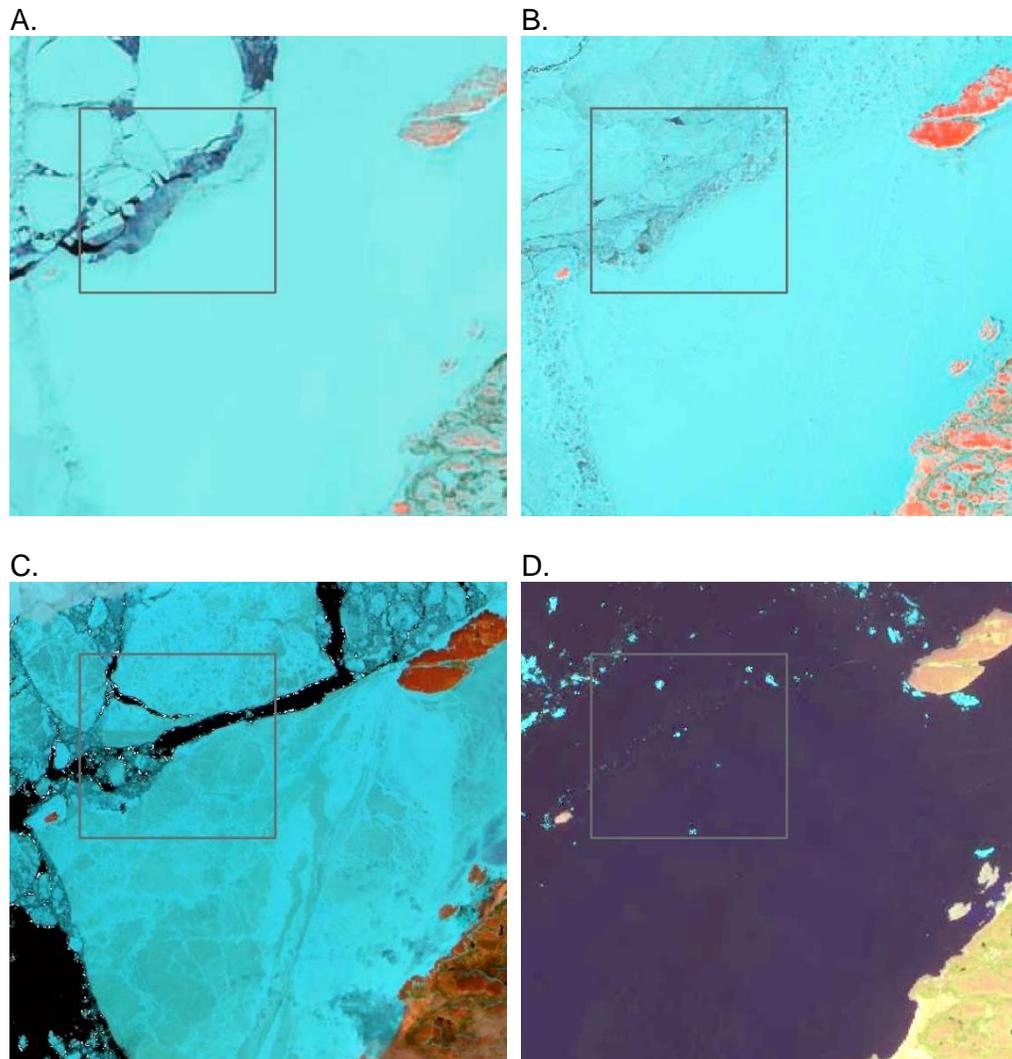


Figure 41 Images satellitaire montrant la baie d'Hudson devant Kuujuarapik lors de la fonte 2020 (A-Landsat-8, 27 avril 2020; B-Sentinel-2, 14 mai 2020; C- Sentinel-2, 1^{er} juin 2020;D- Sentinel-2, 28 juin 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 12 synthétise les observations faites au nord-est de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik depuis 2017. Le Tableau 13 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 12 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de l'île Gillis au large de Kuujjuarapik entre octobre 2017 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	12 déc.	29 nov.	4 déc.
Couvert de glace permanent	12 janv.	21 janv.	9 janv.
Première apparition d'eau	11 juin	8 juin	20 avril
Eau libre pour la première fois	23 juin	29 juin	10 juin
Dernières observations de glace	30 juin	30 juil.	30 juin

Tableau 13 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras situées sur l'île Gillis au large de Kuujjuarapik depuis octobre 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	31	53	36
Durée du couvert de glace permanent	150	138	102
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	12	21	51
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	7	31	20
Durée totale de présence de glace	200	243	209

2.1.2.2 Sommaire

La région couverte par les caméras situées sur l'île Gillis semble peu profonde et encline à beaucoup de turbulence. Durant les mois d'automne, plusieurs tempêtes ont été observées depuis 2017 avec des vagues venant déferler sur la pointe de l'île Gillis, parfois presque jusqu'aux caméras (Bernier et al., 2020). Malgré le fait que les vents dominants à cette période viennent du sud et de l'est (Figure 111), les tempêtes observées sont presque exclusivement le résultat de vents occidentaux.

L'englacement au nord-est de l'île Gillis est le résultat d'une suite répétée de production de glace laquelle est ensuite repoussée vers le large. Au début de décembre, du sorbet apparaît généralement par temps calme. Rendu à la mi-décembre, la nouvelle glace s'est transformée en nilas et en jeune glace. Le secteur est également alimenté en glace du large par des vents de l'ouest. Lorsque le vent passe au sud ou à l'est, la glace est repoussée vers le large et la production de nouvelle glace débute à nouveau. Ce phénomène peut se produire à plusieurs reprises. Les vents du nord peuvent également pousser la glace sur les berges et former des amoncellements de glace. Le secteur observé étant exposé pratiquement de tous les côtés, la glace y demeure mobile plus tardivement et ce n'est que vers la mi-janvier que le couvert se fixe pour l'hiver. Durant l'hiver, des mouvements et des décrochements de la banquise peuvent survenir à quelques reprises. Ceux-ci surviennent principalement au nord et à l'ouest de l'île. Le secteur à l'est situé entre l'île Gillis, l'île Bill of Portland et le village de Kuujjuarapik demeure généralement épargné par ces décrochements. Lors de la fonte, les fractures apparues durant l'hiver sont souvent à l'origine de nouveaux décrochements. Dans les premiers jours de mouvement de glace, un vent du nord peut pousser les floes contre l'île et ainsi créer des hummocks de plusieurs mètres de haut, ce qui a été observé les deux ans où la caméra 1 était en fonction au moment de la fonte (Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). Lorsque la glace est mobilisée, des suites de mouvements similaires à ceux de l'englacement sont observés : les vents du nord et de l'ouest poussent la glace du large vers l'île alors que les vents du sud la repoussent vers le large. La glace mobile peut être observée pendant plusieurs semaines. En raison de la date d'apparition de l'eau en 2020 qui est incertaine, il est difficile de faire ressortir des tendances à partir des observations recueillies.

Il est à noter que l'analyse des saisons de glace pour ce site a été réalisée lors des trois printemps les plus froids des 10 dernières années au Nunavik (Figure 33).

2.2 Description du régime des glaces à Umiujaq

La description du régime des glaces pour le site d'Umiujaq repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2009 mais avec une emphase plus importante sur la période 2017-2020. Il en va de même au niveau des images satellitaires. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La section 1.3.1.2.2 décrit l'emplacement des deux caméras installées à Umiujaq et montrent la vue offerte par celles-ci.

2.2.1 Hiver 2019-2020

À l'automne 2019, les premières observations de nouvelle glace sont survenues le 20 novembre (Figure 42-A), soit plusieurs jours plus tôt qu'à l'habitude (Tableau 14). La nouvelle glace s'est manifestée sous forme de sorbet formant une bande autour de l'infrastructure maritime alors que la température est légèrement sous zéro et la mer est calme et en période de mortes-eaux. La semaine suivante, la mer sera plus agitée sous l'effet de vents en provenance de l'ouest. La présence de sorbet sera plus fréquente à partir du 27 novembre mais en faible quantité. Cela se poursuivra pendant environ trois semaines (Figure 42-B, Figure 43-A), les températures diminuant progressivement durant cette période (Figure 42-C, Figure 43-B). Le 16 décembre, après quelques jours où la température moyenne oscillait entre -15°C et -20°C , la glace est passée à un autre stade alors que du nilas et de la jeune glace étaient visibles, formant une banquise très serrée (Figure 42-D). La banquise se consolidera dans les jours suivants et les ouvertures se couvriront de glace. Le 21 décembre, le couvert était complet et stable pour l'hiver (Figure 43-C).

La température à l'automne 2019 a évolué autour de la moyenne des neuf années précédentes. Les températures à partir de la 2^e semaine de novembre ont été un peu plus froides que les années précédentes mais elles se sont réchauffées ensuite jusqu'au début décembre (Figure 44). Les températures se sont ensuite maintenues autour de la moyenne pour 2 semaines puis elles ont été plus froides les deux dernières semaines de décembre. Durant l'hiver, les températures se sont adoucies légèrement à la fin janvier, début février. Suite à cet épisode, les températures ont suivi les tendances des années précédentes jusqu'à la fin mars avant de s'adoucir légèrement (Figure 45). À partir de ce moment, les DJG se sont éloignés de la moyenne et, au 1^{er} juin, ils étaient 6% plus bas que celle-ci.

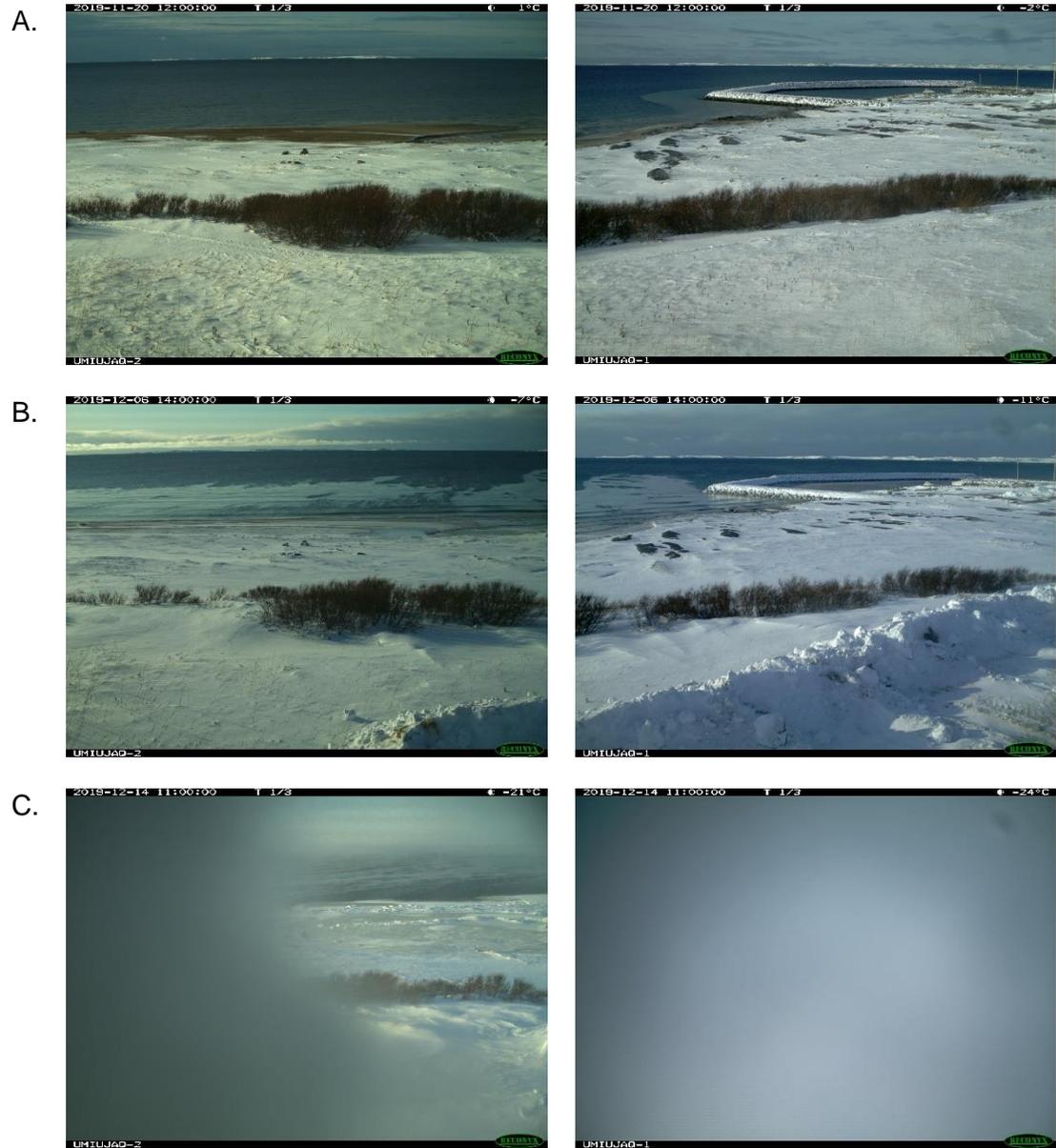




Figure 42 Évolution de l'englacement 2019 à Umiujaq (A-20 novembre 2019, B-6 décembre 2019, C-14 décembre 2019, D-16 décembre 2019)

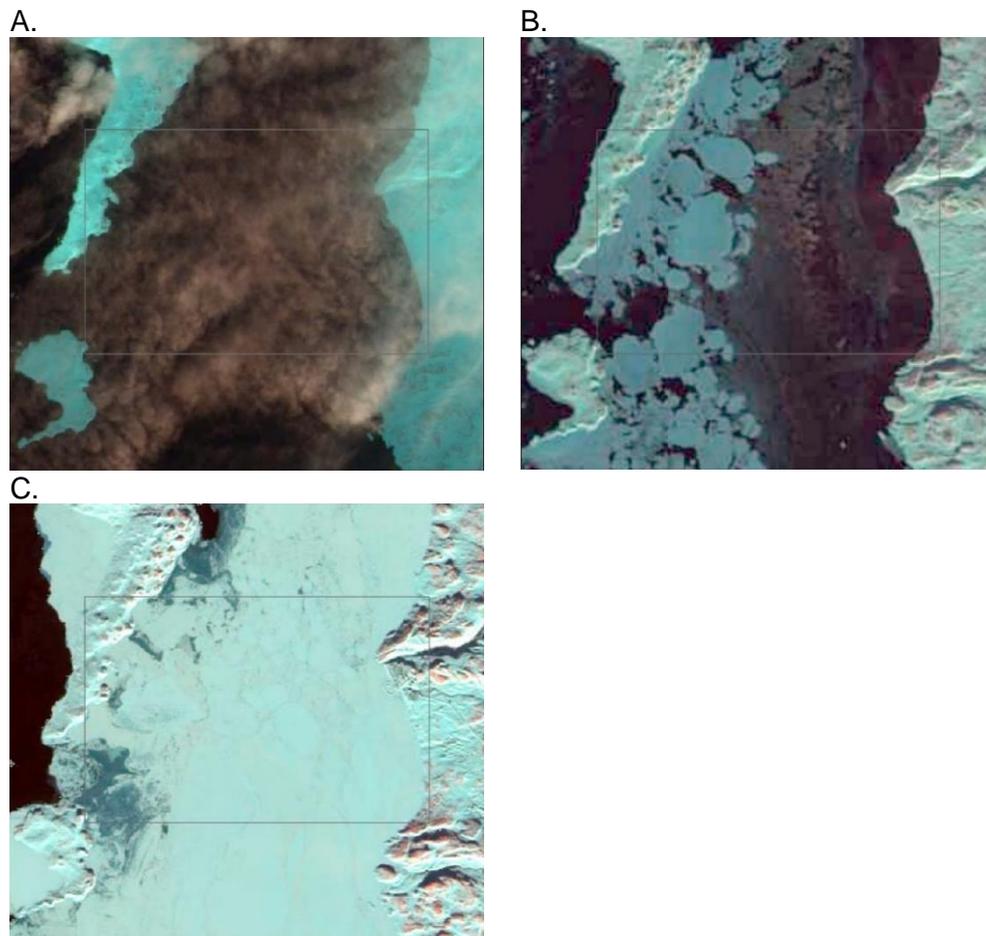


Figure 43 Images satellitaires acquises lors de l'englacement 2019 montrant le détroit de Nastapoka devant Umiujaq (A- Sentinel-2, 6 décembre 2019; B- Landsat-8, 14 décembre 2019; C- Sentinel-2, 29 décembre 2019)

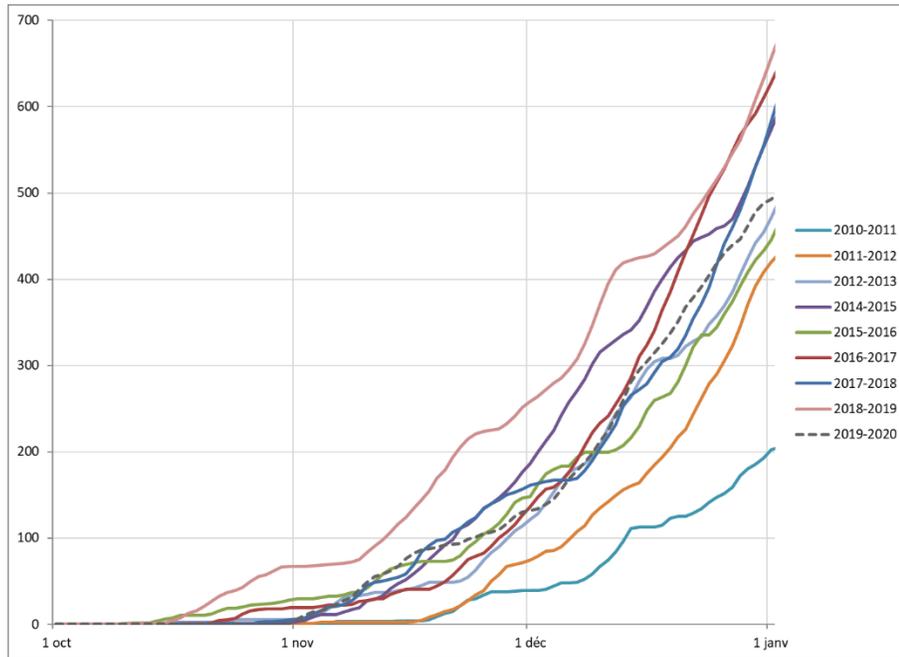


Figure 44 Degrés-jour de gel à Umiujaq du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2010-2020)

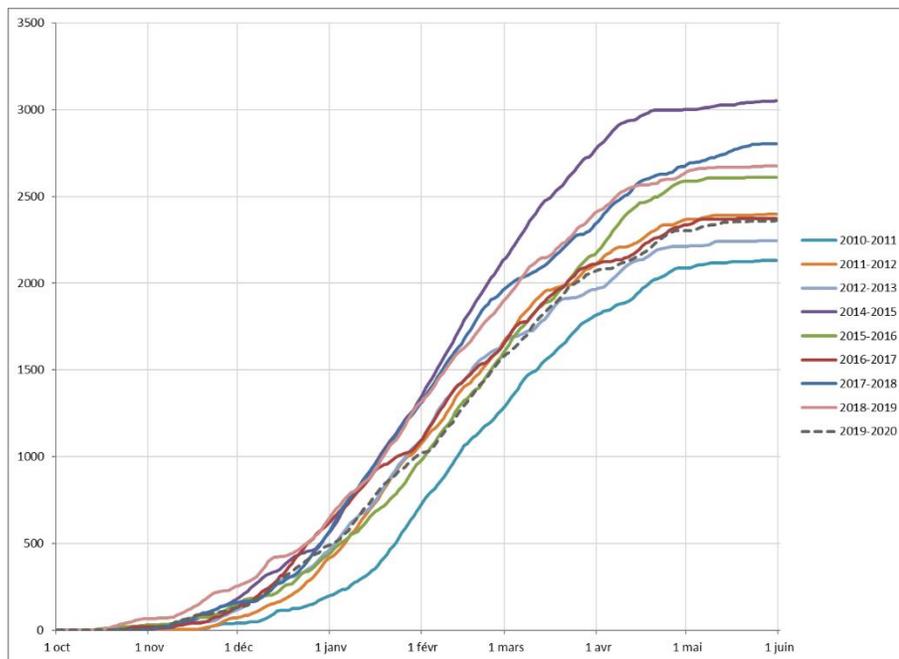


Figure 45 Degrés-jour de gel à Umiujaq lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2010-2020)

Durant l'hiver, la zone de marnage au sud de l'infrastructure maritime, particulièrement devant la caméra 1, a reçu, de façon ponctuelle mais récurrente, des arrivées d'eau (Figure 46). Ce secteur est l'exutoire d'un ruisseau débutant dans les cuestas au nord-est de l'aéroport. Contrairement à ce qui avait été avancé dans le rapport d'étape 3 (Bernier et al., 2020), il n'est pas inhabituel d'observer des arrivées d'eau dans ce secteur (Figure 47). La glace nouvellement créée demeure parfois exposée plusieurs jours, la neige étant balayée par le vent sur sa surface, ce qui rend difficile de déterminer la fréquence des apports d'eau.

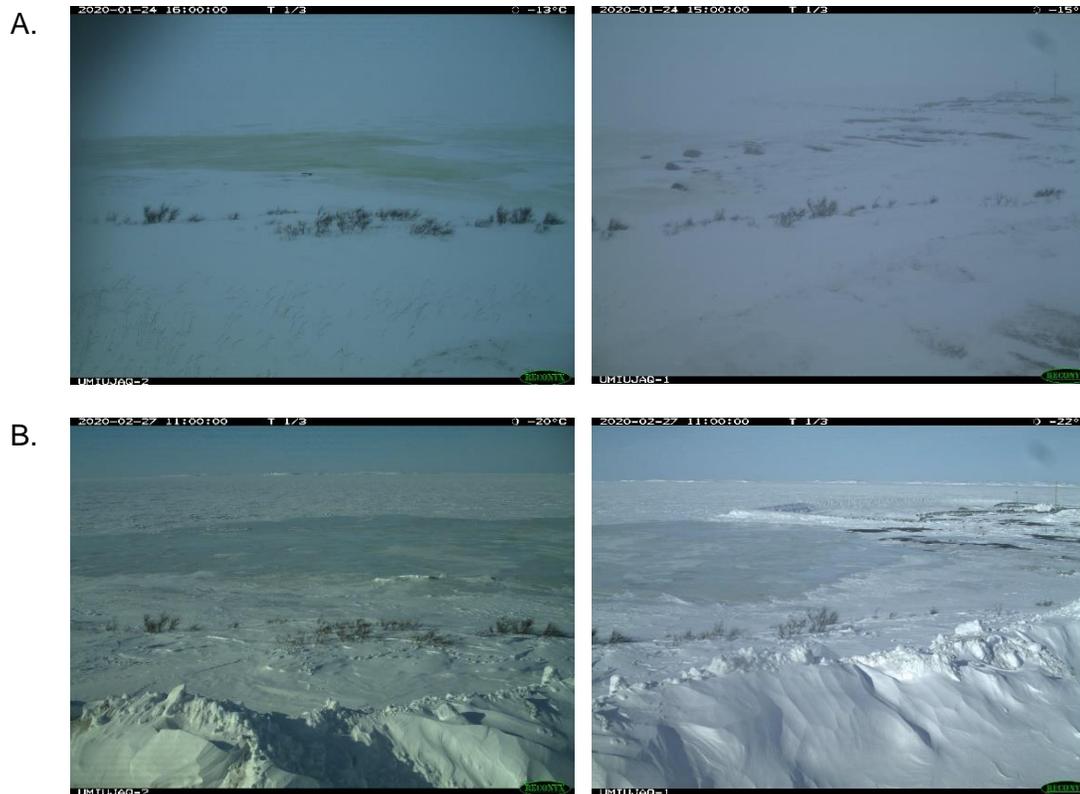


Figure 46 Observations hivernales à Umiujaq en 2020 (A- 24 janvier 2020, B- 27 février 2020)

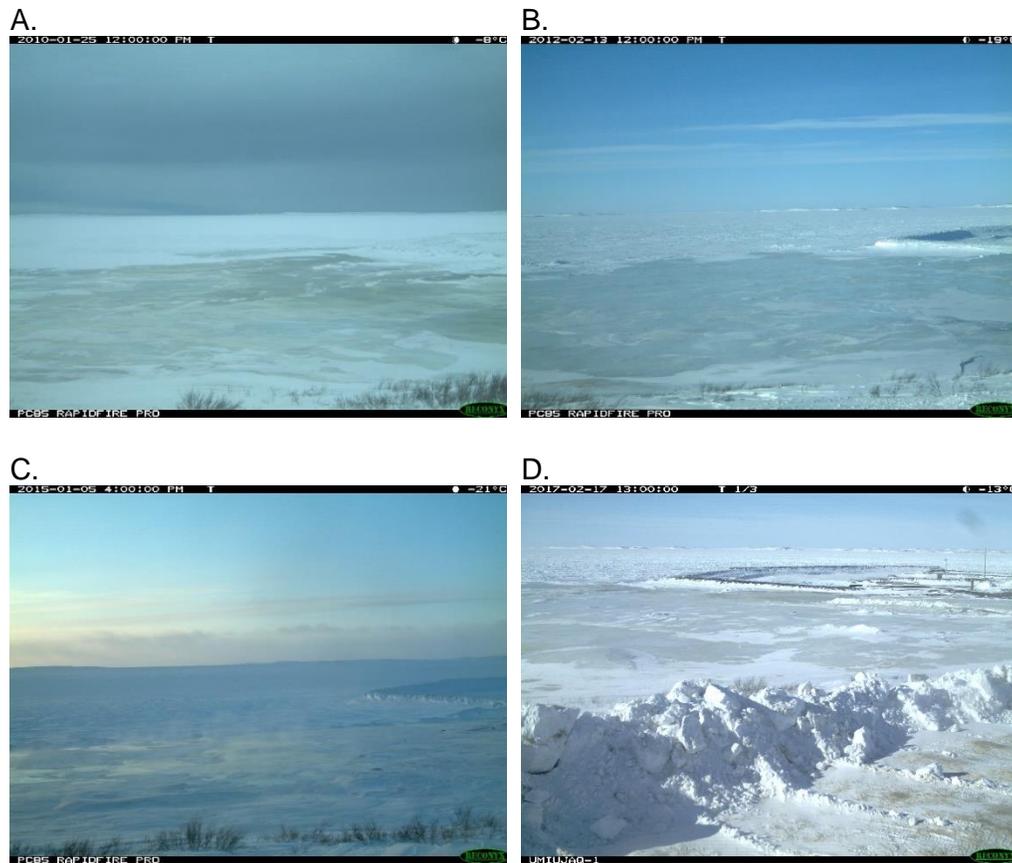


Figure 47 Observations hivernales à Umiujaq montrant la présence d'eau depuis 2010 (A- 25 janvier 2010, B- 13 février 2012, C- 5 janvier 2015, D- 17 février 2017)

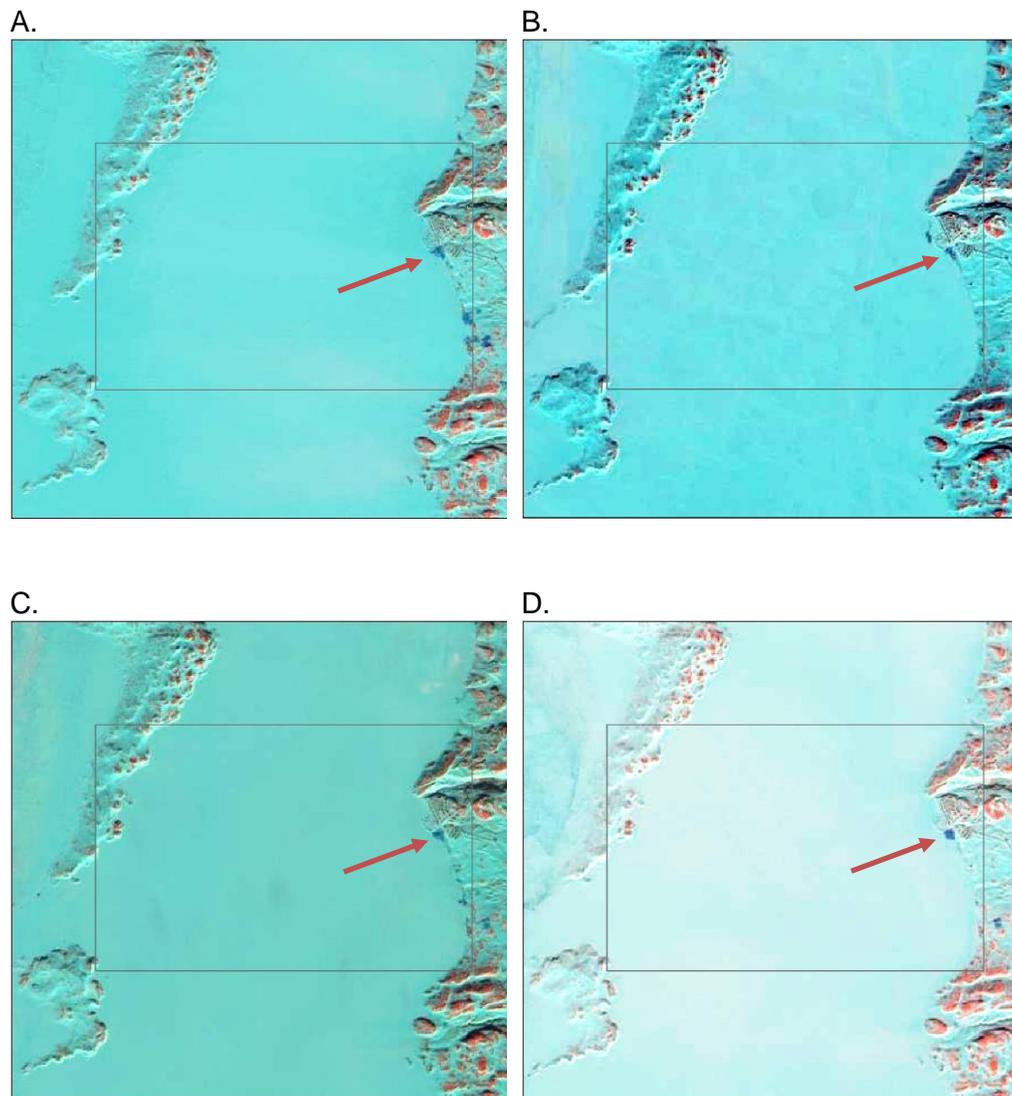


Figure 48 Images du satellite Sentinel-2 montrant la présence d'eau lors des quatre dernières années (A- 17 février 2017; B- 19 février 2018; C- 30 janvier 2019, D- 27 février 2020)

Lors du printemps 2020, la caméra 2 (orientée vers l'infrastructure maritime) a cessé de fonctionner temporairement du 28 avril au 1^{er} juin ce qui a empêché de voir les premiers signes de fonte. En effet, la première observation d'eau se fait généralement au nord du secteur, l'eau progressant ensuite vers le sud.

Les premiers signes de fonte furent observés à la fin avril alors que la température moyenne journalière a atteint les 5 degrés. Le 1^{er} mai, de l'eau est apparue sur la berge là où le ruisseau rejoint la zone de marnage. La situation se reproduira à quelques reprises jusqu'au 10 mai. À partir du 14 mai, la température augmentera, dépassant les 10°C. Le 16 mai, la fonte de la banquise laissera apparaître de l'eau en provenance du nord (Figure 49-A). Cela aurait probablement été observé quelques jours plus tôt sur la caméra 2, davantage orientée vers le nord (Figure 50-A). Le 17 mai, le couvert apparaîtra plutôt stable puis à partir du 18 mai, l'eau progressera vers le sud et vers l'ouest pendant une semaine sans toutefois faire décrocher la banquise côtière (Figure 49-B). Il n'y a pas de données de vent disponibles pour cette période. Le 26 mai, des floes en décomposition formeront une banquise serrée devant le village (Figure 49-C). Le 27 mai, les floes auront quittés et la fonte de la banquise se poursuivra jusqu'au lendemain. Le 28 mai, la banquise restante décrochera en fin de journée. Dès le lendemain, le secteur sera libre de glace. Un peu de floes dériveront dans les trois journées suivantes ne formant jamais plus qu'une banquise très lâche (Figure 49-D, Figure 50-B). Il s'en suivra quatre journées où le détroit sera en eau libre. Le 6 juin, des floes rempliront de nouveau le détroit et formeront une banquise serrée (Figure 49-E). Des glaçons seront poussés sur la berge et s'échoueront dans la zone intertidale. Ils y demeureront quelques jours puis le 12 juin, le secteur sera en eau libre de même que l'infrastructure maritime, libre de glace depuis la veille. Durant les 11 jours suivants, une faible quantité de glace sera observée dans le secteur, ne formant encore une fois jamais plus qu'une banquise très lâche (Figure 50-C). Ce n'est que le 25 juin que le détroit deviendra en eau libre de glace pour l'été.

Au printemps 2019, les températures sont passées au-dessus de zéro assez tardivement à Umiujaq et elles sont demeurées froides jusqu'à la mi-juin (Figure 51). À ce moment, les DJF étaient 43% plus bas que la moyenne. Malgré cela, les températures plus douces durant l'hiver ont certainement contribué à une fonte plus rapide et plus hâtive du couvert de glace. À partir de la mi-juin, les températures ont considérablement augmenté et elles sont demeurées plus chaudes que la moyenne des années précédentes, soit environ 3°C par jour, jusqu'à la fin de l'été (Figure 52). Au 1^{er} septembre, les DJF étaient 17% plus hauts que la moyenne.

A.



B.



C.



D.



E.



Figure 49 Évolution de la fonte 2020 à Umiujaq (A- 16 mai 2020, B- 25 mai 2020, C- 26 mai 2020, D- 1^{er} juin 2020, E- 6 juin 2020)

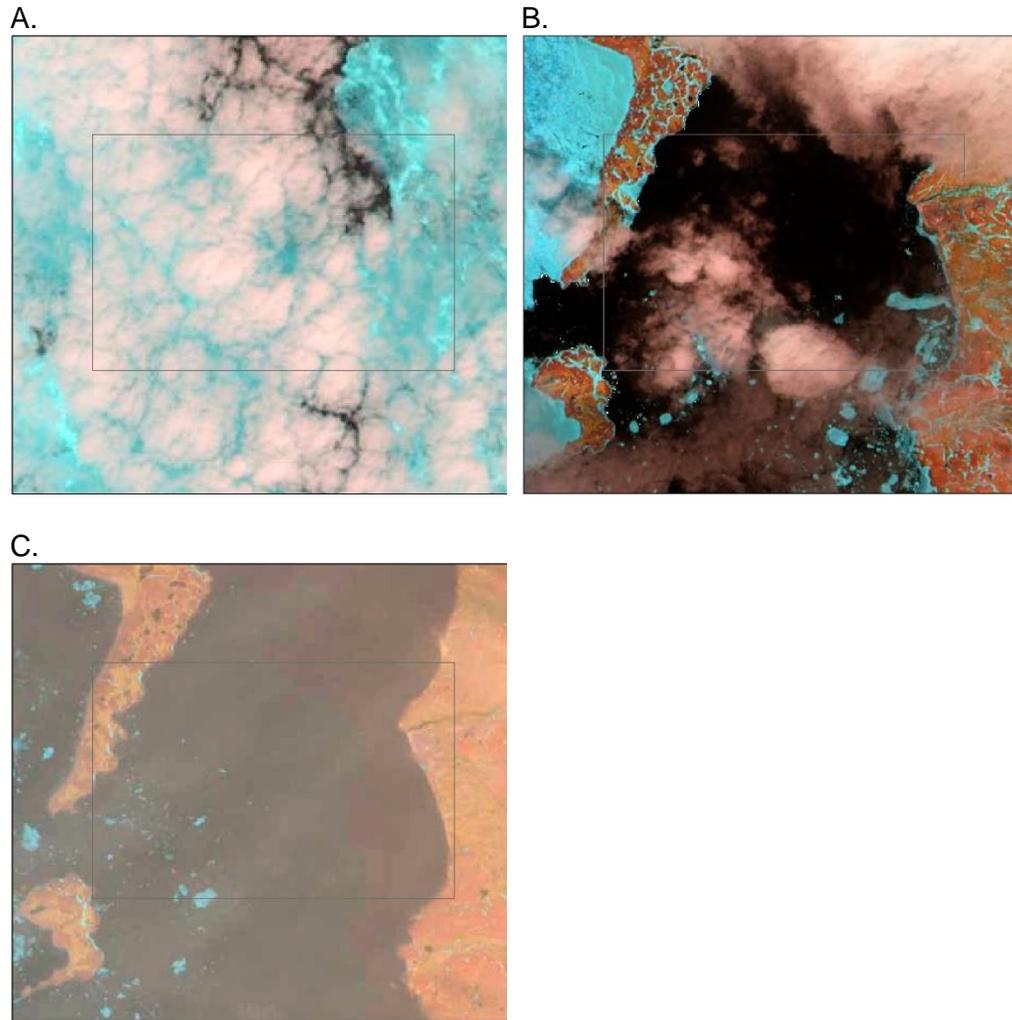


Figure 50 Images satellitaire montrant le détroit de Nastapoka devant Umiujaq lors de la fonte 2020 (A- Landsat-8, 13 mai 2020; B- Sentinel-2, 1^{er} juin 2020; C- Sentinel-2, 21 juin 2020)

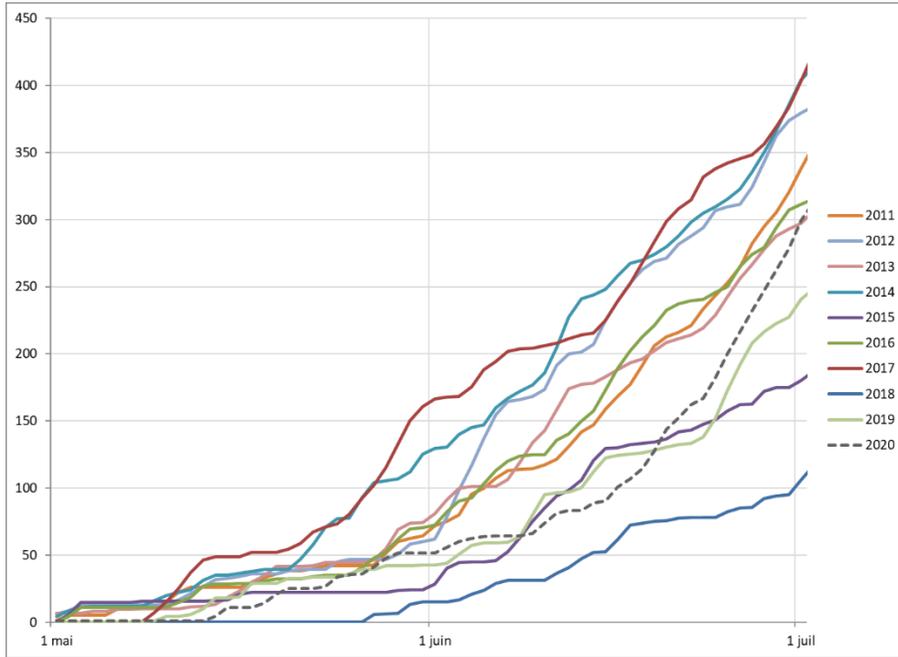


Figure 51 Degrés-jour de fonte à Umiujaq du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2011 à 2020)

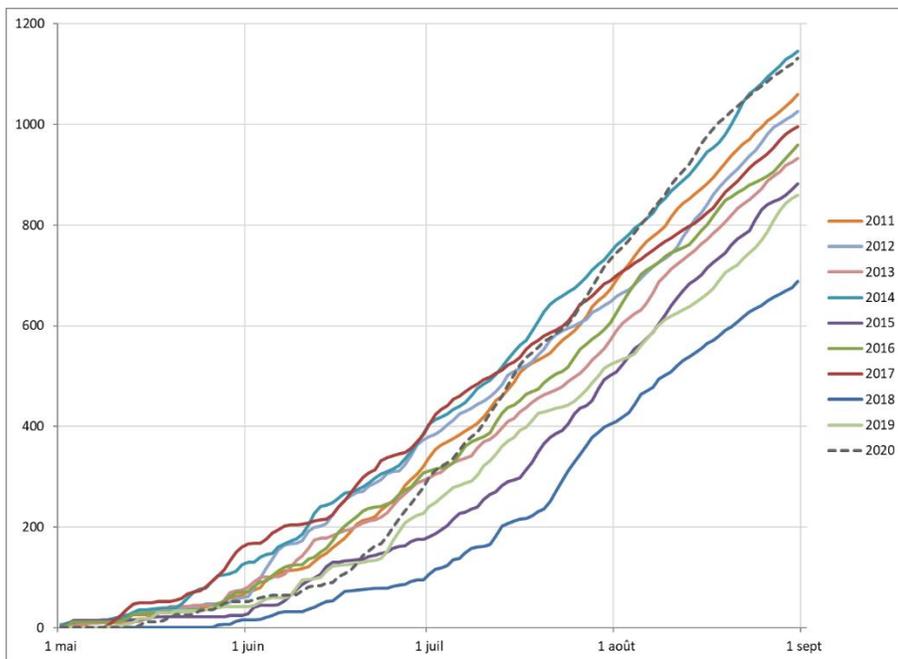


Figure 52 Degrés-jour de fonte à Umiujaq du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2011 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 14 synthétise les observations faites au large d'Umiujaq depuis 2016. Le Tableau 15 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 14 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Umiujaq entre octobre 2016 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	29 nov.	10 déc.	30 nov.	20 nov.
Couvert de glace permanent	19 déc.	24 déc.	10 déc.	21 déc.
Première apparition d'eau	27 mai	12 juin	19 mai	16 mai
Eau libre pour la première fois	1 juin	1 juil.	9 juin	29 mai
Dernières observations de glace	16 juin	12 juil.	3 août	24 juin

Tableau 15 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Umiujaq depuis octobre 2016

Stade d'évolution du couvert de glace	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	20	14	10	31
Durée du couvert de glace permanent	159	170	160	147
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	5	19	21	13
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	15	11	55	25
Durée totale de présence de glace	199	214	246	216

2.2.2 Sommaire

À Umiujaq, les premiers signes de nouvelles glaces surviennent vers le début décembre, généralement en période de mortes-eaux. L'englacement dure en moyenne une vingtaine de jours et le couvert se fixe aux environs de 370-380 DJG ($\sim \pm 1$ journée). La glace est peu mobile lors de sa mise en place, la nouvelle glace se transformant en nilas puis en jeune glace. Une fois la jeune glace présente, des mouvements, généralement est-ouest, sont parfois observés mais sans grande intensité et les floes n'ont pas tendance à se fracturer. De ce fait, lorsque le couvert devient complet, il est généralement assez lisse et peu de

crêtes de pression sont visibles. Lors de l'englacement, et de l'automne en général, les vents dominants proviennent de l'est et c'est aussi de cette direction que proviennent les vents les plus forts (53% des vitesses de vent > 50 km/h proviennent de l'est, 18% surviennent en décembre).

Durant l'hiver, le couvert demeure stable entre la côte et les îles Nastapoka. Des arrivées ponctuelles d'eau ont néanmoins été fréquemment observées devant les caméras, au sud de l'infrastructure maritime, à la sortie d'un petit ruisseau prenant son origine dans les cuestas à l'est du village. L'impact de ces arrivées d'eau est toutefois limité à une zone restreinte le long de la côte.

Au printemps, le couvert se dégrade sur place pendant quelques semaines avant d'être mobilisé. Malgré l'arrivée occasionnelle d'eau douce durant l'hiver devant les caméras, cette source ne contribue que très peu au processus de dégradation et n'est pas initiatrice de la fonte de la banquise. Pour Umiujaq, du moins le secteur devant le village, la perte de banquise se fait du nord vers le sud. L'eau de fonte des neiges provenant de la rivière Umiujaq, laquelle rejoint la mer juste au nord du village, joue probablement un rôle important dans la fonte de la banquise mais il n'est pas possible de le voir sur les photographies ou de le déterminer avec précision sur les images satellites. L'apparition d'eau survient généralement dans la deuxième moitié du mois de mai. Peu de journées avec des températures moyennes au-dessus de zéros sont nécessaires à l'apparition d'eau, généralement causée par la perte de banquise du côté nord. Moins de 40 DJF suffisent habituellement à l'apparition d'eau. En général, à la fin du mois de mai, toute la glace est devenue mobile. Les marées de faibles amplitudes présentes à Umiujaq ne jouent pas un rôle clair dans le processus de morcellement et de mobilisation de la banquise contrairement à ce qui avait été avancé dans Clerc, 2012. En effet, la banquise se dégrade graduellement et le décrochement de la banquise côtière, ou ce qu'il est resté à ce moment-là, survient autant en période de vives-eaux que de mortes-eaux. Au moment d'être mobilisée, la banquise est dans un état avancé de dégradation ce qui fait qu'elle se fracture rapidement pour former des floes de plus petites tailles.

Lors du printemps, tout comme à l'automne, les vents sont majoritairement de l'est. Les vents les plus forts (>50 km/h) surviennent généralement en avril (12% du total annuel) alors que la banquise est bien stable entre la côte et les îles Nastapoka. Par la suite, alors que la glace devient mobile vers la fin mai, la proportion de vents forts diminue pour atteindre 2% en juin. Les vents plus faibles combinés aux marées de faibles amplitudes limitent les risques de pression glacielle sur l'infrastructure. La faible profondeur de l'eau agit également comme une barrière devant l'infrastructure maritime de sorte que les floes, ou glaçons, de plus grande épaisseur y sont bloqués.

Les observations sur les conditions de glace entre 2017 et 2020 sont généralement cohérentes avec celles documentées par Clerc et al (2012) et Bernier et al (2017) dont voici des extraits:

« Pour la communauté d'Umiujaq, que ce soit lors de la fonte printanière ou de l'englacement, les conditions à risques pour l'infrastructure maritime sont généralement limitées et plutôt faibles. Les deux raisons principales sont probablement la faible amplitude des marées et la protection apportée par les îles Nastapoka, face au village. La mobilité des glaces est largement influencée par les vents et les courants littoraux.

Il n'y a pas de grands risques associés à l'englacement, mis à part un décrochement de la banquise avec des niveaux d'eau élevés ou des vents forts, conditions peu ou pas observées depuis l'automne 2009.

Les trois saisons de fonte suivies par les photos des caméras mettent en avant l'importance de la dégradation thermique, qui s'effectue graduellement et sans présenter de réel danger pour les brise-lames.

C'est en fait après le décrochement de la banquise que les brise-lames semblent le plus vulnérable à des impacts avec des morceaux de glace. Pendant la fonte, beaucoup de floes et de glaçons sont à la dérive, ayant réussi à passer le chapelet des îles Nastapoka ou en provenance du goulet du Lac Guillaume Delisle, plus au sud.

Si des niveaux d'eau élevés et des vents forts de l'ouest sont observés, le risque peut devenir accru pour l'infrastructure maritime. Rappelons qu'en plus le brise-lames d'Umiujaq n'est protégé que par un cordon de glace étroit et peu épais, conséquence de la faible amplitude des marées. »

« L'analyse des photographies a également permis de noter qu'en dehors de la saison de glace, l'automne semble être la période la plus venteuse, car de fortes vagues venant frapper l'infrastructure ont été observées. À l'inverse, la période printanière est particulièrement calme. »

L'acquisition d'une longue série de données à Umiujaq a également permis une analyse des variations interannuelles des dates d'observations de la glace et des durées des différents stades du couvert de glace. Alors que la durée des périodes d'englacement est très variable d'une année à l'autre sans tendance particulière, celle du couvert fixe montre une augmentation relativement significative de l'ordre de 30% au cours des 11 dernières années (Figure 53). Le temps nécessaire à l'évacuation de la glace lors de la fonte printanière montre également une tendance haussière (d'environ 100%) mais présente un coefficient de détermination très faible (Figure 54). Le temps nécessaire à la fonte complète de la glace suite à cette première évacuation est quant à lui très variable allant de 11 à 55 jours mais ne montre pas de tendance significative.

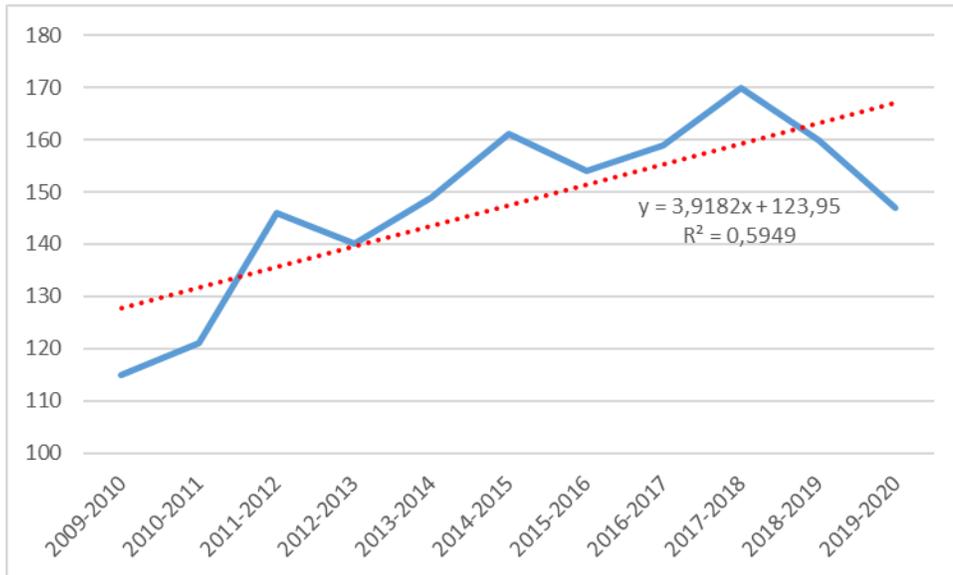


Figure 53 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Umiujaq depuis 2009

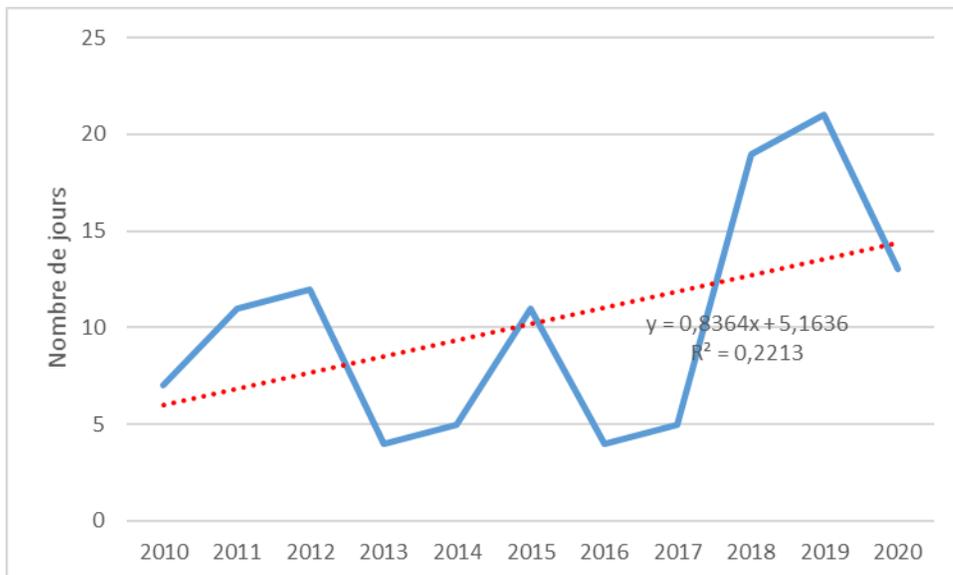


Figure 54 Variation de la durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière à Umiujaq depuis 2013

2.3 Description du régime des glaces à Ivujivik

La description du régime des glaces pour le site d'Ivujivik repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2015 mais avec une emphase plus importante sur la période 2017-2020. Il en va de même au niveau des images satellitaires. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La section 1.3.1.2.3 décrit l'emplacement des deux caméras installées à Ivujivik et montrent la vue offerte par celles-ci (Figure 13). Le comportement des glaces dans les deux zones surveillées par les caméras diffère beaucoup dans la mesure où la caméra 2, orientée vers le nord-ouest, couvre la passe Digges, une région où les forts courants de la baie d'Hudson et du détroit d'Hudson se rencontrent. Bien que le comportement de la glace dans la passe soit documenté par l'analyse des photographies, les dates mentionnées dans le Tableau 16 correspondent aux dates d'englacement et de fonte de la baie en face du village. Pour la caméra 2, les dates correspondent aux moments où les événements décrits ont franchi la limite gauche de la photographie. Ainsi, la première apparition de glace documentée correspond à la première fois où de la glace est visible vis-à-vis la bordure gauche de la photographie. Pour la caméra 1, il s'agit de la première fois où de la glace est visible dans la photographie.

2.3.1 Hiver 2019-2020

À l'automne 2019, peu de tempêtes de vent ont été observées. Les vitesses les plus élevées enregistrées, de l'ordre du coup de vent, ont été mesurées dans la nuit du 29 au 30 novembre et dans celle du 26 au 27 septembre. Dans le premier cas, de la buée sur les lentilles des caméras a rendu impossible l'observation des vagues résultantes dans la journée du 30 novembre. Dans le second cas, des vagues ont pu être observées le 27 septembre alors qu'un grand frais du sud soufflait toujours. Des vagues de grands frais ont également pu être observées en après-midi le 10 octobre 2020.

La première observation de glace s'est faite tardivement à l'automne 2019. Ce n'est que le 3 décembre que de la nouvelle glace sous forme de sorbet et de shuga fut observé sous une brise du sud (Figure 55-A). La température moyenne journalière venait alors de passer sous les -10°C depuis une journée. La nouvelle glace sera pratiquement absente les deux jours suivants avant de réapparaître sous forme de nilas le 6 décembre. La glace se présentera ensuite en quantité variable sous forme de shuga pour les 3 jours suivants. Le 9 décembre, la concentration de shuga augmentera avec des coups de vent de l'ouest. Dans la nuit du 9 au 10 décembre, les forts vents passeront au sud ce qui videra la baie. Dans la journée suivante, les vents du sud diminueront et la formation de nouvelle glace reprendra. Du sorbet et du nilas s'étendent alors dans toute la baie (Figure 55-B). Le 11 décembre, le sorbet s'est consolidé au

fond de la baie et progressera vers de la jeune glace (Figure 55-C). À l'entrée de la baie, de la jeune glace arrivera en provenance de la passe et formera une banquise très serrée. Elle se consolidera le 13 décembre. Des fractures apparaîtront jusqu'au 15 décembre au fond de la baie sous des vents frais du sud-ouest, lesquelles gèleront aussitôt (Figure 55-D). Suite à cela, le couvert sera complet pour l'hiver. Aucune image satellite ne sera utilisable (sans couvert nuageux) lors de la période d'englacement.

Les températures sont demeurées relativement chaudes au début de l'automne à Ivujivik (Figure 56). Ce n'est que vers la fin octobre que les températures moyennes journalières se sont maintenues sous le point de congélation. Par la suite, les températures ont suivi la moyenne des 10 années précédentes jusqu'à la fin mars où elles se sont adoucies légèrement (Figure 57). Le passage tardif des températures sous zéro a fait en sorte que les DJG cumulés de la mi-décembre à la fin février furent les plus bas des années analysées, à l'exception de l'année 2010-2011 qui fut exceptionnellement chaude.

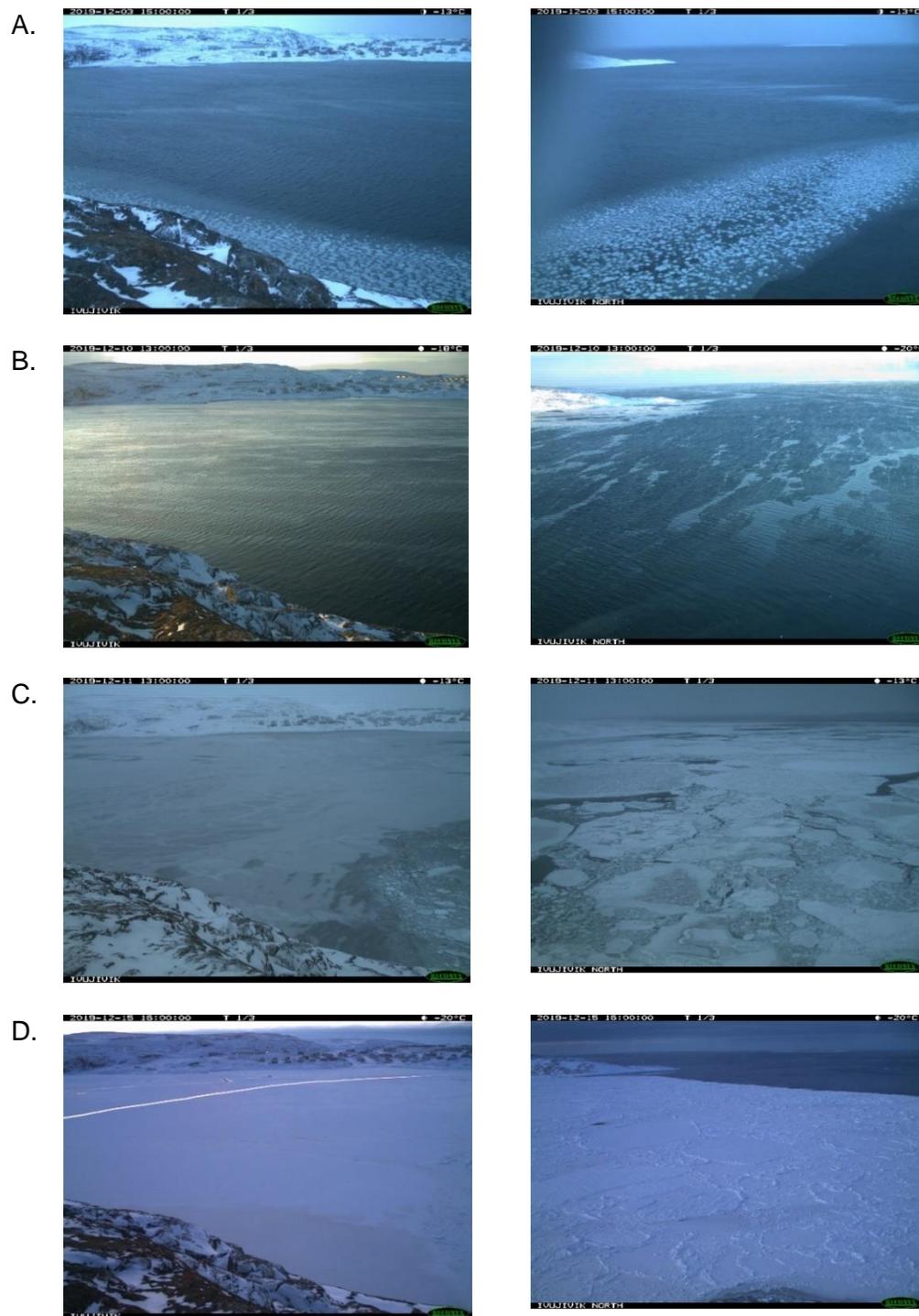


Figure 55 Évolution de l'englacement 2019 à Ivujivik (A-3 décembre 2019, B-10 décembre 2019, C-11 décembre 2019, D-15 décembre 2019)

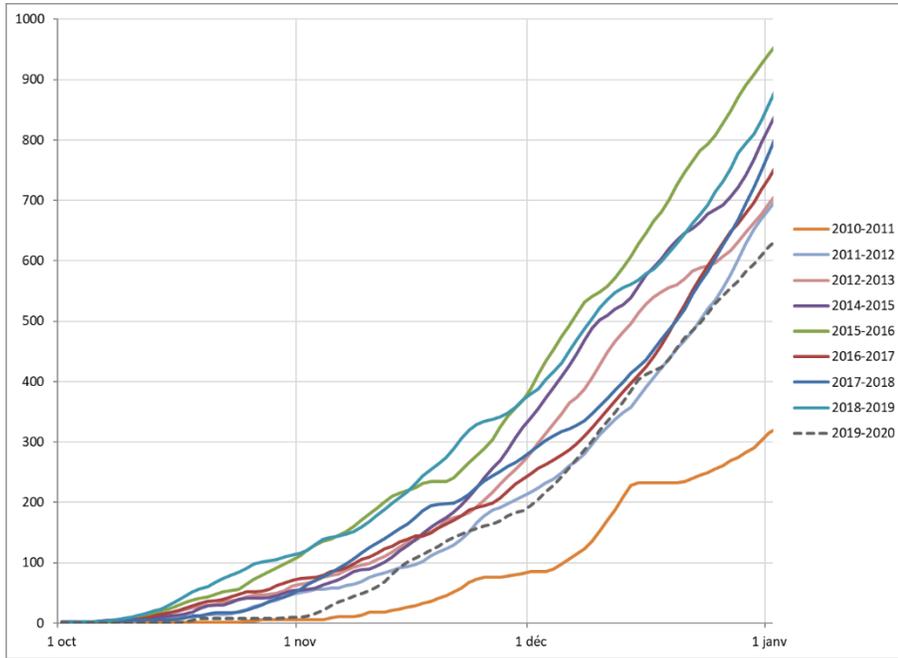


Figure 56 Degrés-jour de gel à Ivujivik du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2010-2020)

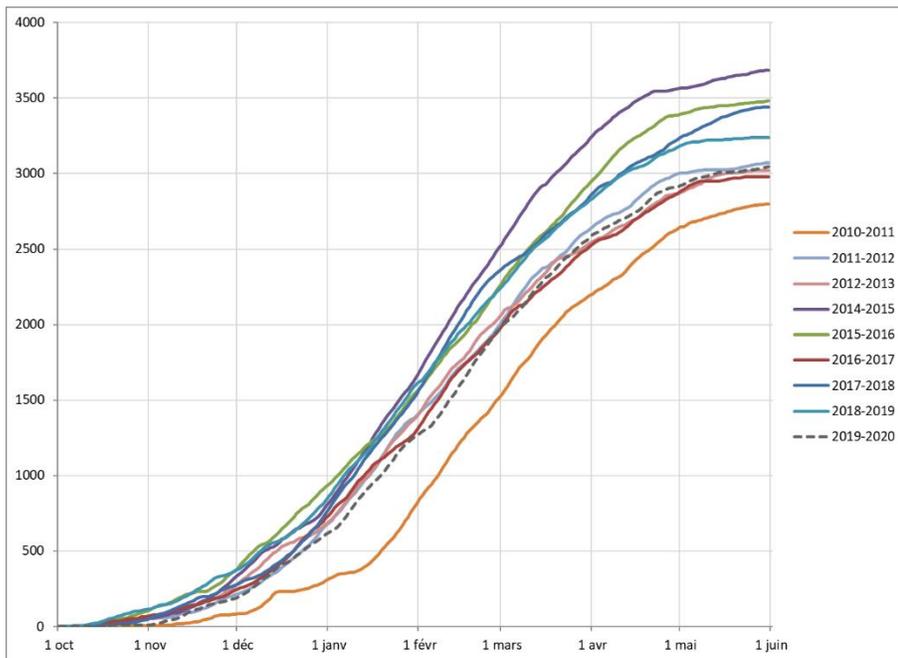


Figure 57 Degrés-jour de gel à Ivujivik lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2010-2020)

La glace demeurera mobile plusieurs semaines dans la passe Digges suite à l'englacement dans la baie d'Ivujivik. Ce n'est que le 9 janvier 2020 que le couvert apparaîtra complet, et immobile. Cela ne sera que de courte durée car une polynie apparaîtra dès la mi-janvier. À la fin janvier, le couvert décrochera à la limite de la banquise et la glace se remettra en mouvement (Figure 58-A). Lorsque le couvert se remettra en place, la polynie récurrente demeurera ouverte (Figure 58-B). Le 14 février, une fracture apparaîtra dans la banquise côtière et le couvert décrochera le lendemain (Figure 58-C). Une partie de la banquise se reconsolidera rapidement mais la glace de la passe demeurera mobile pendant près de trois semaines (Figure 58-D). Le 5 mars le couvert de la passe apparaîtra stable. Le 11 mars, la polynie réapparaîtra puis le couvert décrochera le lendemain et se mettra en mouvement. Lorsqu'il se stabilisera le 15 mars, une zone à la limite de la banquise demeurera en eau libre (Figure 58-E). Cela perdurera jusqu'à la 2^e semaine d'avril après quoi le couvert se remettra en mouvement pendant environ une semaine. À la fin avril, le couvert sera de nouveau mobilisé et demeurera mobile jusqu'à la fonte.



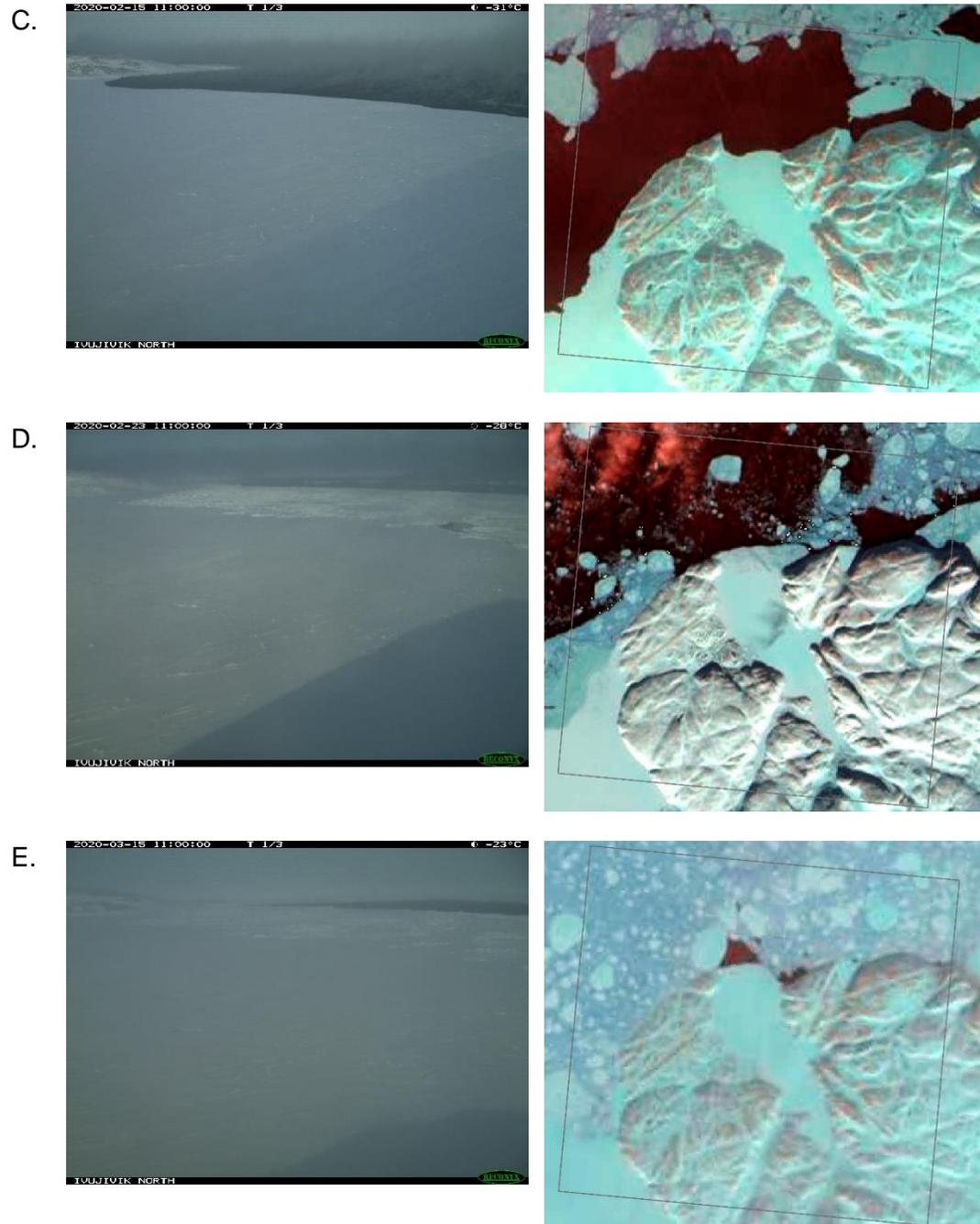


Figure 58 Observations hivernales à Ivujivik en 2020 (A- 30 janvier 2020, B- 10 février 2020, image Sentinel-2; C- 15 février 2020, image Sentinel-2; D- 23 février 2020, image Sentinel-2;E- 15 mars 2020, image Landsat-8)

Au printemps 2020, le 27 avril, la banquise côtière s'est fracturée en début de journée lors de la marée basse. La marée baissante de l'après-midi fera légèrement bouger le morceau de banquise fracturé. Il demeurera néanmoins stable jusqu'au 29 avril, date à laquelle il se décomposera et se mettra en mouvement sous une bonne brise du sud (Figure 59-A). L'ouverture se refermera dans la journée alors que le vent diminuera et passera au sud-ouest puis la baie demeurera stable pendant une semaine (Figure 60-A). Le 6 mai au matin, le résultat d'un nouveau décrochement sera visible, lequel aura emporté un peu plus de la banquise côtière (Figure 59-B). Encore une fois, l'ouverture se refermera dans la journée. Il s'en suivra une semaine où une banquise consolidée recouvrira la baie. Après une tempête de neige le 11 mai, de l'eau apparaîtra sur le couvert de glace un peu plus profondément dans la baie à la limite où la glace exogène consolidée avait rejoint la banquise formée de nilas lors de l'englacement. En fin d'après-midi le 14 mai, des mouvements seront observables à l'embouchure de la baie puis le 15 mai, une plus grande partie de la banquise sera mobilisée sous un vent frais du sud-est (Figure 59-C, Figure 60-B). La température de cette journée dépasse les 5°C. Dans les 10 jours suivants, la banquise reculera tranquillement alors que certaines journées, où les vents seront faibles, montreront beaucoup de glace en mouvement dans la baie. Le 25 mai, une grande quantité de glace exogène viendra se consolider dans la baie. Cette glace demeurera pratiquement immobile jusqu'au 2 juin puis sera remobilisée (Figure 59-D, Figure 60-C). Dans la semaine suivante, le couvert toujours intact pourra sur place, ne perdant que peu de superficie. Du 8 au 13 juin, la banquise reculera pour disparaître complètement de la vue des photos, à l'exception d'une légère bande devant l'infrastructure maritime. L'infrastructure maritime se découvrira le 17 juin. De gros radeaux en mouvement dans une banquise parfois très serrée, parfois serrée, seront visibles lors des deux jours suivants, puis seront évacués. Le 20 juin sera la première journée en eau libre. Cela se poursuivra le lendemain puis de la glace en quantité variable sera visible à partir du 22 juin, ne formant jamais plus qu'une banquise lâche (Figure 59-E, Figure 60-D). La quantité diminuera progressivement et la baie redeviendra en eau libre à partir du 2 juillet. Deux semaines supplémentaires seront nécessaires avant que la baie soit en eau libre de glace.

Les températures au-dessus du point de congélation se sont laissées attendre à Ivujivik au printemps 2020 (Figure 61). Après deux journées avec des moyennes journalières légèrement au-dessus de zéro à la mi-mai, ce n'est qu'un mois plus tard, soit à la mi-juin, que les températures se sont réchauffées pour être constamment supérieures à zéro. Toutefois, à partir de ce moment, les températures mesurées furent les plus hautes des 10 dernières années jusqu'au début août après quoi elles demeurèrent dans les trois années les plus chaudes jusqu'au 1^{er} septembre (Figure 62).

A.



B.



C.



D.





Figure 59 Évolution de la fonte 2020 à Iqaluit (A- 29 avril 2020, B- 6 mai 2020, C- 15 mai 2020, D- 3 juin 2020, E- 24 juin 2020)

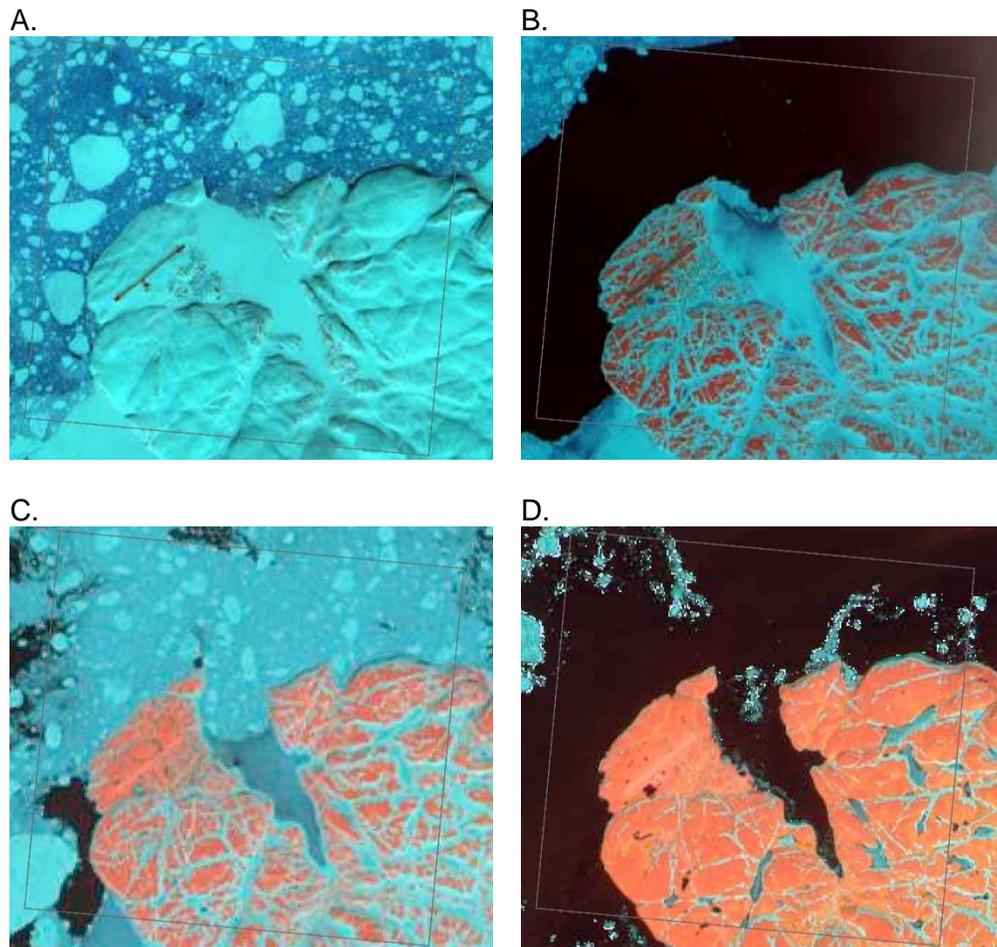


Figure 60 Images satellitaires montrant la baie d'Iqaluit et la passe Digges lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 30 avril 2020; B- Sentinel-2, 15 mai 2020; C- Landsat-8, 3 juin 2020; D- Sentinel-2, 24 juin 2020)

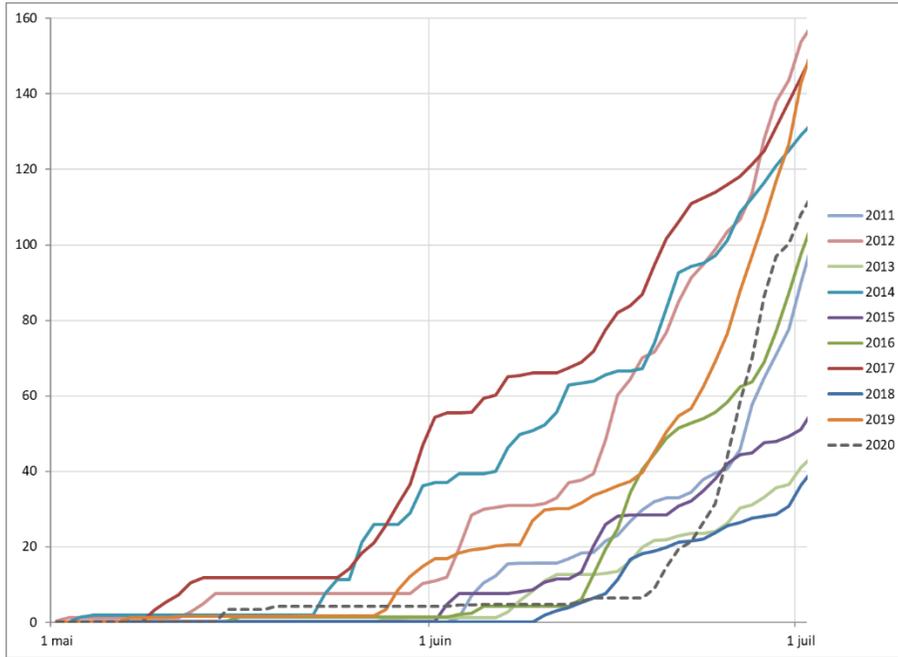


Figure 61 Degrés-jour de fonte à Ivujivik du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2011 à 2020)

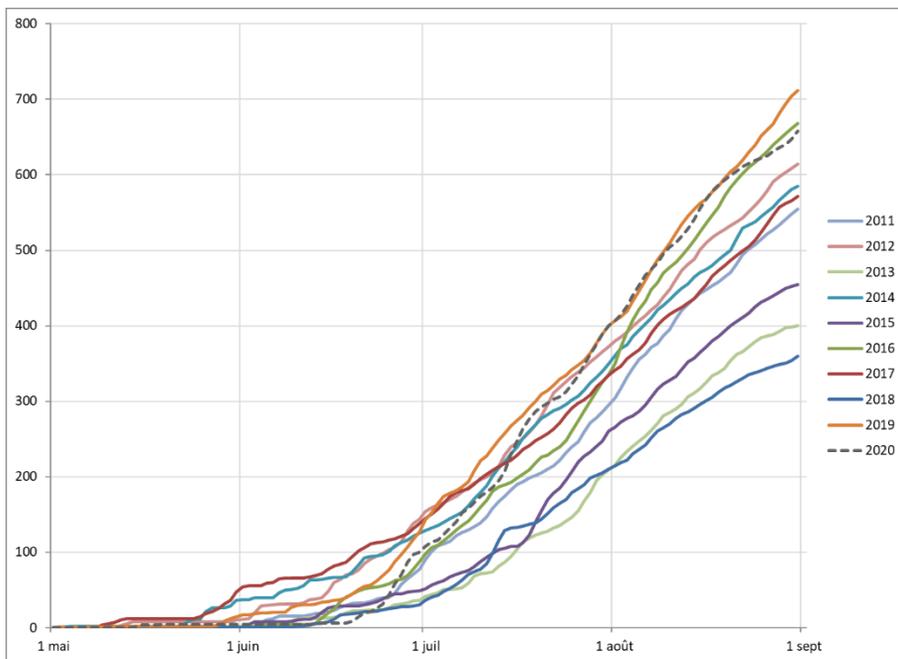


Figure 62 Degrés-jour de fonte à Ivujivik du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2011 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 16 synthétise les observations faites dans la baie d'Ivujivik depuis 2016. Le Tableau 17 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 16 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Ivujivik entre octobre 2015 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	10 nov.	30 nov.	26 nov.	18 nov.	3 déc.
Couvert de glace permanent	1 déc.	14 déc.	16 déc.	3 déc.	16 déc.
Première apparition d'eau	3 juin	25 mai	15 juin	8 mai	24 avril
Eau libre pour la première fois	18 juin	8 juin	13 juil.	9 juin	20 juin
Dernières observations de glace	10 juil.	8 juil.	13 août	1 juil.	14 juil.

Tableau 17 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Ivujivik depuis leur installation en 2015

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	21	14	20	19	13
Durée du couvert de glace permanent	185	162	181	156	133
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	15	14	28	32	54
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	22	30	31	22	24
Durée totale de présence de glace	243	220	260	229	224

2.3.2 Sommaire

Les premières observations de glace à Ivujivik surviennent généralement lors des deux dernières semaines de novembre. La nouvelle glace est alors souvent sous forme de shuga et de sorbet mais ce dernier est plus difficile à détecter sur les photographies. Les premières observations sont généralement annonciatrices d'arrivée massive de glaces exogènes. La mise en place du couvert de glace à Ivujivik est beaucoup dépendante de la direction des vents. En effet, la glace qui formera la banquise hivernale est généralement produite

dans la passe Digges puis poussée dans la baie d'Ivujivik par des vents du nord. À cette période, les vents dominants sont toutefois du sud-est (Figure 121), de même que les forts vents, ce qui retarde la mise en place finale du couvert. L'absence de vents du nord peut également retarder l'apparition de la première glace. La nouvelle glace est alors produite sur place, laquelle finira par épaissir et former la banquise côtière. Le couvert est habituellement stable à partir de la mi-décembre. 400 à 410 DJG sont généralement accumulés lorsque le couvert devient fixe (Figure 56).

Durant l'hiver, bien que les îles Digges et les autres îles de la passe du même nom offrent une protection et des ancrages permettant la formation d'une banquise côtière, le couvert dans la passe Digges ne se fixe que temporairement, dépassant rarement plus de six semaines. Pendant cette période, à l'embouchure de la baie, juste au nord de la pointe d'Ivujivik, une polynie d'environ 100 m par 50 m apparaît de façon temporaire mais récurrente. Cette polynie est un signe de la fragilité de la banquise à l'interface baie/passe. Elle est d'ailleurs impliquée dans les fractures survenant à l'intérieur de la baie. Lorsque le couvert se reconsolide plus tard en hiver, la polynie réapparaît généralement de nouveau. À partir de la mi-mars, le couvert est régulièrement mobile dans la passe jusqu'à la fonte.

Au printemps, la banquise à l'intérieur de la baie pourrie sur place pendant plusieurs semaines suite à l'augmentation des températures. Dans la passe, tel que mentionné plus haut, la glace devient mobile très tôt au printemps ou à la fin de l'hiver. Les vents dominants du nord-est à cette période (Figure 119) viennent constamment pousser les floes contre la banquise. Plus cette dernière perd de la résistance, plus les floes parviennent à pénétrer profondément dans la baie en fracturant la banquise. Lorsque la banquise côtière est suffisamment pourrie, les vents méridionaux et les marées peuvent suffire à fracturer et évacuer la glace. Ainsi, tout comme à l'englacement, la dégradation de la banquise est influencée par la provenance des vents. La date de la première observation d'eau est de plus en plus tôt à Ivujivik (Tableau 16). Toutefois, les dates d'évacuation des glaces et de la dernière observation de glace semblent assez constante de sorte que la durée de la période de glace mobile s'en trouve allongée. Les dates de formation du couvert étant également relativement constantes, la durée du couvert de glace permanent est d'autant plus réduite. Selon la tendance des cinq dernières années, la durée de la période entre la première apparition d'eau et l'évacuation (premier jour à l'eau libre) a augmenté de 300%, soit une augmentation de près de 40 jours (Figure 64). La durée du couvert de glace permanent a quant à elle diminué d'autant de jours (Figure 63).

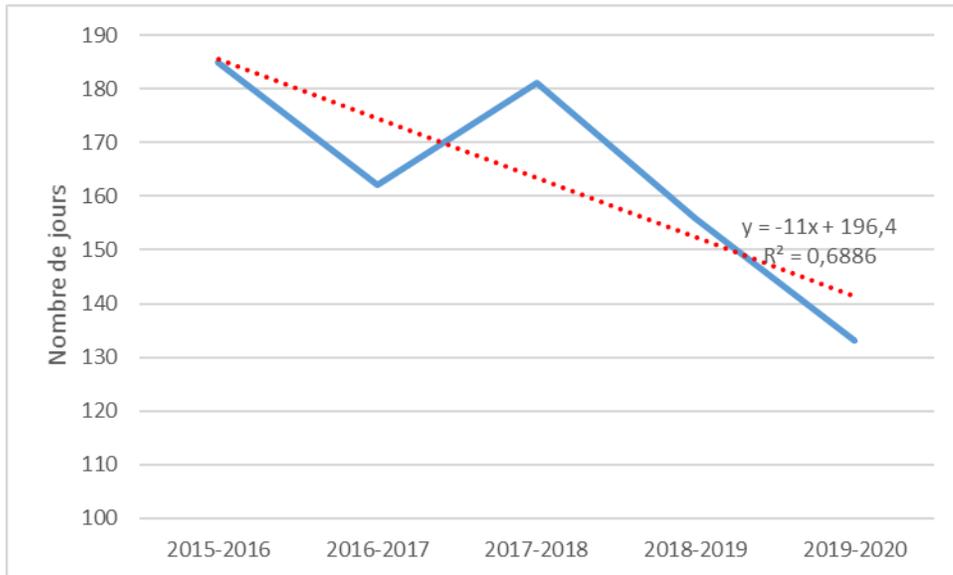


Figure 63 Variation de la durée du couvert de glace permanent à Ivujivik depuis 2015

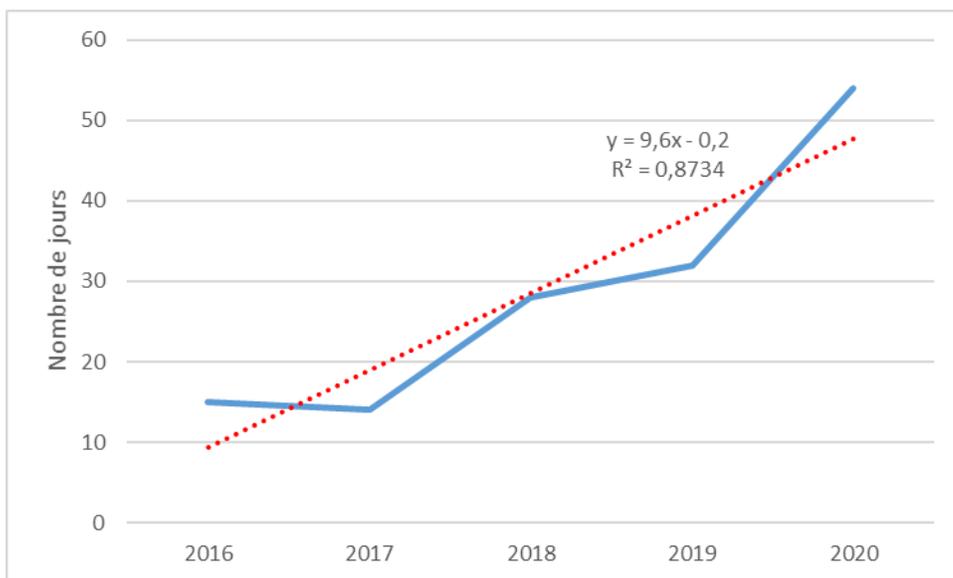


Figure 64 Variation de la durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière à Ivujivik depuis 2016

2.4 Description du régime des glaces à la Baie Déception

La description du régime des glaces pour le site de la Baie Déception repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2015 mais avec une emphase plus importante sur la période 2017-2020. Il en va de même au niveau des images satellitaires. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La section 1.3.1.2.4 décrit l'emplacement des caméras installées à la Baie Déception et montrent la vue offerte par celles-ci (Figure 13). Le comportement des glaces dans les deux zones surveillées par les caméras du projet diffère légèrement dans la mesure où les caméras au site 3, plus près de l'embouchure de la baie, montrent parfois des événements de la dynamique du détroit d'Hudson. Les différents sites ont néanmoins été considérés conjointement lors de l'analyse des photographies.

2.4.1 Hiver 2019-2020

À l'automne 2019, les premières observations de glace sont survenues vers le 13-14 novembre à l'ouest de Pointe Noire alors que les températures moyennes avaient chuté sous les -10°C . Du sorbet et du shuga étaient alors visibles malgré une lentille partiellement embuée (Figure 65-A). La même combinaison de nouvelle glace a été observée à quelque reprise dans les jours suivants (Figure 66). Environ une semaine plus tard, du sorbet était également visible un peu plus au sud dans la baie vis-à-vis l'île Moosehead. Les vents étaient alors très faibles et sans direction. Dans la semaine suivante, les vents sont demeurés faibles et les températures moyennes ont augmentées pour évoluer entre -5°C et 0°C . De la nouvelle glace, du nilas et de la jeune glace ont été observés pendant cette période (Figure 65-B). Un grand frais de l'ouest a ensuite soufflé les 27 et 28 novembre faisant disparaître la glace. Cette dernière est réapparue ensuite avec un refroidissement des températures. Durant la première semaine de décembre, les températures moyennes descendront sous les -15°C ce qui amènera la production de glace malgré plusieurs journées de coup de vents et de grand frais généralement de l'ouest. La caméra de Pointe noire était embuée lors de cette période. À la hauteur de l'île Moosehead, de la jeune glace s'est fixée à la rive est et progresse vers l'ouest. Lors de la deuxième semaine de décembre, une tempête du S.-S.-O. le 9 décembre fera décrocher une partie de la banquise côtière en formation du côté est de la baie. Les deux jours suivants, alors que le vent diminuera et que les températures descendront sous les -20°C , le couvert de glace se reformera rapidement (Figure 65-C). Le 12 décembre, le couvert était pratiquement complet à l'embouchure de la baie. Au niveau de l'île Moosehead, le couvert de jeune glace qui s'est refixé à l'est progressera vers le sud-ouest (Figure 65-D). Le 13 décembre, en fin de journée, la glace aura atteint la rive ouest et le lendemain, le couvert de glace sera complet pour l'hiver.

Une nouvelle station météorologique fut installée à la Baie Déception en septembre 2019. Jusqu'à ce moment-là, l'interprétation des photos et des processus glaciels de la Baie Déception étaient faites en considérant les informations météorologiques de Salluit. Les figures 67 et 68 montrent les DJG de Salluit de 2014 à 2020 et de la Baie Déception pour l'année 2019-2020. On y constate que, pour l'année 2019-2020 où des données des deux sites sont disponibles, les tendances sont semblables mais les températures légèrement différentes. Les températures de la Baie Déception semblent en effet plus chaudes que celles de Salluit. Il est à noter toutefois que les températures de Salluit proviennent de la station météorologique située à l'aéroport de la communauté, lequel est à une altitude de 225 m par rapport au niveau de la mer. La station de Baie Déception est quant à elle à environ 30 m du niveau de la mer. Cela peut expliquer en partie l'écart entre les données des deux stations. Lors de l'automne 2019, peu importe la station utilisée, les températures furent les plus chaudes des six dernières années. Ce n'est qu'à la fin de la première semaine de novembre que les moyennes journalières sont passées sous le point de congélation. De plus, tel que mentionné précédemment, les températures à la fin novembre n'étaient pas très froides, oscillant entre -5°C et 0°C . Tout au long de l'englacement et de l'hiver, les DJG cumulés sont demeurés dans les plus basses valeurs des six dernières années.

Lors des mois d'hiver 2020, le couvert de glace est demeuré stable à la Baie Déception (Figure 69). La banquise côtière à l'embouchure de la baie à la jonction avec le détroit d'Hudson s'est fixée jusqu'aux îles Neptune et Arctique ce qui est comparable avec les années précédentes.

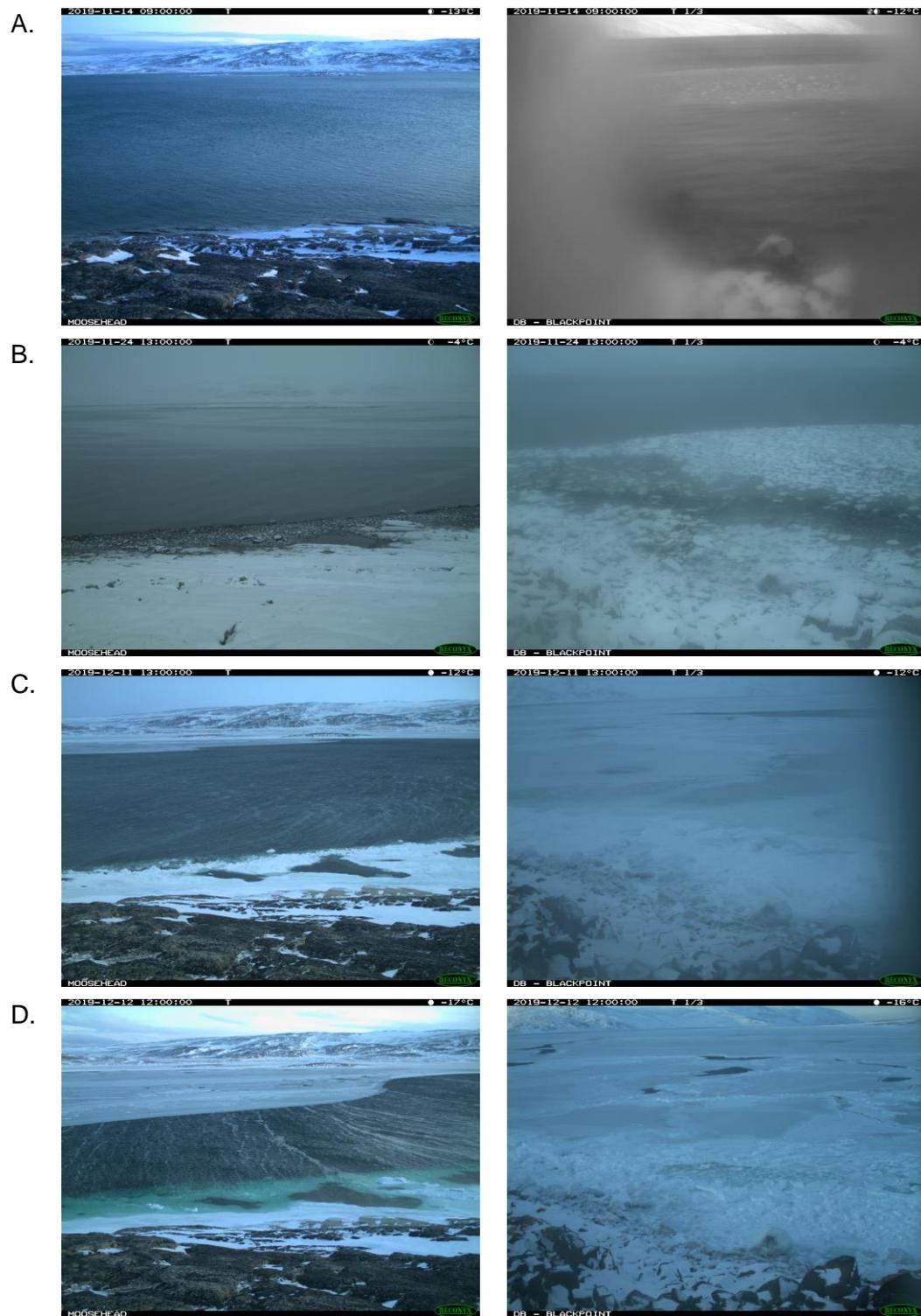


Figure 65 Évolution de l'englacement 2019 à la Baie Déception (A-14 novembre 2019, B-24 novembre 2019, C-11 décembre 2019, D-12 décembre 2019)

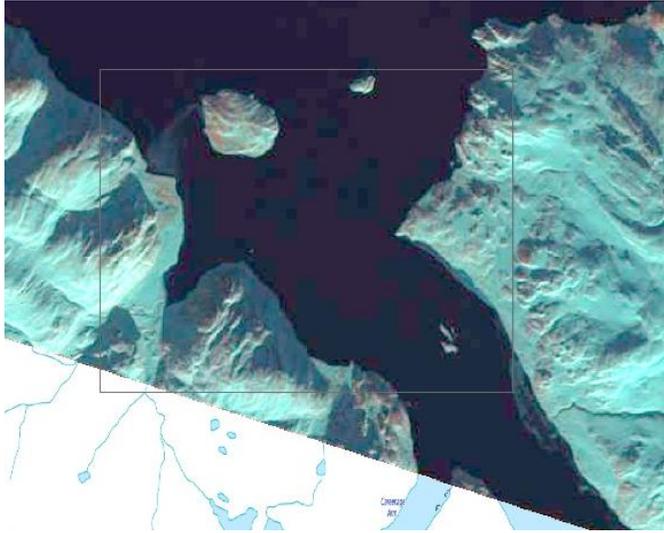


Figure 66 Image satellitaire acquises lors de l'englacement 2019 montrant des signes de nouvelles glaces dans la Baie Déception (Landsat-8, 19 novembre 2019)

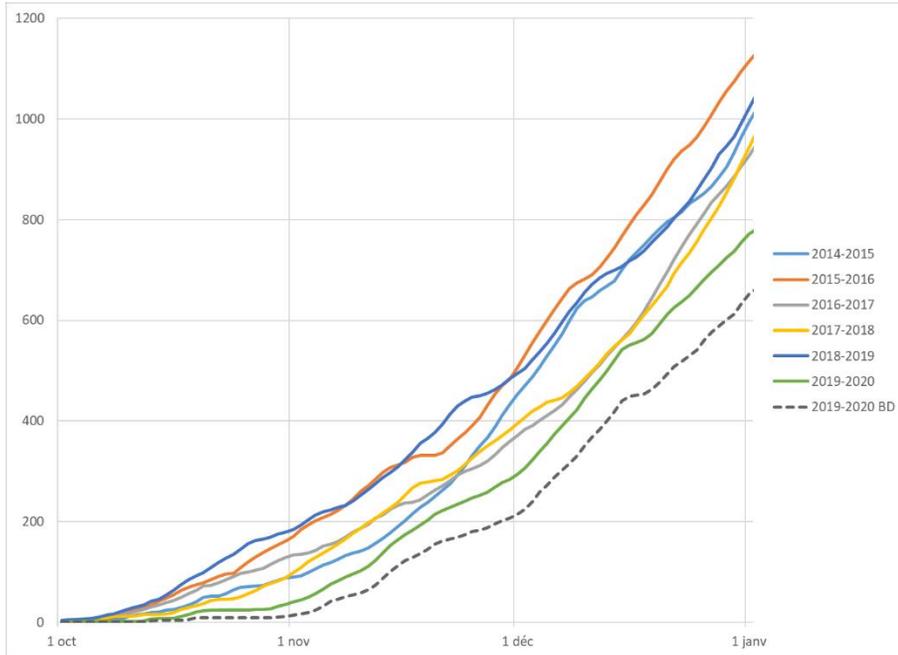


Figure 67 Degrés-jour de gel à Salluit et à la Baie Déception du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2014-2020)

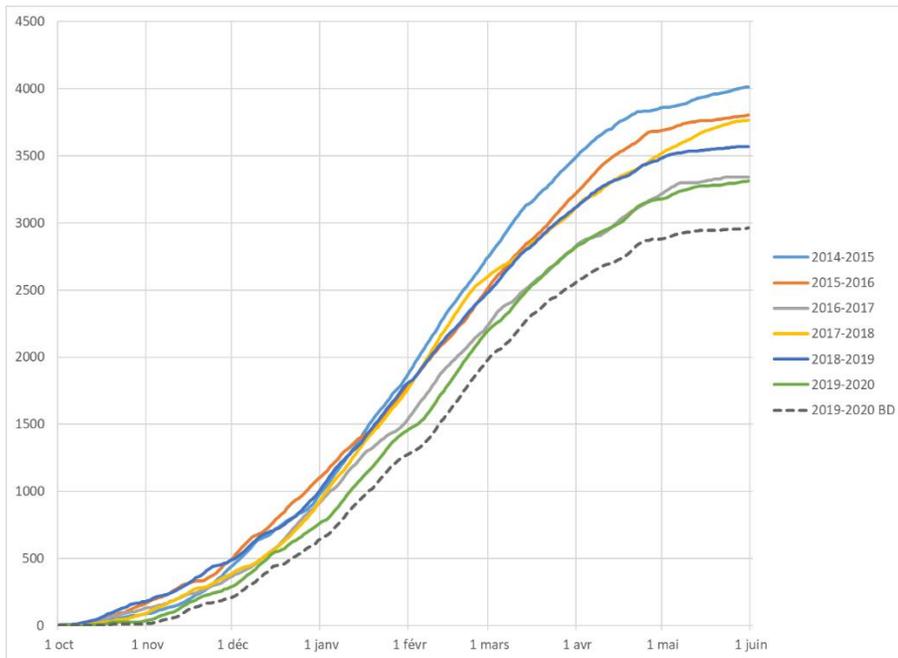


Figure 68 Degrés-jour de gel à Salluit et à la Baie Déception lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2014-2020)

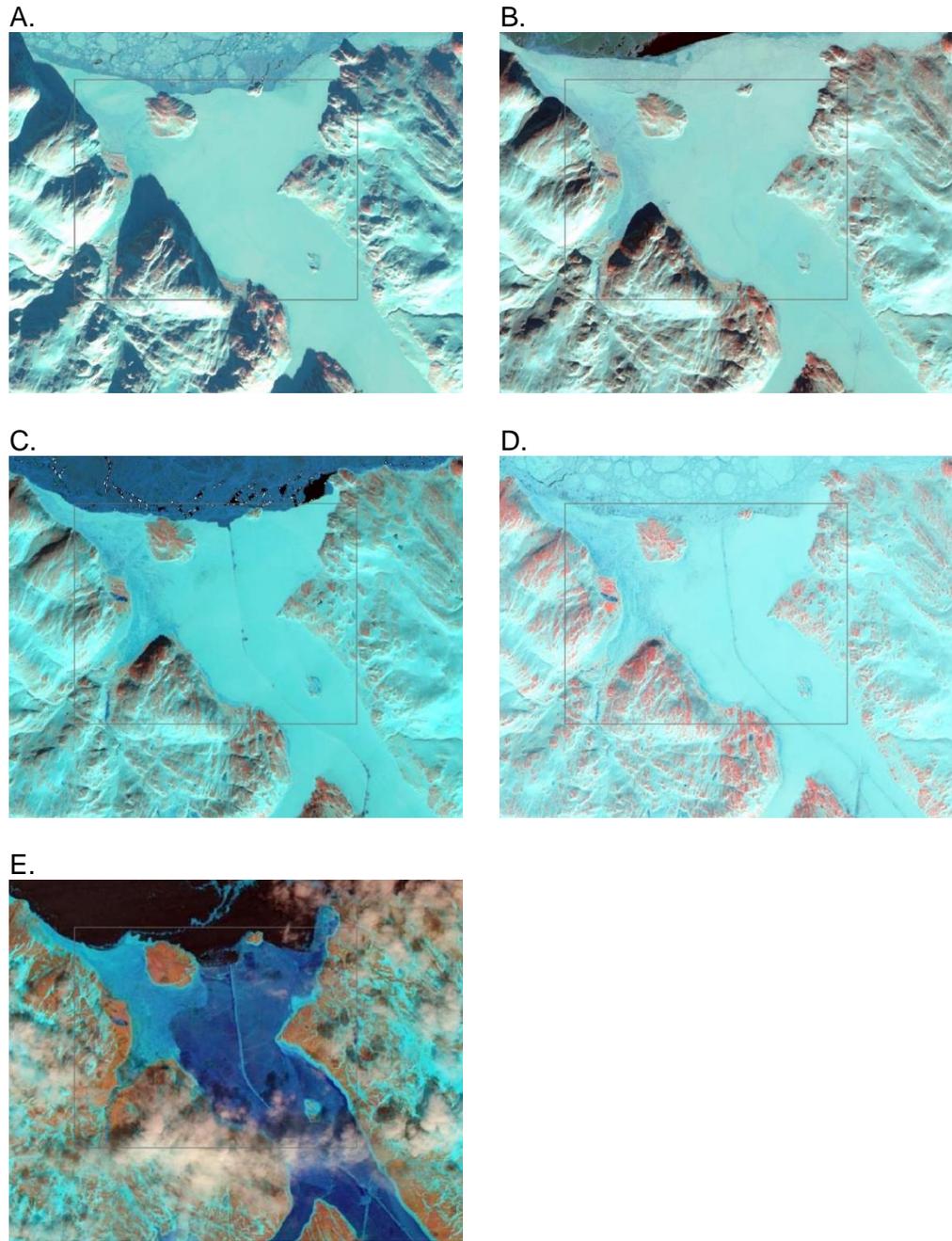


Figure 69 Observations hivernales à la Baie Déception en 2020 (A- 25 janvier 2020, Sentinel-2; B- 22 février 2020, image Sentinel-2; C- 20 mars 2020, image Sentinel-2; D- 20 avril 2020, image Sentinel-2;E- 20 mai 2020, image Landsat-8)

Au printemps 2020, les températures se sont maintenues généralement entre -5°C et 0°C de la fin avril jusqu'au milieu du mois de juin. À partir du 13 juin, les températures moyennes journalières ont augmenté pour se maintenir au-dessus de zéro (Figure 72). La fonte de la banquise était très visible du 13 au 16 juin (Figure 70-A, Figure 71-A). La première observation d'eau est survenue le 19 juin près de la côte de pointe Noire. Le lendemain, le couvert s'est fracturé vis-à-vis l'île Moosehead à partir de la rive ouest, jusqu'au chenal créé par le passage des navires des compagnies minières (Figure 70-B, Figure 71-C). Le couvert demeurera peu mobile jusqu'au 24 juin, continuant de pourrir sur place, perdant un peu de banquise le long des côtes (Figure 71-D). Le 25 juin, c'est une banquise très pourrie qui décrochera finalement (Figure 70-C). Les glaces seront évacuées vers le détroit d'Hudson. L'évacuation se poursuivra le lendemain mais peu de glaces seront encore présentes. Le 27 juin sera la première journée à l'eau libre dans les deux secteurs (Figure 71-E). La glace reviendra quelques jours à partir du 30 juin mais formant généralement pas plus qu'une banquise très lâche. Le 3 juillet, les glaces se concentreront quelques heures pour former une banquise serrée (Figure 70-D). Une banquise serrée sera de nouveau observée les 8 et 9 juillet au large de pointe Noire (Figure 70-E). Il s'en suivra quelques jours où un couvert très lâche dérivera à l'embouchure de la baie. À partir du 14 juillet, la baie sera généralement en eau libre de glace (Figure 71-F). Des observations ponctuelles seront néanmoins faites les 16, 21 et 24 juillet.

À partir de la mi-juin 2020, moment où les températures moyennes journalières se sont maintenues au-dessus de 0°C , les températures ont été généralement plus chaudes que la moyenne des six années précédentes (Figure 73). En juillet et août, les températures ont beaucoup ressemblé à celles de l'année précédente, 2019.

A.



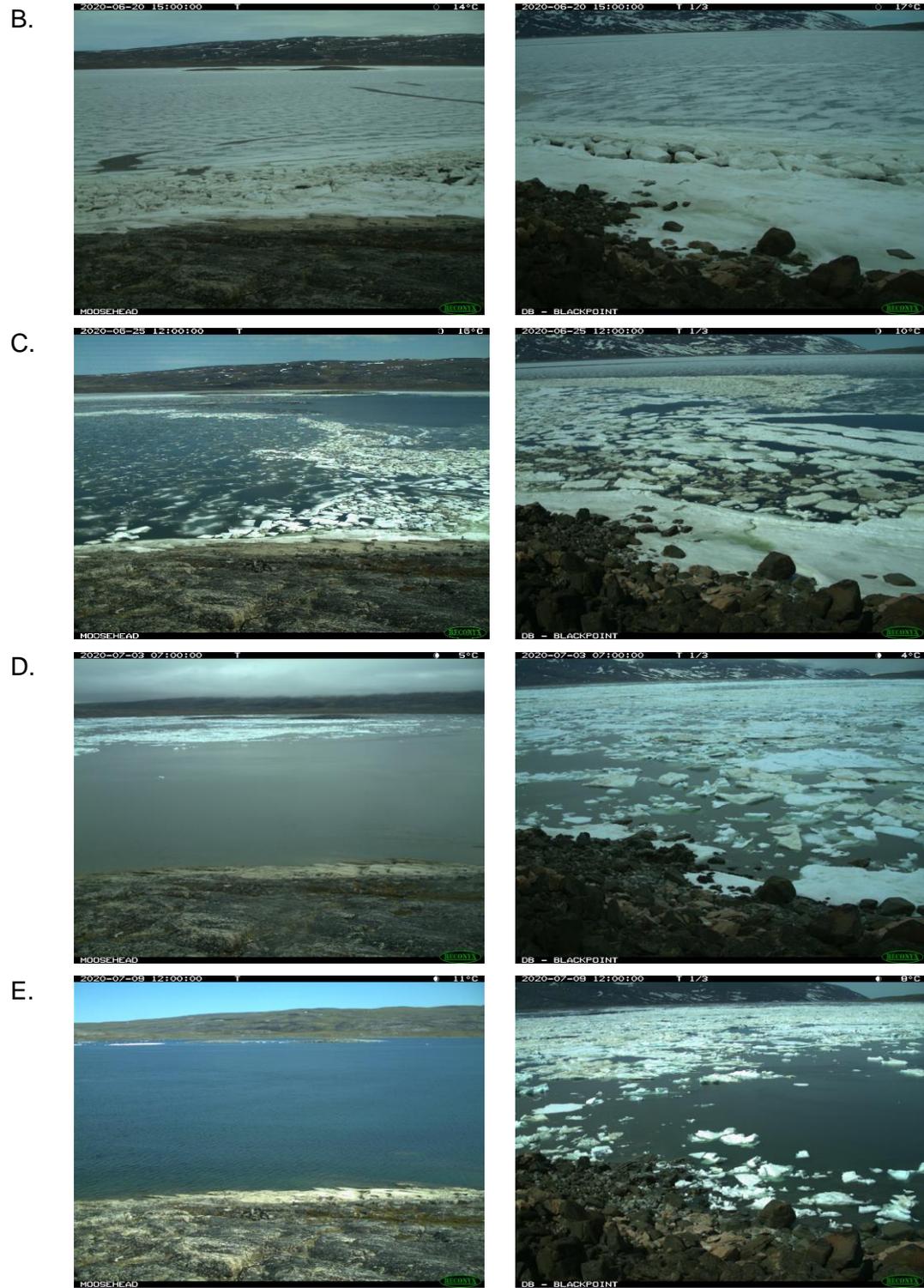


Figure 70 Évolution de la fonte 2020 à la Baie Déception (A- 14 juin 2020, B- 20 juin 2020, C- 25 juin 2020, D- 3 juillet 2020, E- 9 juillet 2020)

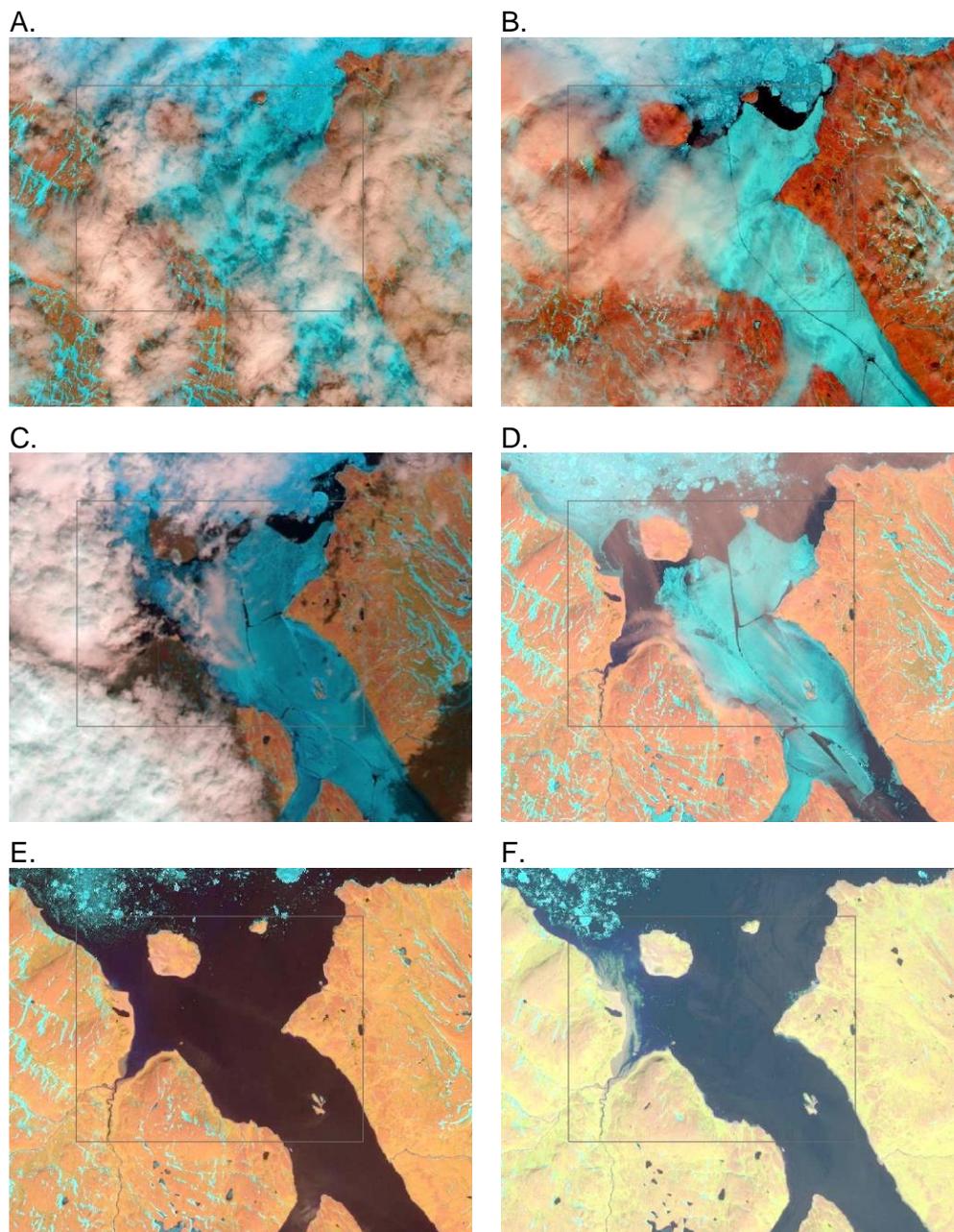


Figure 71 Images satellitaires montrant la Baie Déception lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 16 juin 2020; B- Sentinel-2, 18 juin 2020; C- Landsat-8, 21 juin 2020; D- Sentinel-2, 24 juin 2020; E- Sentinel-2, 28 juin 2020; F- Sentinel-2, 14 juillet 2020)

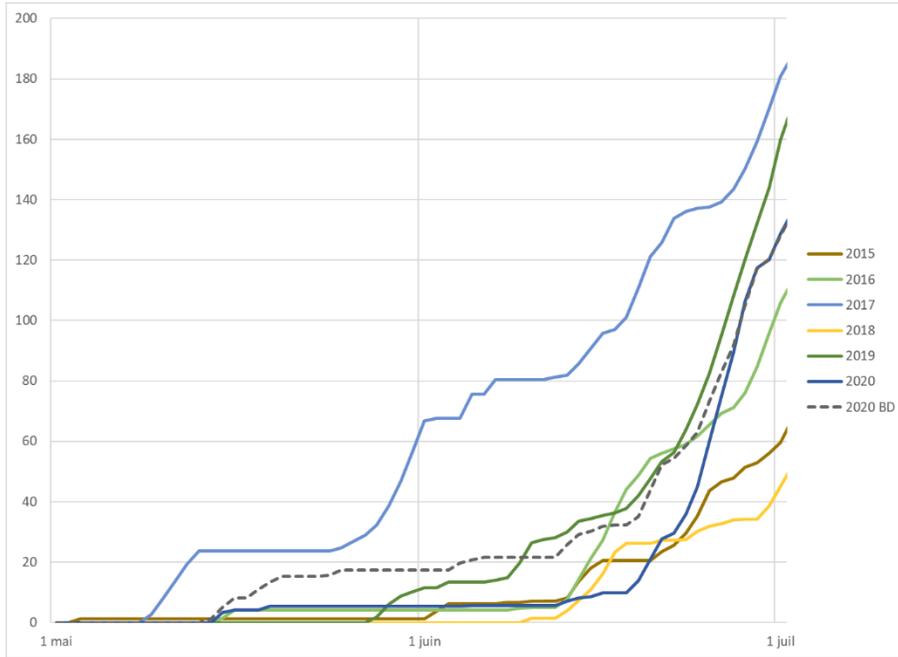


Figure 72 Degrés-jour de fonte à Salluit et à la Baie Déception du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2015 à 2020)

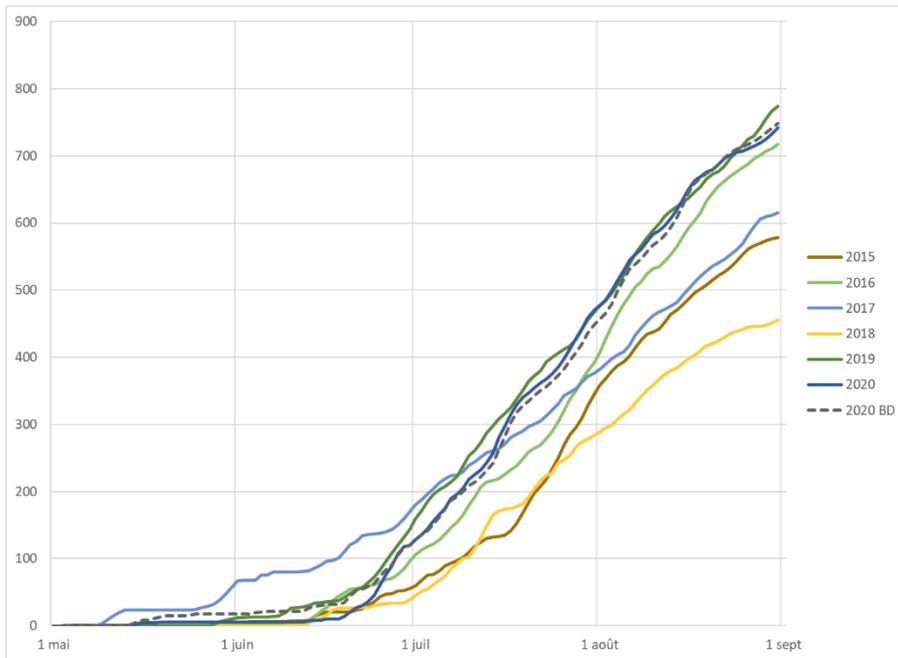


Figure 73 Degrés-jour de fonte à Salluit et à la Baie Déception du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2015 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 18 synthétise les observations faites à la Baie Déception depuis 2015. Le Tableau 19 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 18 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de la Baie Déception entre octobre 2015 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	19 oct.	21 nov.	5 nov.	22 oct.	13 nov.
Couvert de glace permanent	27 nov.	7 déc.	10 déc.	17 déc.	14 déc.
Première apparition d'eau	22 juin	10 juin	25 juin	12 juin	20 juin
Eau libre pour la première fois	29 juin	15 juin	8 juil.	16 juin	27 juin
Dernières observations de glace	2 juil.	25 juin	16 août	16 juin	24 juil.

Tableau 19 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à la Baie Déception depuis leur installation en 2015

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	39	16	35	56	31
Durée du couvert de glace permanent	208	185	197	177	188
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	2	5	13	5	7
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	8	10	39	1	27
Durée totale de présence de glace	257	216	284	239	253

2.4.2 Sommaire

À l'automne, la première apparition de glace à la Baie Déception survient dans une plage temporelle d'un peu plus d'un mois, soit de la troisième semaine d'octobre à la quatrième semaine de novembre. Il faut aux environs de 130 DJG avant cette première apparition. La première glace apparaît souvent sous forme de shuga et de sorbet. Le couvert de glace se fixe de la dernière semaine de novembre à la troisième semaine de décembre. À ce moment, le couvert est généralement composé de jeune glace formé sur place. Depuis l'installation des caméras à la Baie Déception, il est possible de constater une mise en place plus tardive du couvert de glace (Figure 74).

Durant l'hiver, le couvert de glace demeure stable dans la Baie Déception malgré le passage répété des bateaux. Ces derniers empruntent toutefois toujours la même voie ce qui minimise l'impact sur la banquise.

Au printemps, la glace se détériore sur place plusieurs semaines avant la première apparition d'eau. Celle-ci apparaît vers la deuxième ou troisième semaine de juin en période de vives-eaux. L'évacuation de la glace suite à la première apparition de l'eau se fait habituellement très rapidement à la Baie Déception, moins d'une semaine étant généralement nécessaire. Le trafic maritime contribue possiblement à l'évacuation rapide en fracturant le couvert de glace déjà affaibli ce qui permet à de grands morceaux de banquise de se détacher et d'être mobilisés. Avec une mise en place plus tardive du couvert de glace permanent et une stabilité dans les dates d'apparition de l'eau et d'évacuation des glaces, une certaine diminution de la durée du couvert de glace stable est remarquée (Figure 75) mais le coefficient de détermination de la régression est plutôt faible.

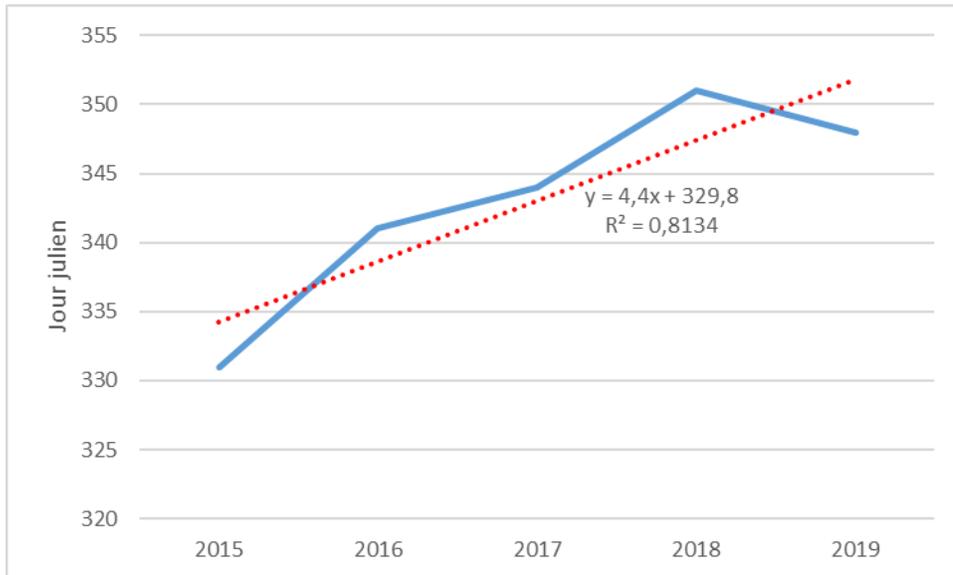


Figure 74 Variation de la date de mise en place du couvert de glace permanent à la Baie Déception

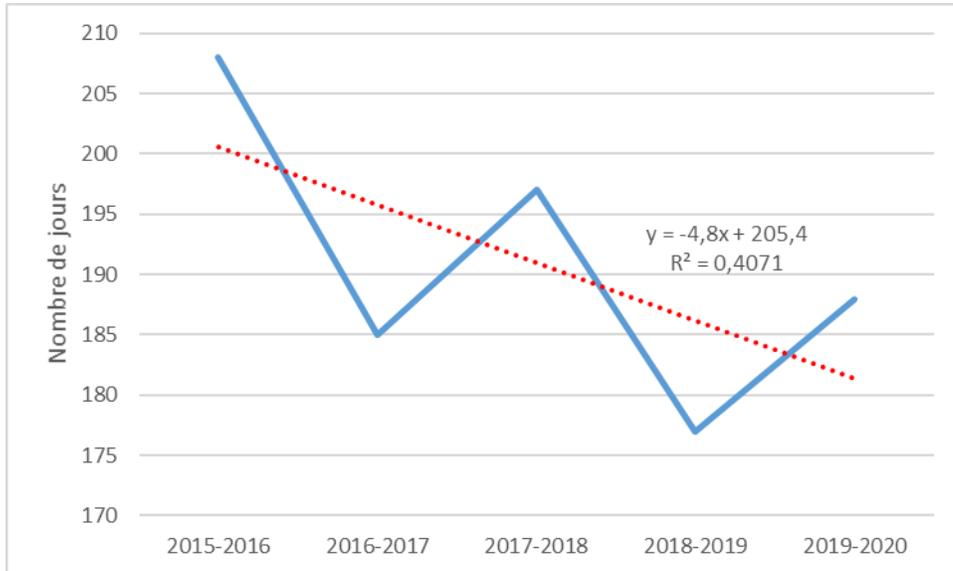


Figure 75 Variation de la durée du couvert de glace permanent à la Baie Déception depuis 2015

2.5 Description du régime des glaces à Quaqtaq

La description du régime des glaces au large de Quaqtaq repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2009 mais avec une emphase plus importante sur la période 2017-2020. Il en va de même au niveau des images satellitaires. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). Les sections 1.3.1.1.2 et 1.3.1.2.5 décrivent l'emplacement des caméras installées à Quaqtaq et montrent la vue offerte par celles-ci. Contrairement à Kuujuarapik qui possède également deux sites de caméras et où les deux sites ont été traités de façon distincte, ceux de Quaqtaq ont été regroupés car les vues des caméras présentent un certain chevauchement et surveillent, de façon générale, la même zone.

2.5.1 Hiver 2019-2020

Tel que mentionné dans le rapport technique no.4 (Bernier et al., 2021), les caméras orientées vers les infrastructures maritimes n'étaient plus présentes en septembre 2020 lorsque le site a été visité pour l'entretien annuel et le téléchargement des données. Elles ont vraisemblablement été volées car aucune pièce provenant de bris n'a été trouvée à proximité et les fils d'alimentation ont été coupés proprement sous le boîtier contenant les batteries. Les éléments mentionnés dans cette section reposent donc uniquement sur l'interprétation des photos acquises par les caméras situées sur l'île Hearn.

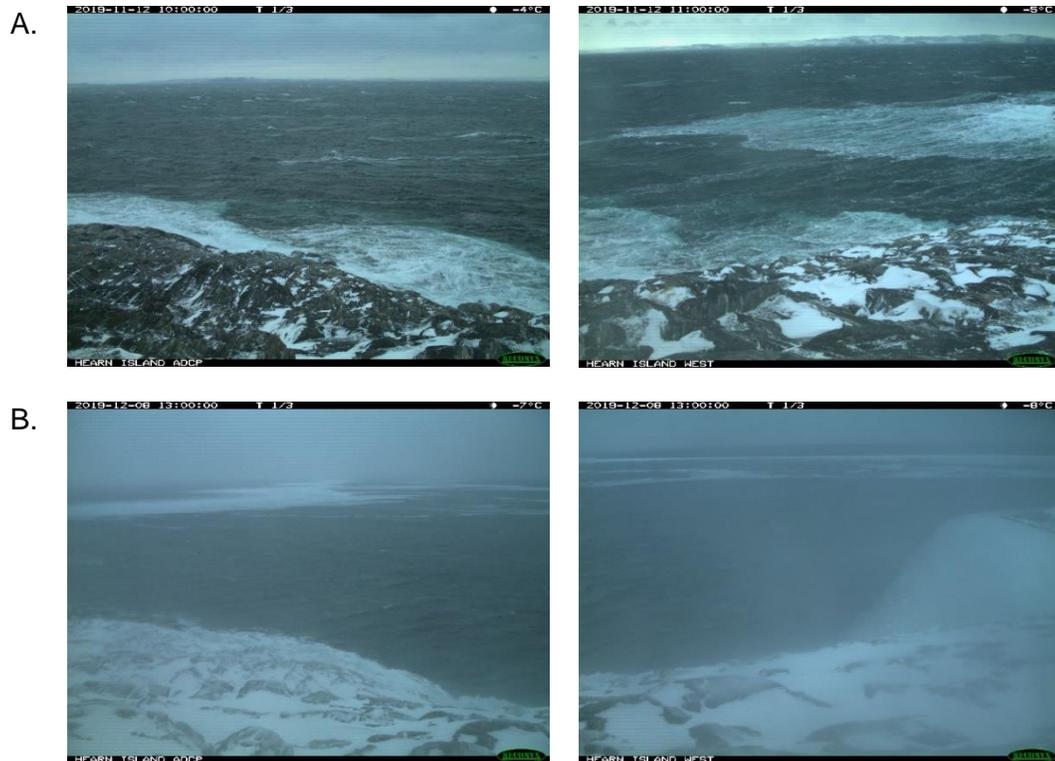
À l'automne 2019, deux périodes de forts coups de vent ont été mesurées, l'une autour du 16 décembre, l'autre, un mois plus tôt, autour du 11 novembre. Les vents les plus forts sont survenus le 16 décembre. Les observations de cette journée seront décrites avec l'englacement. Pour l'épisode de novembre, c'est le 12 que la mer fut la plus agitée, suite à plus de 24h de fort coups de vent de l'ouest-nord-ouest et du nord-ouest (Figure 76-A).

Les premières observations de glace sont survenues le 7 décembre avec de très faibles concentrations de sorbet. Le lendemain, de la nouvelle glace, du nilas et de la jeune glace seront visibles par moment (Figure 76-B). Des coups de vents du sud-sud-est soufflent alors. Le 9 décembre, le vent est passé à l'ouest-sud-ouest mais de forts coups de vent étaient toujours présents. La glace n'était plus visible lors de cette journée. Lors des 3-4 jours suivants, de la nouvelle glace fera son apparition sous forme de sorbet, de shuga et de nilas. La concentration augmentera pour former une banquise compacte le 14 décembre (Figure 76-C). Dans les jours suivants, le couvert se relâchera et sera évacué presque totalement par de forts coups de vent de l'est-nord-est. Des pointes de vent atteignant plus de 100 km/h seront mesurées en matinée le 16 décembre (Figure 76-D). Par la suite, de la nouvelle glace recommencera à se former dans un secteur pratiquement en eau libre. La concentration de sorbet et

de nilas augmentera jusqu'au 20 décembre où de la jeune glace fera son apparition. Le 21 décembre, une banquise très serrée sera observée mais des mouvements seront encore perceptibles. Le 23 décembre, le couvert sera remobilisé et demeurera mobile pendant une semaine. Durant cette période, de la nouvelle glace sera constamment en formation dans les zones ouvertes. Le 30 décembre, la banquise se consolidera (Figure 76-E) pour former, le lendemain, une banquise complète pour l'hiver.

L'apparition de la glace et la formation d'un couvert complet en 2019 se sont produits plus tardivement que les années précédentes (Tableau 20). Cela semble directement relié aux températures plus chaudes qui ont été observées lors de cette période (Figure 77). À partir du mois de janvier 2020, les températures ont diminué puis ont suivi la tendance des 10 dernières années (Figure 78).

Il n'y a pas d'image satellitaires utilisables lors de la période d'englacement.



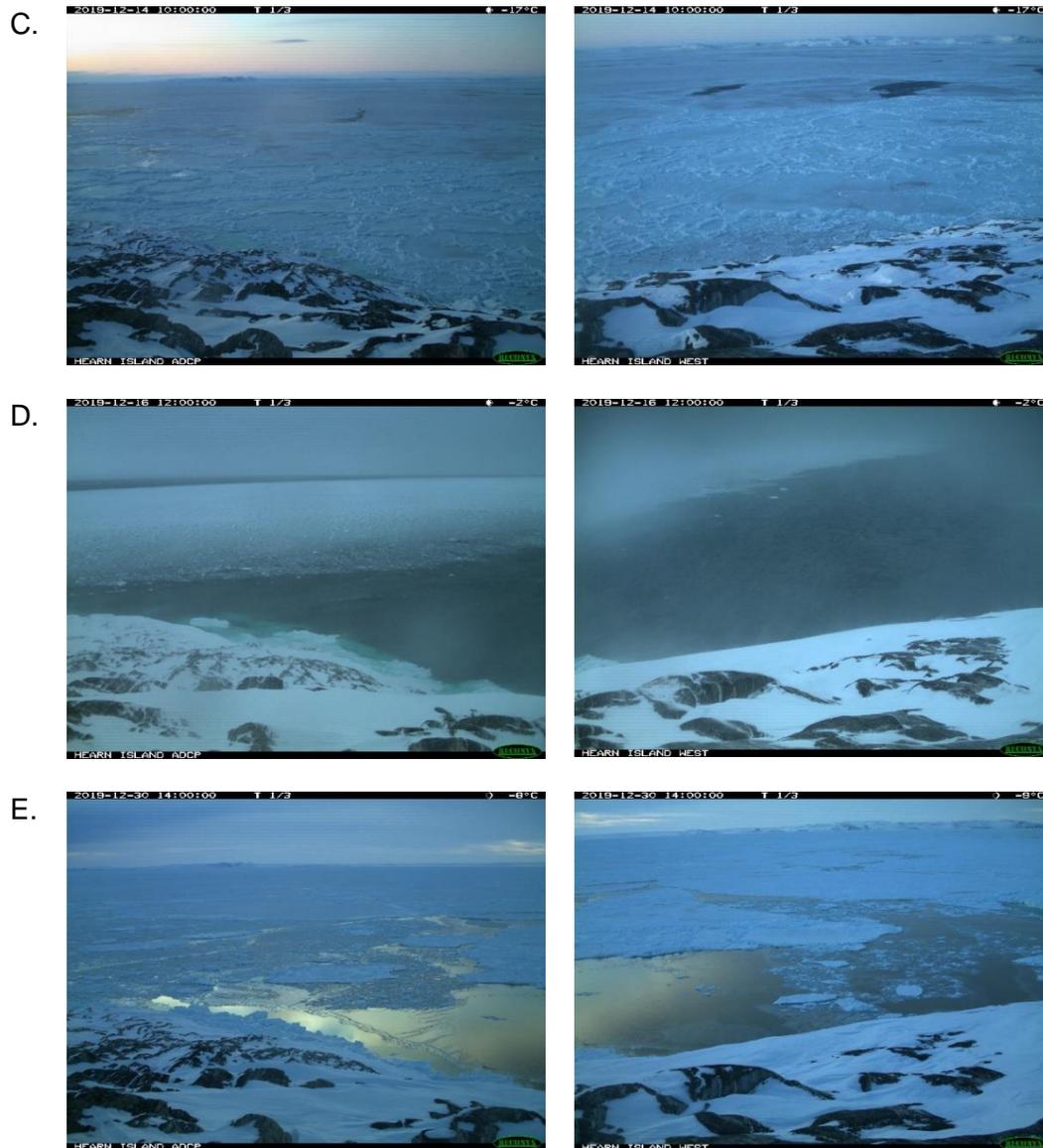


Figure 76 Évolution de l'englacement 2019 à Quaqtq (A-12 novembre 2019, B-8 décembre 2019, C-14 décembre 2019, D-16 décembre 2019, E-30 décembre 2019)

Durant l'hiver 2020, le couvert est demeuré stable jusqu'à la fin mars dans le secteur de la baie Diana. Le 30 mars, un décrochement est survenu à l'ouest de l'île Hearn (Figure 79-A, Figure 80-A). L'ouverture sera visible pendant peu de temps, de la nouvelle glace se formant aussitôt. La fracture sera ensuite réactivée le 18 avril alors qu'une ouverture sera visible (Figure 79-B, Figure 80-B). Elle se refermera dans la journée. Les apparitions d'eau subséquentes seront considérées comme le début de la fonte 2020.

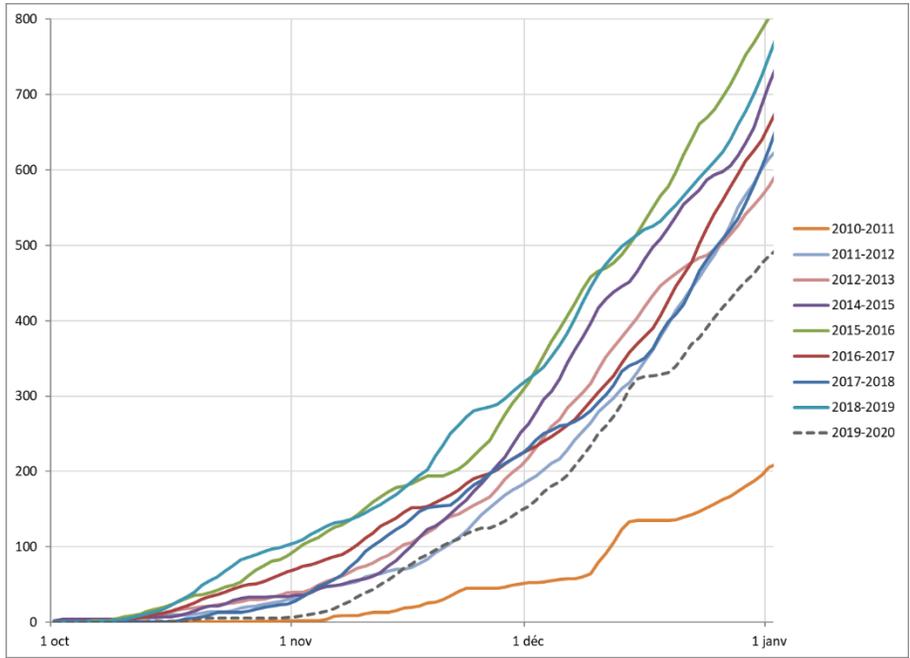


Figure 77 Degrés-jour de gel à Quaqtq du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2010-2020)

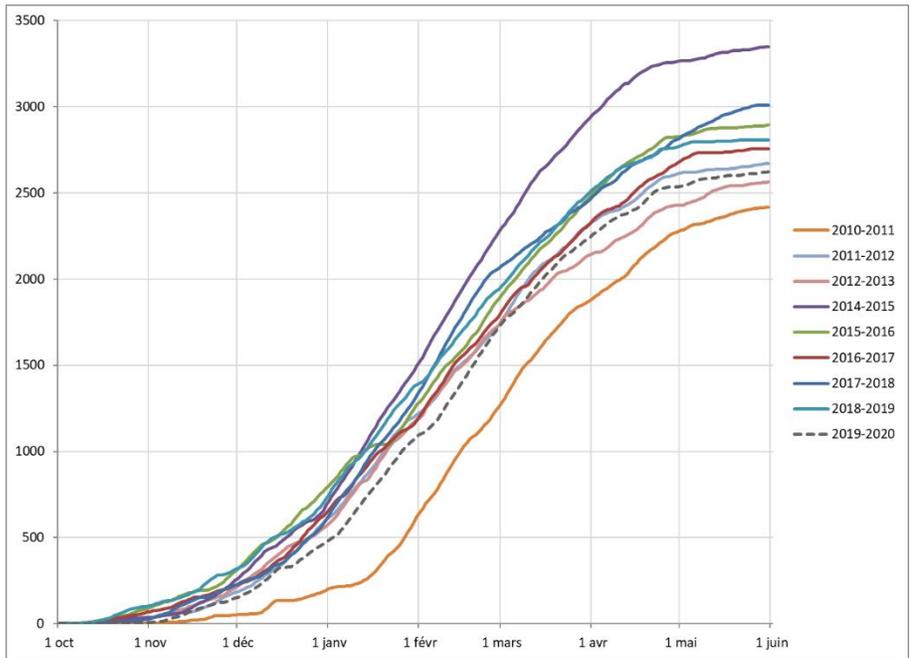


Figure 78 Degrés-jour de gel à Quaqtq lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2010-2020)

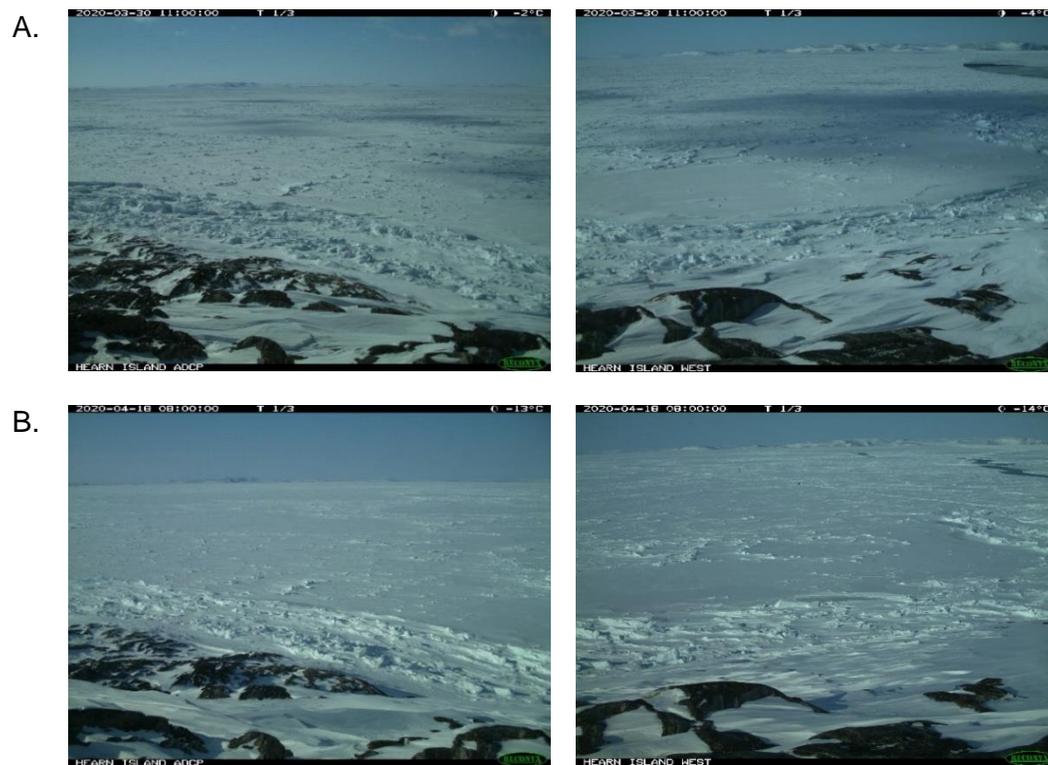


Figure 79 Observations hivernales à Quaqaq en 2020 (A- 30 mars 2020, B- 18 avril 2020)

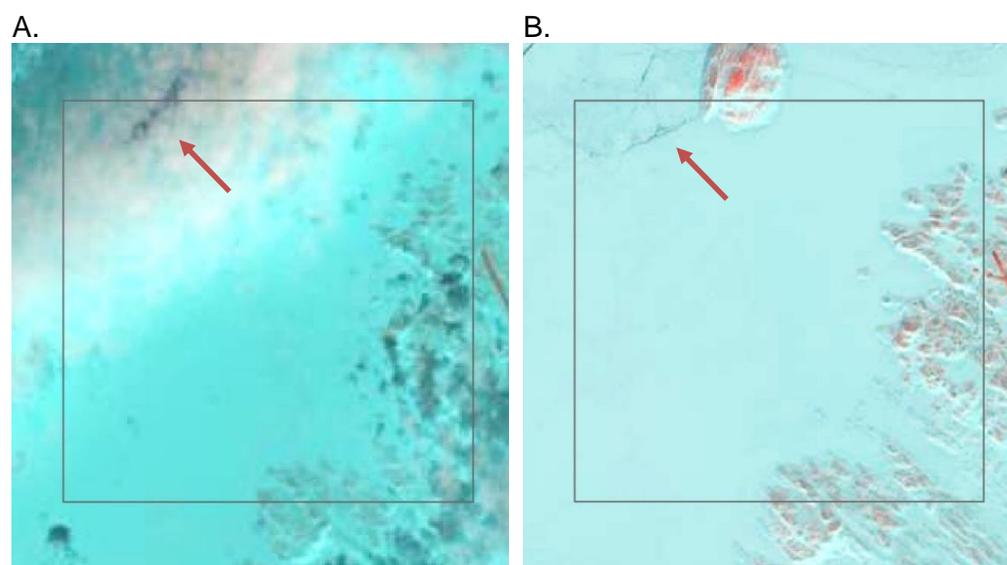
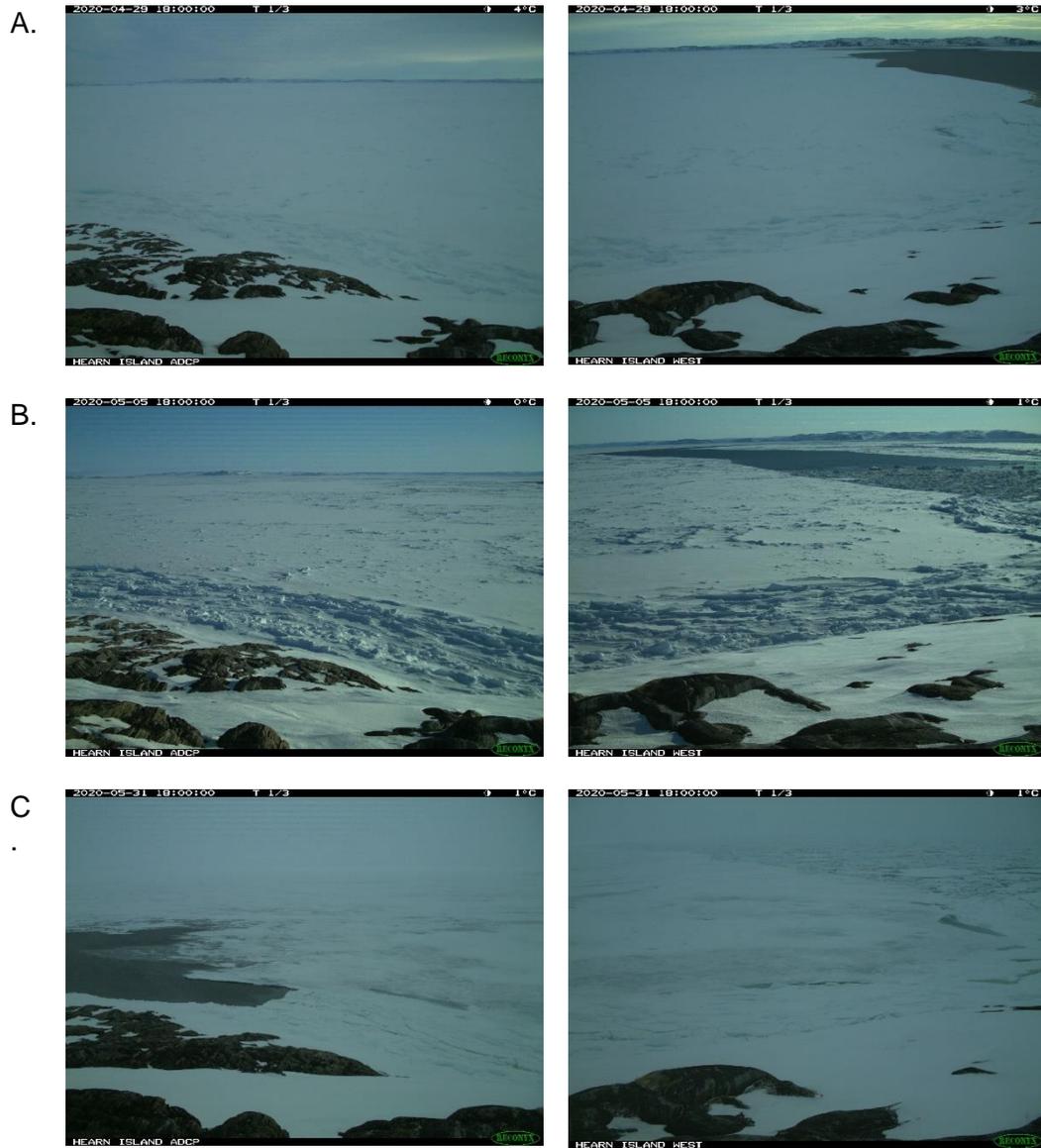


Figure 80 Images satellitaires acquises lors de l'hiver 2020 montrant une partie de la baie Diana au large de Quaqaq (A- Landsat-8, 30 mars 2020; B- Sentinel-2, 18 avril 2020)

Au printemps 2020, les premières apparitions d'eau sont survenues assez tôt comparativement aux printemps précédents alors qu'une ouverture dans la banquise est observée lors des derniers jours d'avril (28 et 29 avril). Lors de cette première phase, le décrochement est survenu dans la partie partiellement mobilisée à la fin mars et à la mi-avril. Une perte de banquise légèrement plus importante fut toutefois observée à ce moment-ci alors que l'intensité des vents méridionaux atteignaient le coup de vent (Figure 81-A). Le 30 avril, alors que les vents sont passés au N.-O., l'ouverture se refermera. Une semaine plus tard, sous une bonne brise du sud, un nouveau décrochement surviendra plus profondément dans la banquise (Figure 81-B, Figure 82-A). Le décrochement suivra alors une fracture apparue le 18 avril mais pas encore activée. Suite à ce décrochement, des glaces en mouvements, en concentration généralement très faible, seront observées à l'ouest de l'île Hearn pendant deux semaines. Le 17 mai, une bonne brise du N.-O. pousse la glace en mouvement contre la banquise côtière. Le vent passant au sud, la glace fut évacuée, puis, après un retour du vent au N.-O., la glace fut ramenée. Elle formera alors un couvert consolidé qui demeurera complet jusqu'au 24 mai, soit tant que soufflera le vent du N.-O. Le 25 mai, le vent passant au sud, la glace fut évacuée mais reviendra le lendemain avec un grand frais du N.-O. À partir de ce moment, les premiers signes de dégradation du côté S.-E. sont apparus. Des mouvements dans les glaces furent alors observables le long de la côte de l'île. Les 30 et 31 mai, de légères pertes de banquises sont survenues du côté S.-E. alors que s'entassaient les glaces à la dérive du côté N.-O. (Figure 81-C). Cela se reproduira les 4 et 5 juin. Le couvert sera relativement stable la semaine suivante avec un secteur complètement consolidé à l'ouest et des glaces en mouvement au gré des marées au S.-E., sans perte réelle de banquise. En fin de journée le 12 juin, un mouvement de quelques mètres de la banquise intacte fut observable devant l'île. Le lendemain matin, la banquise devant l'île aura disparue permettant ainsi aux glaces de dériver librement d'est en ouest (Figure 81-D). Le 18 juin, sous une bonne brise du N.-O., une banquise compacte s'est formée à partir des glaces en dérive. La banquise deviendra ensuite très serrée. Les glaces demeureront néanmoins mobiles. Le couvert de glace se relâchera lorsque le vent passera au sud les 20 et 21 juin (Figure 82-B). Une partie de la banquise au fond de la baie Diana sera alors mobilisée. Sous une bonne brise du N.-O., le secteur se remplira de glace le 23 juin pour former une banquise très serrée. La banquise se relâchera dans les trois jours suivants alors que le vent passera au sud (Figure 82-C). Il s'en suivra trois jours où, à l'exception de la banquise toujours intacte au sud, le secteur sera en eau libre (Figure 81-E). La concentration de glace augmentera un peu le 30 juin pour ensuite diminuer le 1 juillet. Le 2 juillet, sous un vent E.-S.-E., un décrochement a semblé survenir dans la banquise toujours intacte au fond de la baie Diana, laquelle est poussée vers le nord. Des floes de moyennes et grandes tailles dériveront devant les caméras jusqu'au 6 juillet (Figure 81-F, Figure 82-D). Le 7 juillet, un grand frais du sud poussera la glace hors de la baie Diana. Une partie de cette glace viendra se serrer sur les côtes de l'île Hearn. Elle aura disparu à l'aube le 8 juillet. Quelques glaçons à la dérive seront encore visibles jusqu'au lendemain.

Bien que la présence d'eau et de glaces mobiles aient été observés plus tôt qu'à l'habitude (Tableau 20), les températures moyennes journalières n'étaient pas particulièrement chaudes au mois de mai et au début juin (Figure 83). Cela a possiblement contribué au fait que la durée de la période de glace mobile s'est étirée (Tableau 21), les glaces disparaissant vers les mêmes dates que les années précédentes. À partir de la mi-juin, les températures ont considérablement augmentés et les mois de juillet et août 2020 ont été les plus chauds de la dernière décennie (Figure 84).



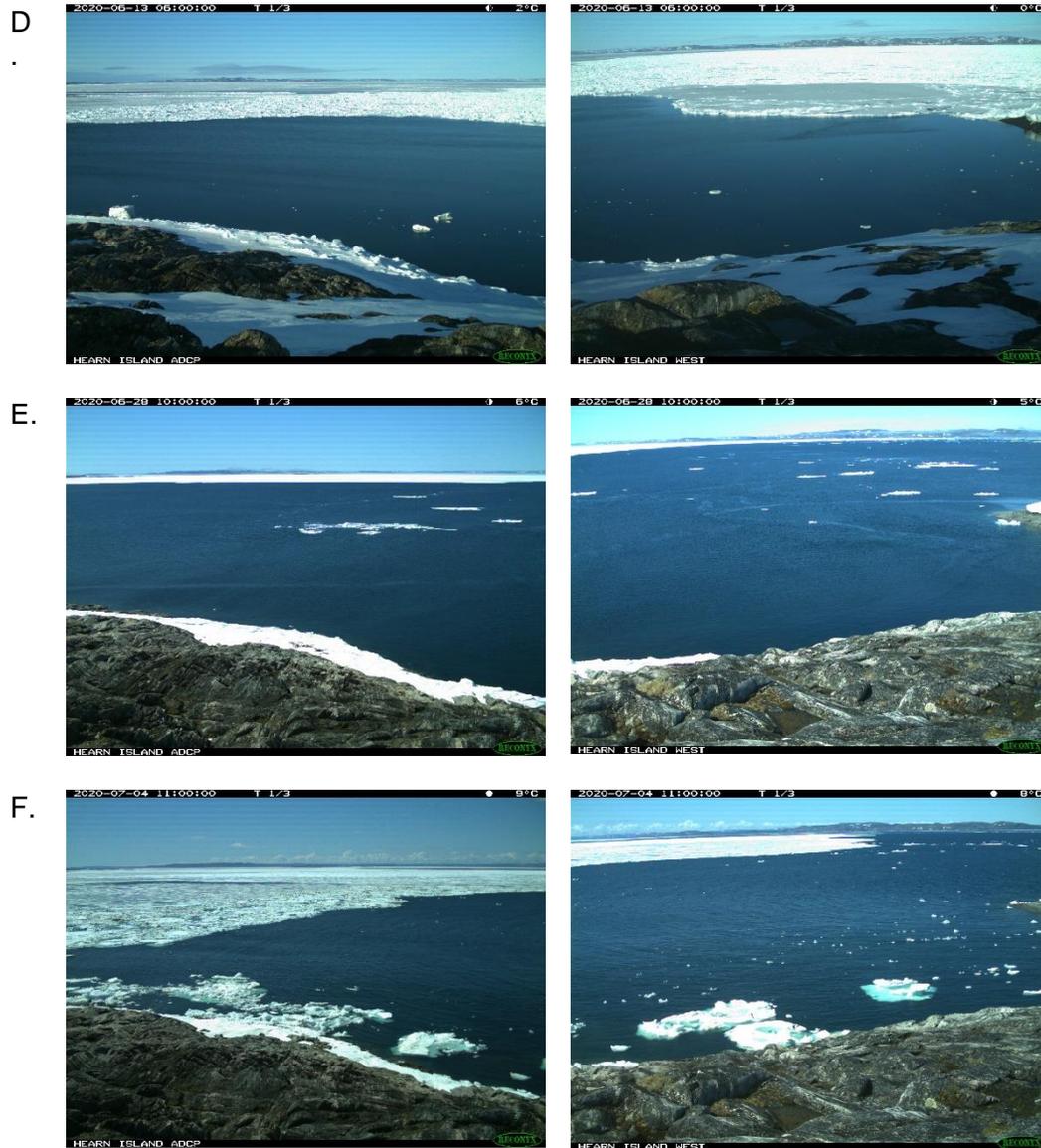


Figure 81 Évolution de la fonte 2020 à Quaqtq (A- 29 avril 2020, B- 5 mai 2020, C- 31 mai 2020, D- 13 juin 2020, E- 28 juin 2020, F-4 juillet 2020)

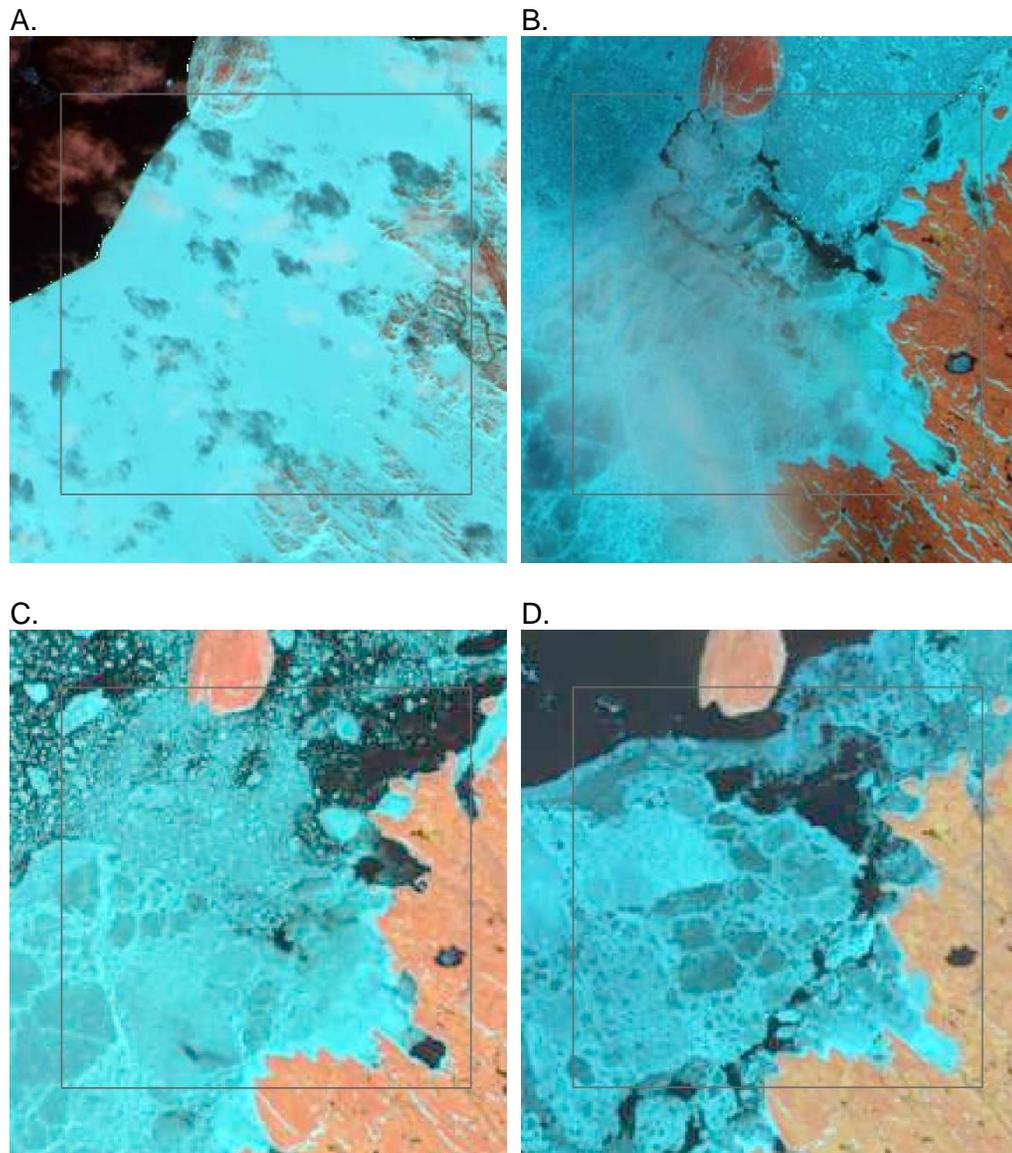


Figure 82 Images satellitaires montrant la baie Diana devant Quaqtq lors de la fonte 2020 (A- Sentinel-2, 6 mai 2020; B- Sentinel-2, 20 juin 2020; C- Landsat-8, 25 juin 2020, D- Landsat-8, 4 juillet 2020)

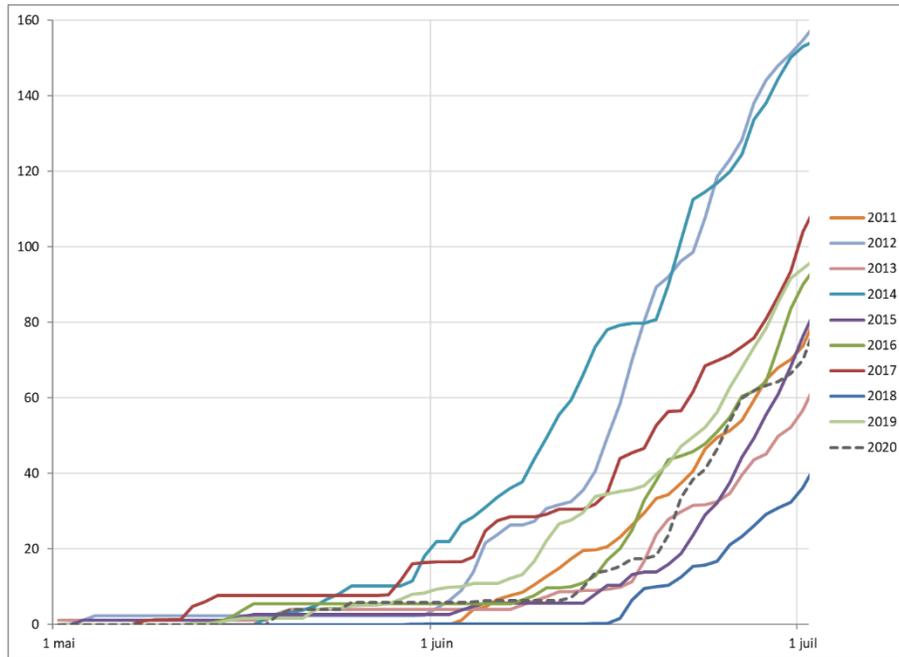


Figure 83 Degrés-jour de fonte à Quaqtak du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2011 à 2020)

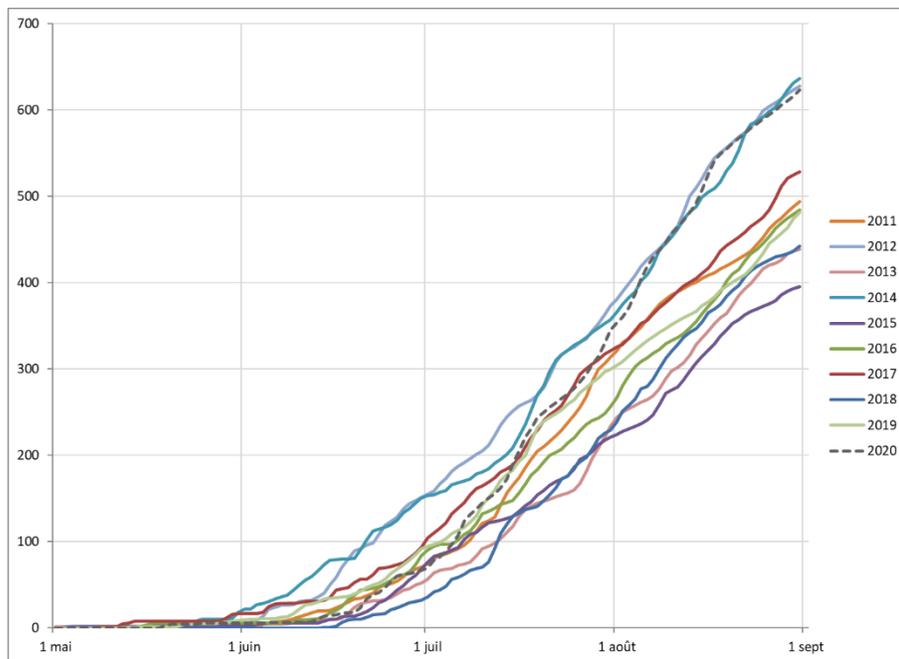


Figure 84 Degrés-jour de fonte à Quaqtak du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2011 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 20 synthétise les observations faites au large de Quaqtq depuis 2015. Le Tableau 21 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 20 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras de Quaqtq entre octobre 2015 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	11 nov.	4 déc.	2 déc.	17 nov.	7 déc.
Couvert de glace permanent	29 nov.	18 déc.	23 déc.	17 déc.	31 déc.
Première apparition d'eau	14 juin	3 juin	25 juin	22 mai	28 avril
Eau libre pour la première fois	3 juil.	7 juil.	16 juil.	19 juin	8 juil.
Dernières observations de glace	20 juil.	9 juil.	30 juil.	13 juil.	9 juil.

Tableau 21 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Quaqtq depuis octobre 2015

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	18	14	21	30	24
Durée du couvert de glace permanent	198	167	184	156	119
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	19	34	21	28	71
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	17	2	14	24	1
Durée totale de présence de glace	252	217	240	238	215

2.5.2 Sommaire

Tel que remarqué lors de la première étude de 2009 à 2012 (Clerc et al., 2012) et lors des années suivantes, l'englacement de la baie Diana et des environs de Quaqtq se déroule généralement de la façon suivante :

1. Apparition de nouvelle glace (mélange de frasil, sorbet et shuga) le long de la côte et formation de glace dans les anses et les petites baies. Les premières observations de glaces se produisent généralement la dernière semaine de novembre ou la première semaine de décembre (Tableau 20).
2. Apport de glaces exogènes en provenance du détroit d'Hudson poussées par les vents dominants du nord-ouest (Figure 130). Ces glaces viennent se mélanger à la nouvelle glace et aux plaques de nilas épaissies.
3. Stabilisation et épaississement de la banquise côtière, dont la lisière est délimitée au nord par les îles Hearn et Diana. Le couvert devient généralement stable lors des deux dernières semaines de décembre en période de mortes-eaux (Tableau 20).
4. Banquise côtière fixe et consolidée jusqu'à la fonte alors que les glaces dans le détroit d'Hudson restent en mouvement pendant tout l'hiver, venant parfois heurter la banquise.

Lors de l'englacement, la grande amplitude des marées, en combinaison avec le vent, influence la dynamique de formation de la glace. En période de revif, le couvert nouvellement formé peut décrocher en présence de forts vents, continentaux ou non. À l'inverse, la mise en place d'un couvert entre la période de vive-eau et celle de morte-eau, que celui-ci provienne de glace exogène ou non, offre un pouvoir de protection aux infrastructures car les glaces en formation se fixent à l'infrastructure et au substrat intertidal alors que les marées perdent de l'amplitude.

Tel que mentionné, le couvert de glace demeure stable en hiver dans la baie Diana et l'anse de la Mission. L'orientation de la caméra 2 située sur l'île Hearn permet une vue à la limite du couvert fixe (Figure 5). C'est pour cette raison que des mouvements y sont parfois observés.

Au printemps, les premiers signes de fonte dans l'anse de la Mission surviennent vers la mi-mai et font suite à l'afflux d'eau douce au fond de l'anse en provenance du ruisseau Imirtaviup. Le couvert de glace se fracture alors dans la zone intertidale puis régresse hors de celle-ci. L'eau apparaît hors de la zone intertidale généralement dans les deux premières semaines de juin puis s'étend le long de la côte vers le nord-ouest. Dans la baie Diana, la banquise régresse sur deux fronts, à l'est et à l'ouest de l'île Hearn, en direction du sud. Lorsque les deux régions se rejoignent et permettent la circulation de glace au sud de l'île Hearn, le niveau de risque augmente dans l'anse de la Mission en raison des floes qui peuvent être poussés sur une longue distance par les vents du nord-ouest, prédominant également au printemps (Figure 128). Il est fréquent que des blocs de glace s'échouent dans la zone intertidale et contre les infrastructures maritimes. Ces blocs peuvent dépasser les 5 m d'épaisseur, et même les 10 m (Figure 85). Néanmoins, la faible profondeur devant les infrastructures de même que les hauts fonds devant l'infrastructure la plus récente offrent une bonne protection contre les glaces épaisses arrivant du large.

Les observations faites à Quaqtq depuis 2009 n'ont pas mis en évidence de changements, tant au niveau spatial que temporel, dans le régime des glaces.



Figure 85 Épaisseur des blocs de glace échoués près des infrastructures maritimes à Quaqtq (28 juin 2017).

2.6 Description du régime des glaces à Aupaluk

La description du régime des glaces près d'Aupaluk repose sur l'analyse des photographies disponibles depuis l'automne 2015 mais avec une emphase plus importante sur la période 2017-2020. Il en va de même au niveau des images satellitaires. Une description détaillée de l'hiver 2019-2020 est présentée ainsi qu'une comparaison avec les années précédentes. Les descriptions détaillées des hivers 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 sont présentes dans les rapports d'étapes (Poulin et al., 2018; Bernier et al., 2019; Bernier et al., 2020). La section 1.3.1.2.6 décrit l'emplacement des caméras installées à Aupaluk et montrent la vue offerte par celles-ci.

Depuis leur installation, différents problèmes ont affecté les caméras d'Aupaluk. Lors de l'hiver 2015-2016, l'une des caméras a cessé de fonctionner à la fin novembre en raison d'un problème d'écriture sur la carte mémoire. Durant l'hiver 2017-2018, les caméras ont été subtilisées de sorte qu'aucune observation n'a pu être faite lors de cet hiver. De nouvelles caméras, de marque différente, ont été installées pour l'hiver suivant mais n'ont pas fonctionné correctement. Seulement une des deux caméras a fonctionné suffisamment longtemps pour capturer l'englacement. Ces caméras ont de nouveau été changées en 2019 et des observations ont pu être faites lors de l'hiver 2019-2020. Toutefois, tel que mentionné dans le rapport technique no.4 (Bernier et al., 2021), l'une des caméras, a eu des problèmes avec son horloge. À deux reprises, l'horloge de la caméra est revenue en arrière, passant du 27 septembre 2019 au 27 juillet 2019. La série de photos se terminait donc le 11 avril 2020, au lieu du 17 août 2020, date à laquelle l'entretien a été fait. Les dates d'acquisition des photos ont été modifiées afin que ces dernières soient continues. Ce traitement a permis de faire correspondre la date d'acquisition de la dernière photo avec la date de l'entretien du 17 août 2020. Ces modifications n'ont pas été faites sur le bandeau présent sur les photos de sorte que les photos présentées plus bas n'affichent pas la date réelle de leur acquisition. Les heures sont néanmoins correctes.

Il est également à noter que les données météorologiques présentées pour Aupaluk proviennent des observations faites par le personnel de l'aéroport, lors des heures de travail, lorsque présent. Il s'agit donc essentiellement de données diurnes et les moyennes journalières ne peuvent pas, au niveau absolu, être comparées avec les données des autres sites. De plus, les informations relatives à la direction et à la vitesse du vent n'étaient pas disponibles au moment d'écrire ce rapport.

2.6.1 Hiver 2019-2020

Les premiers signes de nouvelles glaces sont apparus sous forme de sorbet en faible quantité les 14 et 15 octobre 2019. Nous sommes alors en période de vives-eaux et la température moyenne n'est pas encore descendue sous zéro. Du sorbet fut également observé le 24 octobre puis le 3 novembre (Figure 86-A). Une importante accumulation de neige dans la nuit du 3 au 4 novembre lors de la marée basse a produit un peu de gadoue lors de la marée haute suivante. Du sorbet et du shuga furent visibles le 5, puis à partir du 8. La sortie de la période de mortes-eaux fera en sorte que la neige accumulée dans le haut de la zone de marnage sera transformée en gadoue et s'ajoutera aux quantités de sorbet et shuga déjà visibles (Figure 86-B). Le 14 novembre, de la jeune glace était visible mais disparaîtra dès le lendemain. Durant les semaines suivantes, des épisodes de sorbet et du shuga seront visibles et des accumulations de neige mèneront à la création de gadoue (Figure 86-C, Figure 87-A). À chaque cycle de marée, une partie de la nouvelle glace se dépose dans la zone de marnage découverte. Aucune mesure de vent n'est disponible pour le village d'Aupaluk mais il est néanmoins possible de constater qu'à certaines occasions, la nouvelle glace semble poussée contre la côte alors que le reste de la baie

parait en eau libre. À partir de la fin novembre, la baie était majoritairement recouverte de nilas et de jeune glace (Figure 86-D, Figure 87-B). Durant la première semaine de décembre, la glace présente dans la zone de marnage se consolidera et se fixera pour l'hiver (Figure 86-E, Figure 87-C). À partir du 6 décembre, le couvert de glace sera complet.

Le passage des températures moyennes sous zéro fut assez tardif en 2019 (Figure 88). Ce n'est que vers le début novembre que cela se produisit. Suite à cela, les températures ont rapidement refroidi et à partir de la troisième semaine de novembre, les DJG cumulés rejoignaient la moyenne des 10 dernières années. À l'exception de certaines périodes de redoux durant la saison hivernale, les DJG sont demeurés très près de la moyenne jusqu'à la fin mars, après quoi les températures se sont adoucies légèrement (Figure 89).

A.



B.



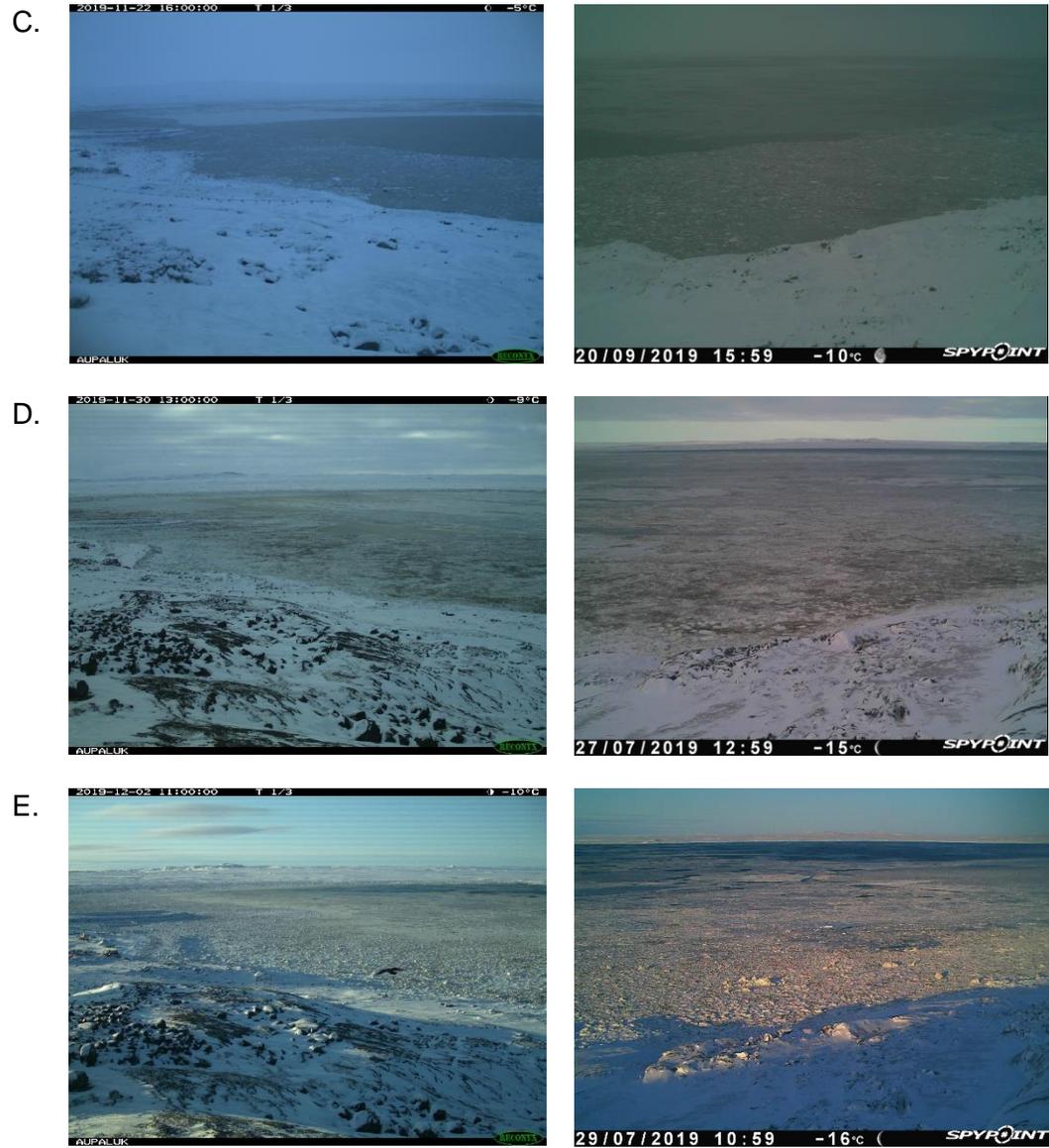


Figure 86 Évolution de l'englacement 2019 à Aupaluk (A-3 novembre 2019, B-12 novembre 2019, C-22 novembre 2019, D-30 novembre 2019, E-2 décembre 2019)

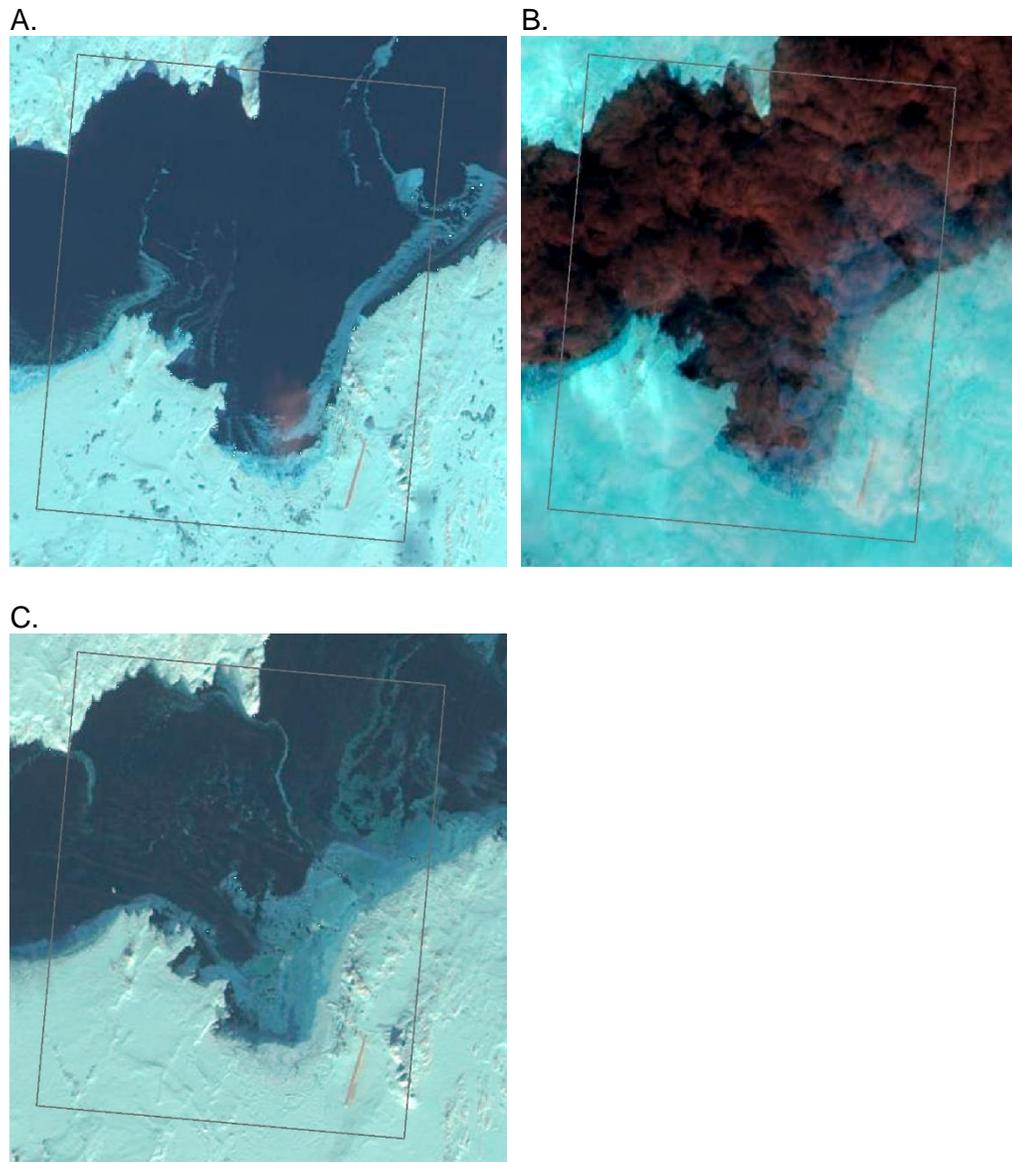


Figure 87 Images satellitaires montrant la baie devant Aupaluk lors de l'englacement 2019 (A- Sentinel-2, 17 novembre 2019; B- Sentinel-2, 30 novembre 2019; C- Sentinel-2, 2 décembre 2019)

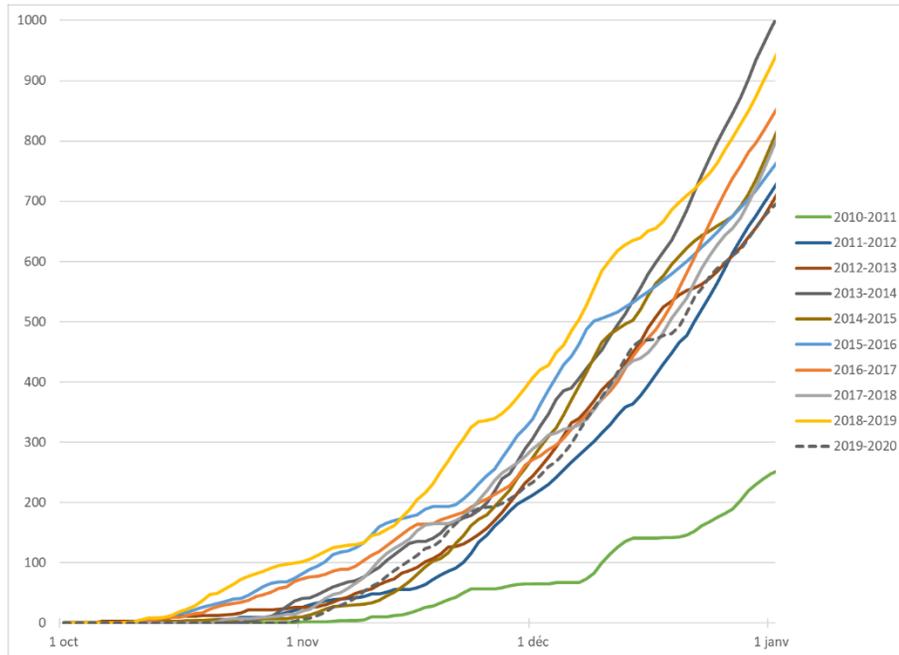


Figure 88 Degrés-jour de gel à Aupaluk du 1^{er} octobre au 1^{er} janvier (2010-2020)

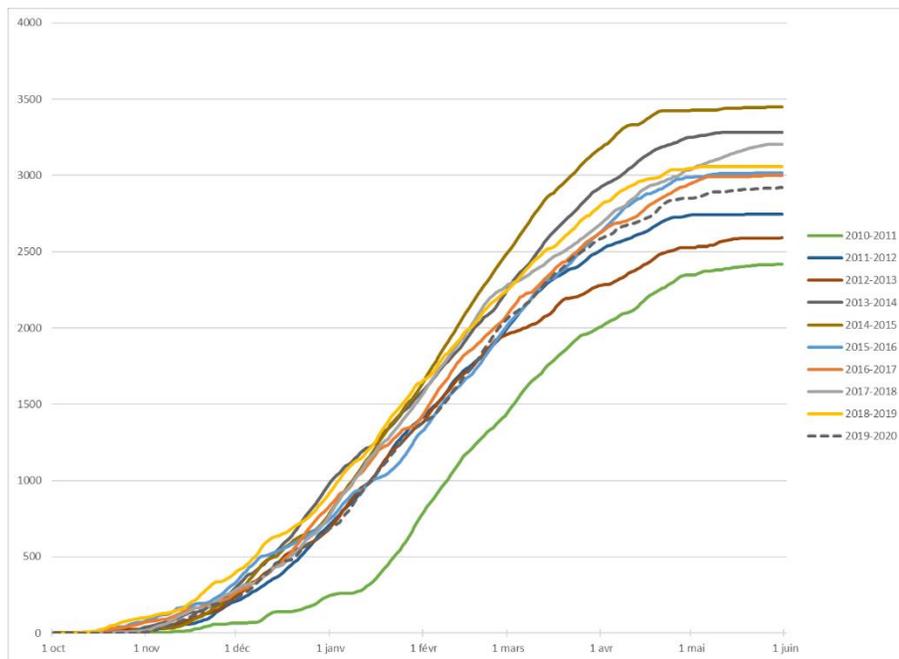


Figure 89 Degrés-jour de gel à Aupaluk lors des saisons hivernales du 1^{er} octobre au 1^{er} juin (2010-2020)

Durant l'hiver 2020, de l'eau fut observable sur les images satellites lors des marées de vives eaux de février (Figure 90-A), mars (Figure 90-B) et avril (Figure 90-C). L'eau est également visible sur les photos. (Figure 90-D).

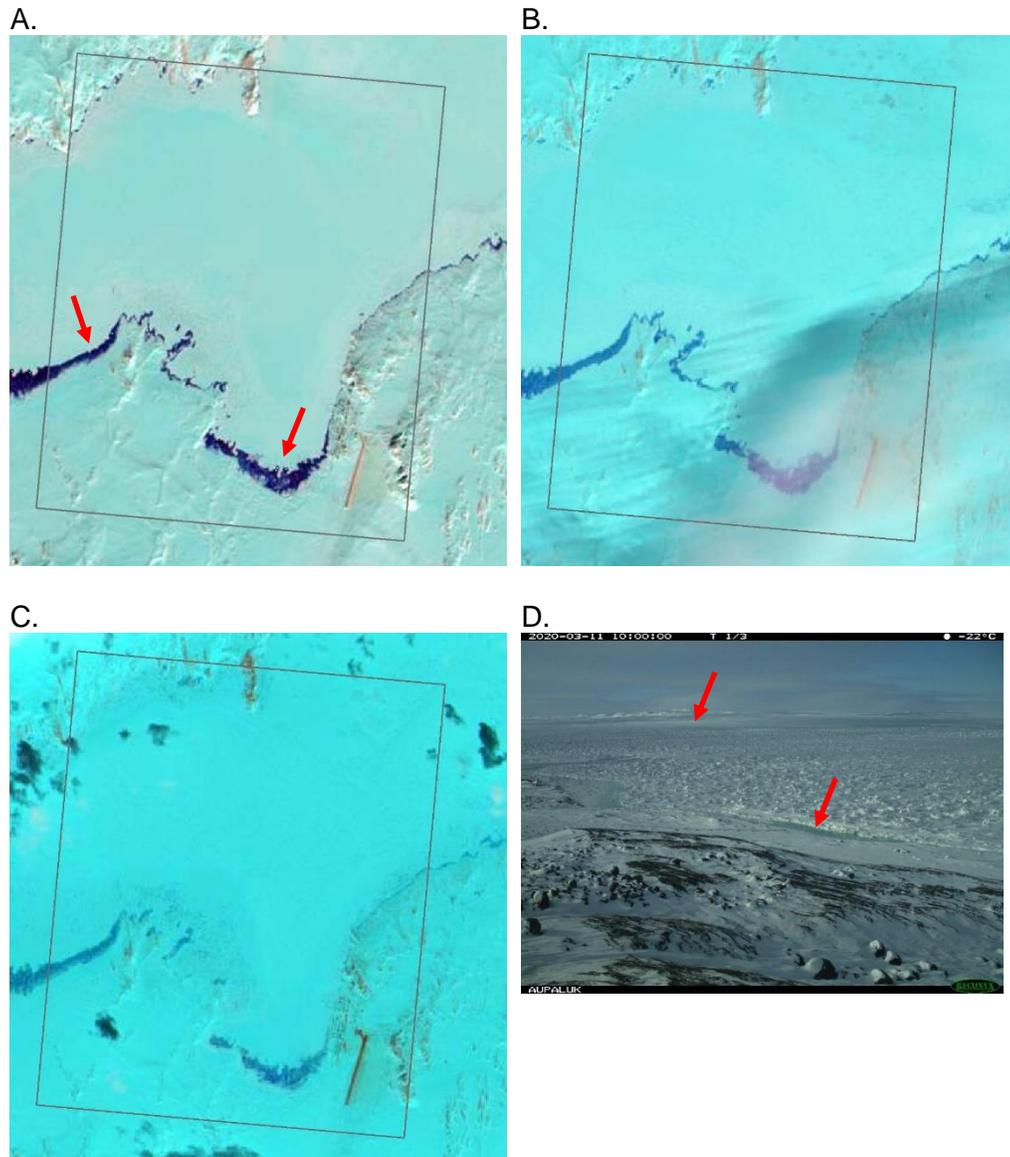


Figure 90 Images satellitaires et photos montrant la baie devant Aupaluk lors de l'hiver 2020 (A- Sentinel-2, 13 février 2020; B- Sentinel-2, 11 mars 2020; C- 11 mars 2020; D- Sentinel-2, 13 avril 2020)

Au printemps 2020, de l'eau apparait dans la zone intertidale vers le 22 mai. Des signes de dégradation du couvert sont visibles sur deux images satellites du 26 mai (Figure 92-A,B). Le couvert semble néanmoins intact à ce moment (Figure 91-A). La fonte se poursuit et, dans la deuxième semaine de juin, des mouvements seront observés dans la zone intertidale (Figure 91-B, Figure 92-C). Une semaine plus tard, de l'eau sera visible hors de la zone de marnage (Figure 91-C, Figure 92-D). À partir de ce moment, la glace sera rapidement évacuée et le secteur sera en eau libre en fin de journée le 21 juin (Figure 91-D). On est alors en présence de marées de vives-eaux. Quelques glaçons seront visibles jusqu'au 1^{er} juillet suite à quoi le secteur sera à l'eau libre de glace pour l'été.

A.



B.





Figure 91 Évolution de la fonte 2020 à Aupaluk (A- 26 mai 2020, B- 11 juin 2020, C- 18 juin 2020, D- 21 juin 2020)

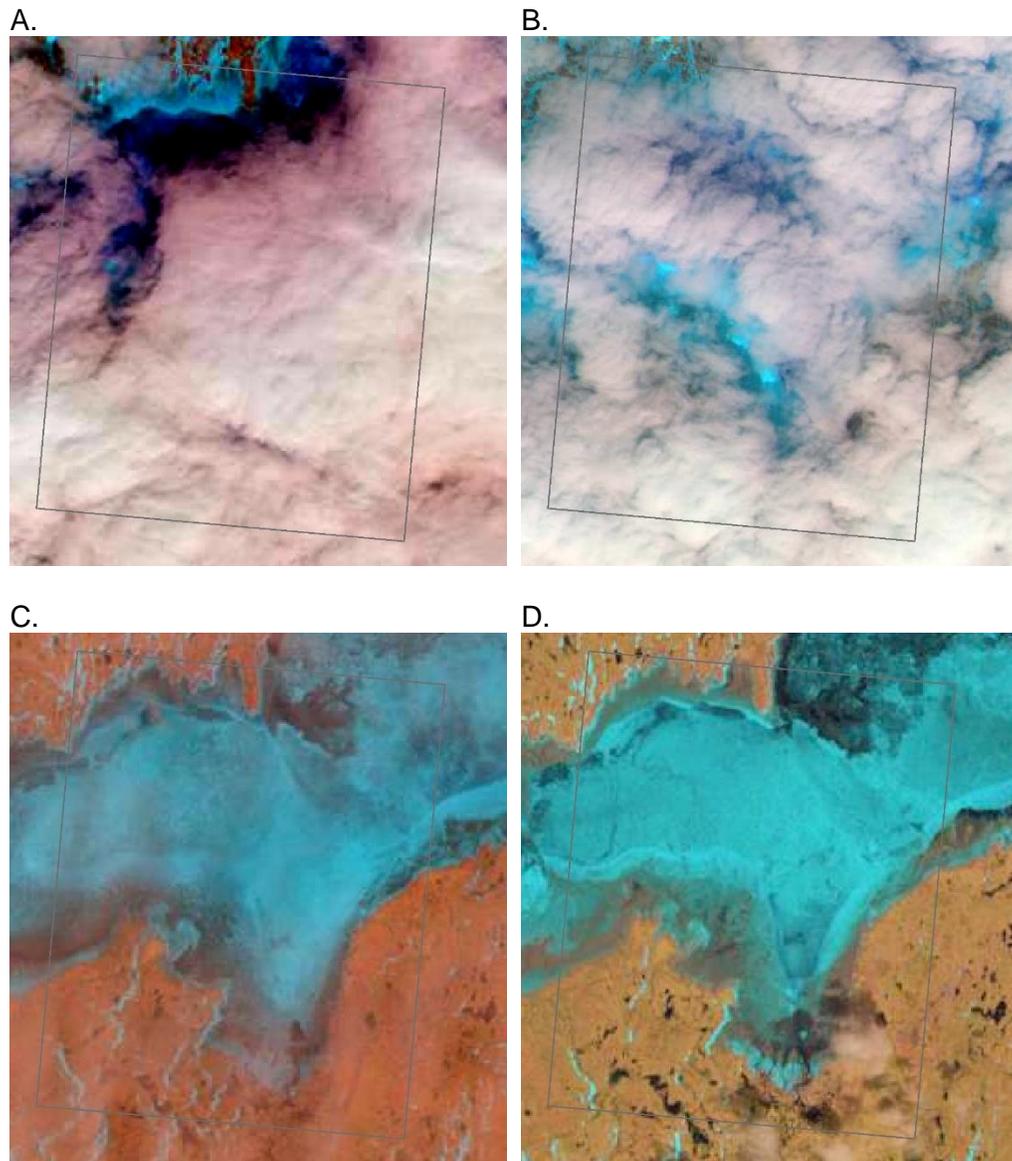


Figure 92 Images satellitaires montrant la baie devant Aupaluk lors de la fonte 2020 (A- Landsat-8, 26 mai 2020; B- Sentinel-2, 26 mai 2020; C- Landsat-8, 11 juin 2020, D- Landsat-8, 18 juin 2020)

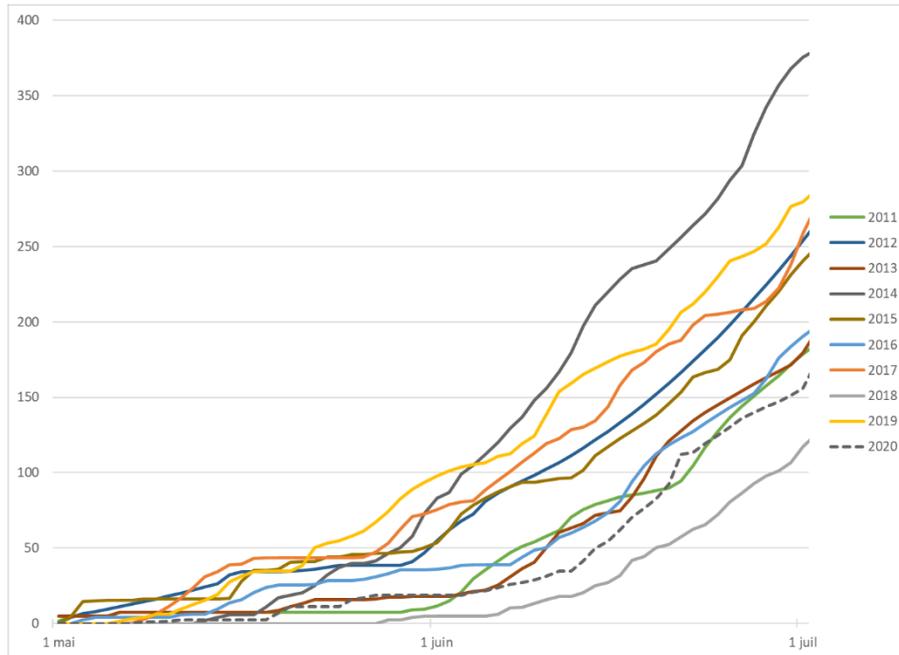


Figure 93 Degrés-jour de fonte à Aupaluk du 1^{er} mai au 1^{er} juillet (2011 à 2020)

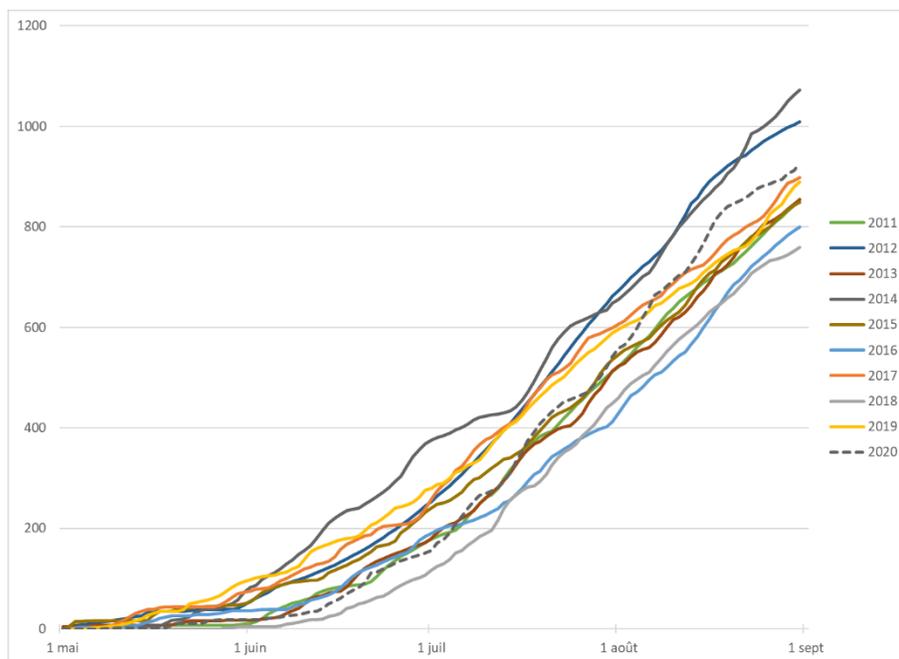


Figure 94 Degrés-jour de fonte à Aupaluk du 1^{er} mai au 1^{er} septembre (2011 à 2020)

Pour conclure cette section, le Tableau 22 synthétise les observations faites au large d'Aupaluk depuis 2015. Le Tableau 23 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour la même période.

Tableau 22 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras d'Aupaluk entre octobre 2015 et août 2020

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Première apparition de glace	26 oct.	18 oct.	?	12 oct.	14 oct.
Couvert de glace permanent	28 nov.	7 déc.	?	2 déc.	6 déc.
Première apparition d'eau	13 juin	7 juin	?	?	17 juin
Eau libre pour la première fois	27 juin	17 juin	?	?	21 juin
Dernières observations de glace	16 juil.	8 juil.	Entre 1 ^{er} et 12 juil.	Entre 2 et 13 juil.	1 ^{er} juil.

Tableau 23 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Aupaluk depuis octobre 2015

Stade d'évolution du couvert de glace	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Durée de l'englacement	32	50	?	51	53
Durée du couvert de glace permanent	198	182	?	?	194
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	14	10	?	?	4
Durée entre l'évacuation des glaces et la dernière apparition de glace lors de la fonte printanière	19	21	?	?	10
Durée totale de présence de glace	258	255	?	?	241

2.6.2 Sommaire

À Aupaluk, les premières observations de nouvelle glace ont généralement lieu lors d'un cycle de vives-eaux pendant les deuxième ou troisième semaine d'octobre. La faible profondeur de l'eau sur de grande distance dans la zone intertidale favorise le refroidissement de la masse d'eau et l'apparition précoce de nouvelle glace. Le large estran permet également une bonne production de gadoue, laquelle contribue également à diminuer la température de l'eau. À noter que la présence de gadoue n'a pas été considérée comme la première apparition de glace dans l'analyse mais elle contribue néanmoins à l'englacement. Malgré la configuration qui favorise la production de glace, l'amplitude des marées et les forces du flux et du reflux créent du mouvement qui retarde la mise en place du couvert, lequel devient fixe vers la première semaine de décembre. L'englacement dure donc en moyenne une cinquantaine de jour.

Durant l'hiver, le couvert de glace demeure stable devant le village d'Aupaluk et sur plusieurs kilomètres vers le nord-est dans la baie Hopes Advance. De l'eau peut néanmoins apparaître dans le haut de l'estran, particulièrement au fond de l'anse Funnel, en périodes de vives-eaux.

Au printemps, alors que la banquise se dégrade thermiquement (des signes sont visibles à partir de la mi-mai), l'arrivée d'eau douce d'un ruisseau dont l'exutoire est au fond de l'anse Funnel, vient éroder la banquise jusqu'à ultimement rejoindre la zone hors de l'estran. La première apparition d'eau hors de l'estran survient généralement lors de la deuxième ou troisième semaine de juin. Par la suite, au fil des marées hautes, l'eau finie par soulever et désagréger des parties du couvert de glace présent sur l'estran et peu de temps est nécessaire avant que l'ensemble de la banquise soit mobilisé. Suite à cela, les marées hautes ramènent à l'occasion des petits floes et des blocs de glace autour et dans l'infrastructure maritime. Les marées sont réellement les moteurs du mouvement de ces blocs. La longueur de l'estran et l'amplitude plus faible des marées de vives-eaux à cette période offrent cependant une protection contre l'arrivée de blocs de grandes épaisseurs.

Les premières journées en eau libre surviennent généralement lors des deux dernières semaines de juin. La présence de glace s'étire ensuite jusqu'au début juillet. Bien que seulement trois saisons printanières ont pu être observées avec les caméras à Aupaluk, les trois saisons analysées ont montré une diminution du temps nécessaire à l'évacuation de la glace suite à la première observation d'eau (Figure 95). La dernière observation de glace semble également survenir plus tôt (Figure 96).

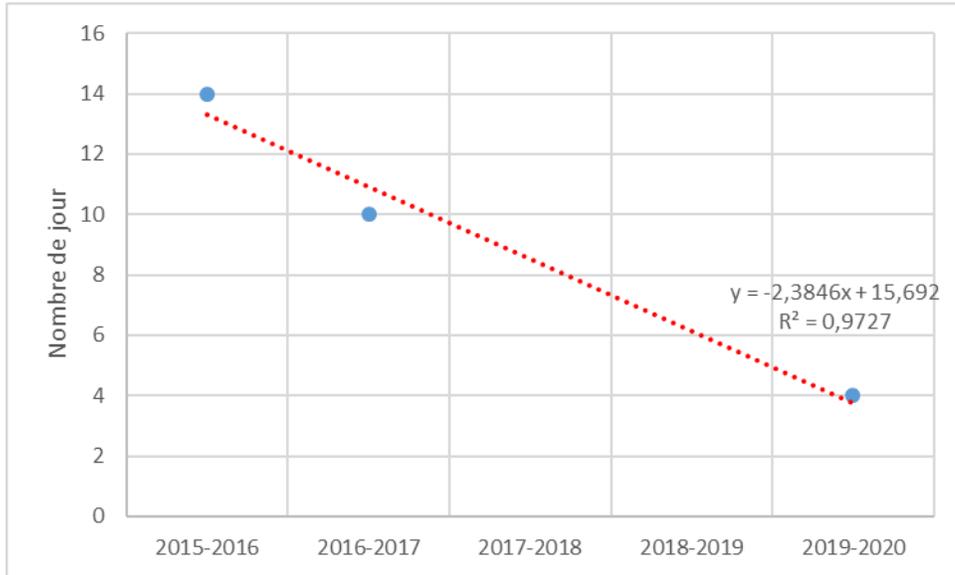


Figure 95 Variation de la durée entre la première apparition d'eau et le premier jour en eau libre.

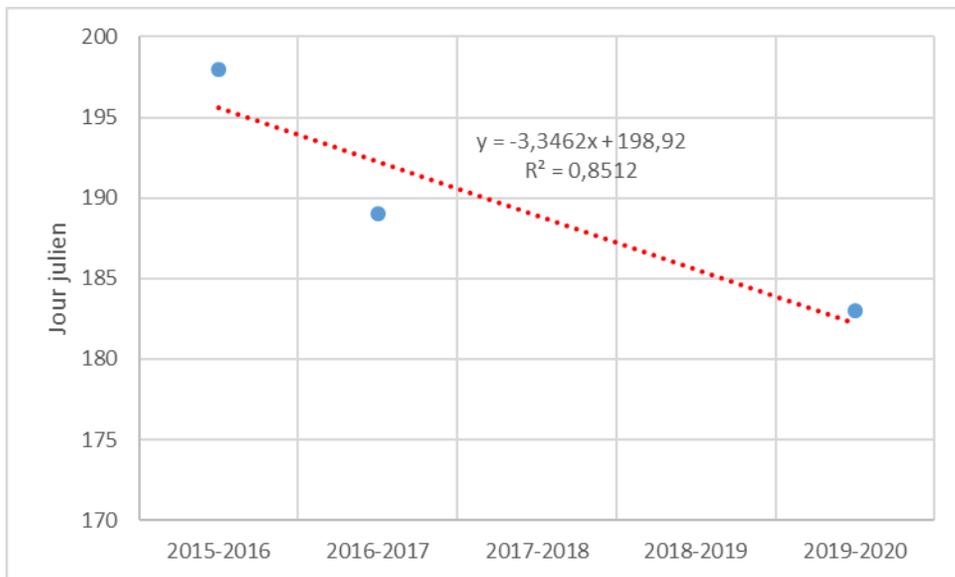


Figure 96 Variation de la date des dernières observation de glace à Aupaluk

3. CALCUL DU FETCH À PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRES POUR QUAQTAQ ET KUJJUARAPIK

Suite à leur classification, les images des satellites Landsat-8 et Sentinel-2 ont été utilisées afin de calculer, si cela était possible, le fetch au moment de l'acquisition des images. Deux situations rendent impossible le calcul du fetch, soit la présence de glace ou de nuage à la position du mouillage. Si le mouillage est en eau libre, la recherche d'obstacle débute dans la direction de provenance du vent. La valeur de fetch obtenue peut être réelle dans les situations où le premier obstacle rencontré est terrestre ou de la glace, ou partielle si des nuages masquant la surface de l'océan sont rencontrés dans la direction de recherche d'obstacle. Il est également possible qu'aucun obstacle ne soit rencontré dans la direction de provenance des vents. Dans ce cas, la recherche s'arrête à la limite de l'image satellitaire et la valeur de fetch est considérée comme partielle. La Figure 97 montre une situation de valeur de fetch réelle alors que la Figure 98 montre une situation où la valeur de fetch n'a pu être déterminée. Cette dernière est donc considérée comme partielle.

Aucun critère quant à la taille minimale des floes afin de les considérer comme des obstacles n'a été mis en place dans l'algorithme. Il est donc possible que de tout petits floes isolés, aussi petit qu'un pixel, et dérivant dans la direction de provenance des vents soient considérés suffisant pour déterminer la valeur réelle du fetch.

Tel que mentionné précédemment, les images sans couvert nuageux en période d'englacement et de fonte ne sont pas très fréquentes. Ainsi, peu de valeurs de fetch ont pu être calculées (10%), soit en raison du couvert nuageux au-dessus du site de mouillage (61%) ou parce que le site était recouvert de glace (29%). Parmi les valeurs calculées, les valeurs de fetch réelles représentent 58% alors que les valeurs partielles représentent 42%.

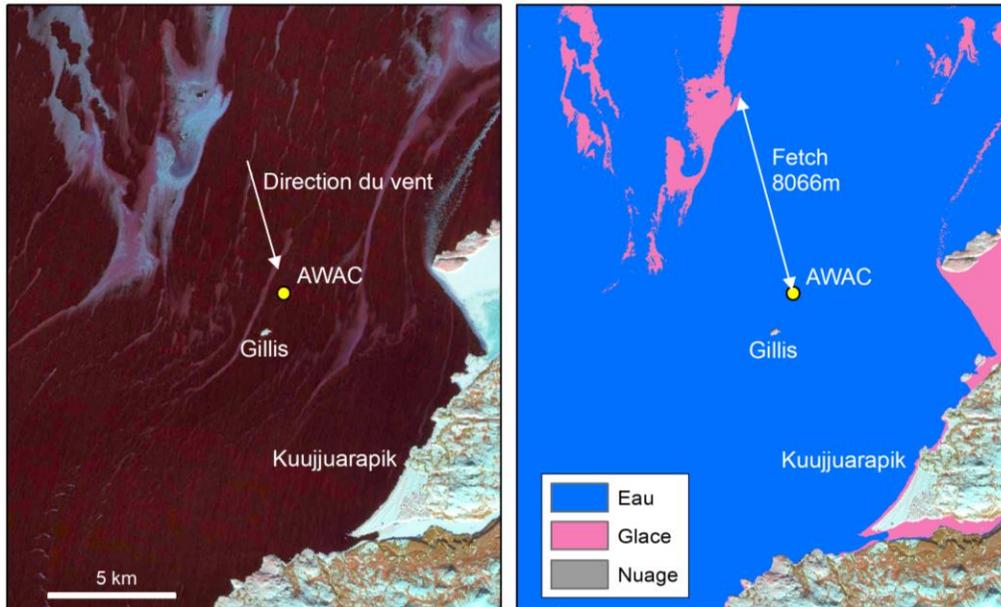


Figure 97 Exemple de valeur réelle de fetch déterminée à partir des images satellitaires (image Sentinel-2, 16 décembre 2018)

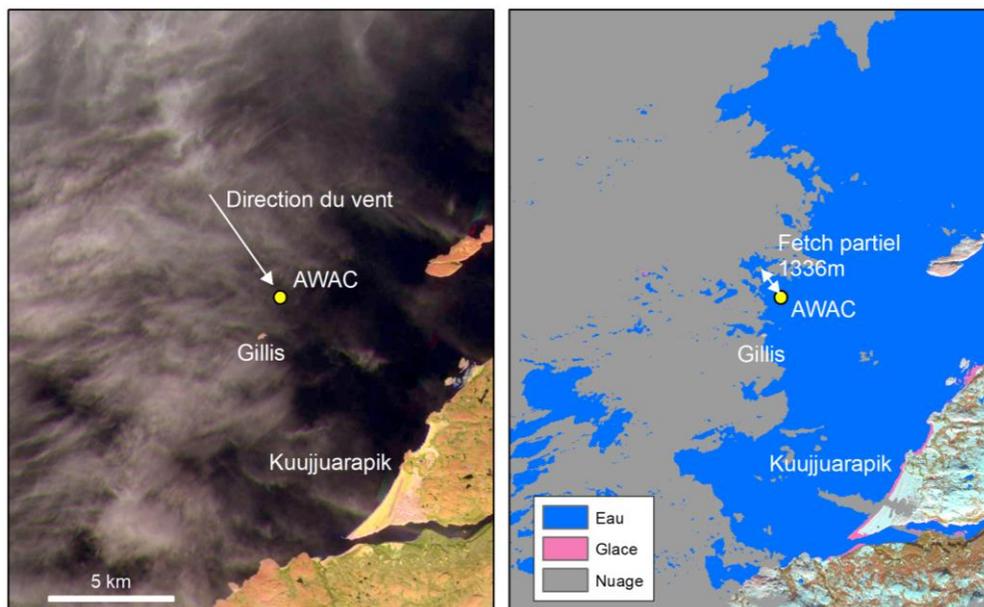


Figure 98 Exemple de valeur partielle de fetch déterminée à partir des images satellitaires (image Sentinel-2, 12 octobre 2018)

4. VALIDATION DU POTENTIEL DE L'IMAGERIE RADAR POUR DÉTERMINER LES CARACTÉRISTIQUES DU FRONT DE VAGUES

En raison des conditions sanitaires reliées à la COVID-19, l'équipe du projet CC016.1 a dû repousser à l'été 2021 sa dernière campagne de terrain prévue à l'été 2020. De ce fait, aucune donnée provenant des AWAC n'a été récupérée depuis l'été 2019. Bien que l'approche proposée ait été appliquée sur toutes les images RADARSAT-2, uniquement celles acquises avant l'été 2019 ont pu être validées. Les traitements et la validation des résultats avaient été présentés dans le rapport d'étape 3 (Bernier et al., 2020). Ils seront présentés de nouveau dans les pages suivantes.

4.1 Traitements et résultats

Les matrices de cohérence C3 et T3 ont été extraites à partir des images RS-2. Les pentes en distance et en azimut ont également été calculées sur les images. Celles-ci sont présentées sur les Figure 99 et Figure 100 respectivement.

L'application de fenêtres spatiales de taille 128x128 et 400x400 pixels a permis d'obtenir une résolution spatiale d'environ 2,5 km par 2,5 km pour les paramètres des vagues sur les deux types d'images. La taille de cette fenêtre détermine la quantité de pixels prise en compte dans les calculs du spectre de Fourier lors de l'extraction des paramètres des vagues significatives. Xie et al. (2015) avaient utilisés une fenêtre de 512x512 pixels. Cette taille ne permettait pas d'extraire les paramètres de vagues proches de la côte. Cela s'avérait problématique dans ce projet sachant que les appareils servant aux mesures des vagues (AWAC) sont installés à environ 1 km de l'île Hearn pour Quaqtak et à 1,6 km de l'île Gillis pour Kuujjuarapik. Par contre, une taille trop petite entraîne un biais important dans le calcul du spectre de Fourier sur les sous-images dans lesquelles les paramètres des vagues significatives sont extraits. L'île Gillis est tellement petite par rapport à la taille de la fenêtre choisie que cet effet reste discret à l'emplacement de la sonde proche de l'île à Kuujjuarapik. Une discussion sur l'effet de la taille de cette fenêtre spatiale devait faire l'objet d'un article lorsque les données des AWAC permettant de valider les résultats des images acquises durant l'automne 2019 seraient disponibles.

L'orientation des directions des vagues extraites sont quasiment perpendiculaires aux structures linéaires observées sur les images de pente en

visée radar (range). L'image de pente est formée par une succession de valeurs positives et négatives. Ces structures linéaires représentent les formes géométriques des fronts de vagues. La Figure 101 représente les directions extraites sur l'image RS2 acquise le 4 octobre 2018 à Quaqtq. Afin de mettre en évidence l'orientation des directions des vagues, celles-ci sont représentées par des flèches sur l'image de la pente. Chacune des flèches représente la direction de provenance des vagues extraite dans chaque bloque de pixel. La résolution spatiale est de 2,5 km.

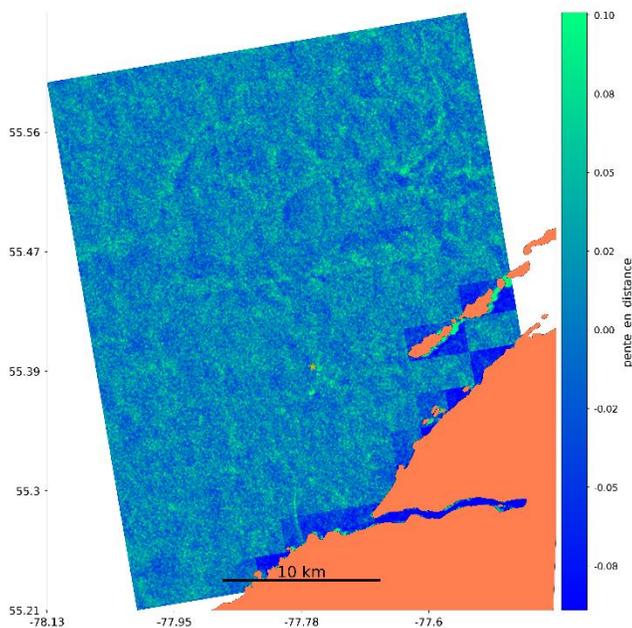


Figure 99 Pente en distance extraite de la scène RADARSAT-2 acquise le 6 octobre 2018 à 22h48 UTC montrant la baie d'Hudson au large de Kuujjuarapik.

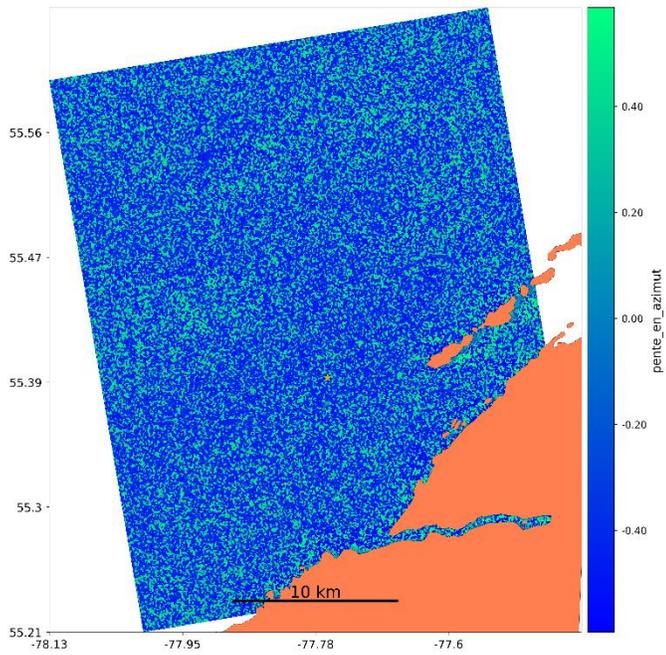


Figure 100 Pente en azimuth extraite de la scène RADARSAT-2 acquise le 6 octobre 2018 à 22h48 UTC montrant la baie d’Hudson au large de Kuujjuarapik.

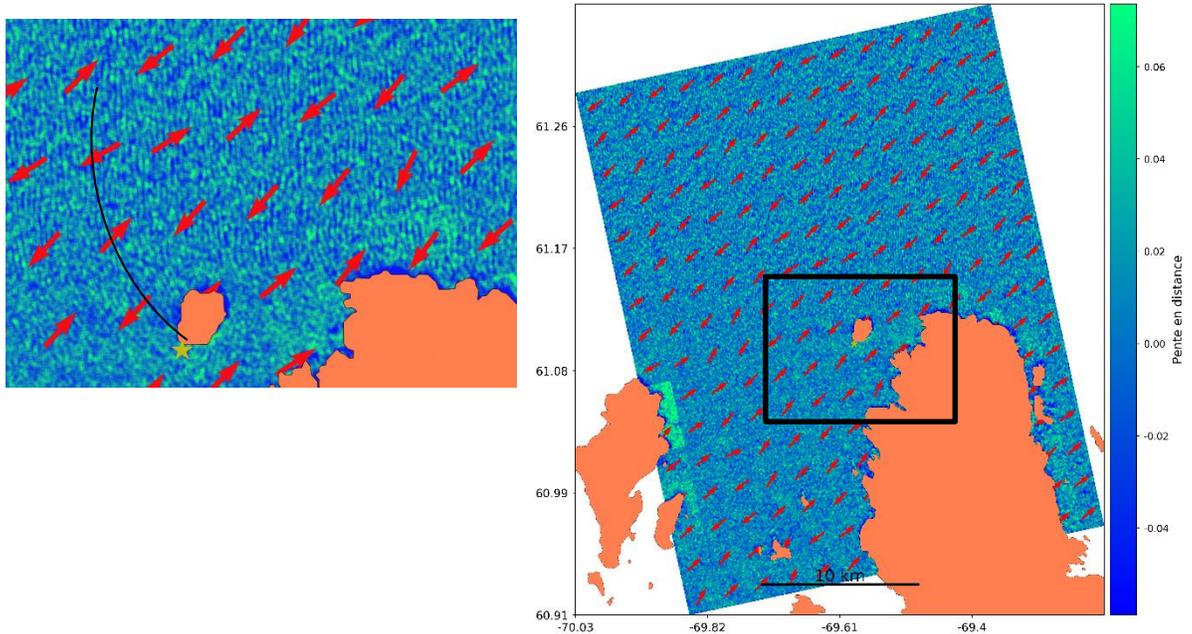


Figure 101 Pente et directions des vagues sur l'image RADARSAT-2 du 2018-10-04 (Quaqtaq). L'arc en noire en haut à gauche indique la forme des vagues après avoir été diffracté sur son déplacement depuis l'Est vers l'ouest.

L'image acquise le 4 octobre 2018 correspond à un évènement de fort vent à Quaqtaq et dans tout le Nunavik. Des membres de l'équipe INRS sur le terrain à Kuujuaq lors de cette journée avaient pu le constater. Pour ces raisons, cette scène a été choisie pour présenter les résultats d'extraction des paramètres de vagues dominantes pour le site à l'Île Hearn à Quaqtaq. D'ailleurs un premier test d'extraction a été effectué sur celle-ci. Les valeurs des hauteurs des vagues extraites varient de 0 m à 2 m et les longueurs d'ondes d'environ 15 m à 50 m (Figure 102 et Figure 103).

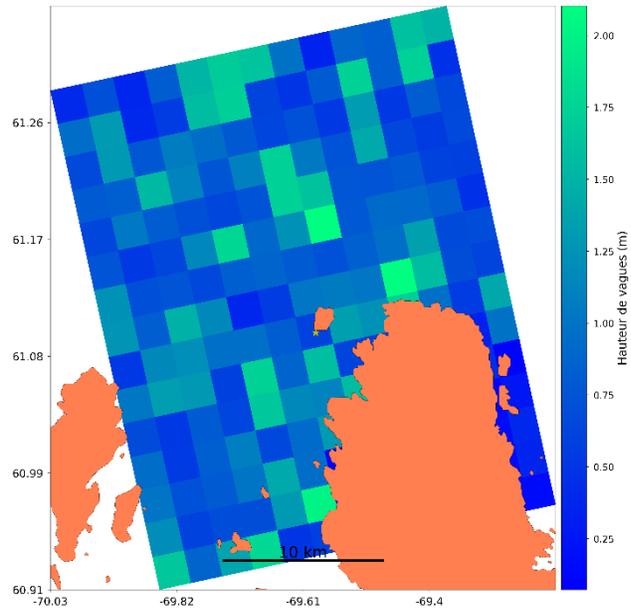


Figure 102 Hauteur des vagues extraites de l'image RADARSAT-2 du 4 octobre 2018 au large de Quaqtaq

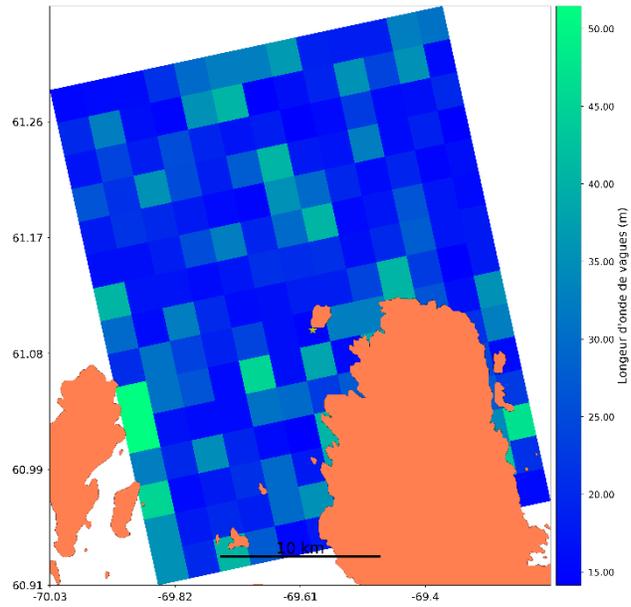


Figure 103 Longueurs d'ondes des vagues extraites sur l'image du 4 octobre 2018 au large de Quaqtaq.

4.2 Validations

Les mesures in situ provenant des instruments de mouillage traitées par l'équipe de l'ISMER ont été utilisées pour la validation. Les données qui se rapprochent le plus du temps d'acquisition de chacune des images ont été sélectionnées pour être comparées aux paramètres des vagues extraites sur les images. En effet, les données à utiliser pour la validation doivent être prises moins d'une heure avant ou après l'acquisition des images RSO (Xie et al. 2015).

La racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (RMSE) a été utilisée pour valider. Malgré le nombre réduit d'images disponibles pour la validation (4 pour chacun des sites), une validation a été effectuée sur chacun des deux sites d'études. Les images acquises durant l'automne 2019 pourront être validées ultérieurement avec les données terrain qui seront récoltés durant la prochaine campagne de terrain en 2021. Les prochains paragraphes présentent les comparaisons des valeurs des paramètres de vagues extraites sur les images RSO avec celles provenant des mesures *in situ* (AWAC) pour les baies avoisinant Kuujuarapik et Quaqtac.

4.2.1 Hauteur des vagues

Les hauteurs de vagues H_m , H_{m0} , $H_{1/3}$ et $H_{1/10}$ ont été comparées aux hauteurs de vagues extraites des images sur les deux sites (Kuujuarapik et Quaqtac). Les définitions de ces paramètres sont résumées ci-après (Tableau 24). La validation des hauteurs de vagues pour le site à Kuujuarapik durant l'automne de l'année 2018 est illustrée par la Figure 100 et celle pour la baie de Quaqtac par la Figure 101.

Tableau 24 : Signification des paramètres utilisés pour la comparaison des hauteurs de vagues

Paramètre	Signification
H_{m0}	hauteur significative des vagues calculée par la méthode spectrale
$H_{1/3}$	hauteur significative des vagues calculée par la méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues)
$H_{1/10}$	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
H_m	hauteur moyenne des vagues (méthode zero-crossing)

Différentes valeurs de RMSE ont été notées pour le site de Kuujuarapik (Tableau 25) et celui de Quaqtac (Tableau 24). Pour les deux tableaux, les valeurs des biais montrent que les images RSO utilisées ont tendance à sous-estimer la hauteur des vagues, sauf pour le cas de H_m sur le site de Quaqtac. La hauteur H_m est celle la plus proche de la hauteur extraite des images avec une valeur de RMSE égale à 0,2 m et un biais de -0,032 m pour Kuujuarapik et un RMSE de 0,6 m et biais de 0,075 m pour Quaqtac. Les valeurs de RMSE et

de biais obtenus à Kuujjuarapik étant inférieures à celles obtenues à Quaqtaq, cela semble montrer l'impact des pixels terrestres sur la qualité des valeurs extraites des images. De plus, la petite taille de l'île Gillis fait qu'il y a moins de pixels terrestres dans la fenêtre de calcul. Sur la Figure 102, nous pouvons constater que presque le quart de la fenêtre de calcul est constitué de pixels terrestres (île Hearn). En somme, plus le groupe de pixels considérés dans le calcul du spectre de Fourier est contaminé par des pixels terrestres, plus la précision des paramètres de vagues semble moindre.

Avec davantage de données de validation, il sera possible de tester l'effet de différentes tailles de fenêtres spatiales et de discuter de l'influence de la taille de celle-ci lors de la procédure de traitement des images. Le code conçu pour effectuer le traitement des images dans ce projet peut accepter une variété de taille de fenêtre spatiale; cela permettra de faire éventuellement différents tests lorsque toutes les données in situ auront été récupérées.

Tableau 25 : Valeur des RMSE obtenus lors de la comparaison avec les hauteurs de vagues extraites sur les images à Kuujjuarapik.

Hauteur	H_m	H_m0	H_1/3	H_1/10
RMSE (m)	0,2	0,4	0,3	0,5
Biais (m)	-0,032	-0,28	-0,265	-0,422

Tableau 26 : Valeur des RMSE obtenus lors de la comparaison avec les hauteurs de vagues extraites sur les images à Quaqtaq.

Hauteur	H_m	H_m0	H_1/3	H_1/10
RMSE (m)	0,614	0,889	0,871	1,12
Biais (m)	0,075	-0,415	-0,394	-0,698

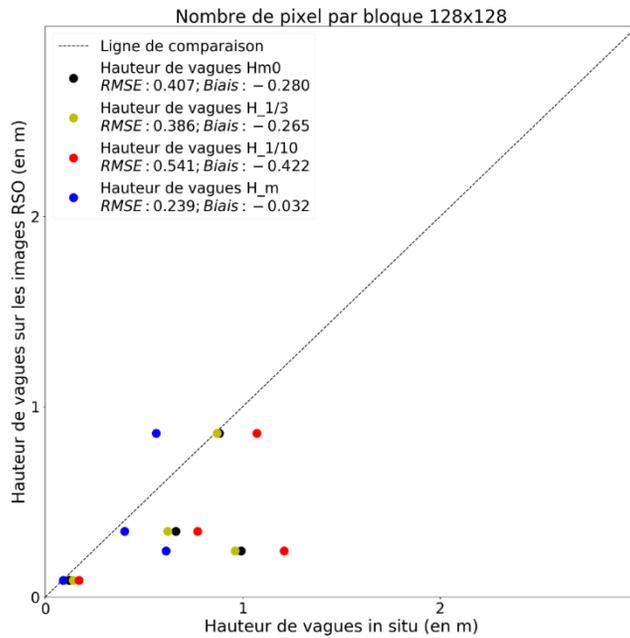


Figure 104 Validation des hauteurs de vagues pour le site à Kuujuarapik pour l'automne de l'année 2018.

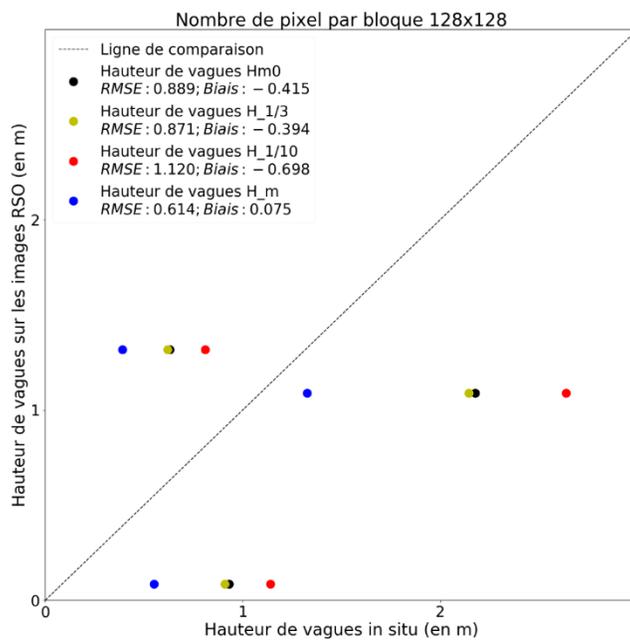


Figure 105 Validation des hauteurs de vagues pour le site à Quaqtq pour l'automne de l'année 2018.

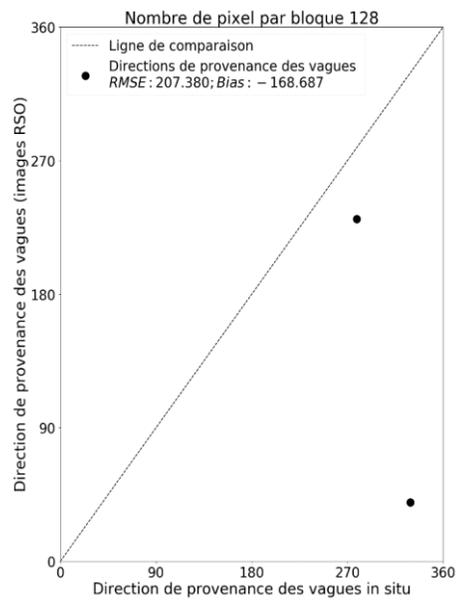
4.2.2 Direction des vagues

Au niveau de la direction des vagues, deux valeurs in situ sont disponibles pour comparer avec les résultats obtenus sur les images. Par conséquent, la qualité des résultats est difficile à juger au moyen de la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (RMSE) ou de tout autre méthode. De plus, l'orientation des directions calculées contient encore une ambiguïté de 180 degrés à corriger. Malgré cette ambiguïté, les directions extraites ont été utilisées comme telles (sans correction) dans les calculs des autres paramètres comme la moyenne quadratique (*Srms*) de la surface d'élévation qui est utile pour déduire la hauteur significative des vagues. Cette surface d'élévation étant celle définie par les pentes en distance et en azimuth extraites sur l'image. La Figure 106 présente les résultats de validation des directions extraites des images par rapport aux directions de provenance des vagues mesurées in situ. En raison des ambiguïtés qui sont encore présentes sur les directions extraites et le nombre très réduit de valeurs incluses dans la validation, nous pouvons constater des valeurs RMSE élevées et des biais importants.

4.3 Sommaire

En raison des conditions sanitaires reliées à la COVID-19, l'équipe du projet CC016.1 a dû repousser à l'été 2021 sa campagne de terrain prévue à l'été 2020. De ce fait, aucune donnée provenant des AWAC n'a été récupérée depuis l'été 2019. Bien que l'approche proposée ait été appliquée sur toutes les images RADARSAT-2 acquises pour le projet, uniquement celles acquises avant l'été 2019 ont pu être validées. Il appert que des RMSE élevées et des biais importants soient observés tant pour les hauteurs que pour les directions des vagues mais nous pouvions nous y attendre étant donné la proximité des côtes et l'importance des masses terrestres entrant dans les calculs des estimés. Des ajustements pourraient être faits sur la méthode proposée lorsque les données in situ (mesures des AWAC) de l'automne 2019 seront éventuellement disponibles. En effet, un plus grand nombre de données de in-situ permettra d'effectuer une meilleure validation des précisions sur les directions et les hauteurs des vagues dominantes qui pourraient être obtenues à l'aide d'images radar polarimétriques comme celles de RADARSAT-2.

A. Kuujuarapik



B. Quaqtq

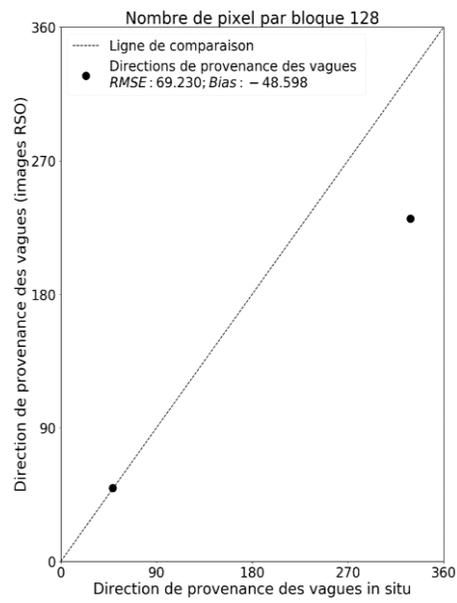


Figure 106 Validation des directions de vagues pour les sites de Kuujuarapik (A) et Quaqtq (B) pour l'automne de l'année 2018.

5. DIFFUSION DES PHOTOGRAPHIES ET DES INFORMATIONS DÉRIVÉES

Les photographies du réseau CAIMAN sont diffusées sur un site internet public hébergé à l'INRS depuis l'automne 2018. La conception de ce site web a été réalisée par un professionnel de l'équipe de recherche à l'été 2018. Une version plus adaptée aux appareils mobiles a également été développée en 2019. Outre les photographies, le site se bonifie actuellement pour diffuser les conditions de sentiers de motoneige partant de Salluit et de Kangiqsujuaq. Le site donnera aussi accès à différentes séries de données mesurées sur le terrain au cours des dernières années au Nunavik. L'adresse du site est www.aiman.ete.inrs.ca.

L'information relative au cycle saisonnier de la glace, ainsi qu'un échantillon de photographies ont également servi de base à la conception d'un calendrier qui fut distribué dans chacun des villages du Nunavik et aux partenaires du projet CAIMAN au printemps/été 2018. Outre l'information sur le cycle saisonnier de la glace, le calendrier présente les cycles saisonniers de la neige et de la végétation de même que l'accessibilité à l'infrastructure maritime. Ces informations ont également été extraites à partir des photographies du réseau CAIMAN. Le calendrier, traduit en Inuktitut, est également accompagné d'œuvres d'une artiste Inuit de Kuujuaq. Ce calendrier a été financé par Savoir Polaire Canada et le projet CC09.2 a servi de levier financier. Un second calendrier a également été produit pour l'année 2019-2020 et porte sur l'observation des conditions météorologiques à partir des photos du réseau CAIMAN.

L'installation des caméras sur l'île Gillis en 2017 a également été suivie par une équipe de réalisation de CBC Nord dans le cadre d'un reportage sur les changements climatiques. Ce dernier a été diffusé sur les ondes de CBC Montréal à l'émission MAAMUITAAU le dimanche 17 février 2019 à 11h30. L'émission peut être regardée en ligne à l'adresse suivante : <https://watch.cbc.ca/media/maamuitaa/season-36/episode-17/38e815a-0106917d2f1>

6. CONCLUSION

Ce projet a permis de poursuivre avec succès la documentation historique des conditions de glace de rive au voisinage de six infrastructures maritimes du Nunavik pour la période 2017-2020, soit : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk. Deux nouveaux sites ont également été instrumentés sur des îles près des communautés de Quaqtaq et de Kuujjuarapik.

Les quatre objectifs spécifiques du projet ont été réalisés:

1. Maintenir en bon état de fonctionnement les systèmes de suivi des glaces par caméras au voisinage des infrastructures maritimes de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk;

Tous ces sites ont été entretenus annuellement et ont bien fonctionné dans l'ensemble. Considérant les 16 caméras utilisées pendant les trois ans du projet, et les 12 déjà en place lors de l'hiver 2016-2017, c'est un total de 240 saisons qui pouvaient être observées par les caméras du réseau CAIMAN. Les problèmes rencontrés ont causé la perte de 41 saisons de données. En retirant les problèmes dont la cause est connue, 13 saisons ont été perdues sur une possibilité de 212, soit 6% de perte. Sur ces 13 saisons perdues, sept l'ont été par des caméras de marque SpyPoint, utilisées comme remplacement à la suite du vol des caméras d'Aupaluk. Ces caméras n'ont pas un grand pourcentage d'efficacité, ayant fonctionné cinq saisons sur douze (42%). Quant aux caméras Reconyx, elles ont fonctionné 97% du temps (194/200).

Lors de la dernière campagne de terrain prévue à ce projet, soit à l'automne 2020, les sites nouvellement instrumentés sur des îles à proximité des villages de Quaqtaq et Kuujjuarapik ont été démontés en raison de l'incertitude liée à la pérennité du réseau et de la difficulté d'accès à ces sites. Les sites de la Baie Déception ont été retirés pour les mêmes raisons. Les autres sites dans les communautés de Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Quaqtaq et Aupaluk sont toujours en place et étaient fonctionnels après l'entretien effectué en 2020.

2. À partir des photos et des images satellitaires, établir les dates d'englacement et de fonte ainsi que les concentrations de glace pour ces six sites pour la période 2017-2020;

Le réseau CAIMAN a fait l'acquisition d'un total de plus de 256 000 photographies qui ont pu être utilisées lors de la période 2016-2020. À ce nombre s'ajoutent environ 3400 images des satellites Landsat-8 et Sentinel-2 pour la même période. Ces photos et ces images satellitaires ont permis de documenter l'évolution des conditions des glaces de rive dans un contexte de changement climatique et les conditions de glace qui peuvent représenter un risque pour ces ouvrages côtiers pour les six (6) sites à l'étude. Les photos horaires permettent de bien distinguer l'arrivée et le départ de la glace, ainsi que

la présence de blocs en dérive qui peuvent représenter un risque pour l'infrastructure maritime. Par contre, il est essentiel de déterminer des procédures précises et un vocabulaire commun, afin d'éviter l'incertitude au niveau du choix de la date exacte d'englacement et de fonte. Sur certains sites, la caméra peut même être obstruée par le givre pendant les périodes d'englacement et de fonte. Les images satellitaires viennent compléter l'information des photos en fournissant une vue plus régionale des conditions de glace. Par contre, rares sont les images acquises sans la présence de nuages ou de brume pendant les périodes critiques (englacement et fonte) et qui permettent de voir la zone observée par la caméra.

Les séries de données pluriannuelles des sites à l'étude a permis de faire les constats suivants pour chacun d'eux:

À Kuujuarapik, le secteur de l'infrastructure maritime située au nord du village est relativement calme. La mise en place du couvert de glace semble très liée aux températures mesurées. Pour les cinq périodes d'englacement observées, le couvert s'est fixé le jour où le cumul des DJG est passé au-dessus de 250. Les vents dominant de l'ouest et du nord lors du printemps apporte parfois de grande quantité de glace à l'intérieur du détroit mais ceux-ci ne présentent pas de risque pour l'infrastructure maritime. L'englacement au nord-est de l'île Gillis est le résultat d'une suite répétée de production de glace, décrochement et apport de glace exogènes. En raison de ces mouvements, le couvert ne se fixe que vers la mi-janvier. Durant l'hiver, des mouvements et des décrochements de la banquise peuvent survenir à quelques reprises. Ceux-ci surviennent principalement au nord et à l'ouest de l'île. Le secteur à l'est situé entre l'île Gillis, l'île Bill of Portland et le village de Kuujuarapik demeure généralement épargné par ces décrochements. Au printemps, lorsque la glace est mobilisée, des suites de mouvements similaires à ceux de l'englacement sont observés. La glace mobile peut être observée pendant plusieurs semaines.

À Umiujaq, les durées des périodes d'englacement et de fonte furent très variables au cours des 11 dernières années et ne montrent pas de tendance particulière. La durée du couvert fixe montre quant à elle une augmentation relativement significative de l'ordre de 30% au cours de la même période.

À Ivujivik, selon la tendance des cinq dernières années, la durée de la période entre la première apparition d'eau et l'évacuation (premier jour à l'eau libre) a augmenté de 300%, soit une augmentation de près de 40 jours. La durée du couvert de glace permanent a quant à elle diminuer d'autant de jours.

À la Baie Déception, la première apparition de glace survient de la troisième semaine d'octobre à la quatrième semaine de novembre. Le couvert de glace se fixe quant à lui de la dernière semaine de novembre à la troisième semaine de décembre. Depuis l'installation des caméras, il est possible de constater une mise en place plus tardive du couvert de glace. Au printemps, la glace se détériore sur place puis est évacuée rapidement. Le trafic maritime contribue possiblement à l'évacuation rapide en fracturant le couvert de glace déjà affaibli

ce qui permet à de grands morceaux de banquise de se détacher et d'être mobilisé.

À Quaqtaq, il est fréquent que des blocs de glace s'échouent dans la zone intertidale et contre les infrastructures maritimes. Ces blocs peuvent dépasser aisément les 5 m d'épaisseur, et même les 10 m. Néanmoins, la faible profondeur devant les infrastructures de même que les hauts fonds devant l'infrastructure la plus récente offrent une bonne protection contre les glaces épaisses arrivant du large.

À Aupaluk, les trois saisons de fonte analysées ont montré une diminution du temps nécessaire à l'évacuation de la glace suite à la première observation d'eau. La dernière observation de glace semble également survenir plus tôt.

3. À partir des photos et des images satellitaires, produire les cartes de glace et déterminer le fetch et les concentrations de glace pour les deux nouveaux sites de Kuujuarapik et Quaqtaq (dédiés à l'étude des vagues) pour la période 2017-2020;

Pour les deux nouveaux sites de Kuujuarapik et Quaqtaq instrumentés en 2017 et dédiés à l'étude des vagues, les images satellitaires ont été classifiées afin de produire des cartes montrant la présence ou l'absence de glace. En superposant les grilles de modélisation des vagues, il est possible de calculer, pour chaque maille, la concentration de glace présente au moment de l'acquisition de l'image. Cette information pourra être utilisée dans le cadre du projet CC16.1 mené à l'ISMER comme intrant au modèle de vagues ou pour l'analyse des résultats de ce dernier. Les images classifiées ont également servi à déterminer la longueur du fetch au moment où les images ont été acquises. L'intérêt était particulièrement porté aux périodes où la glace est présente. Comme mentionné précédemment, les images sans couvert nuageux en période d'englacement et de fonte ne sont pas très fréquentes. Cela s'explique aisément par les différences de température plus marquées à cette période entre la mer et le continent, lesquelles favorisent la production de nuages. Ainsi, peu de longueurs de fetch ont pu être calculées (10%), soit en raison du couvert nuageux au-dessus du site de mouillage (61%) ou parce que le site était recouvert de glace (29%).

4. À l'aide de l'imagerie satellite radar, estimer les patrons de vague (hauteur, direction, période) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année en 2017-2018 et 2018-2019, à des fins de validation des modèles de vague.

Les images satellitaires, RADAR cette fois-ci, ont également été utilisées afin d'estimer les patrons de vague (hauteur, direction, période) au voisinage de ces deux mêmes sites à certains moments de l'année en 2017-2018 et 2018-2019, à des fins de comparaison des modèles de vagues. La méthode employée étant encore peu utilisée, des modifications ont été faites afin de rencontrer les

besoins du projet. Les résultats de cette méthode doivent être validés afin d'en définir la précision avec un bon niveau de confiance. Les données mesurées par les AWAC mis en place dans le cadre du projet CC016.1 devaient servir à cette validation. Les images RS-2 acquises à l'automne 2018 ont pu être traitées et comparées avec les données mesurées par les AWAC. Cependant, en raison des conditions sanitaires liées à la COVID-19, l'équipe du projet CC016.1 a dû repousser à l'été 2021 sa dernière campagne de terrain prévue à l'été 2020. De ce fait, aucune donnée provenant des AWAC n'a été récupérée depuis l'été 2019. Les traitements faits sur les images RS-2 acquises à l'automne 2019 n'ont donc pas pu être validés. Pour les images acquises en 2018, il appert que des RMSE élevées et des biais importants sont observés tant pour les hauteurs que pour les directions des vagues. Ces éléments peuvent être causés par la proximité des côtes et l'importance des masses terrestres entrant dans les calculs des estimations. Des ajustements pourraient être faits sur la méthode proposée lorsque les données in situ (mesures des AWAC) de l'automne 2019 seront éventuellement disponibles. En effet, un plus grand nombre de données in-situ permettra d'effectuer une meilleure validation des précisions sur les directions et les hauteurs des vagues dominantes qui pourraient être obtenues à l'aide d'images radar polarimétriques comme celles de RADARSAT-2.

Les principaux bénéfices attendus du projet ont été atteints malgré les défis technologiques et les contraintes dues à la crise sanitaire en 2020. En résumé, le projet a permis de :

- Poursuivre la documentation historique des processus d'englacement et de fonte initiée depuis 2009, permettant ainsi d'avoir des données sur une plus longue série temporelle. Le maintien et l'entretien des systèmes de caméra déjà en place ont permis de maximiser les investissements déjà réalisés dans le cadre de projets antérieurs.
- Poursuivre le développement de la connaissance sur les conditions de glaces de rive au Nunavik qui peuvent représenter un risque pour les ouvrages côtiers, la navigation et la circulation de la population sur le couvert de glace pour la pratique des activités de subsistance dans un contexte de changements climatiques.
- Fournir des données qui ont été utilisées dans le cadre d'un autre projet de recherche financé par le Ministère (CC16.1 « 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 »).

Aussi, une fois les projets de recherche CC09.2 et CC16.1 complétés, à partir des données recueillies, il sera possible d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques, ce qui devra faire l'objet d'un futur projet de recherche. Les observations sur les glaces pourront aussi servir dans le cadre d'un exercice visant à édicter des normes guidant la construction ou l'entretien des infrastructures maritimes au Nunavik. L'ensemble des données recueillies et des résultats obtenus (photos, images,

cartes, graphes, analyses) peuvent servir à tous les partenaires autant publics que privés impliqués dans la conception et/ou l'entretien d'infrastructures maritimes au Nunavik (Administration régionale Kativik, MTQ, compagnies privées, etc.). Les photos et cartes numériques seront transmises au ministère des Transports en parallèle au dépôt du rapport final, selon une modalité à préciser (support physique ou transfert électronique).

Depuis 2009, les caméras ont acquis près de 500 000 photos, ce qui en fait une base d'information de premier plan sur les conditions de glace de rive au Nunavik. Il sera donc profitable de maintenir les efforts et les fonds nécessaires à l'entretien du réseau de caméras mis en place dans le cadre de ce projet afin de poursuivre l'observation de l'environnement dans ces sites dans un contexte de changement climatique, afin d'enrichir la base de données sur les risques aux infrastructures dues aux glaces mobiles ou aux vagues et de poursuivre le développement de la connaissance sur les conditions de glaces de rive au Nunavik.

Afin d'assurer la pérennité du réseau CAIMAN pour lequel le Ministère et l'Administration Régionale Kativik ont assuré une bonne partie du financement, une proposition intitulée « Programme de formation et de partage des connaissances en soutien à l'appropriation efficace du réseau CAIMAN par les Nunavimmiut » a été soumise au Programme d'application des connaissances polaires de Savoir polaire Canada en 2019. Cet organisme est responsable de l'avancement des connaissances du Canada sur l'Arctique, du renforcement du leadership canadien en sciences et technologies polaires et de la promotion de l'élaboration et de la diffusion des connaissances sur les autres régions circumpolaires. Bien que le projet devait débiter en 2020, l'évaluation de la proposition a été retardée à cause de la pandémie et une mise à jour du budget pour les années (2021-2024) et des lettres d'appui ont été demandées en février 2021. Toutefois, vu le court laps de temps pour les fournir, de nouvelles lettres de support de l'ARK et du MTQ n'ont pu être soumises. S'il est financé, ce projet permettrait la mise en place d'un programme de formation destiné aux communautés du Nunavik afin que des membres de chacune d'elles soient en mesure de prendre en charge certains équipements scientifiques déployés dans leur communauté. Il est principalement question ici des caméras du réseau CAIMAN, dont certaines transmettent par lien cellulaire ou par lien satellite, et de stations météorologiques. Le financement permettrait également des visites annuelles pour l'entretien du réseau CAIMAN par le personnel de l'INRS pendant trois ans (2021-2024) ce qui assurerait une prise en charge graduelle du réseau par les communautés. Si la proposition n'est pas financée, l'ARK et l'INRS étudieront différentes avenues de financement afin de maintenir opérationnel le réseau des caméras CAIMAN et d'assurer la prise en charge par les Nunavimmiut.

7. RÉFÉRENCES

Bernier M., Poulin J. et Y. Gauthier. (2021). « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (2017-2020) ». *Rapport technique no.4.*, Québec: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement. 55 pages. (INRS - Centre Eau Terre Environnement, rapport de recherche; 2004).

Bernier, M., Poulin, J., Ratsimbazafy T. et Y. Gauthier. (2020). « 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 (2017-2020) - Projet de recherche CC09.2. » *Rapport d'étape 3.*

Bernier, M., Poulin, J., Ratsimbazafy T. et Y. Gauthier, (2019). « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (2017-2020) ». *Rapport technique no.3.*, Québec: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement. 37 pages.

Bernier, M., Poulin, J., Ratsimbazafy T., Gauthier Y. et D. Éthier. (2019). « 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 (2017-2020) - Projet de recherche CC09.2. » *Rapport d'étape 2.*

Bernier, M., Poulin, J., Gignac, C. et Y. Gauthier. (2017). « 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 - Projet de recherche CC09.1. », *Rapport final.*

Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y, Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J-S. et E. Duhamel-Beaudry, (2012). « Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik: Quaqtac, 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 pages.

McCandless, S. et C. R. Jackson (2004). « Principles of synthetic aperture radar. » SAR Marine User's Manual: 1-23.

Poulin, J., Bernier, M., et T. Ratsimbazafy, (2018). « 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 (2017-2020) - Projet de recherche CC09.2. » *Rapport d'étape 1*.

Poulin, J., Bernier, M., et Y. Gauthier, (2019). « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (2017-2020) ». *Rapport technique no.2.*, Québec: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement. 35 pages.

Poulin, J., Bernier, M., et Y. Gauthier, (2017). « Suivi des conditions des glaces de rive et de vagues à l'aide de caméras et d'imagerie satellitaire à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac et Aupaluk (2017-2020) ». *Rapport technique no.1.*, Québec: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement. 48 pages.

Qiu, S. Zhu, Z. et B. He, (2019). « Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4-8 and Sentinel-2 imagery ». *Remote Sensing of Environment*. 231. 111205. 10.1016/j.rse.2019.05.024.

Ratsimbazafy, T. et M. Bernier (2015). « Wind Direction Ambiguity Removal Using RADARSAT-2 Polarimetric SAR Images. ». *Canadian Journal of Remote Sensing* 41(4): 249-261.

Ulaby, F. T., D. G. Long, W. J. Blackwell, et al. (2014). « Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing », University of Michigan Press.

Xie, T., Perrie, W., He, Y., Li, H., Fang, H., Zhao, S., et Yu, W., (2015). « Ocean surface wave measurements from fully polarimetric SAR imagery », *Science China Earth Sciences* 58(10): 1849-1861.

Zhu, Z. et C. Woodcock, (2012). « Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery ». *Remote Sensing of Environment*. 118. 83–94. 10.1016/j.rse.2011.10.028.

Xie, Tao & Perrie, W. & He, Yijun & Li, Haiyan & Fang, He & Zhao, ShangZhuo & Yu, WenJin. (2015). Ocean surface wave measurements from fully polarimetric SAR imagery. *Science China Earth Sciences*. 58. 10.1007/s11430-015-5078-6.

ANNEXE A

Origine et vitesse des vents

A.1 Sites de Kuujjuarapik

Les vitesses et directions des vents pour le village de Kuujjuarapik proviennent d'une station météorologique opérée par Environnement Canada (EC). Cette station est située à environ 10 km au nord de la communauté.

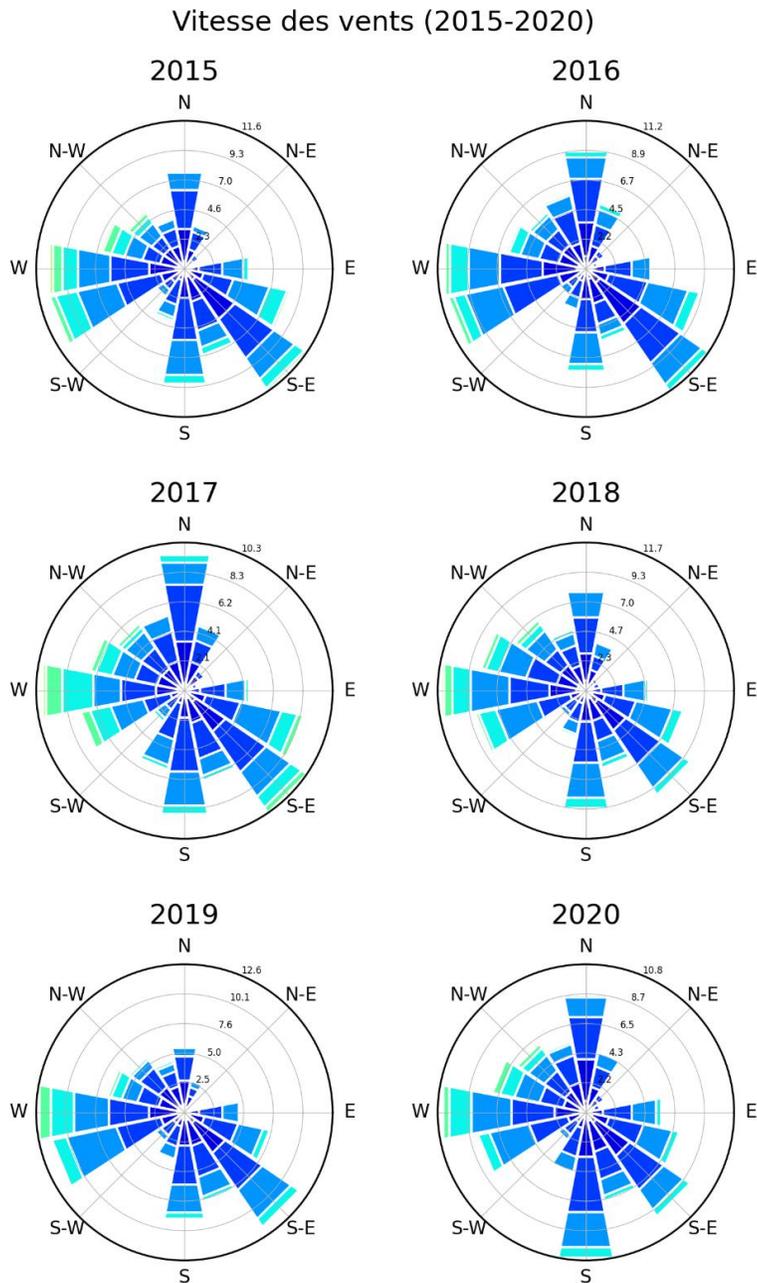


Figure 107 Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik de 2015 à 2020.

Vitesse des vents par saison (JFM)

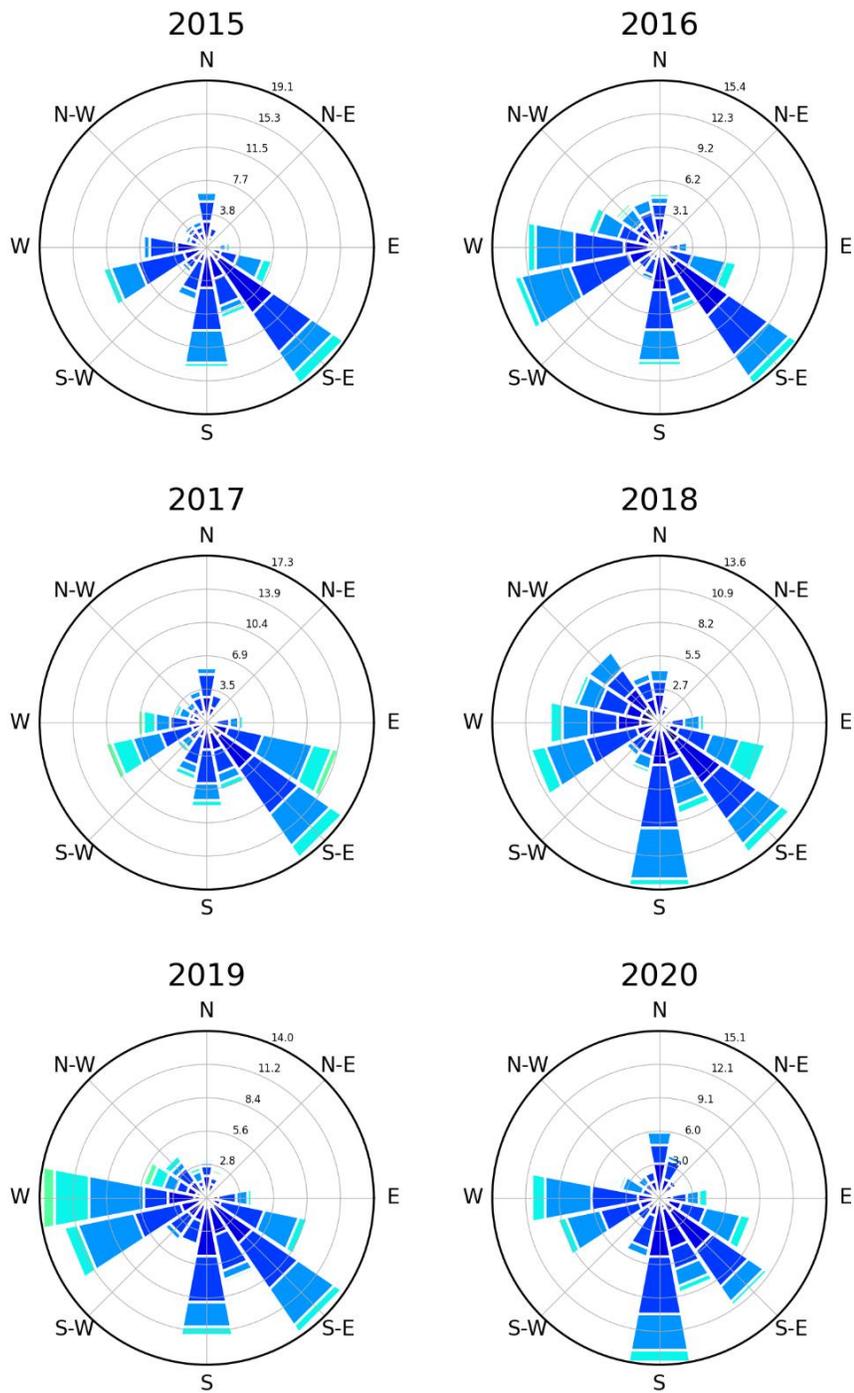


Figure 108 Origine et vitesse des vents à Kuujuaupik lors des mois de janvier, février et mars.

Vitesse des vents par saison (AMJ)

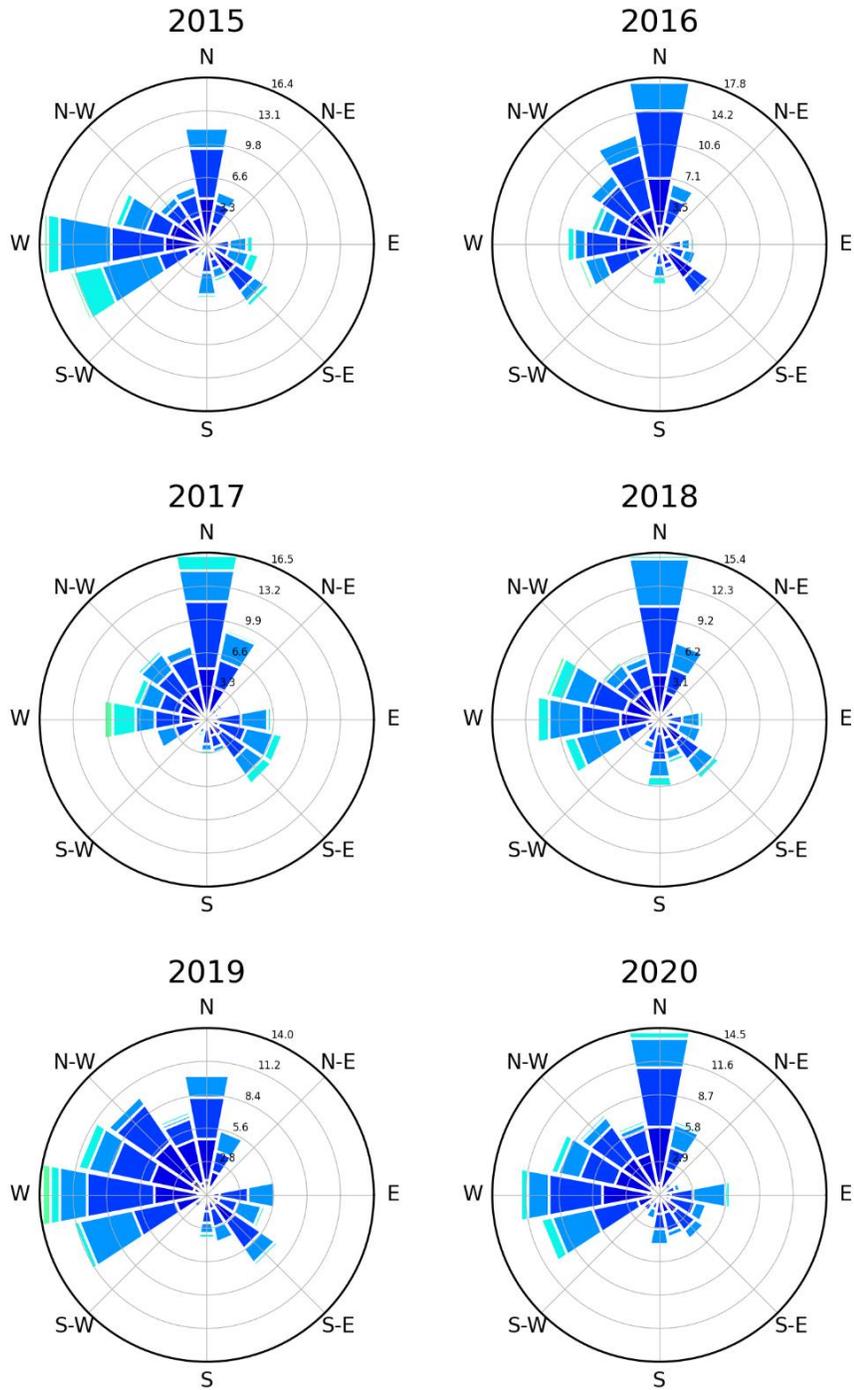


Figure 109 Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois d'avril, mai et juin.

Vitesse des vents par saison (JAS)

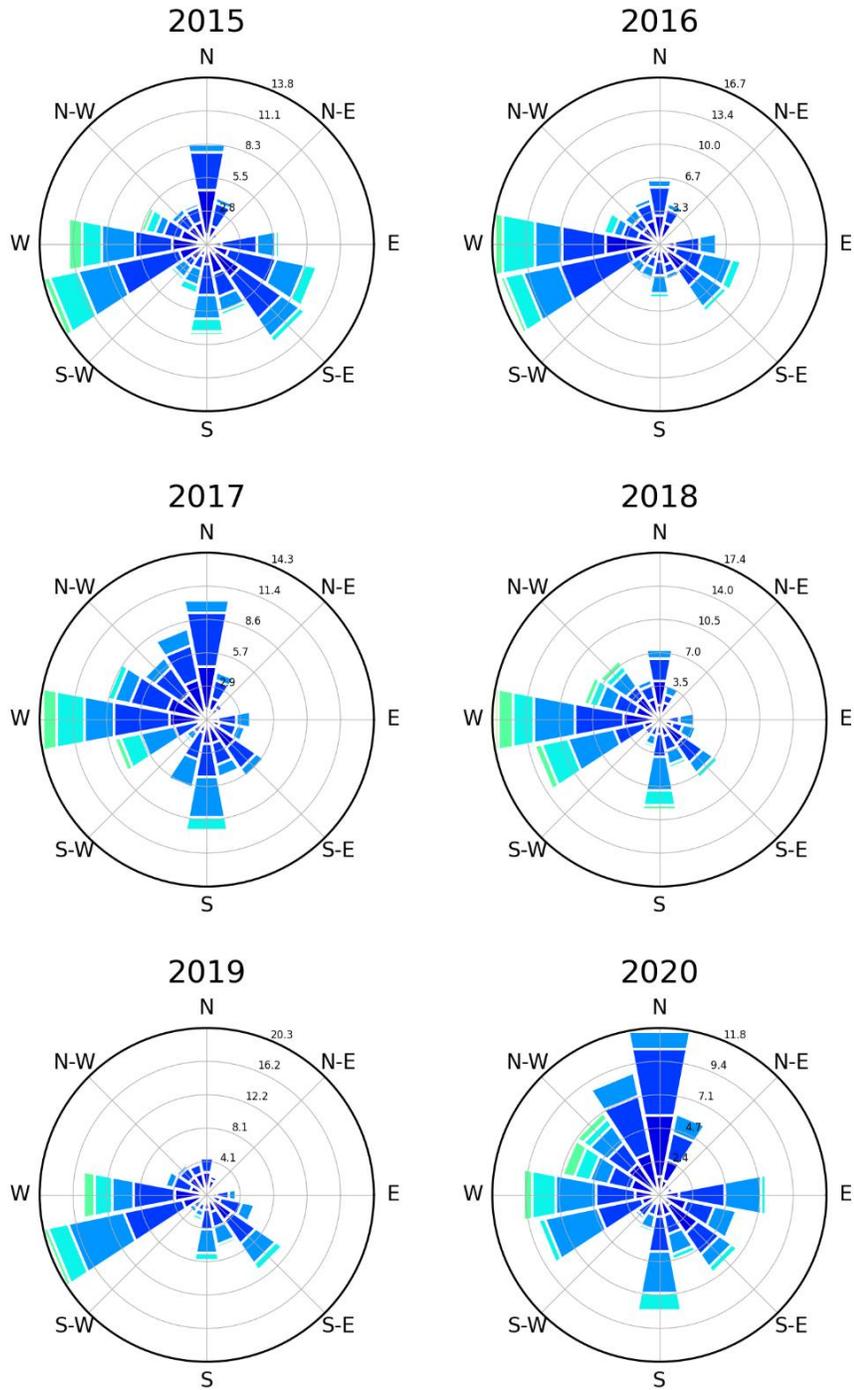
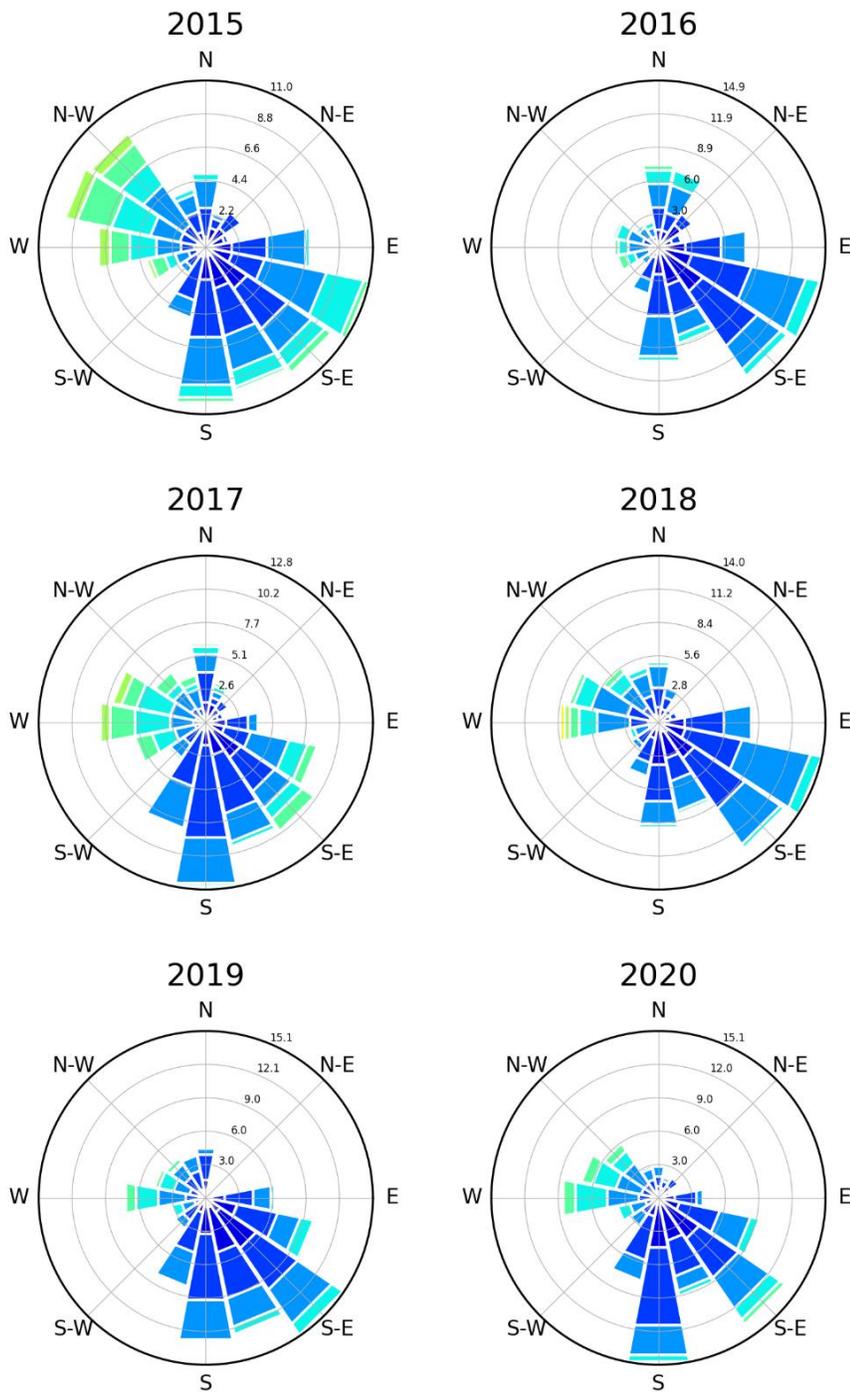


Figure 110 Origine et vitesse des vents à Kuujjuarapik lors des mois de juillet, août et septembre.

Vitesse des vents par saison (OND)



A.2 Site d'Umiujaq

Les vitesses et directions des vents pour le village d'Umiujaq proviennent d'une station météorologique opérée par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Les vitesses mesurées de l'automne 2019 à l'automne 2020 semblent erronées.

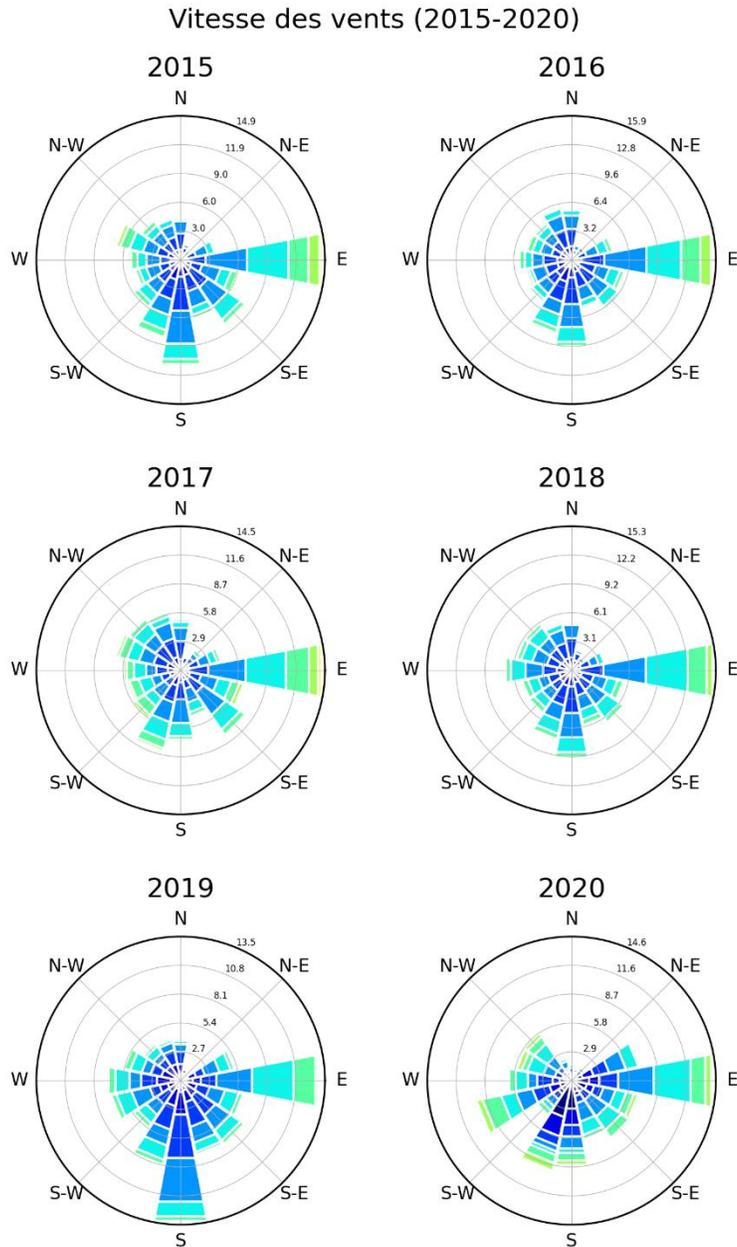


Figure 112 Origine et vitesse des vents à Umiujaq de 2015 à 2020.

Vitesse des vents par saison (JFM)

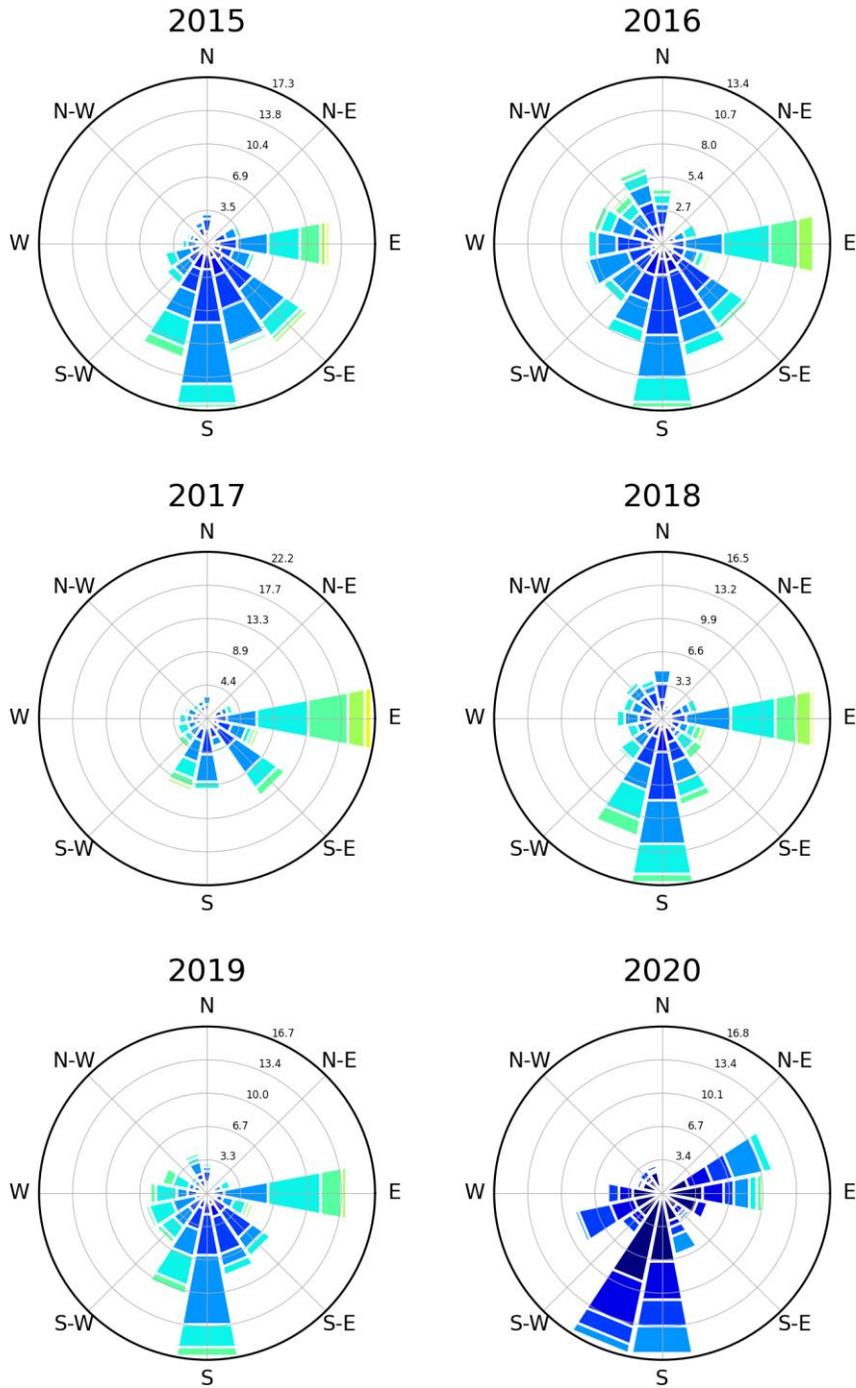


Figure 113 Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois de janvier, février et mars.

Vitesse des vents par saison (AMJ)

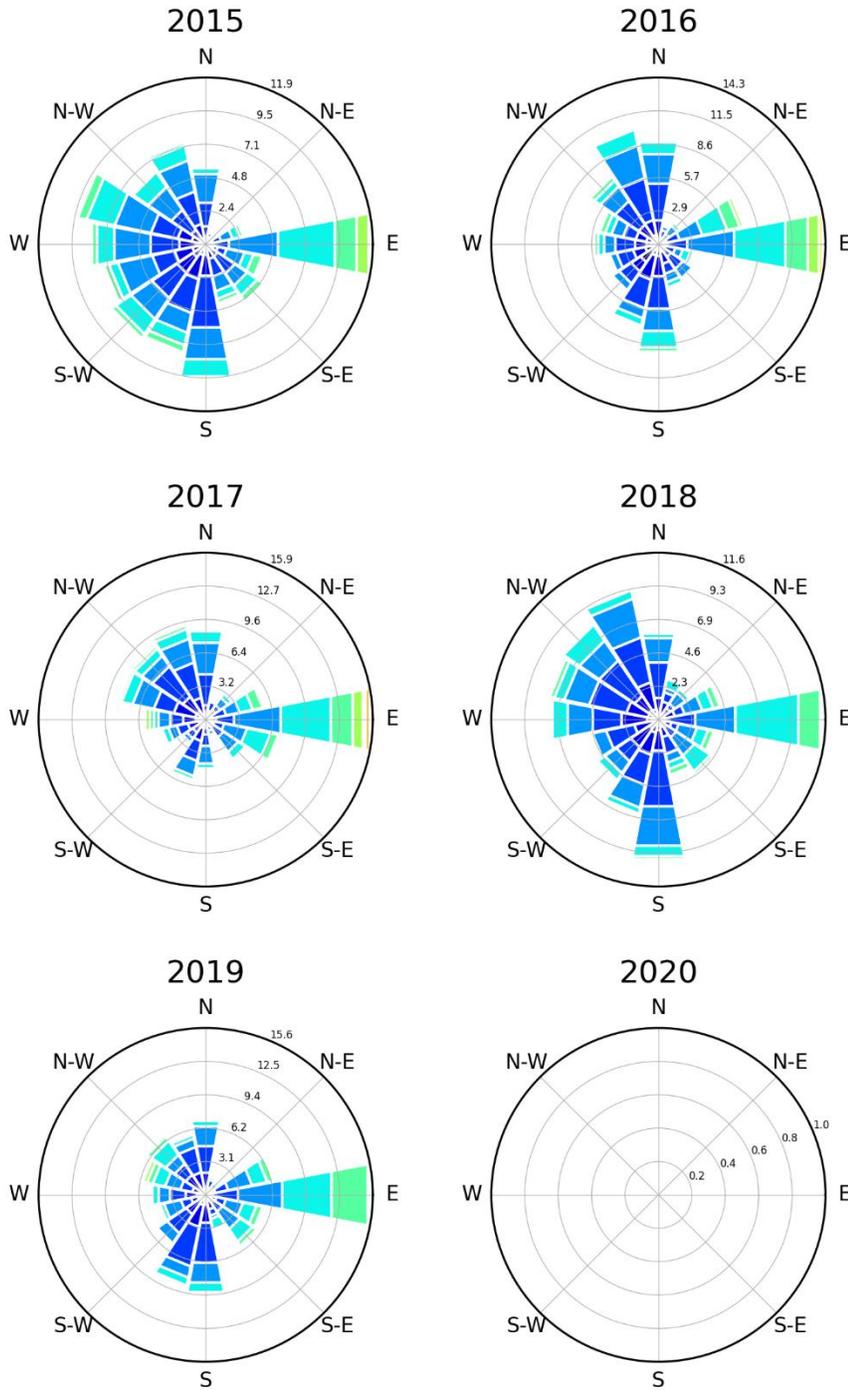


Figure 114 Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois d'avril, mai et juin.

Vitesse des vents par saison (JAS)

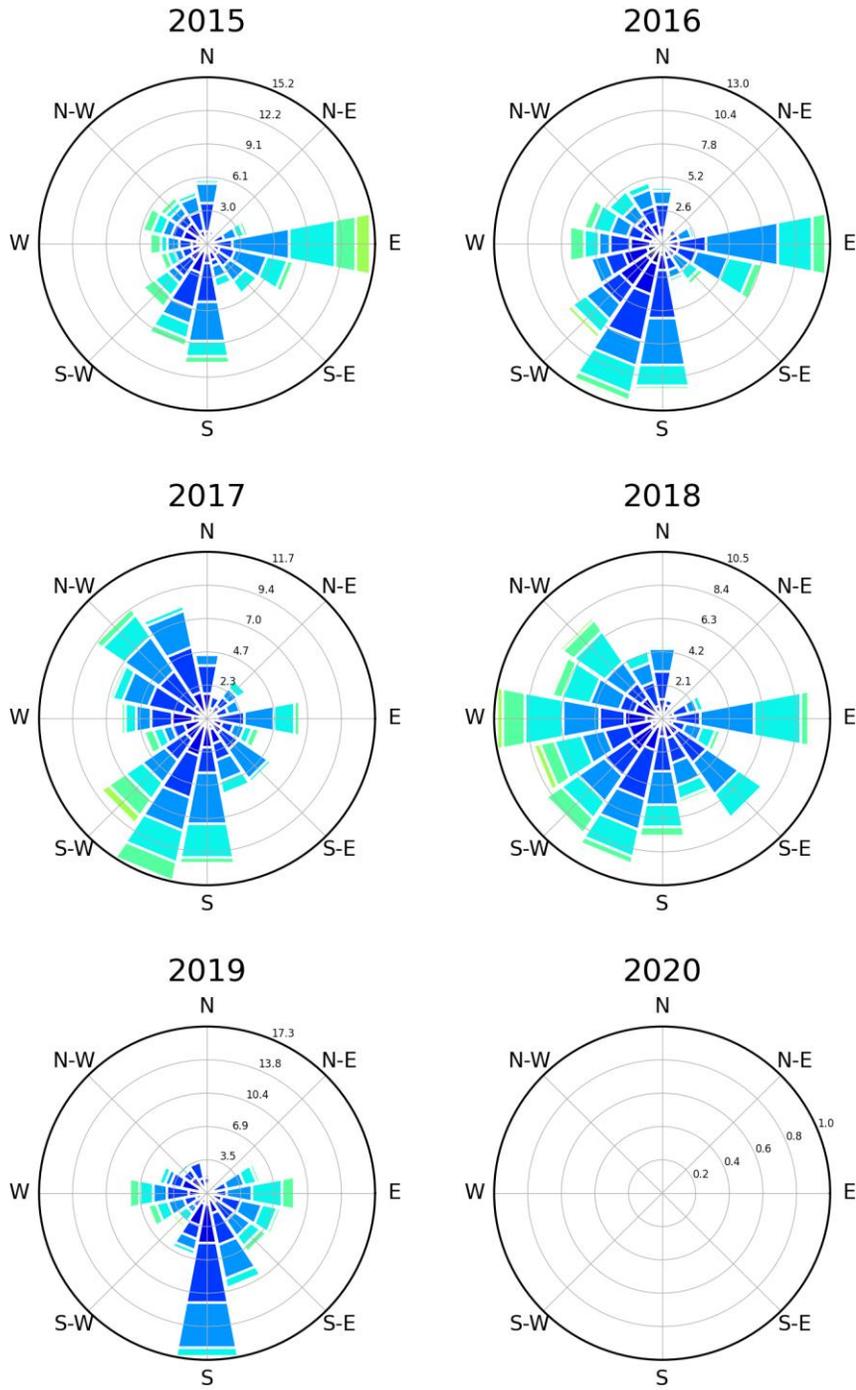


Figure 115 Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois de juillet, août et septembre.

Vitesse des vents par saison (OND)

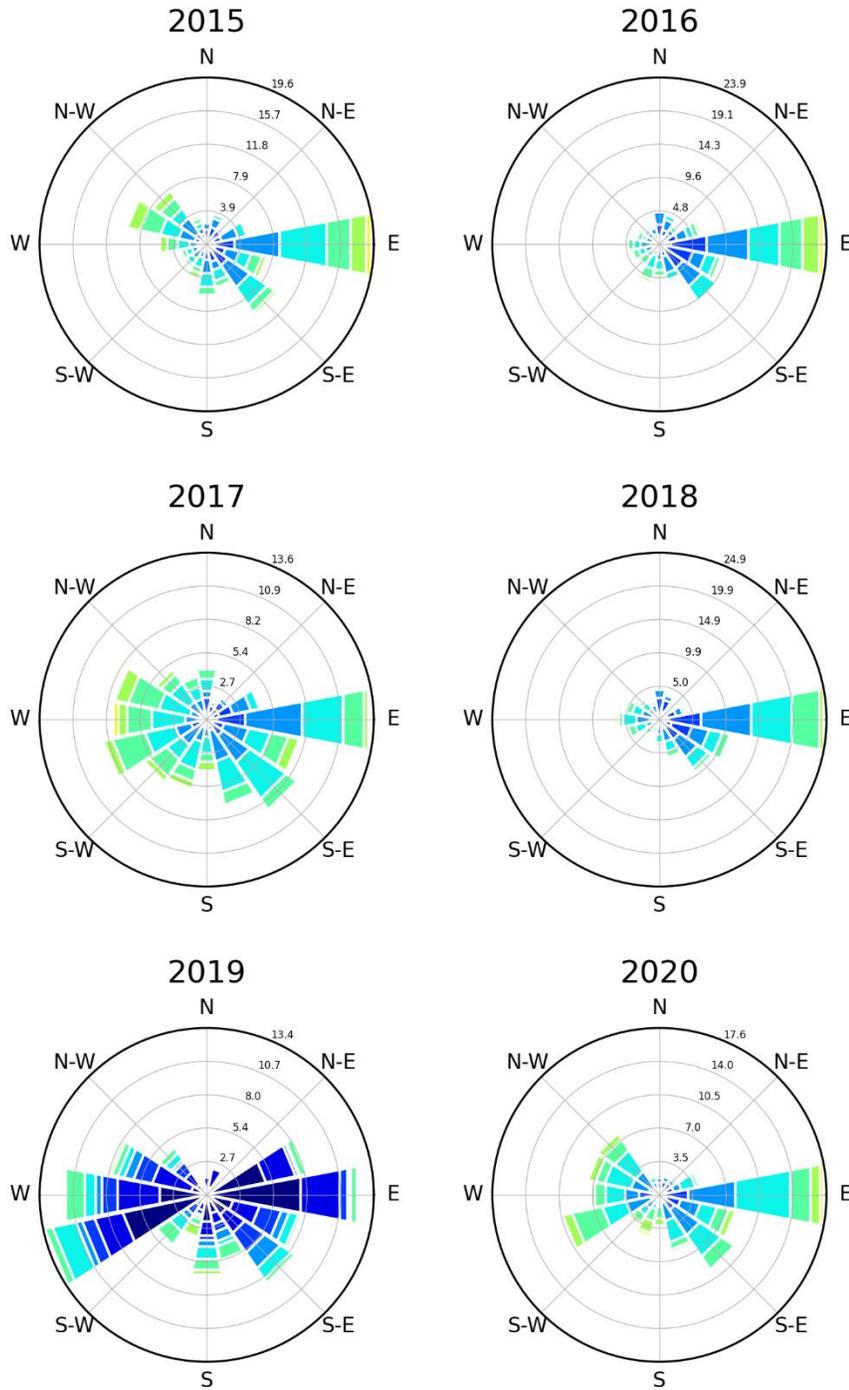


Figure 116 Origine et vitesse des vents à Umiujaq lors des mois d'octobre, novembre et décembre.

A.3 Site d'Ivujivik

Les vitesses et directions des vents pour le village d'Ivujivik proviennent d'une station météorologique opérée par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

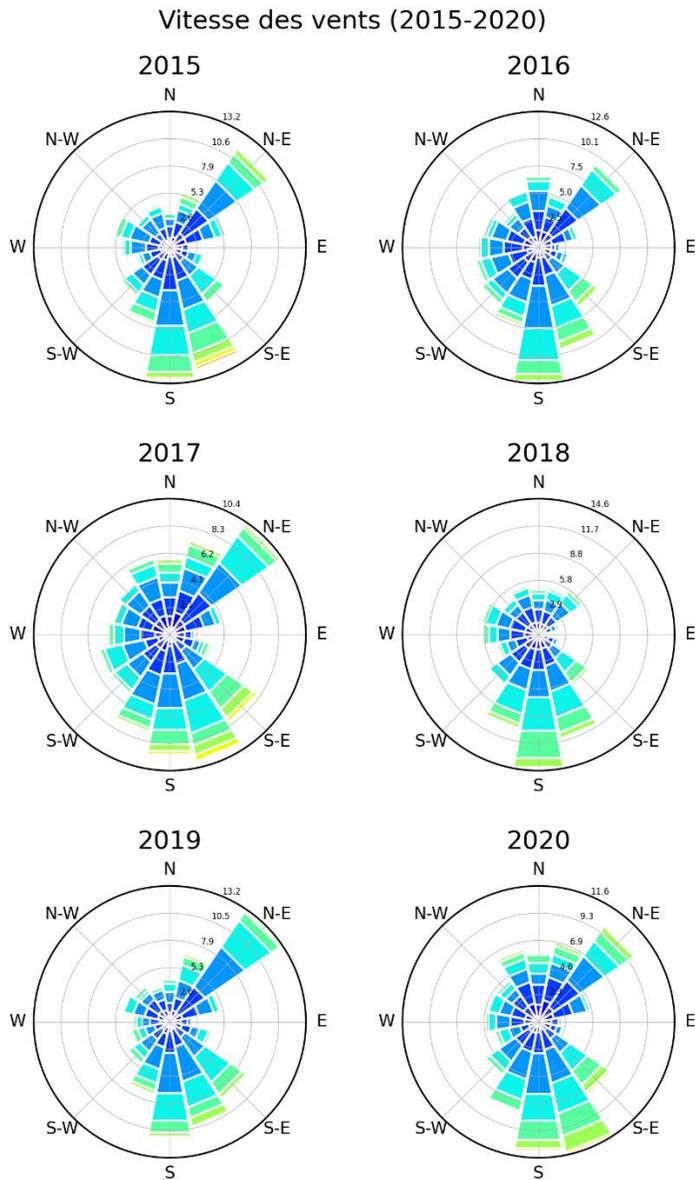


Figure 117 Origine et vitesse des vents à Ivujivik de 2015 à 2020.

Vitesse des vents par saison (JFM)

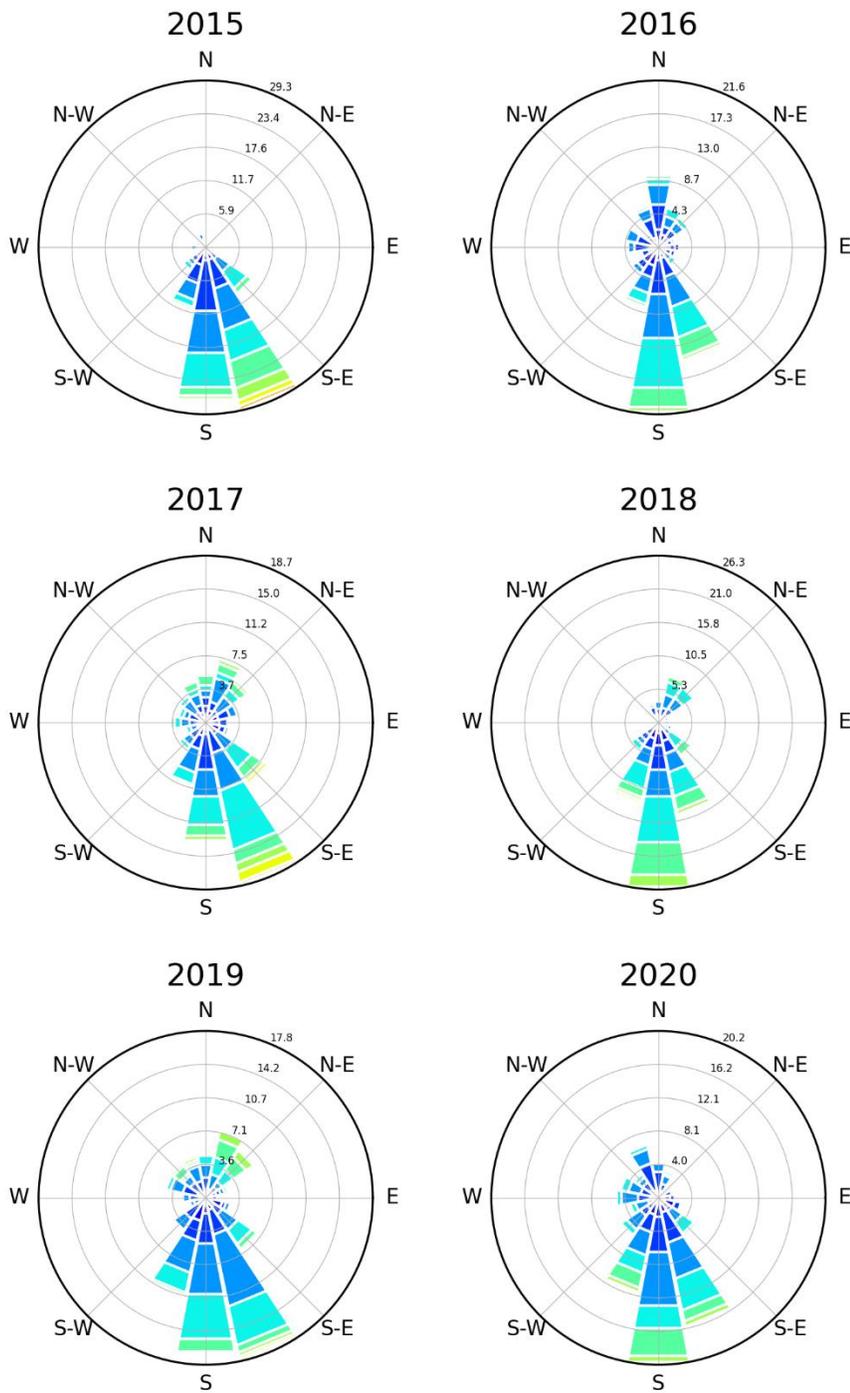


Figure 118 Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois de janvier, février et mars.

Vitesse des vents par saison (AMJ)

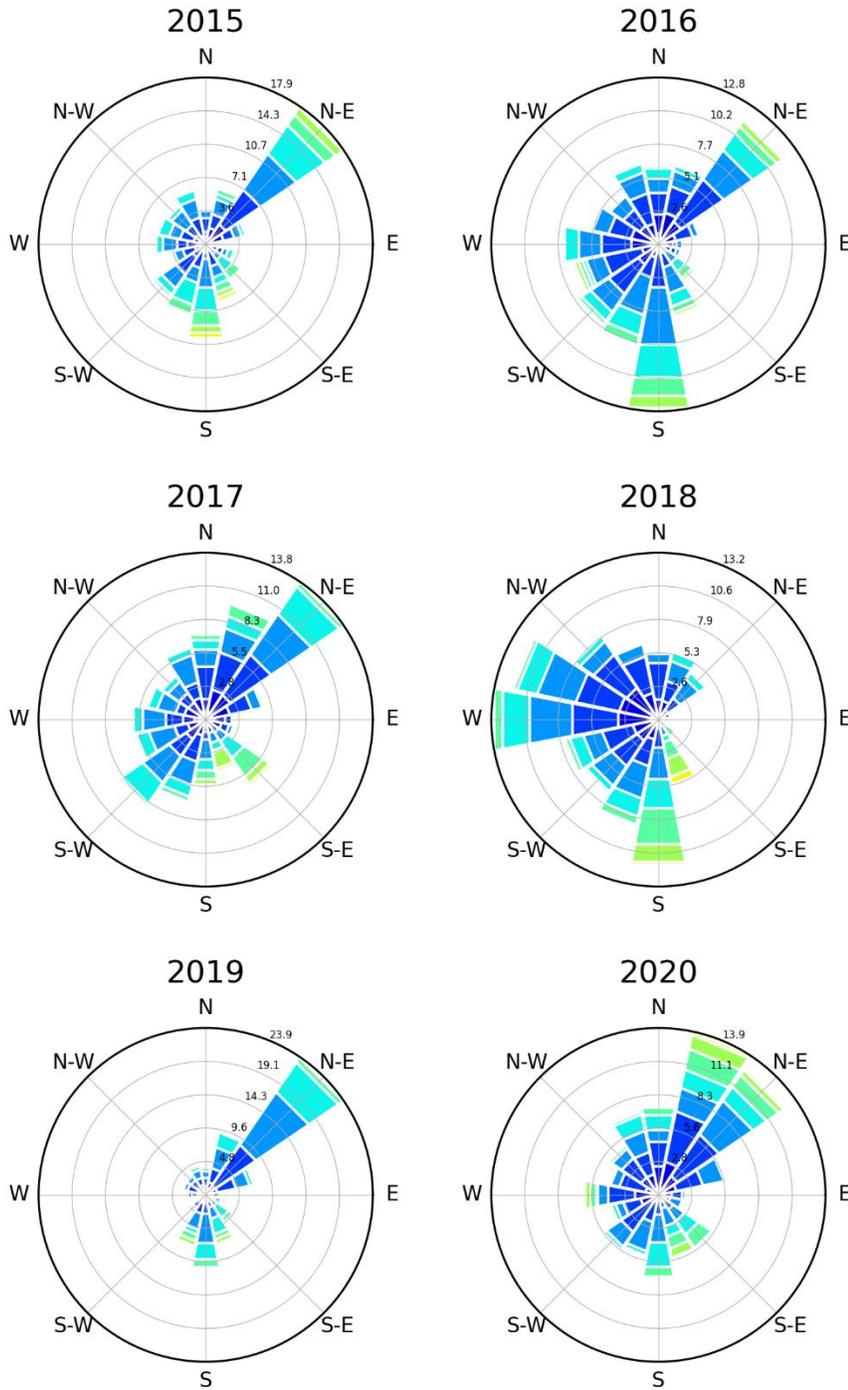


Figure 119 Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois d'avril, mai et juin.

Vitesse des vents par saison (JAS)

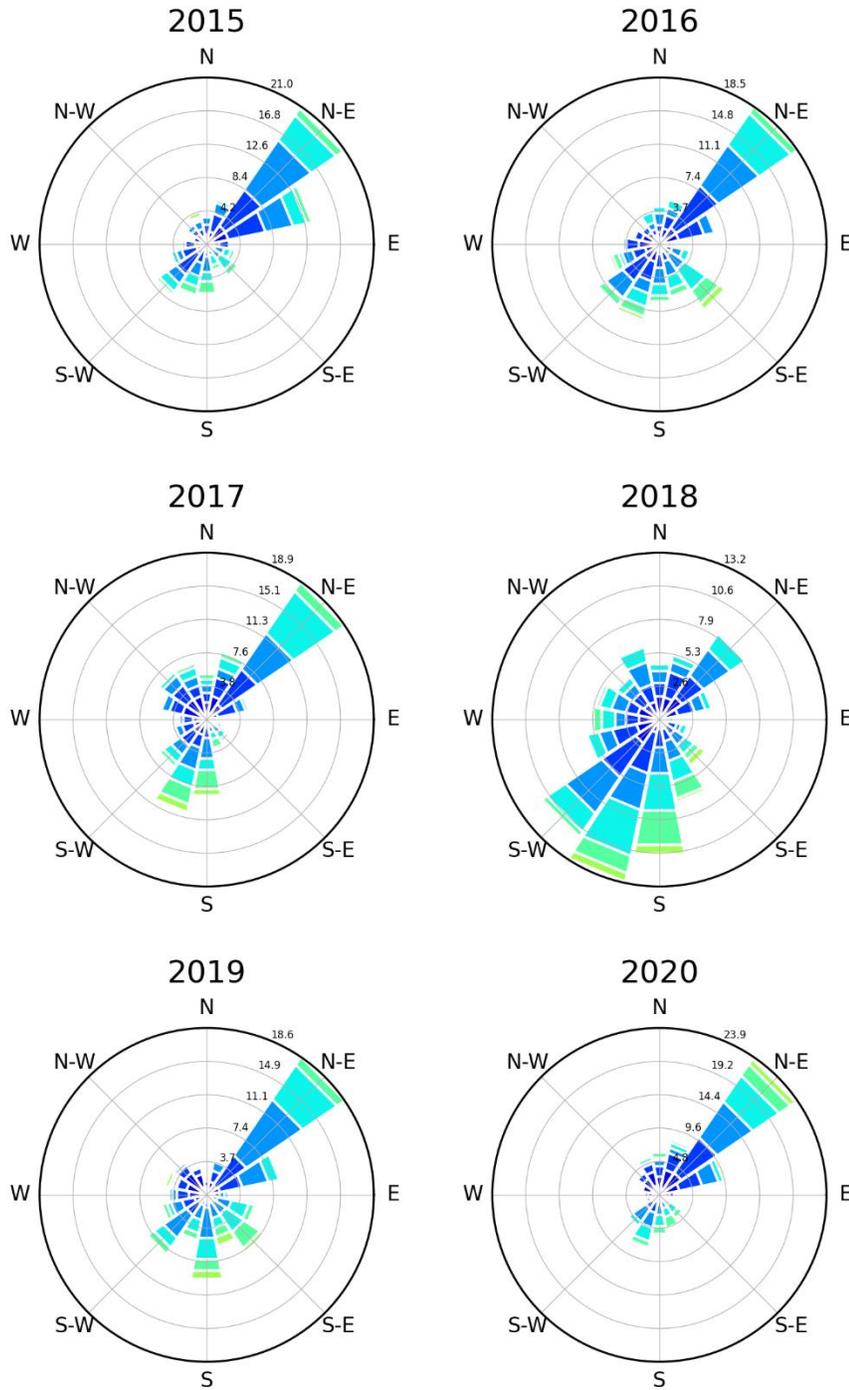


Figure 120 Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois de juillet, août et septembre.

Vitesse des vents par saison (OND)

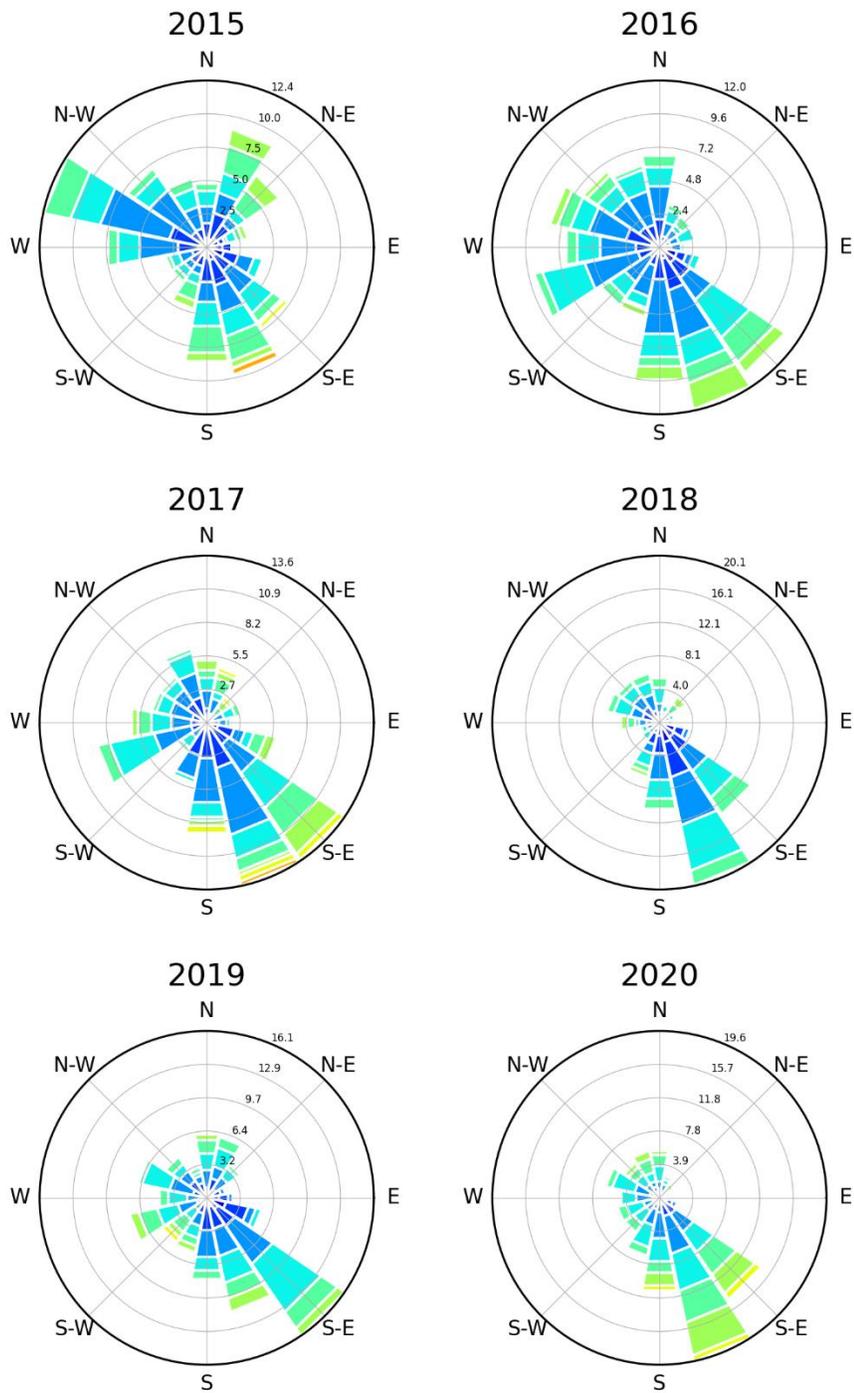


Figure 121 Origine et vitesse des vents à Ivujivik lors des mois d'octobre, novembre et décembre.

A.4 Site de Baie Déception

Les vitesses et directions des vents pour le site de la Baie Déception proviennent d'une station météorologique installée en septembre 2019 dans le cadre des projets « Sea ice monitoring services at Deception Bay, Salluit and Kangiqsujuaq » et « Trail monitoring in Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq ». Elle a été financé par Glencore – Mine Raglan et Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada.

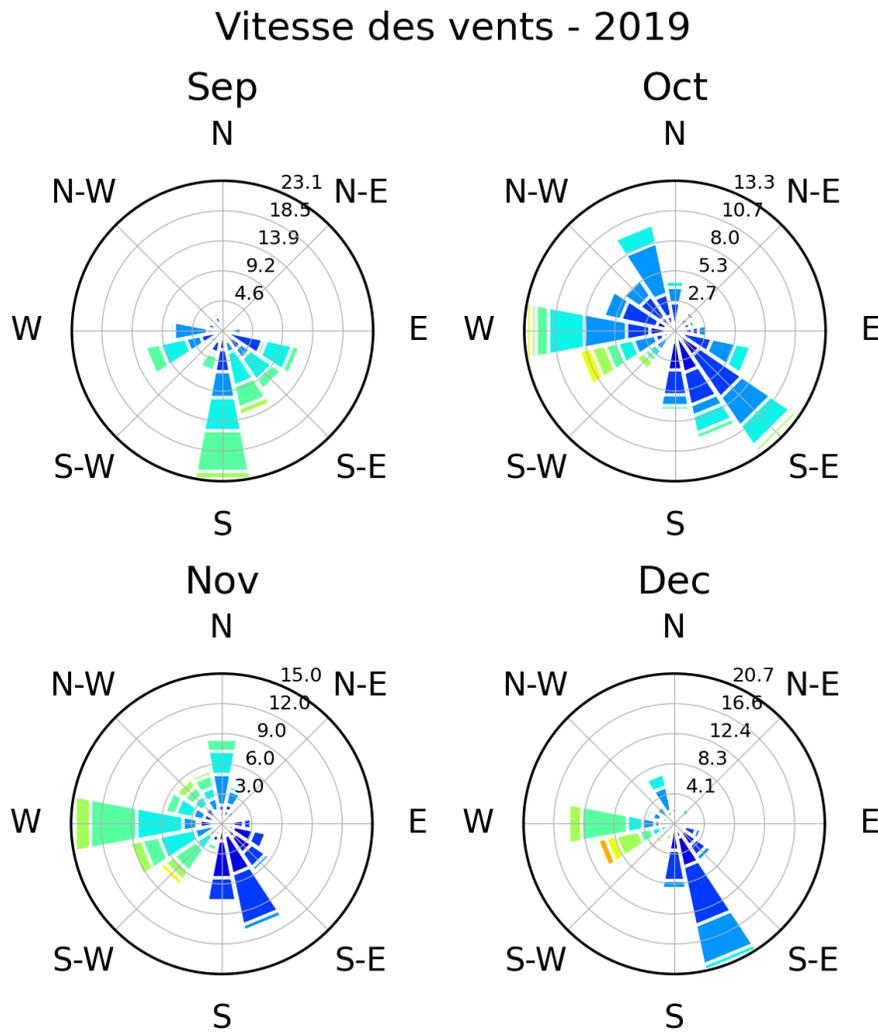


Figure 122 Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2019.

Vitesse des vents - 2020

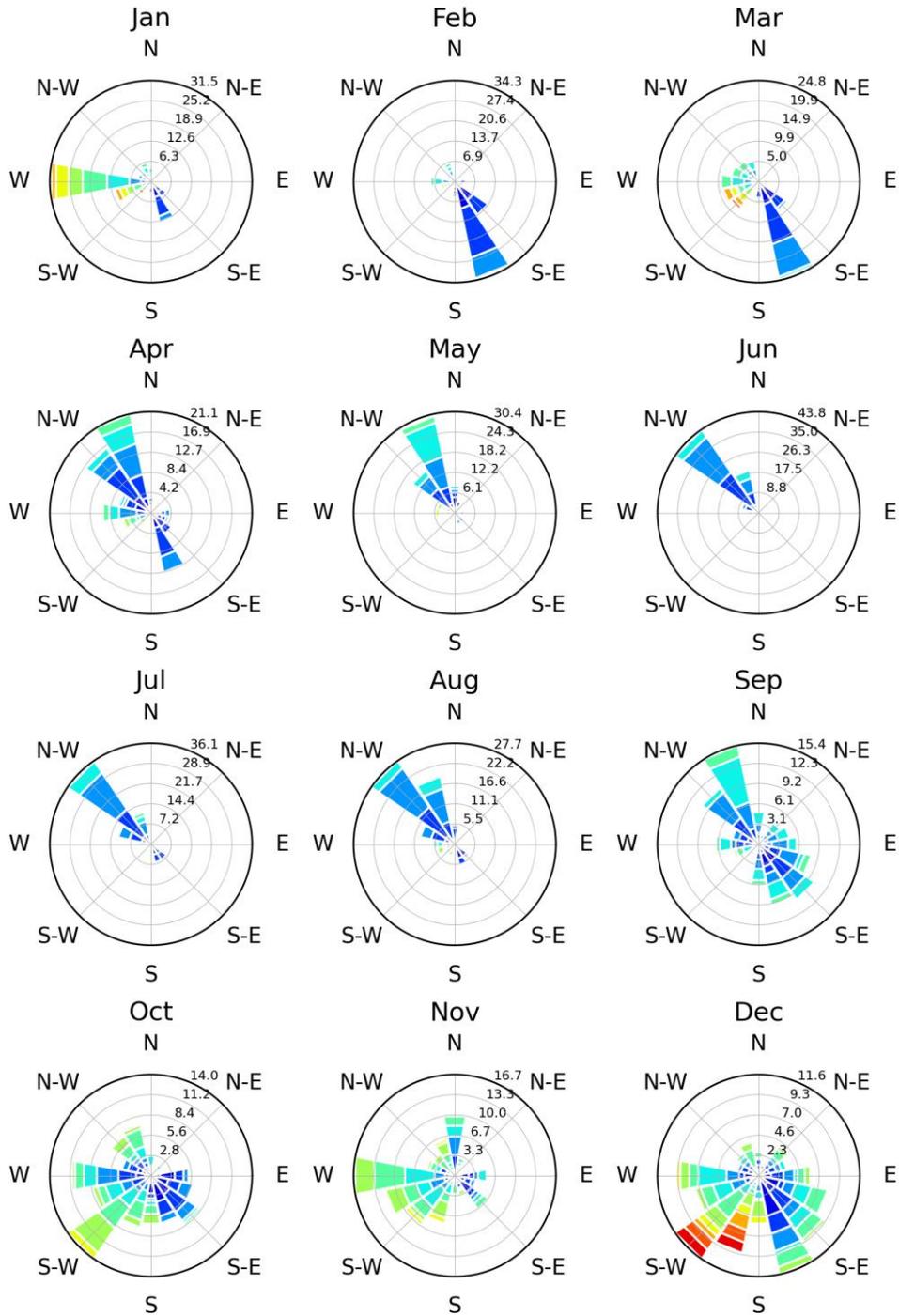


Figure 123 Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2020.

Vitesse des vents par saison - 2020

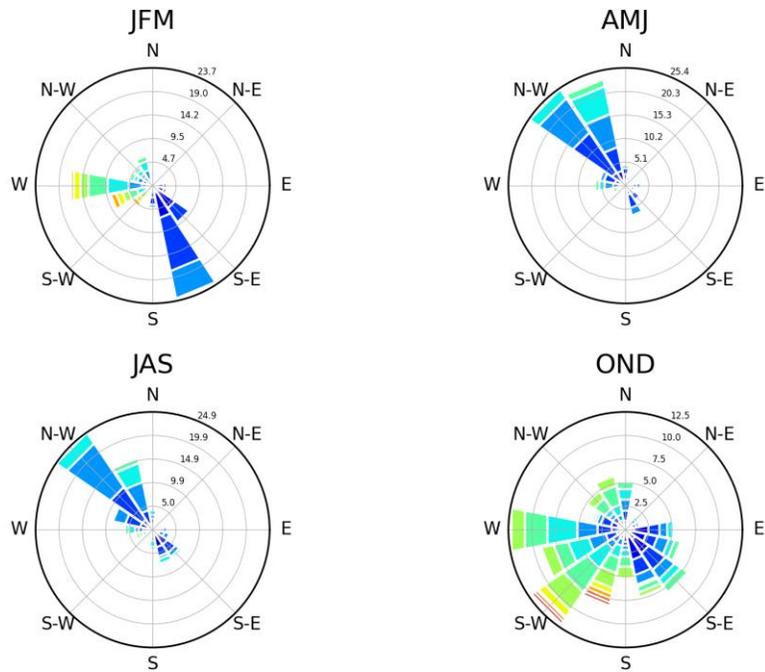


Figure 124 Origine et vitesse des vents à la Baie Déception en 2020 par saisons.

Vitesse des vents par saison (OND)

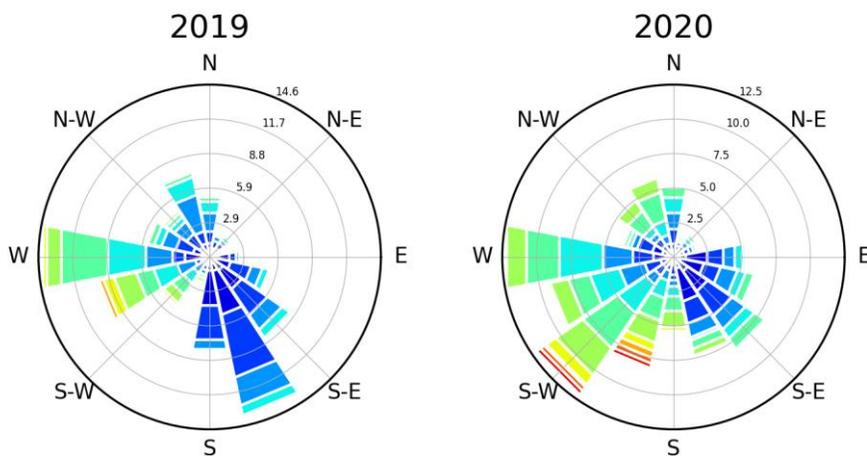


Figure 125 Origine et vitesse des vents à la Baie Déception lors des mois d'octobre, novembre et décembre.

A.5 Site de Quaqtq

Les vitesses et directions des vents pour le village de Quaqtq proviennent d'une station météorologique opérée par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

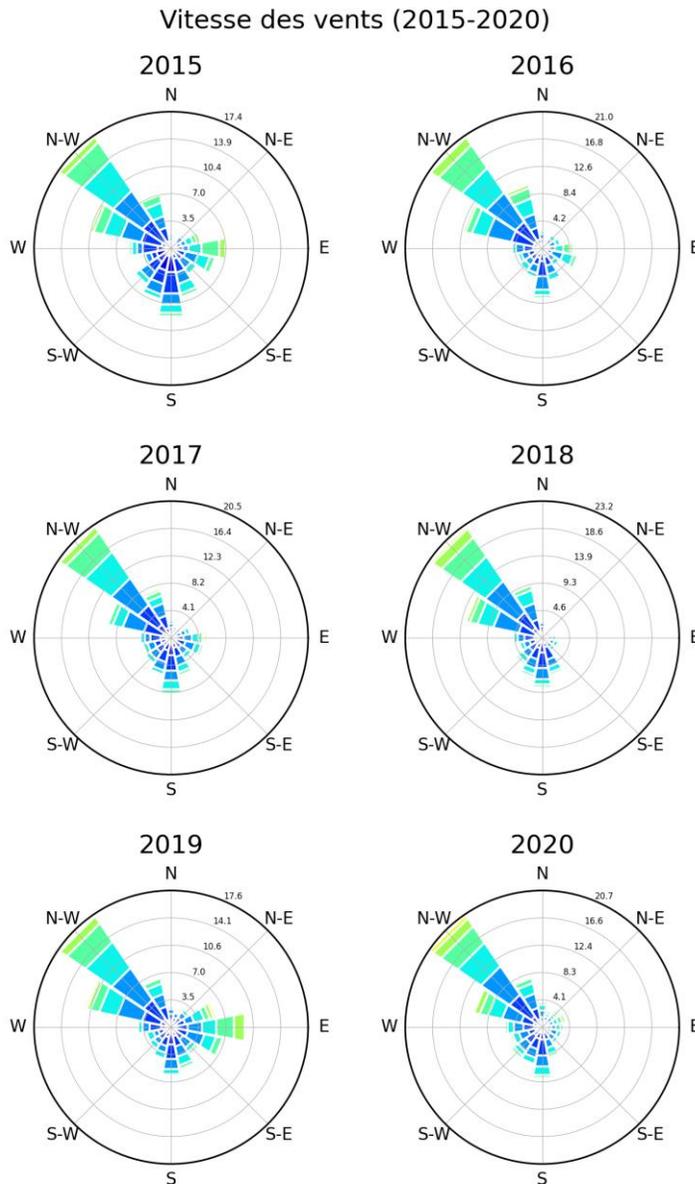


Figure 126 Origine et vitesse des vents à Quaqtq de 2015 à 2020.

Vitesse des vents par saison (JFM)

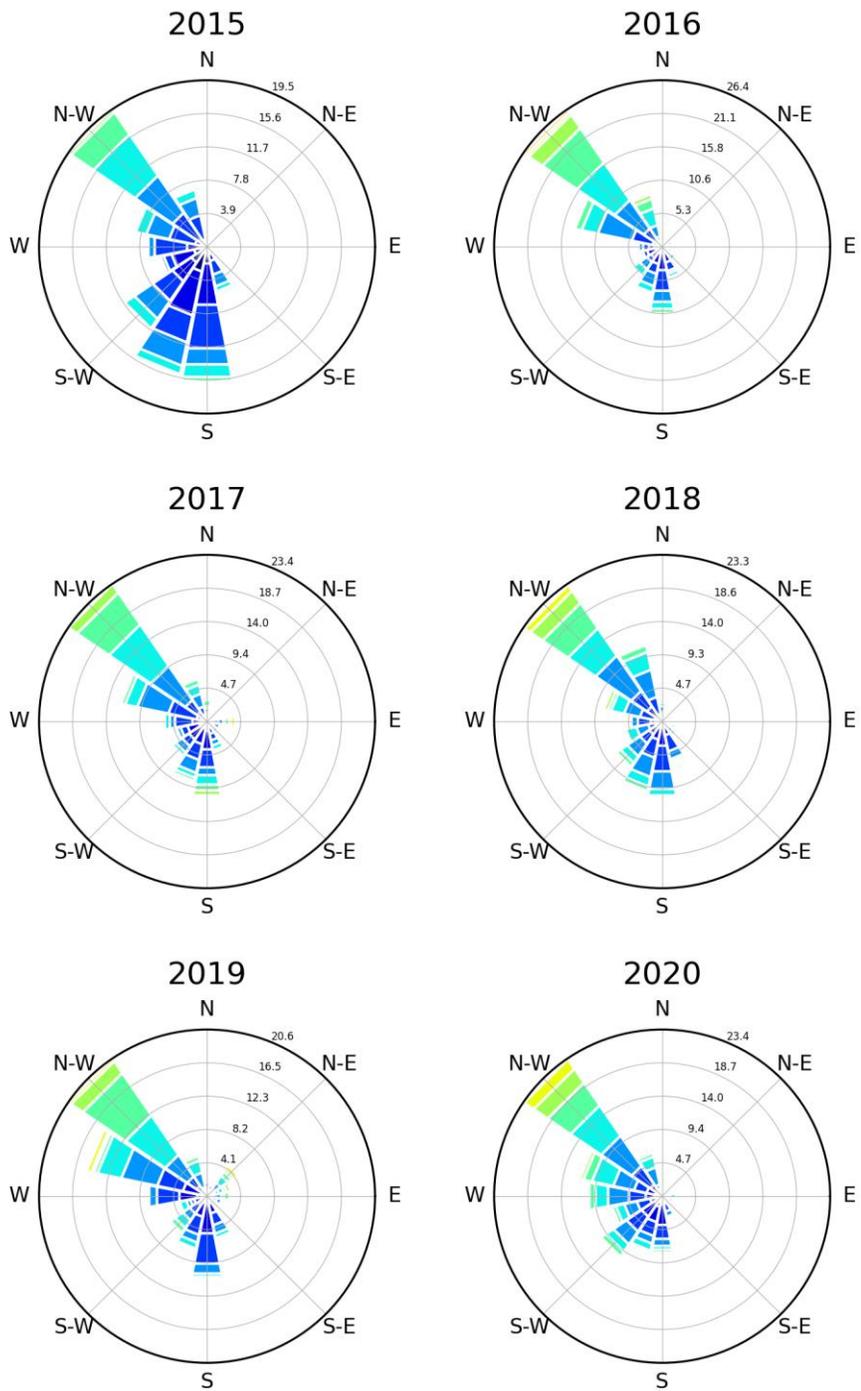


Figure 127 Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois de janvier, février et mars.

Vitesse des vents par saison (AMJ)

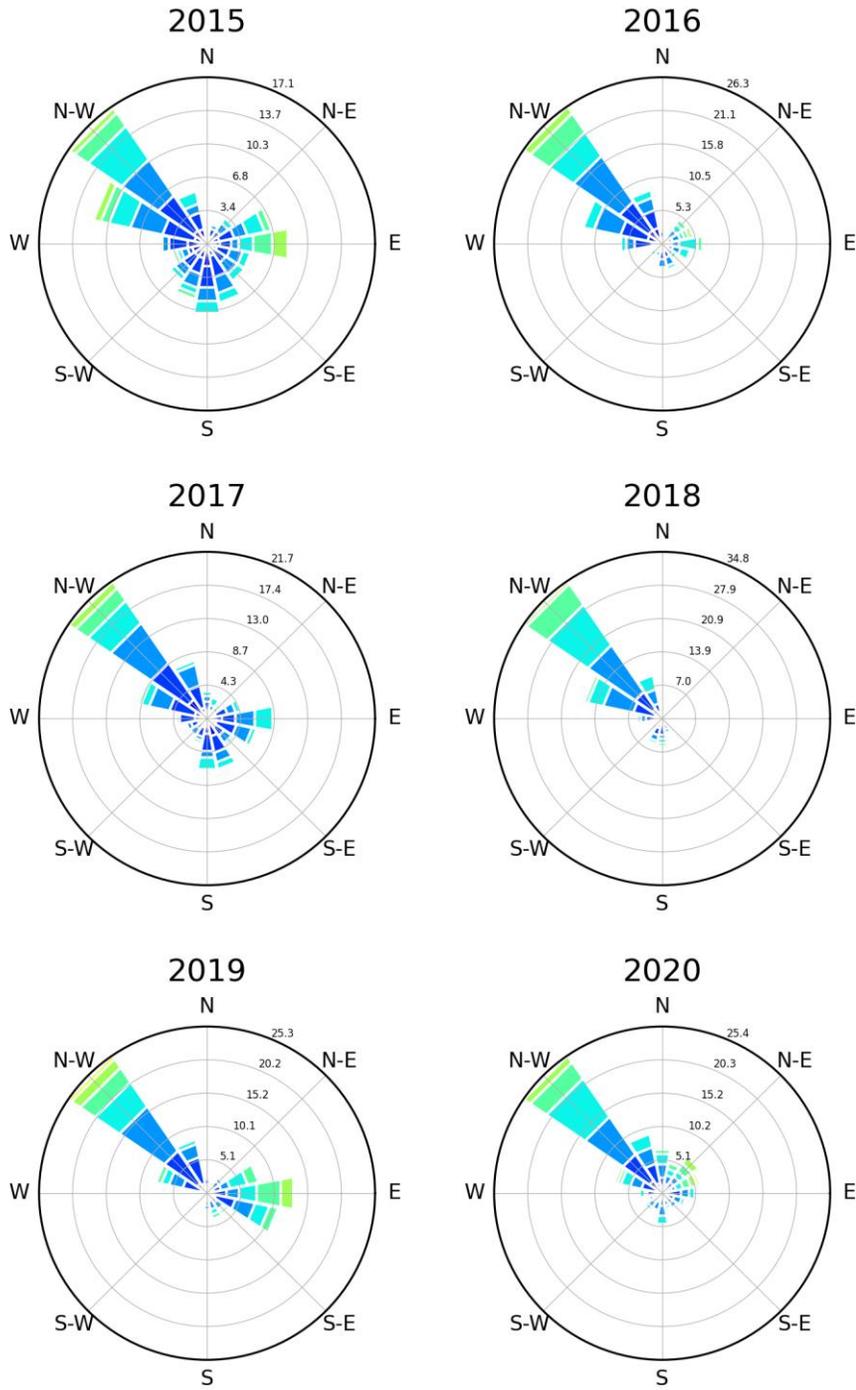


Figure 128 Origine et vitesse des vents à Quaqaq lors des mois d'avril, mai et juin.

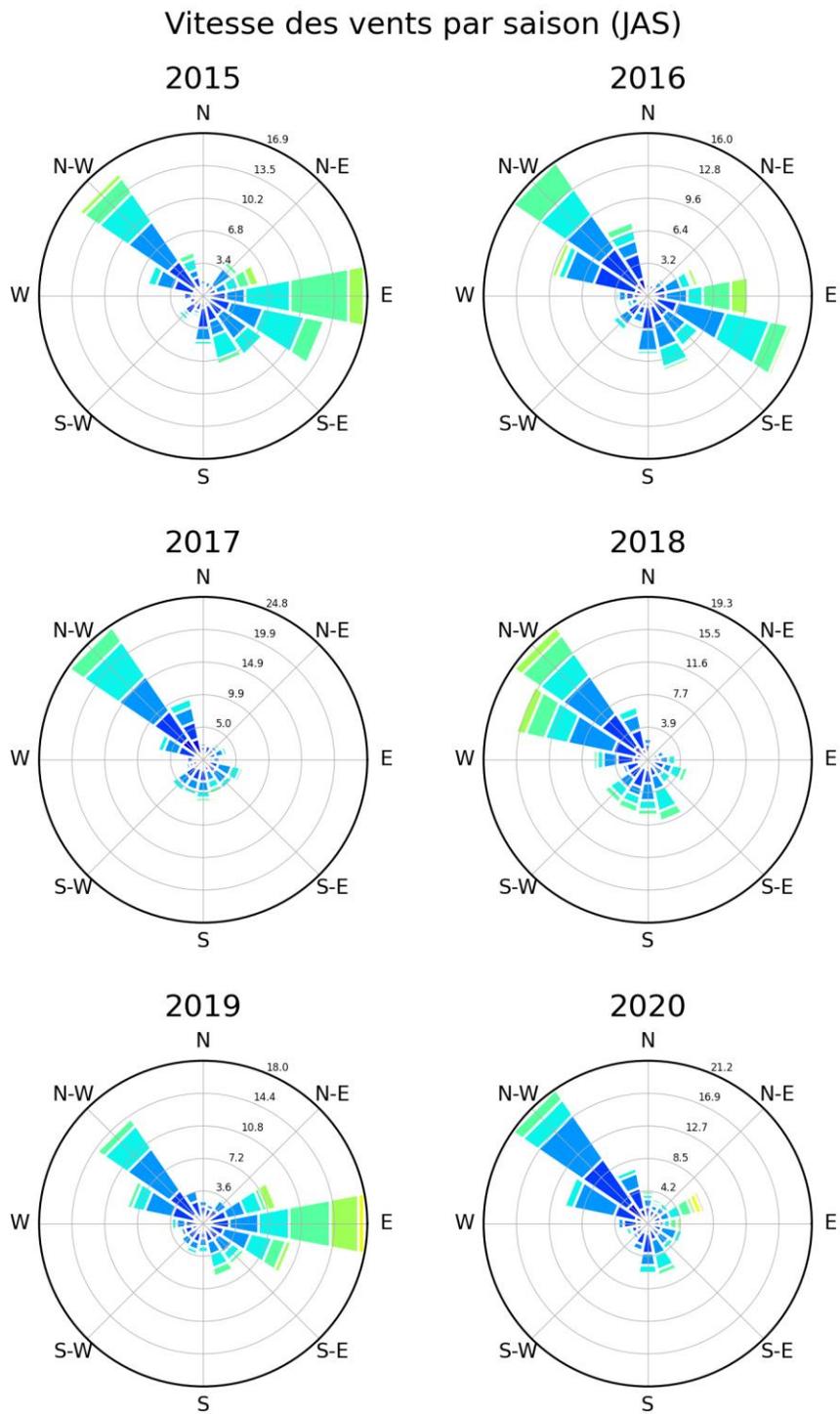


Figure 129 Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois de juillet, août et septembre.

Vitesse des vents par saison (OND)

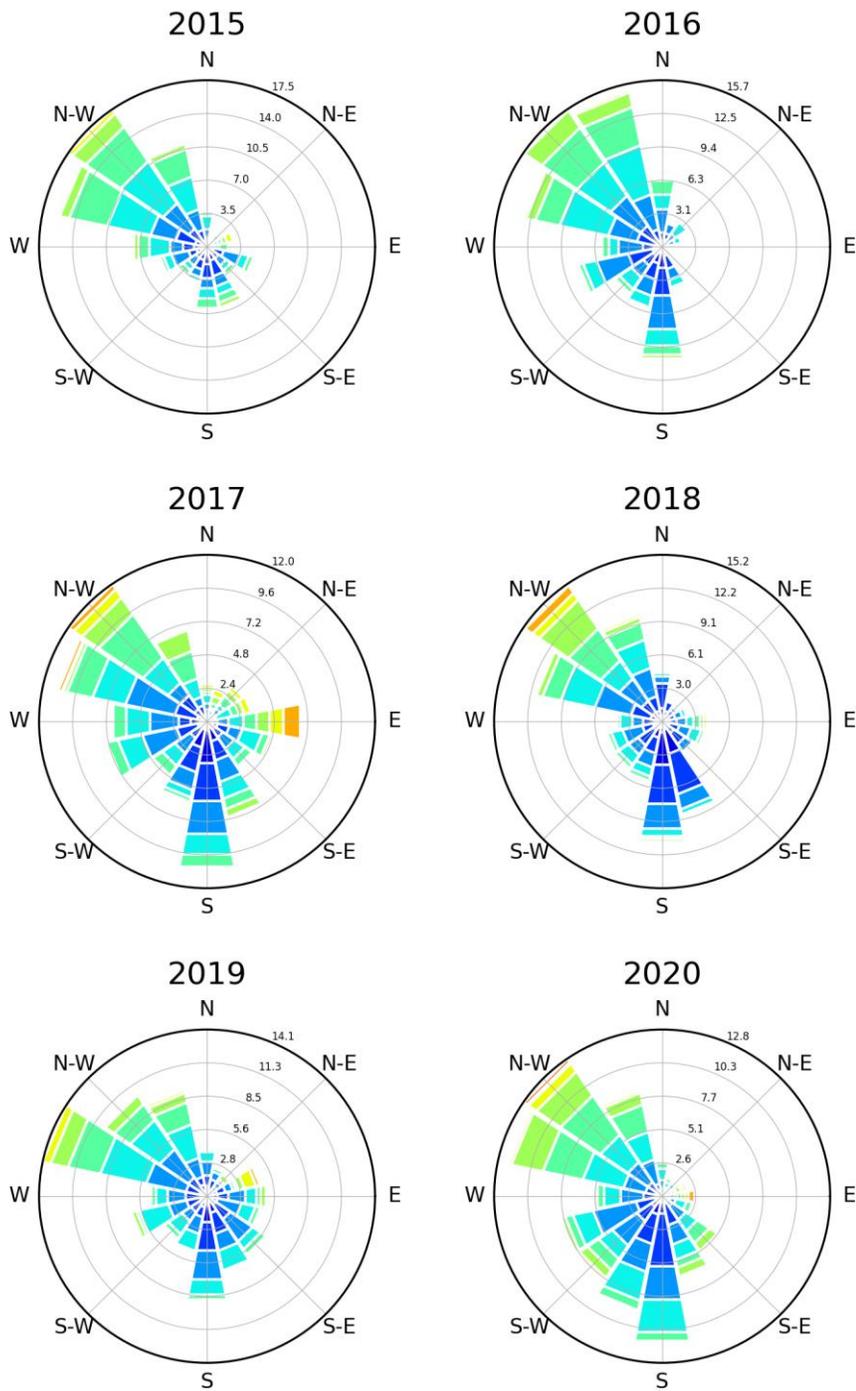


Figure 130 Origine et vitesse des vents à Quaqtq lors des mois d'octobre, novembre et décembre.

ANNEXE B

Valeurs de fetch calculées à partir des images satellitaires

Fichier contenant les valeurs calculées de fetch.



Fetch_info.xlsx