

Projet de recherche CC09.2

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 : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaᑭtaq et Aupaluk (2017-2020)

Rapport d'étape no.3 remis à :

Bureau de la coordination du Nord-du-Québec,  
Ministère des Transports du Québec

Par :

Monique Bernier, Jimmy Poulin, Tahiana Ratsimbazafy, et Yves Gauthier



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

Rapport INRS no.1976

4 août 2020

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021  
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-948-7 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2021  
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2021

## Table des matières

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes .....	4
Glossaire des glaces .....	5
Tableau de l'échelle Beaufort.....	7
1. Introduction.....	9
1.1. Mandat confié à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) .....	9
1.2. Localisation géographique des caméras .....	10
1.3. Plan du rapport.....	11
2. Sites d'observation des conditions de glace de rives au Nunavik : Analyse des photographies d'octobre 2018 à août 2019 (Activité 3).....	12
2.1. Analyses des photographies acquises par les caméras.....	12
2.1.1. Site d'observation à Aupaluk.....	13
2.1.2. Sites d'observation à Quaqlaq .....	18
2.1.3. Sites d'observation à Baie Déception.....	31
2.1.4. Site d'observation à Ivujivik.....	39
2.1.5. Site d'observation à Umiujaq .....	51
2.1.6. Site d'observation à Kuujjuarapik (infrastructure maritime) .....	62
2.1.7. Site d'observation à Kuujjuarapik (île Gillis).....	72
2.2. Traitement et diffusion des photographies acquises par les caméras.....	78
2.2.1. Diffusion des photographies et des informations dérivées .....	78
3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d'images satellitaires à Quaqlaq et Kuujjuarapik (Activité 4) .....	80
4. Validation du potentiel d'utilisation d'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues à Kuujjuarapik et Quaqlaq (Activité 5) .....	83
4.1. Principe de fonctionnement des radars imageurs .....	83
4.2. Commande d'images.....	84
4.2.1. Images polarimétriques RADARSAT-2 .....	84
4.2.2. Images PALSAR-2 .....	85
4.2.3. Traitements des images.....	86
4.3. Résultats .....	86
4.3.1. RADARSAT-2 .....	86
4.4. Validations .....	90

5. Conclusions.....	94
6. Références.....	97

## 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
CAIMAN	CAMéras aux Infrastructures MARitimes du Nunavik
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ISMER	Institut des sciences de la mer
JAXA	Agence d'exploration aérospatiale japonaise
MTQ	Ministère des Transports du Québec
UQAR	Université du Québec à Rimouski
RSO	Radar à synthèse d'ouverture

## Glossaire des glaces

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

<b>Banquise lâche</b>	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.
<b>Banquise serrée</b>	Banquise dont la concentration est de 7/10 à 8/10 et qui est composée de floes dont la plupart sont en contact.
<b>Banquise très lâche</b>	Banquise dont la concentration est de 1/10 à 3/10 et où il y a plus d'eau que de glace.
<b>Banquise très serrée</b>	Banquise dont la concentration est de 9/10 à moins de 10/10.
<b>Banquise/pack</b>	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 ».
<b>Crête (Glacé)</b>	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 ».
<b>Eau libre</b>	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.
<b>Gadoue</b>	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.
<b>Glacé en crêpes</b>	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.
<b>Glacé pourrie</b>	Glacé criblé de trous de fonte et à un stade avancé de désintégration.
<b>Hummock</b>	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 ».
<b>Nilas</b>	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.
<b>Nilas clair</b>	Nilas ayant plus de 5 cm d'épaisseur et plus claire que le nilas sombre.

<b>Nilas sombre</b>	Nilas ayant moins de 5 cm d'épaisseur et une couleur très sombre.
<b>Nouvelle glace</b>	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.
<b>Polynie</b>	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-marinières les appellent des claires-voies.
<b>Sarrasins (Brash)</b>	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.
<b>Shuga</b>	Accumulation de morceaux de glace blanche et spongieuse ayant quelques centimètres de longueur ; ils sont formés à partir de sorbet ou de gadoue et, quelquefois, de glace de fond remontant à la surface.
<b>Sorbet</b>	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.
<b>Stades de formation de la glace de mer</b>	Nouvelle glace Nilas Jeune glace Glace de première année Vieille glace

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

#### Divers

<b>Degré-jours de gel</b>	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 <sup>er</sup> octobre de chaque année.
<b>Degré-jours de fonte</b>	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 <sup>er</sup> mai de chaque année.

## Tableau de l'échelle Beaufort

Force	Vitesse du vent (Km/h)	Appellation	Effets observés sur mer	Effets observés sur terre
<b>0</b>	< 1	Calme	La surface de la mer est unie comme un miroir, mais pas forcément plane.	La fumée s'élève verticalement.
<b>1</b>	1 à 5	Très légères brises	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans écume.	La fumée, mais non la girouette, indique la direction du vent.
<b>2</b>	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.
<b>3</b>	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.
<b>4</b>	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.
<b>5</b>	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.
<b>6</b>	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.
<b>7</b>	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.
<b>8</b>	62 à 74	Coup de vent	Lames de hauteur moyenne et plus allongées. De la crête commencent à se détacher des tourbillons d'embruns. Nettes traînées d'écume orientées dans le lit du vent.	De petites branches se cassent. La marche contre le vent devient presque impossible.
<b>9</b>	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).
<b>10</b>	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.
<b>11</b>	103 à 117	Violente tempête	Lames exceptionnellement hautes. Mer complètement recouverte de bancs d'écume. Visibilité réduite.	Dégâts considérables.
<b>12</b>	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 structureaux importants.



## 1. Introduction

### 1.1. Mandat confié à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS)

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, Quaqtac et Umiujaq. 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 Quaqtac (Projet CC09.1) afin de poursuivre le projet entamé en 2009. 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, Quaqtac 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 Quaqtac. 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 mises 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.

De plus, les observations sur les glaces seront 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, le Ministère sera en mesure d'entamer l'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik dans un contexte de changements climatiques, d'identifier les solutions d'adaptation au besoin et de réviser les critères de conception des ouvrages côtiers en milieu arctique.

## **1.2. Localisation géographique des caméras**

Ce projet de recherche a pour but de fournir des données d'observations des conditions de glace de rive au Nunavik dans un contexte de changements climatiques. Les sites visés sont situés à Kuujjuarapik (2), Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtac (2) et Aupaluk. La localisation géographique de tous les sites des caméras servant au suivi des glaces et des vagues au Nunavik est présentée au Tableau 1. La localisation des deux nouvelles caméras installées sur les îles Gillis (Kuujjuarapik) et Hearn (Quaqtac) est soulignée en caractère gras. Ces caméras permettront de surveiller la hauteur et la direction des vagues ainsi que l'englacement au-dessus des sites de mouillage de l'ISMER.

Tableau 1 : Emplacement des caméras impliquées dans ce projet

Village	Emplacement	Suivi des glaces	Suivi des vagues
Kuujjuarapik	77,61600°O 55,37497°N	X	X
<b>Kuujjuarapik (Île Gillis)</b>	<b>77,85327°O</b> <b>55,33865°N</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Umiujaq	76,54746°O 56,54922°N	X	
Ivujivik	77,89286°O 62,42455°N	X	
Aupaluk	69,60064°O 59,31168°N	X	
Quaqtaq	69,63431°O 61,04901°N	X	X
<b>Quaqtaq (Île Hearn)</b>	<b>69,68658°O</b> <b>61,06687°N</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Baie Déception (Pointe Noire)	74,74575°O 62,21011°N	X	
Baie Déception (Ouest de l'île Moosehead)	74,75786°O 62,17873°N	X	

### 1.3. Plan du rapport

Les observations sont réalisées en utilisant deux sources de données: des photographies provenant de caméras in situ ainsi que des images satellites optiques Landsat-8 et Sentinel-2. Le second chapitre de ce rapport se sépare en trois sections. La première décrit l'interprétation des photographies du réseau de caméras CAIMAN prises entre les mois d'octobre 2018 et août 2019. La seconde aborde la question de la classification des photos (glace/non glace). La troisième section traite de la rectification des photographies. La méthodologie des sections deux et trois est davantage détaillée dans le rapport final du projet CC09.1 (Bernier et al., 2017). Le troisième chapitre décrit comment seront extraites les concentrations de glace des images satellitaires optiques. Le quatrième chapitre présente l'avancée des travaux sur l'évaluation du potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues pour deux sites à Kuujjuarapik et Quaqtaq. Pour ce faire, des images RADARSAT-2 ont été analysées. Le rapport se termine par une conclusion.

## 2. Sites d'observation des conditions de glace de rives au Nunavik : Analyse des photographies d'octobre 2018 à août 2019 (Activité 3)

***L'objectif de l'activité 3 est d'analyser les photographies acquises par le réseau de caméra et de diffuser les informations concernant le suivi des glaces.***

### 2.1. Analyses des photographies acquises par les caméras

Pour tous les sites de suivi, les photos ont été récupérées lors des visites d'entretien de l'automne 2019 puis ont été archivées avec celles des années précédentes. Une procédure automatisée a permis d'identifier les photographies inutilisables pour différentes raisons (noirceur, givre, visibilité nulle, problème technique, etc.). Parmi les photographies utilisables, une photographie par heure (les caméras font l'acquisition de trois photographies au début de chaque heure) a été visualisée dans une application développée à l'INRS afin de noter les conditions de la glace visibles à ce moment. Ce travail a permis entre autres d'identifier les dates de la première apparition de la glace, du couvert complet final, de la première apparition d'eau, de la première eau libre complète et de déterminer les durées d'englacement, de la saison de glace et de fonte. Des conditions de glaces ou climatiques d'intérêt, telles des tempêtes et des blocs de glace en dérive, ont également pu être notées.

Dans les sections qui suivent, les résultats de l'analyse des photographies seront présentés pour chaque site et chaque caméra (Tableau 1).

### 2.1.1. Site d'observation à Aupaluk

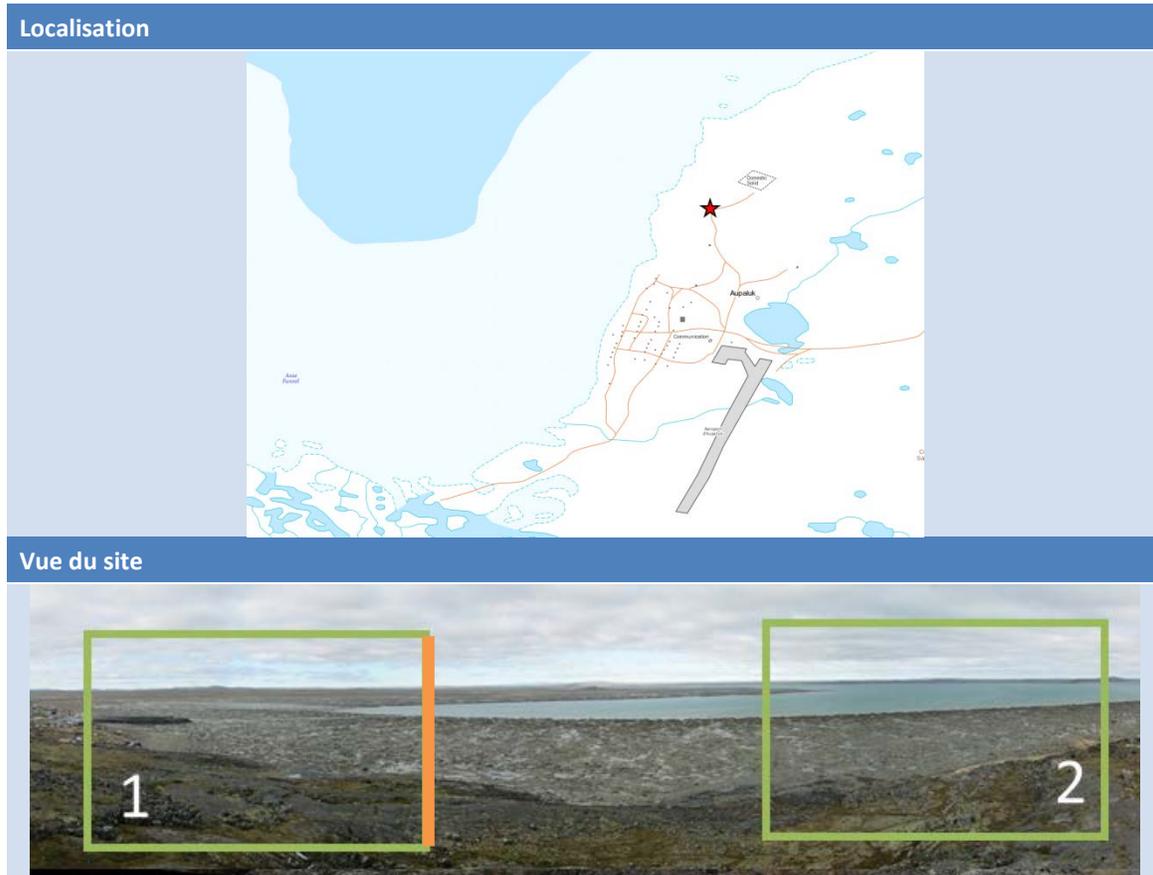


Figure 1 : Emplacement et vues des deux caméras situées à Aupaluk : Caméra 1-Ouest et caméra 2-Nord.

Tel que mentionné dans les rapports techniques numéros 2 et 3, les caméras installées à Aupaluk ont été subtilisées entre l'entretien annuel effectués à l'automne 2017 et le mois d'août 2018. Elles ont été remplacées par des caméras de marque SpyPoint moins dispendieuses que les caméras originales de marques Reconyx en raison de l'incertitude liée à leur présence à long terme. Ces nouvelles caméras n'ont pas bien fonctionné et se sont arrêtées longtemps avant l'entretien de l'automne 2019. La caméra visant l'infrastructure (caméra 1) a fonctionné jusqu'au 11 février mais en ne faisant l'acquisition que de 80% des photos. La seconde caméra n'a quant à elle fonctionné que 10 jours, soit jusqu'au 13 octobre 2018. L'englacement à Aupaluk a donc pu être observé partiellement. En effet, le comportement des glaces dans les deux zones surveillées par les caméras d'Aupaluk diffèrent sensiblement dans la mesure où la caméra orientée vers le sud-ouest (caméra 1), couvre le fond de l'anse Funnel, une zone de marnage se découvrant presque à chaque marée (Figure 1). Avec l'arrivée d'un cours d'eau dans son extrémité, le comportement des glaces dans cet estran est différent de celui plus au large dans la baie Hope Advance et n'est pas très représentatif de la région. Bien que le comportement de la glace dans l'anse soit documenté par l'analyse des photographies (celles que nous avons), les dates mentionnées dans le Tableau 2 correspondent aux dates d'englacement et de fonte hors de

l'estran pour être cohérent avec les informations extraites en 2016-2017. Ainsi, pour la caméra 1, les dates correspondent aux moments où les événements décrits ont franchi la limite droite de la photographie, représentée par le trait orange sur la Figure 1. Ainsi, la première apparition de glace documentée correspond à la première fois où de la glace est visible vis-à-vis la ligne orange.

Suite à une importante averse de neige ayant recouvert la zone intertidale le 19 octobre, de la gadoue est visible lors de la marée haute suivante. La première apparition de glace est observée le 22 octobre sous la forme d'un mélange de sorbet et de shuga (Figure 2-A). Le mélange sera visible lors des marées hautes jusqu'au 25 octobre. Le 27 octobre, une tempête, dont la vitesse des vents n'est pas disponible, produit de fortes vagues jusqu'à l'infrastructure (Figure 2-B). Lors des deux semaines suivantes, des épisodes de sorbet et du shuga seront visibles entrecoupés de marées en eau libre (Figure 2-C). Le 13 novembre, une nouvelle averse de neige laisse une importante couche de neige dans la zone intertidale. Les marées suivantes la transformera en gadoue qui restera sur place en raison de l'eau peu agitée (Figure 2-D). La couche s'épaissira et s'étendra lors des jours suivants pour recouvrir complètement la zone visible par la caméra le 23 novembre. Le 26 novembre, la marée descendante apportera avec elle une partie du couvert (Figure 2-E). Le 29 novembre, après quelques jours sans photos en raison d'obstruction devant la lentille, les berges et une partie de la zone intertidale réapparaissent couverts de glace. Cette glace ne sera plus remobilisée. La couverture progressera jusqu'au 5 décembre, premier jour de couvert complet et stable pour l'hiver (Figure 2-F).

A.



B.



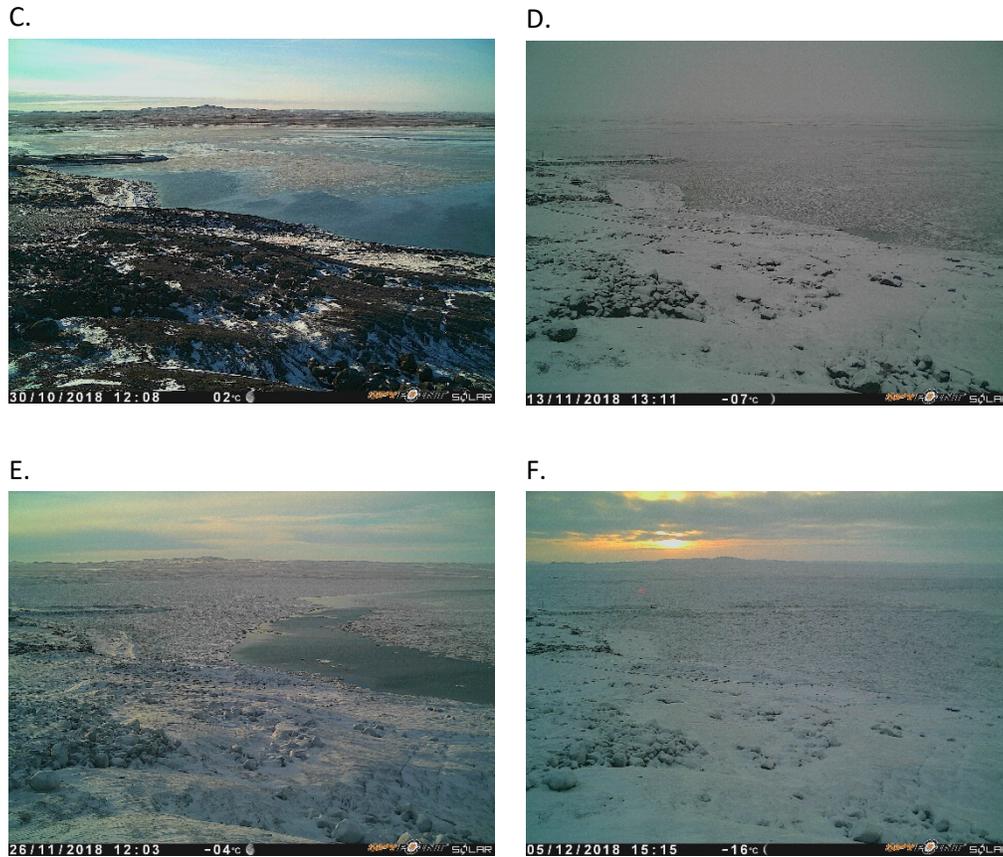


Figure 2 : Évolution de l'englacement 2018 à Aupaluk (A- 22 octobre 2018, B- 27 octobre 2018, C- 30 octobre 2018, D- 13 novembre 2018, E- 26 novembre 2018, F- 5 décembre 2018)

Les degrés-jour de gel observés à Aupaluk à l'automne-hiver 2018-2019 (courbe orangé sur la Figure 3) montrent des températures plus froides que la moyenne des huit années précédentes la période de formation du couvert de glace la plus froide de la mi-octobre à la mi-décembre (Figure 4). Ceci explique la présence plus hâtive de glace par rapport à ce qui avait été observé à l'automne-hiver 2016-2017 (première observation le 9 novembre).

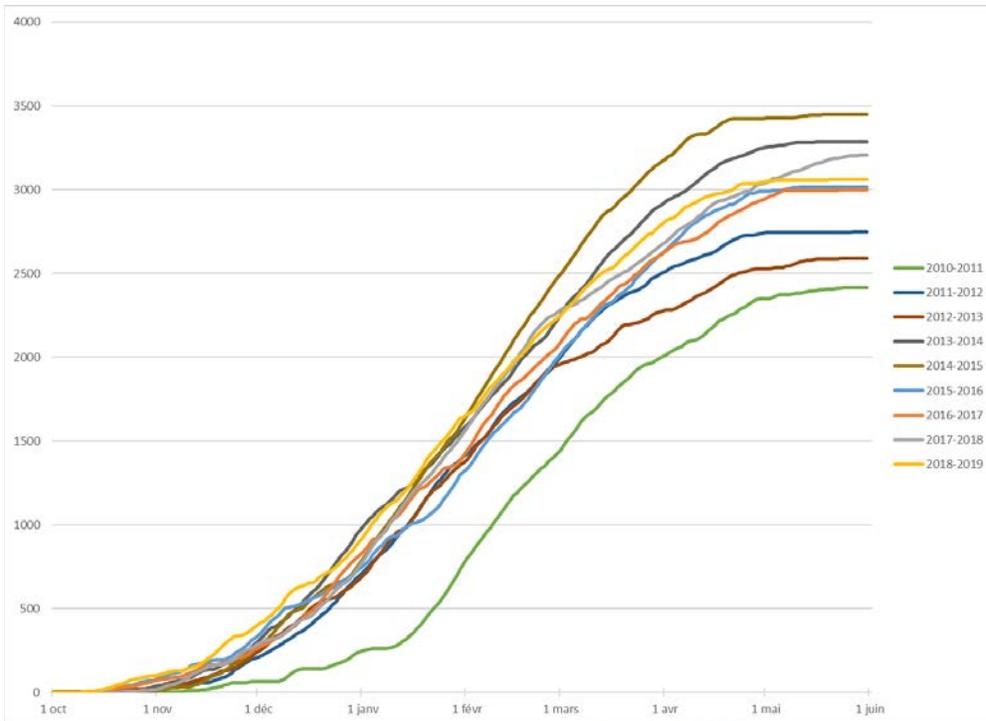


Figure 3 : Degré-jour de gel à Aupaluk à partir du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin (2010-2019)

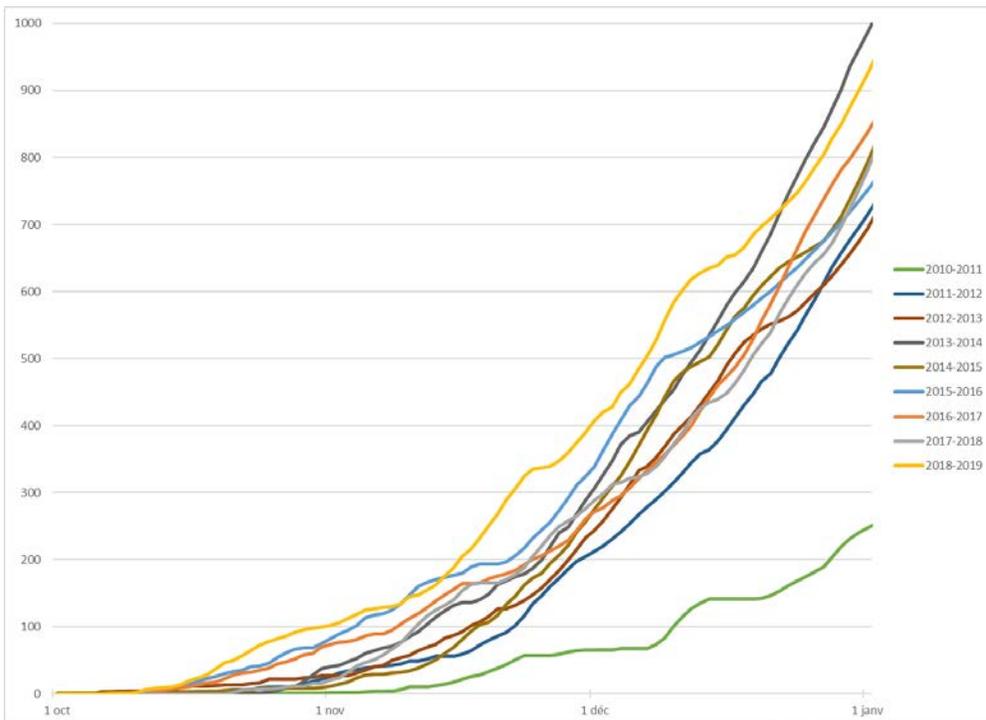


Figure 4 : Degré-jour de gel à Aupaluk lors de l'englacement du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> janvier (2010-2019)

Pour conclure cette section, le Tableau 2 synthétise les observations faites lors de la saison 2018-2019 à partir des caméras installées à Aupaluk près du village. Le Tableau 3 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace pour l'hiver 2018-2019 pour la baie d'Aupaluk.

**Tableau 2 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Aupaluk entre octobre 2018 et février 2019**

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (ouest)	Caméra 2 (nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	22 octobre 2018	-	22 octobre 2018
Couvert de glace permanent	5 décembre 2018	-	5 décembre 2018
Première apparition d'eau	-	-	-
Libre de glace pour la première fois	-	-	-

**Tableau 3 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Aupaluk depuis octobre 2016.**

Stade d'évolution du couvert de glace à Aupaluk	Nombre de jours 2016-2017	Nombre de jours 2017-2018	Nombre de jours 2018-2019
Durée de l'englacement	32	?	44
Durée du couvert de glace permanent	177	?	?
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	30	?	?

## 2.1.2. Sites d'observation à Quaqtq

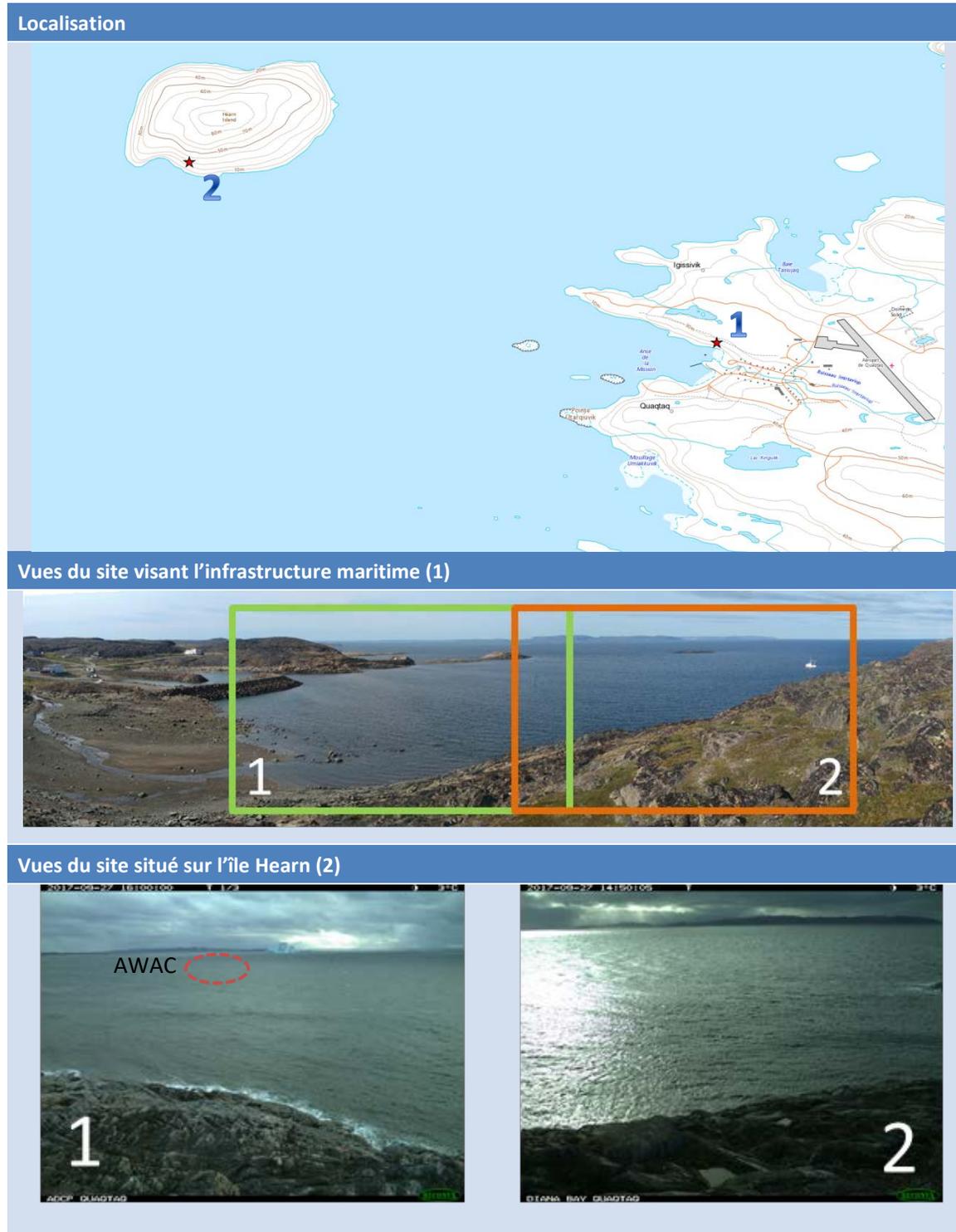


Figure 5 : Emplacement et vues des caméras situées à Quaqtq (site 1- Infrastructure maritime, site 2- île Hearn)

La Figure 5 montre l'emplacement des sites de caméras à Quaqtq. Un premier site en place depuis 2009, vise les infrastructures maritimes. Le second, installé en 2017, est situé sur l'île Hearn. Ce site couvre le secteur où est déployé le mouillage pour le projet CC16.1. La position approximative du mouillage (AWAC) est également montrée à la Figure 5.

Lors de l'automne 2018, deux journées ont eu des vents qualifiés de tempêtes par l'échelle de Beaufort, soit avec des vents entre 89 et 102km/h. Une première tempête est survenue le 27 octobre lors d'une grande marée (Figure 6-A). Les vents moyens ont alors atteint 91km/h. La direction nord-ouest du vent a fait en sorte de créer de fortes vagues dans l'anse de la mission et dans la baie Diana. Par la suite, les premiers signes de glace sont apparus dans l'Anse-de-la-mission le 19 novembre sous forme de sorbet et de shuga. Le 20 novembre, la glace semble passée au stade de nilas et est maintenant visible dans la baie Diana. Le 21 novembre, environ 90% de la baie est recouverte de glace (Figure 6-B). La seconde tempête est survenue en fin de journée le 22 novembre. Bien que l'après-midi ait été balayé par de forts coup de vent en provenance du nord-ouest, avec des pointes dépassant les 100km/h, la marée basse et la présence de glace ont fait en sorte que peu de signe de cette tempête n'ont été visibles près du village (Figure 6-C). Dans la baie Diana, l'eau semblait agitée mais rien de comparable au 27 octobre bien que la vitesse des vents enregistrés étaient supérieures et la direction était la même. Suite à la tempête, le 23 novembre, la baie Diana est libre de glace et l'anse de la mission est remplie de shuga poussée par le vent. Les marées hautes suivantes vont remettre la glace en mouvement. Les vents, de calme à légère brise, lors des jours suivants permettront la formation de nilas et de jeune glace. Le 30 novembre, environ 80% de la baie est recouverte de glace et de la glace en crêpe est visible (Figure 6-D). Dans la première semaine de décembre, la glace s'épaissira et s'étendra à l'ensemble de la baie (Figure 6-E). À partir de ce moment, l'anse de la mission sera recouverte de glace pour l'hiver. Pour le reste de la baie, la glace se remettra en mouvement le 7 décembre et demeurera mobile jusqu'au 11 décembre. Durant cette période, une partie de la jeune glace sera détruite et du sarrasin accompagnera le nilas. Du 12 au 14 décembre, le couvert sera stable. Le 14 décembre en après-midi, à la faveur d'une marée montante et d'une jolie brise du sud, une partie du couvert de glace s'est séparée et s'est déplacée vers l'extérieur de la baie (Figure 6-F). Bien que de la glace thermique ait débuté sa formation dans la crevasse laissée par le déplacement, cette dernière s'est refermée dans la nuit du 15 au 16 décembre, probablement sous l'effet d'une bonne brise de l'ouest-nord-ouest. Il s'agira du dernier mouvement de glace de l'automne. Le couvert sera donc complet et fixe pour l'hiver à partir du 17 décembre. Les premières grandes marées à survenir suite à la prise du couvert feront apparaître de l'eau dans la partie intertidale du 23 au 27 décembre. Le couvert demeurera néanmoins complet tout l'hiver.

Les degrés-jour de gel observés à Quaqtq à l'automne-hiver 2018-2019 (courbe en bleu ciel à la Figure 7) montrent les températures les plus froides des huit années précédentes pour la période de formation du couvert de glace de la mi-octobre à la mi-décembre (Figure 8). Ceci explique la présence plus hâtive de glace par rapport à ce qui avait été observé les deux automnes précédents (premières observations les 7 décembre 2016 et 2 décembre 2017). La période d'englacement

est toutefois très longue puisque les fortes marées et les vents forts (tempêtes) des mois de novembre et début décembre détruisent le couvert à chaque fois qu'il se forme.

A.



B.



C.

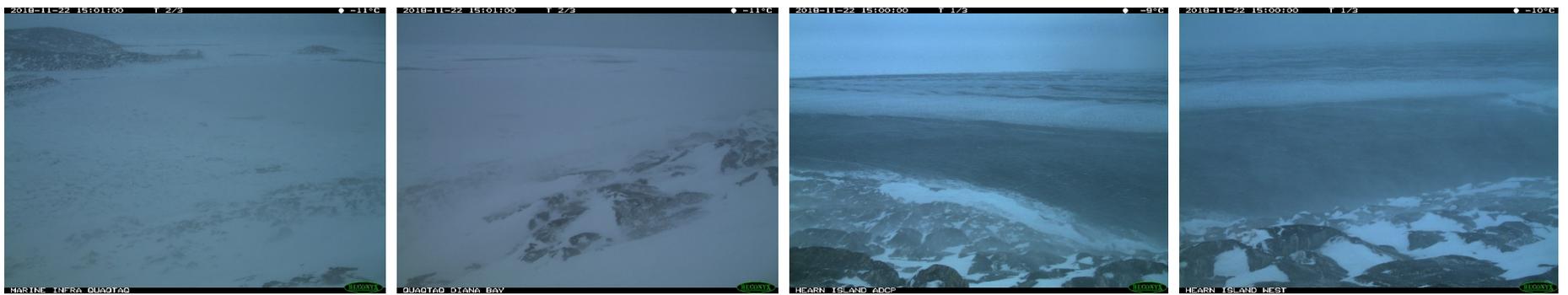




Figure 6 : Évolution de l'englacement 2018 à Quaqtaq (A- 27 octobre 2018, B- 21 novembre 2018, C- 22 novembre 2018, D- 30 novembre 2018, E- 5 décembre 2018, F- 21 décembre 2018)

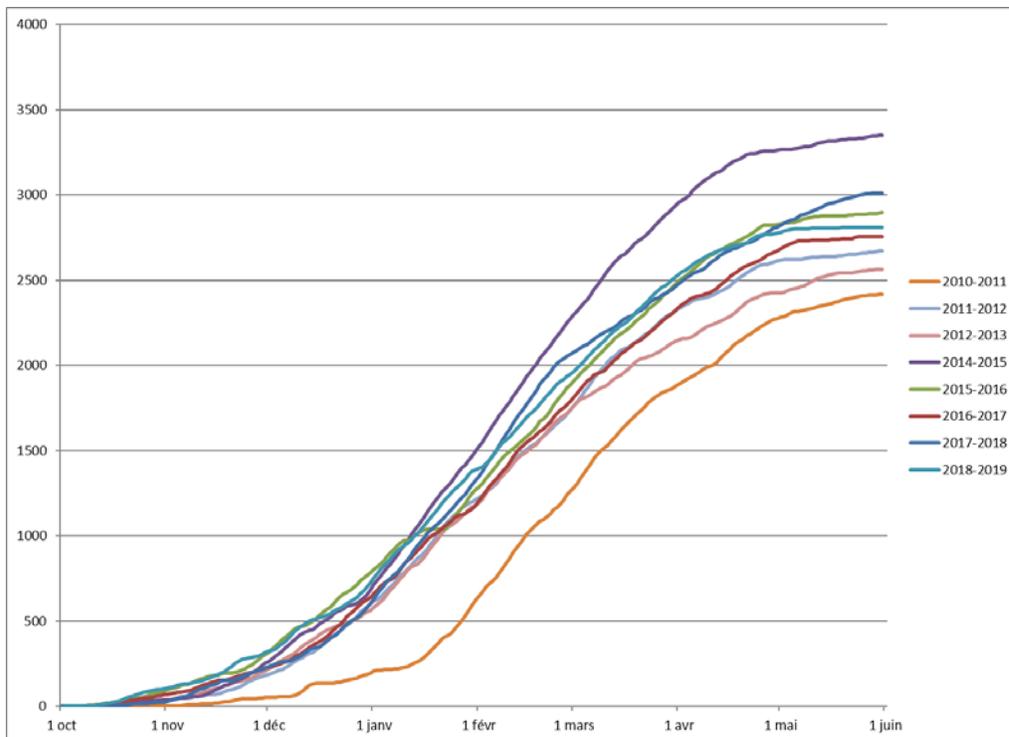


Figure 7 : Degré-jour de gel à Quaqtq à partir du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin (2010-2019)

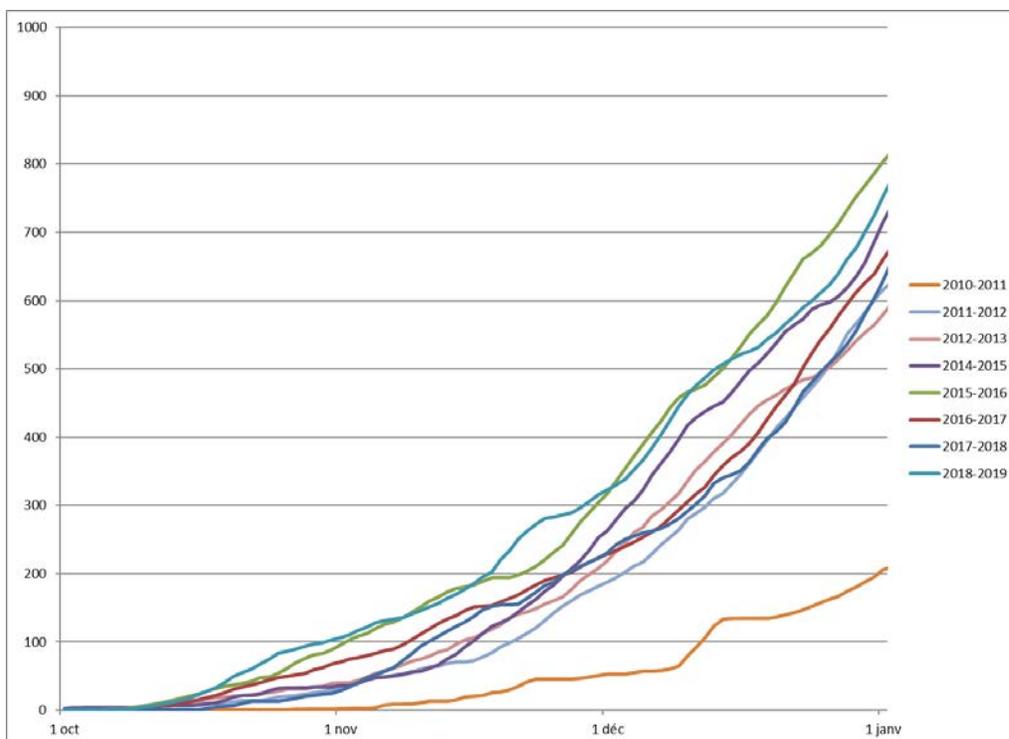


Figure 8 : Degré-jour de gel à Quaqtq lors de l'englacement du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> janvier (2010-2019)

À l'hiver 2019 (selon les dates, c'est le printemps), deux décrochements de la banquise sont survenus dans la baie Diana, au sud-ouest de l'île Hearn. Le premier est observé le 23 mars (Figure 9-A). La zone découverte demeure libre de glace pendant moins de 24h, après quoi, avec des températures sous les  $-20^{\circ}\text{C}$ , de la glace thermique commence à se former. La brèche se refermera néanmoins le 25 mars sous la poussée de glaces venant du nord-ouest. Le second décrochement est survenu le 17 avril, légèrement plus au sud que la fracture précédente (Figure 9-A), lors d'une marée montante avec une jolie brise du sud, perpendiculaire à la ligne de fracture. Les températures sont alors plus chaudes, frôlant les  $-1^{\circ}\text{C}$ . La zone restera ouverte plus longtemps. Pendant 3 jours de la glace en dérive sera observée puis l'ouverture se refermera dans la nuit du 19 au 20 avril.

Au printemps 2019, les premiers signes de fonte surviennent les 10, 11 et 12 mai avec une arrivée d'eau douce au fond de l'anse de la Mission en provenance du ruisseau Imirtaviup. Des mares de fonte sont également visible dans l'anse de la mission. Peu de changements seront visibles les 10 jours suivants. Le 22 mai, alors que davantage de mares sont visibles dans l'anse, la banquise se fracture de nouveau au même endroit que le 17 avril, alors qu'un fort vent frais souffle du sud-sud-est (Figure 9-B). La brèche se refermera dans la journée mais la glace sera affaiblie. Dès le lendemain, la glace commencera à se déplacer dans le secteur ayant bougé la veille. Jusqu'au 26 mai, la concentration de glace demeurera élevée dans ce secteur mais elle demeurera mobile. Le 26 mai, l'ouest de la baie Diana se videra de glace sous un vent d'est et restera libre jusqu'au 5 juin. Pendant ce temps, de l'eau apparaît entre l'île Hearn et le continent à partir du nord le 30 mai puis s'étendra lentement vers le sud lors de la semaine suivante. Les premiers mouvements de la glace sur les berges près des infrastructures seront également observés le 30 mai. Après quelques cycles de grandes marées, les premiers mouvements de glace hors de la zone de marnage sont observés le 7 juin (Figure 9-C). À ce moment, des petites et jolies brises du nord-ouest poussent de la glace du détroit d'Hudson dans la baie Diana. Cette glace se remettra en mouvement le 9 juin et sera évacuée le 10 juin (Figure 9-D). Pendant ce temps, la fonte se poursuit avec des températures au-dessus de  $0^{\circ}\text{C}$ , et des maximums journaliers atteignant  $8.8^{\circ}\text{C}$  et  $12.5^{\circ}\text{C}$ . Les mares de fonte sont de plus en plus présentes sur la banquise, l'étendue d'eau entre le continent et l'île Hearn s'agrandie et la glace de l'anse de la mission est partiellement disparue. À ce moment, une bande de glace ceinturant l'anse la protège des glaces de la baie mais empêche également les glaces de quitter l'anse (Figure 9-E). Cette barrière cèdera le 11 juin, libérant les glaces de l'anse de la mission. Le 12 juin, ce qui reste de banquise devant l'île Hearn sera mobilisé et poussé vers l'ouest par un fort vent frais soutenu de l'est. Le 14 juin, la glace est de retour dans l'est de la baie Diana et dans l'anse mais ne semble pas très épaisse. Des blocs s'échoueront près de l'infrastructure maritime. Un cordon de glace épais ceinture alors les infrastructures. Le 16 juin, la seconde infrastructure maritime est libre de glace et accessible. Jusqu'au 19 juin, peu de glace sera présent dans le secteur d'étude. Le 20 juin, un vent du nord-ouest, combiné à une grande marée, pousse la glace dans l'est de la baie et dans l'anse de la mission. Beaucoup de blocs s'échouent alors près de l'infrastructure (Figure 9-F). L'amplitude des marées diminuant, les blocs demeureront dans l'anse plusieurs jours. Le 22 juin, la baie se remplit de nouveau de glace en provenance du détroit d'Hudson avec des vents du nord-ouest. La glace est alors plus épaisse avec

des blocs de quelques mètres d'épaisseur. La glace demeurera jusqu'au 25 juin où elle sera brièvement évacuée en fin d'après-midi pour revenir dans la nuit. De la glace mobile sera présente jusqu'au 30 juin. Le 30 juin, de gros blocs/icebergs sont visibles parmi les glaces en dérives (Figure 9-G). Le 1<sup>er</sup> juillet, beaucoup moins de glace est visible dans l'anse et la baie et plusieurs endroits sont en eau libre. Des petits icebergs sont néanmoins présents dans la baie. La quantité de glace en dérive diminuera jusqu'au 6 juillet. Le 7 juillet sera la première journée sans glace. La semaine suivante, des icebergs apparaîtront au fond de la baie. Ils se déplaceront dans la baie jusqu'à la mi-juillet où l'un d'entre eux restera échoué jusqu'au 2 août. Il dérivera ensuite vers l'île Hearn, où il s'échouera de nouveau à proximité et y restera jusqu'au 12 août.

Au niveau météorologique, les températures enregistrées à Quaqtq montrent un printemps et un été parmi les plus chauds (courbe en vert pâle sur la Figure 10) et les plus hâtifs (Figure 11) des neuf dernières années alors que le printemps précédent, celui de 2018, était de loin le plus tardif.



A.



B.



C.



D.



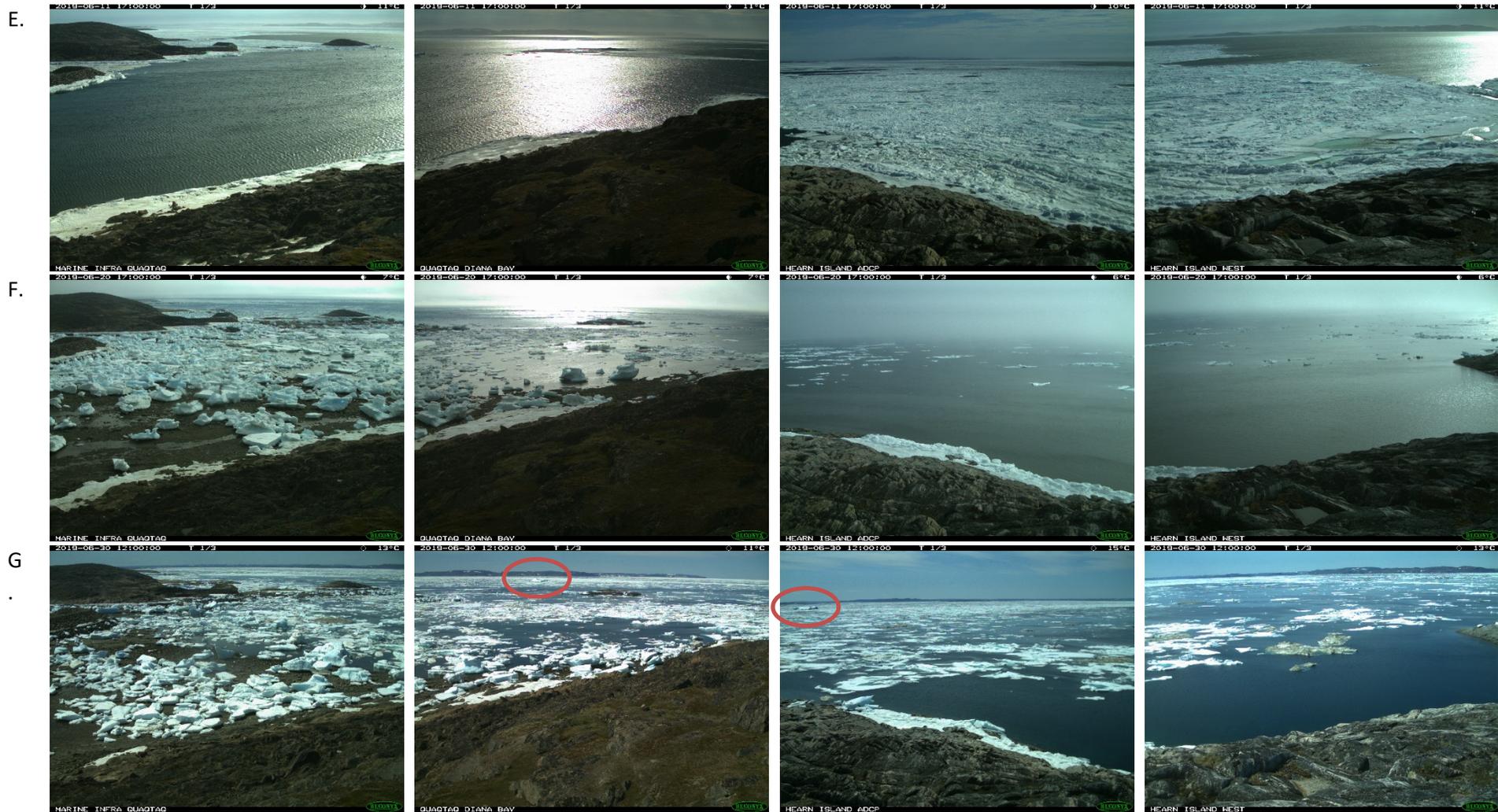


Figure 9 : Évolution de la fonte printanière du couvert de glace à Quaqtaq en 2019 (A- 23 mars et 18 avril 2019, B- 22 mai 2019, C- 7 juin 2019, D- 10 juin 2019, E- 11 juin 2019, F- 20 juin 2019, G- 30 juin 2019)

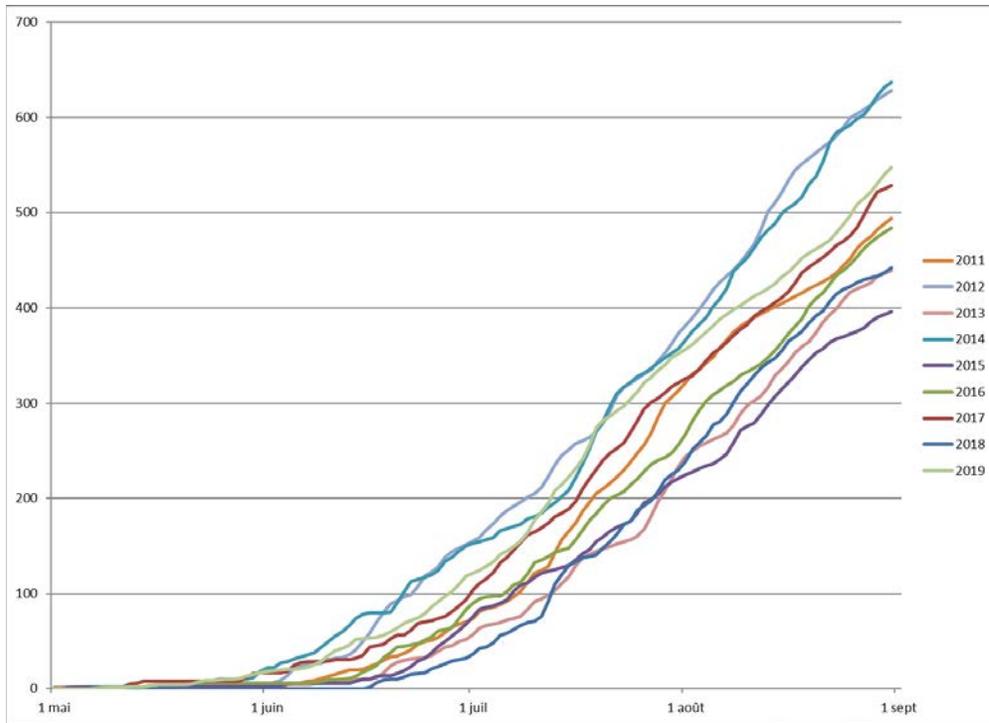


Figure 10 : Degré-jour de fonte à Quaqaq à partir du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> septembre (2011-2019)

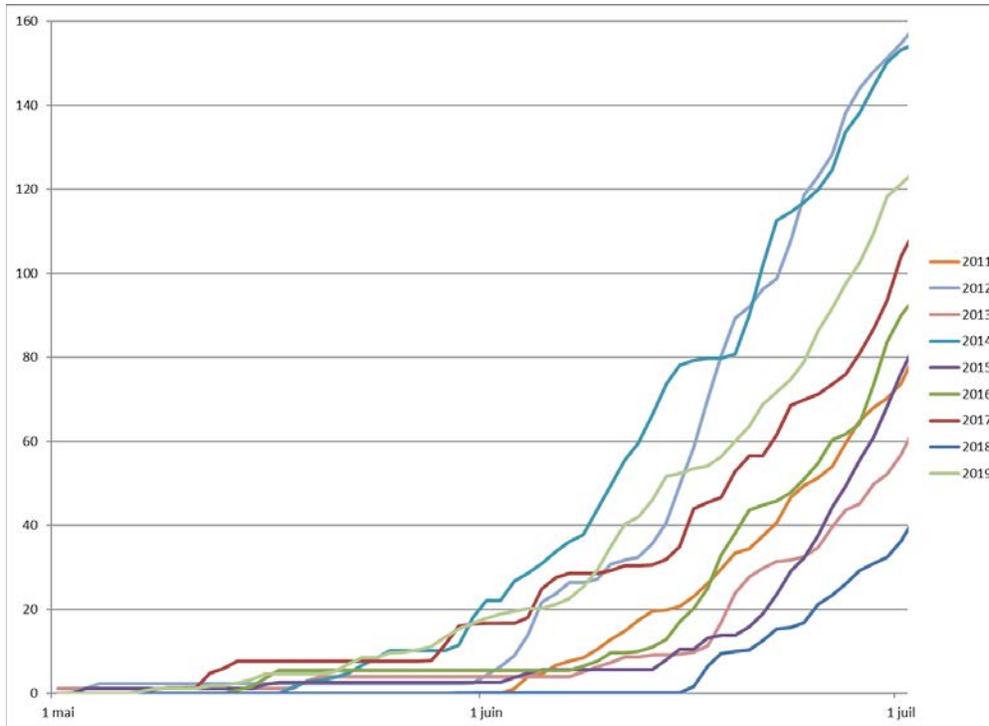


Figure 11 : Degré-jour de fonte à Quaqaq lors de la fonte printanière du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> juillet (2011-2019)

Pour conclure cette section, le Tableau 4 synthétise les observations faites lors de la saison 2018-2019 à partir des caméras installées à Quaqtq près du village et sur l'île Hearn. Le Tableau 5 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace depuis octobre 2016 pour la baie Diana et l'Anse de la Mission à Quaqtq.

**Tableau 4 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Quaqtq entre octobre 2018 et août 2019**

Stade	Infrastructure maritime		Île Hearn		Ensemble du site
	Caméra 1 (sud)	Caméra 2 (ouest)	Caméra 1 (sud)	Caméra 2 (ouest)	
Première apparition de glace	18 novembre 2018	18 novembre 2018	20 novembre 2018	20 novembre 2018	18 novembre 2018
Couvert de glace permanent	5 décembre 2018	11 décembre 2018	17 décembre 2018	17 décembre 2018	17 décembre 2018
Première apparition d'eau	7 juin 2019	7 juin 2019	22 mai 2019	22 mai 2019	22 mai 2019
Libre de glace pour la première fois	7 juillet 2019	7 juillet 2019	7 juillet 2019	7 juillet 2019	7 juillet 2019

**Tableau 5 : Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Quaqtq depuis octobre 2016**

Stade d'évolution du couvert de glace à Quaqtq	Nombre de jours 2016-2017	Nombre de jours 2017-2018	Nombre de jours 2018-2019
Durée de l'englacement	11	21	29
Durée du couvert de glace permanent	166	181	156
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	35	38	46

### 2.1.3. Sites d'observation à Baie Déception



Figure 12 : Emplacement et vues des caméras situées à la Baie Déception (site 1-Pointe-Noire, site 2-Ouest de l'île Moosehead)

Tel que mentionné dans le rapport technique 3 de novembre 2019<sup>1</sup>, la caméra SpyPoint Solar installée sur le site de Pointe Noire à la Baie Déception a cessé de prendre des photographies peu de temps après son installation en septembre 2019. Elle n'a acquis que 133 photos soit environ 11 jours de fonctionnement. La caméra a été retirée. La caméra Reconyx a, quant à elle, très bien fonctionné tout au long de l'année. Au site situé à l'ouest de l'île Moosehead, la caméra Browning ne répondait plus au moment de l'entretien. Aucune photo n'a été acquise par cette caméra pour l'année 2018-2019. Elle a été retirée. La caméra Reconyx a bien fonctionné également à ce site. Il est à noter aussi que les informations météo présentées pour la baie Déception proviennent de Salluit ou bien des capteurs de température intégrés aux caméras. Une station météo a été installée à l'automne 2019 au fond de la baie et pourra fournir des informations plus précises et exactes pour les années à suivre.

Les premières apparitions de glace se manifestent sous forme de bandes de shugas et de sorbet les 22 et 23 octobre dans le nord de la baie (Figure 13-A). Le 26 octobre, du sorbet est visible vis-à-vis Moosehead et dans le nord de la baie. Le 27 octobre, les effets d'un fort vent sont observés dans le nord de la baie (Figure 13-B). Il s'agit d'une journée où tout le nord du Nunavik était touché par une dépression. À partir du 30 octobre, les observations de shuga et de sorbet se sont enchaînées jusqu'au 12 novembre, particulièrement dans le nord de la baie (Figure 13-C). À partir de ce jour, davantage de nilas est présent. Le 13 novembre, une grande proportion de la baie est recouverte de nilas. Le lendemain midi, la couverture de nilas est complète (Figure 13-D). Le 15 novembre, le vent passe au nord et pousse le nilas au fond de la baie. Un peu de sorbet demeure visible sur la côte de Pointe Noire. Le lendemain, un vent du sud souffle sur la glace qui se mobilise. Elle est poussée vers le nord de la baie. Les 17 et 18, du sorbet et du nilas sont visible dans la baie puis le 19, le vent passe au nord-ouest ce qui a pour conséquence que la baie se remplit de glace en provenance du détroit. Quelques trous en eau libre apparaissent parmi les radeaux de nilas devant Moosehead (Figure 13-E). Le couvert restera stable et de la glace thermique se formera dans les espaces en eau libre. À partir du 21, le couvert sera fixe pour l'hiver devant l'île Moosehead. Plus au nord, à l'exception d'une petite fracture apparaissant le 21 et se remplissant de glace thermique, le couvert demeure stable jusqu'au 26 novembre malgré des vents du sud et la présence de grandes marées. Le 27 novembre, une nouvelle fracture plus importante apparaît le long de Pointe Noire mais la glace n'est pas mobilisée (Figure 13-F). L'ouverture formée par la fracture gèle et demeure stable jusqu'au 11 décembre. Le 12 décembre, la glace est remobilisée puis évacuée de la partie nord-est de la baie (Figure 13-G). Le secteur demeure ensuite en eau libre jusqu'au 17 décembre. Lors de cette journée, des plaques de nilas arrivent du nord-est pour former un couvert complet. Il se consolidera et sera fixe pour l'hiver.

---

<sup>1</sup> Rapport technique du 22 novembre 2019 réalisé dans le cadre du projet CC09.2 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, Quaqtuaq et Aupaluk (2017-2020)

A.



B.



C.



D.



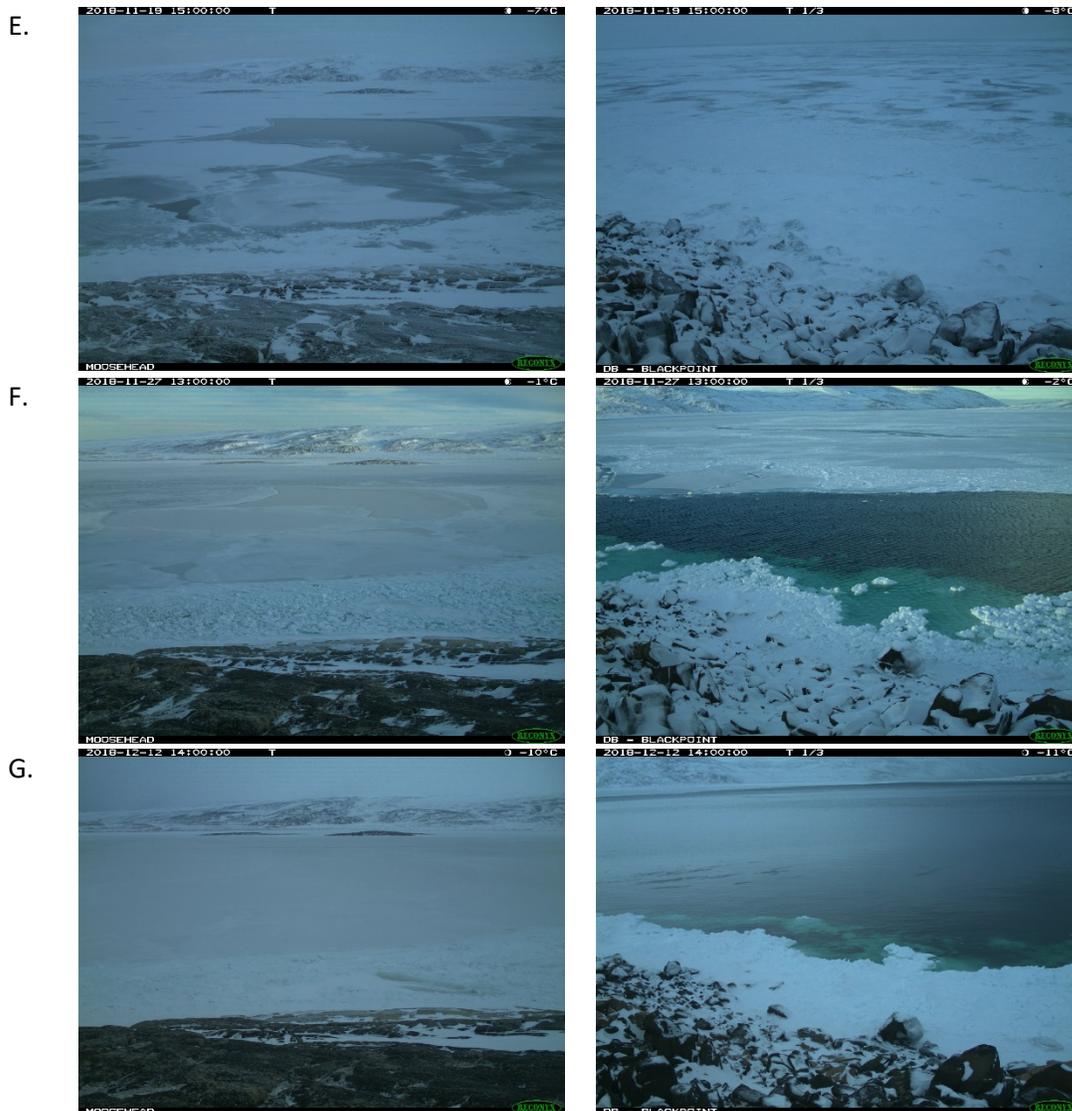


Figure 13 : Évolution de l’englacement 2018 à la Baie Déception (A- 22 octobre 2018, B- 27 octobre 2018, C- 11 novembre 2018, D- 14 novembre 2018, E- 19 novembre 2018, F- 27 novembre 2018, 12 décembre 2018)

Après un hiver où le couvert de glace est resté stable malgré les passages répétés des bateaux, les premiers signes de fonte apparaissent à partir de la mi-mai alors que les températures moyennes journalières augmentent mais se maintiennent néanmoins sous 0°C. Ce réchauffement se traduit visuellement par une fonte du couvert de neige sur la glace bien visible le 22 mai (Figure 14-A). Les températures moyennes journalières passent ensuite au-dessus de 0°C dans la dernière semaine de mai se qui accélère le processus de dégradation de la glace. Le 1<sup>er</sup> juin, premier jour où les bateaux sont autorisés dans la baie, un premier navire traverse la banquise en matinée (Figure 14-B). Le passage du bateau ne semble pas trop affaiblir la banquise car elle demeurera intacte vis-à-vis l’île Moosehead jusqu’au 11 juin à l’exception du chenal laissé par le bateau qui

ne règlera pas complètement. Le 12 juin, toute la glace est mobilisée et évacuée (Figure 14-C). Quelques radeaux de glace tarderont à quitter la baie et seront visibles jusqu'au 14 juin (Figure 14-D). Le 15 juin, le secteur de l'île Moosehead est en eau libre et à partir du lendemain, il sera libre de glace pour toute la saison estivale.

Pendant la période de fonte, peu d'information est disponible pour la caméra située à la Pointe Noire car le 28 mai, la vue de la caméra de Pointe Noire a été modifiée. La nouvelle vue donne l'impression que le couvercle de la caméra est partiellement ouvert (Figure 14-B). Cela durera 2 semaines. Pendant cette période, de l'eau apparaîtra dans la zone de marnage devant la caméra le 9 juin. À partir du 10 juin, le couvercle de la caméra semble s'être ouvert complètement de sorte que la vue est rendue orientée vers l'est (Figure 14-C). Le 22 juin en soirée, la vue revient pratiquement à son état initial, quelqu'un ayant fermé le couvercle de la caméra (Figure 14-E).

Au niveau des températures, les températures moyennes observées à Salluit lors de l'automne 2018 se situe dans la moyenne des cinq années précédentes (Figure 15). À la fonte, les températures se situaient dans la moyenne jusqu'à la mi-juin puis elles ont augmenté pour devenir l'été le plus chaud depuis 2015 (Figure 16).

Pour conclure cette section, le Tableau 7 synthétise les observations faites au courant de la saison 2018-2019 à partir des caméras installées à la pointe Noire et à l'ouest de l'île Moosehead à la Baie Déception. Le Tableau 8 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace depuis octobre 2016 pour Baie Déception.

A.



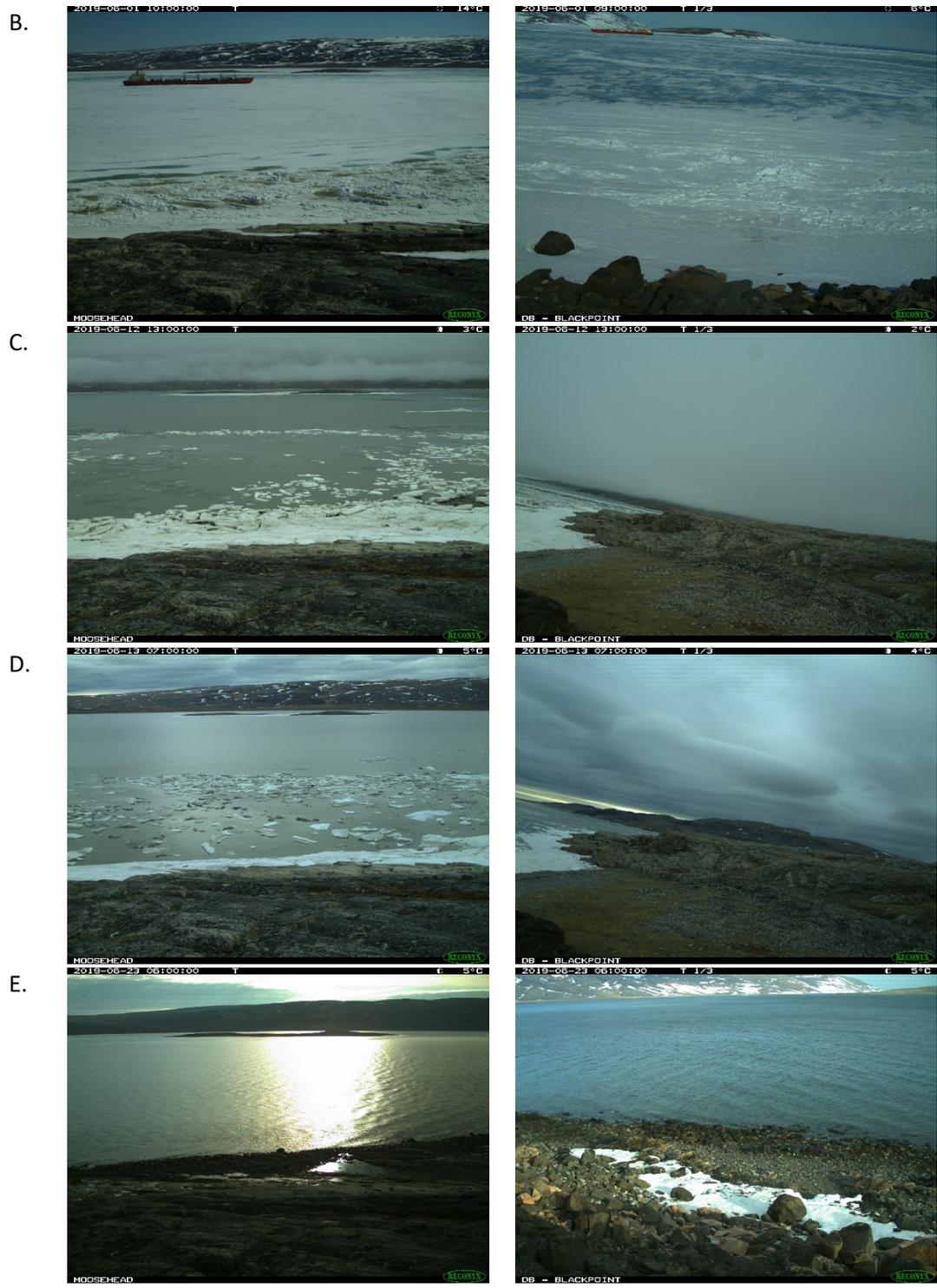


Figure 14 : Évolution de la fonte du couvert de glace à la Baie Déception en 2019 (A- 22 mai 2019, B- 1<sup>er</sup> juin 2019, C- 12 juin 2019, D- 13 juin 2019, E- 23 juin 2019)

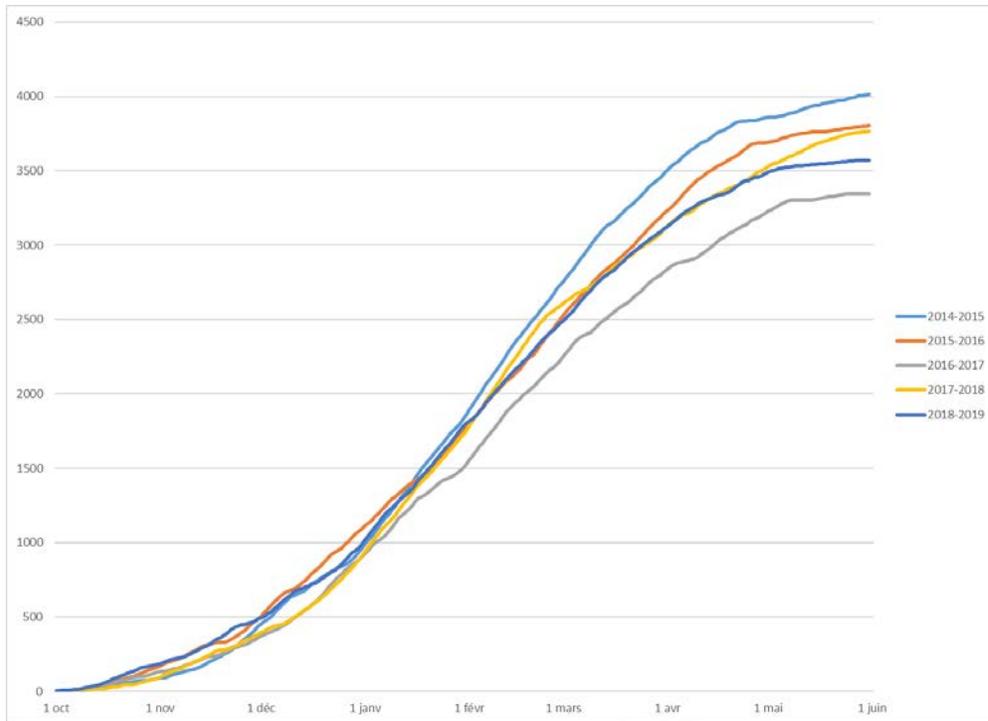


Figure 15 : Degré-jour de gel à Salluit à partir du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin (2014-2019).

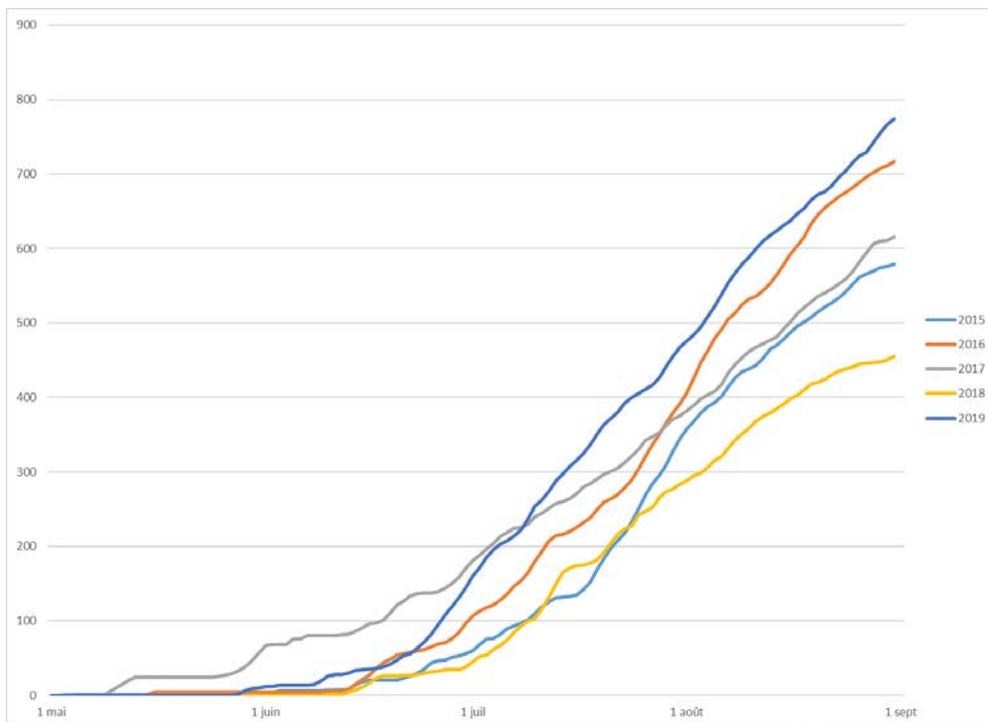


Figure 16 : Degré-jour de fonte à Salluit à partir du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> septembre (2015-2019).

**Tableau 6 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à l'ouest de l'île Moosehead à la Baie Déception entre octobre 2017 et août 2018**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Caméra 1 (ouest)</b>	<b>Caméra 2 (pointe Noire)</b>	<b>Ensemble du site</b>
Première apparition de glace	26 octobre 2018	22 octobre 2018	22 octobre 2018
Couvert de glace permanent	21 novembre 2018	17 décembre 2018	17 décembre 2018
Première apparition d'eau	12 juin 2019	-	12 juin 2019
Libre de glace pour la première fois	16 juin 2019	-	16 juin 2019

**Tableau 7 : Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Baie Déception depuis octobre 2016**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace à la Baie Déception</b>	<b>Nombre de jours</b>		
	<b>2016-2017</b>	<b>2017-2018</b>	<b>2018-2019</b>
Durée de l'englacement	16	35	56
Durée du couvert de glace permanent	185	197	177
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	5	13	5

## 2.1.4. Site d'observation à Ivujivik

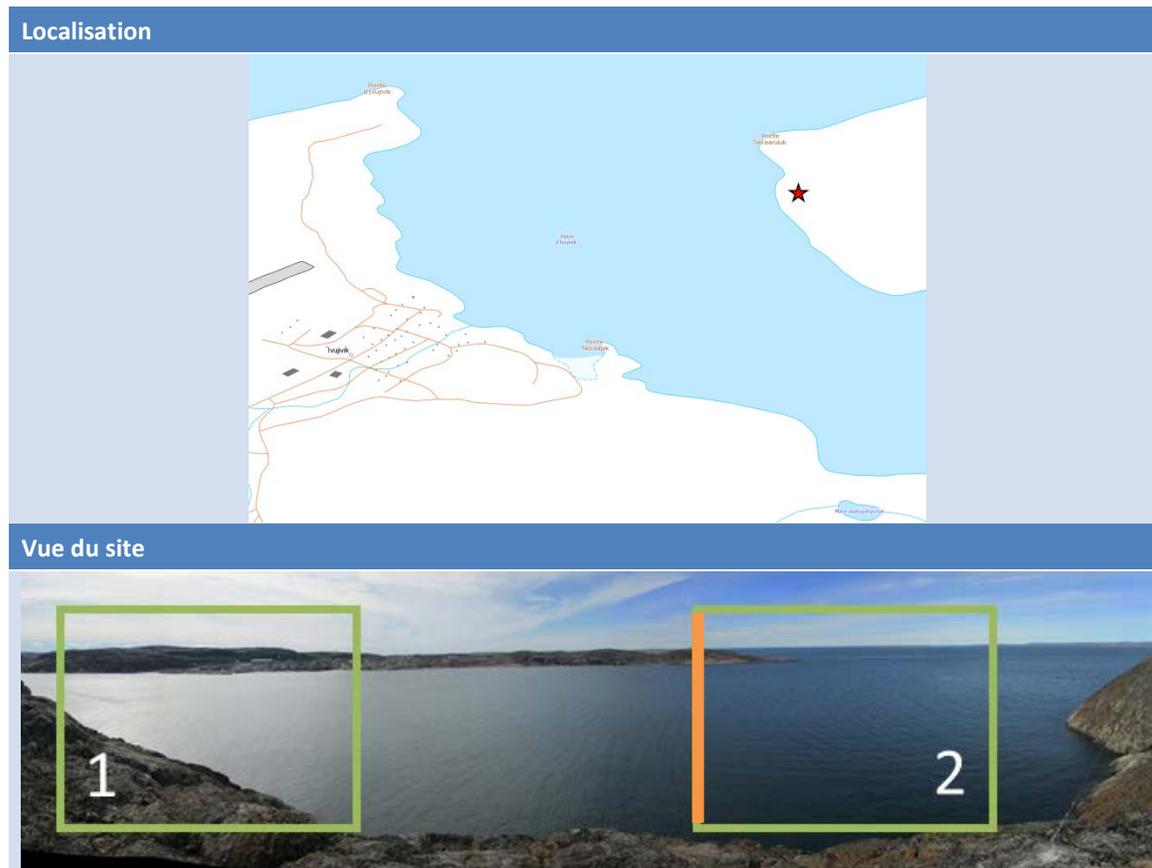


Figure 17 : Emplacement et vues des caméras situées à Ivujivik (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 17 montre l'emplacement des caméras à Ivujivik et les vues sur la baie. 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 8 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, représentée par le trait orangé sur la Figure 17. Ainsi, la première apparition de glace documentée correspond à la première fois où de la glace est visible vis-à-vis la ligne orange. Pour la caméra 1, il s'agit de la première fois où de la glace est visible dans la photographie.

À l'automne 2018, aucun vent qualifié de tempête n'a été mesuré à Ivujivik. Les vents les plus violents ont été des coups de vent du nord-est le 4 octobre. La mer au fond de la baie et dans le

secteur de l'infrastructure maritime n'était alors pas très agitée puisqu'ils étaient assez bien protégés du vent.

Les toutes premières observations de glace dans la baie d'Ivujivik ont eu lieu au milieu novembre, les 15, 16 et 17, avec une très faible concentration du shuga et de sorbet (Figure 18-A). Ces observations ne seront pas considérées comme le début de l'englacement en raison de leur ponctualité et de la très faible concentration de glace présente. Le 18 novembre au matin, le fond de la baie est rempli à plus de 95% de nilas (Figure 18-B). Le vent est alors du nord-nord-ouest, passant de bonne brise durant la nuit à une petite brise en matinée. Aucune glace n'est visible dans la passe Digges. Jusqu'au 23 novembre, la banquise se consolide pour former de la jeune glace sous l'effet d'un vent majoritairement du nord. Durant cette période, dans la passe, la glace apparaît et la concentration augmente. Le 22 novembre, tôt le matin, la passe, tout comme la baie sont recouverts de glace. La glace dans la passe se remet en mouvement en après-midi. Le 23 novembre, alors qu'un fort vent frais du sud-est souffle, la nouvelle banquise commence à se fracturer et à décrocher. Petit à petit, jusqu'au 24 novembre, la banquise reculera mais sans libérer l'infrastructure maritime (Figure 18-C). Dans la nuit du 24 au 25, le vent passe au nord-est ce qui a comme conséquence de remplir de nouveau la baie le 25 novembre au matin. Beaucoup de mouvements sont visible dans la passe. Elle apparaît recouverte de glace à 12h puis en eau libre en après-midi. La baie demeurera remplie le 26 novembre avec une grande concentration de sarrasin et de glace en crêpes alors que la passe demeure passablement exempte de glace (Figure 18-D). Le 27 novembre au matin, suite à un passage du vent au sud-sud-est, la baie est libre de glace de même que la passe. Dans les jours suivants, alors que le vent est très calme et les températures aux environs de  $-10^{\circ}\text{C}$ , du sorbet et du nilas réapparaissent dans la baie mais en faible concentration. Le 30 novembre, à l'exception d'un bout de banquise au fond de la baie, cette dernière est libre de glace durant toute la journée. De la glace en mouvement est visible dans la passe mais elle ne pénètre pas dans la baie. La même chose se reproduit le lendemain. Un peu de sorbet est néanmoins visible par moment. Une grande quantité de glace arrive de la passe le 2 décembre avec des vents du nord-ouest (Figure 18-E). La caméra orientée vers le village est alors embuée et le demeurera jusqu'au 8 décembre. La banquise se consolide rapidement de sorte qu'elle est déjà recouverte de neige le 4 décembre (Figure 18-F). Elle résiste alors à un grand vent frais du sud-sud-est soutenu pendant plusieurs heures. Pendant le reste du mois de décembre, des concentrations variables de glace sont observées dans la passe Digges. Pendant une douzaine de journées, la caméra orientée vers la passe est cependant embuée. De l'eau est cependant visible le 30 décembre puis la passe apparaît complètement gelée le 1 janvier 2019.

Lors de la période d'englacement, les températures enregistrées à Ivujivik en octobre et novembre 2018 étaient les plus froides des huit dernières années (courbe en bleu sur la Figure 19). Cela a certainement contribué à la mise en place plus précoce du couvert de glace. Durant l'hiver, les températures se sont rapprochées de la moyenne pour cette même période mais en demeurant supérieure à celle-ci (Figure 20).

A.



B.



C.



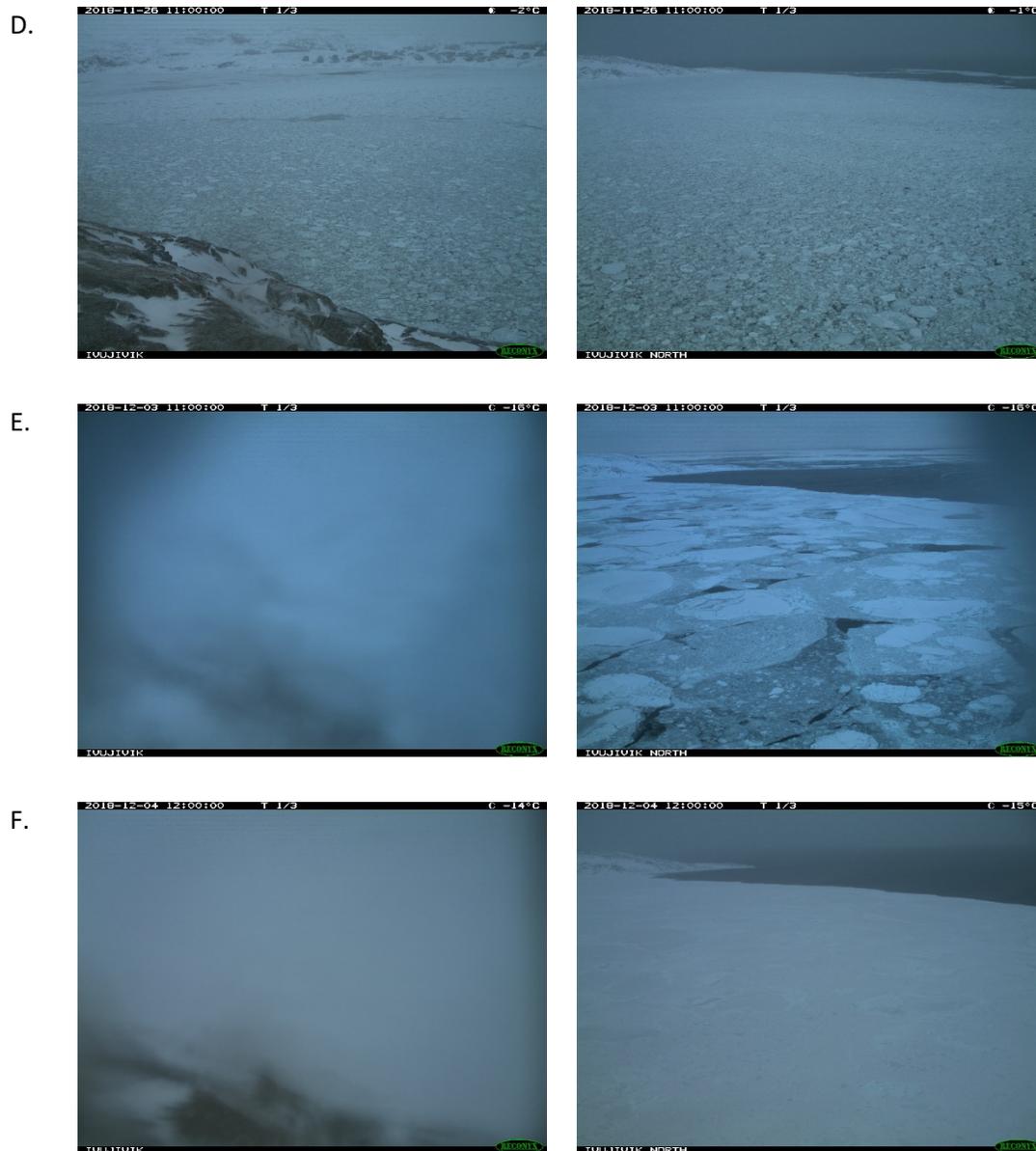


Figure 18 : Évolution de l'englacement à Ivujivik en 2018 (A- 4 octobre 2018, B- 18 novembre 2018, C- 24 novembre 2018, D- 26 novembre 2018, E- 3 décembre 2018, F- 16 décembre 2017)

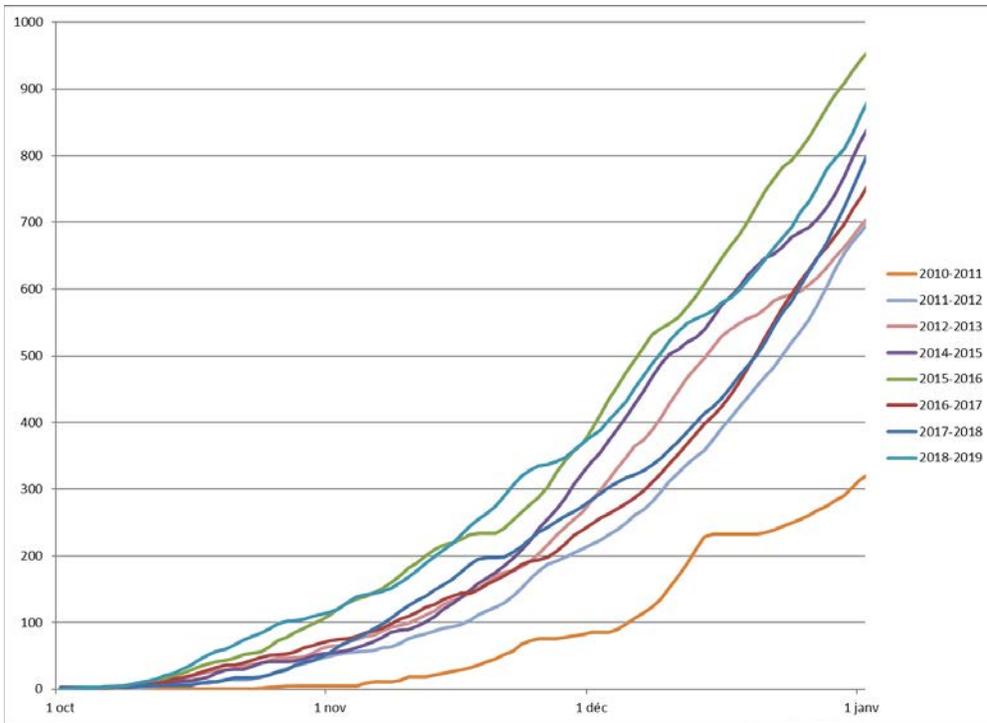


Figure 19 : Degré-jour de gel à Iqviq lors de l'englacement du 1er octobre au 1er janvier (2010-2019)

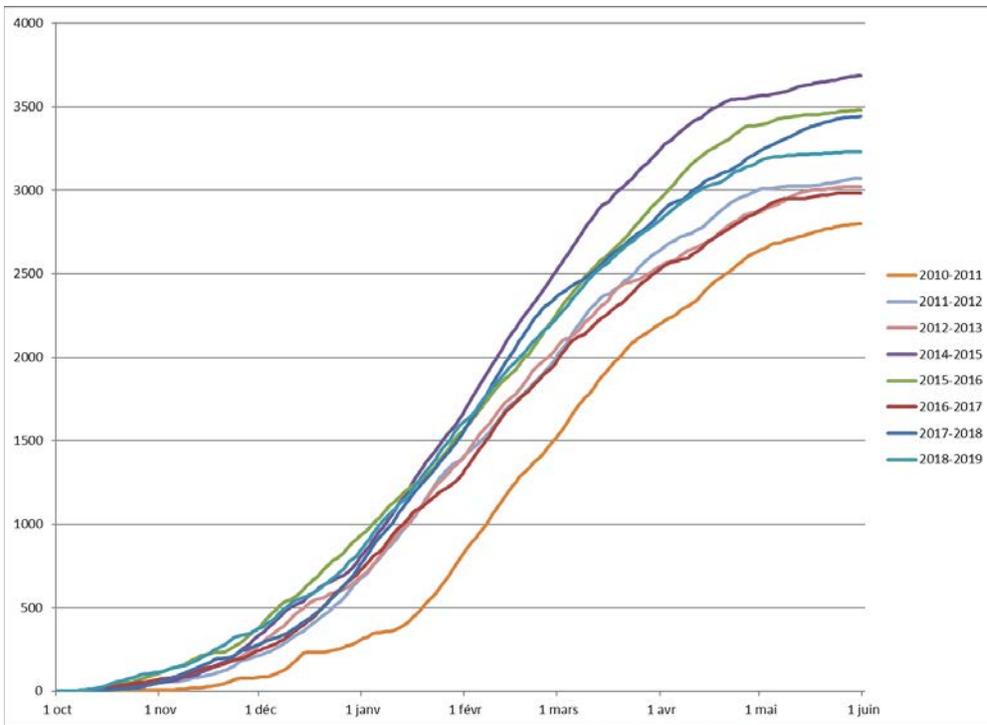


Figure 20 : Degré-jour de gel à Iqviq à partir du 1<sup>er</sup> octobre au 1er juin (2010-2019)

Durant l'hiver, une ouverture apparaîtra juste au nord de la pointe d'Ivujivik les 28 et 29 janvier (Figure 21-A). Cet endroit se retrouve ponctuellement non-gelé de façon récurrente à chaque année. Le 7 février, une ouverture apparaît loin à l'ouest puis le lendemain, un décrochement survient à la pointe d'Ivujivik (Figure 21-B). Le tout se referme le 10 février. Un nouveau décrochement se produit le 20 février, toujours à partir de la pointe d'Ivujivik mais davantage vers le nord cette fois-ci (Figure 21-D). La glace sera mobile dans la passe jusqu'au 13 mars suite à ce décrochement. Le 21 mars, à marée descendante lors d'une grande marée, la glace de la passe s'enfonce dans la banquise (Figure 21-D). La glace de la passe demeure par la suite mobile jusqu'au 23 mars. Un nouveau décrochement se produit le 9 avril à partir de la pointe d'Ivujivik vers le nord-est (Figure 21-E). À partir de ce moment, la glace demeurera mobile dans la passe jusqu'à la fonte (Figure 21-F). Durant cette période, une fracture apparaîtra s'étirant plus profondément dans la banquise le 21 avril mais le secteur touché ne décrochera pas. Le 25 avril, l'eau s'avancera davantage dans la banquise le long de la pointe d'Ivujivik (Figure 21-G).

Les premiers signes de fonte sur la banquise intacte apparaissent au début du mois de mai alors que les températures approchent le point de congélation. Les 6 et 7 mai, la température atteint les 2°C (Figure 22-A). Le 8 mai, sous l'effet soutenu de bonnes brises du sud et du sud-sud-est et pendant un cycle de grandes marées, la banquise dégradée par la fonte des jours précédents décroche (Figure 22-B). L'état de dégradation de la glace est alors passablement avancé de sorte que la banquise se détache jusqu'à la région couverte par la caméra 1. Jusqu'au 12 mai, le recul de la banquise se poursuivra tranquillement avec la venue de très peu de glace exogène. Le vent est très majoritairement d'une direction variant du sud à l'est. Le 13 mai au matin, alors que le vent provient du nord-nord-est, la baie apparaît remplie de glace. La glace nouvellement venue demeurera mobile bien que la concentration soit grande. Avec une direction du vent qui demeure sensiblement la même, encore plus de glace est présente dans la baie et la passe le 14 au matin (Figure 22-C). Lors de la marée descendante suivante, la glace mobile est complètement évacuée. La situation se reproduira le 17 mai. La glace, bien que mobile, demeurera en grande quantité jusqu'au 21 mai. La limite de la banquise ne variera que très peu pendant cette période. En fin de journée le 21 mai, le vent passe à l'est lors de la marée descendante ce qui évacue la glace de la baie. Pour les 5 jours suivants, la lentille de la caméra 1 est obstruée par de la buée mais il est néanmoins possible de constater un recul de la banquise. Le vent est essentiellement du sud durant cette période avec environ 30% de vent frais. Le 26 mai, lorsque le vent passe au nord-est, la lentille se dégage en après-midi en présence du soleil. La banquise a alors reculée de plusieurs dizaines de mètres par rapport au 21 mai, soit jusqu'au niveau de l'infrastructure maritime (Figure 22-D). Cette dernière demeure néanmoins englacée. Le vent du nord-est ramène ensuite une certaine quantité de glace en provenance de la passe. La glace est poussée du côté ouest de la baie. Environ 50 à 60% de la baie est recouverte. La glace sera évacuée puis elle reviendra en grande quantité les 1<sup>er</sup> et 6 juin toujours sous des vents du nord-est (Figure 22-E). Le 9 juin, sous un vent frais du sud-est, la baie sera libre de glace pour la première fois. Cela ne durera qu'une journée mais la concentration demeurera faible jusqu'au 15 juin. À partir du 15 juin, et pour environ 1 semaine, la concentration de glace augmentera dans la baie. Des épisodes de fortes concentrations seront observés les 15 et 18 juin. Le 22 juin, des glaces un peu plus épaisses seront

observées (Figure 22-F). Les concentrations diminueront ensuite jusqu'à des journées sans glace les 25 et 26 juin. Un peu de glace sera observée du 27 au 30 juin en matinée. La glace quittera en après-midi. La baie et la passe seront libres de glace pour l'été à partir de ce moment.

Les premières semaines de fonte n'ont pas été particulièrement différentes au niveau des degrés-jour de fonte à la Figure 23. La température moyenne journalière est passée régulièrement au-dessus de zéro à partir des derniers jours de mai (la courbe de 2019 est orangée) ce qui est dans la moyenne des années précédentes. Les semaines suivantes ont toutefois été différentes alors que la moyenne journalière s'est maintenue constamment au-dessus de zéro. À partir du 22 juin, les températures journalières se sont finalement réchauffées au-dessus de 10°C et ce, jusqu'à la fin de la période observée, soit le 1<sup>er</sup> septembre. Pour la même période en 2018, le village d'Ivujivik n'avait connu que trois jours avec des températures moyennes au-dessus de 10°C. Au cours de ses deux derniers été, le village d'Ivujivik a connu l'été le plus froid et le plus chaud des huit dernières années avec des degrés-jour de fonte cumulés au 1<sup>er</sup> septembre allant du simple au double (Figure 24). L'année 2019 a d'ailleurs dépassée les DJF de l'année précédente le 24 juillet, soit plus de cinq semaines plus tôt qu'en 2018.

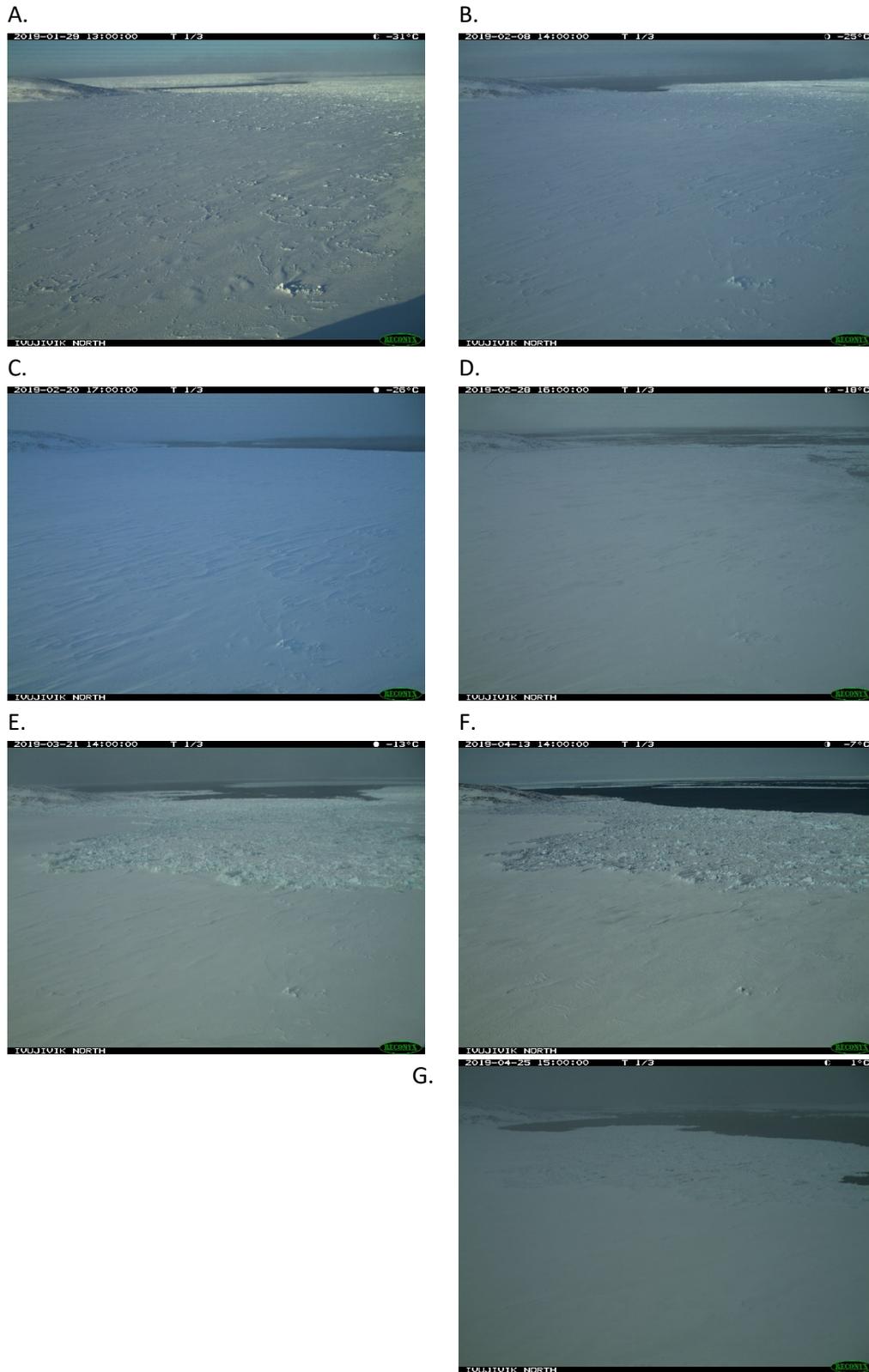


Figure 21 : Évolution des conditions du couvert de glace durant l’hiver 2019 à Ivujivik (A- 29 janvier 2019, B- 8 février 2019, C- 20 février 2019, D- 2 février 2019, E- 21 mars 2019, F- 13 avril 2019, G- 25 avril 2019)

A.



B.



C.



D.



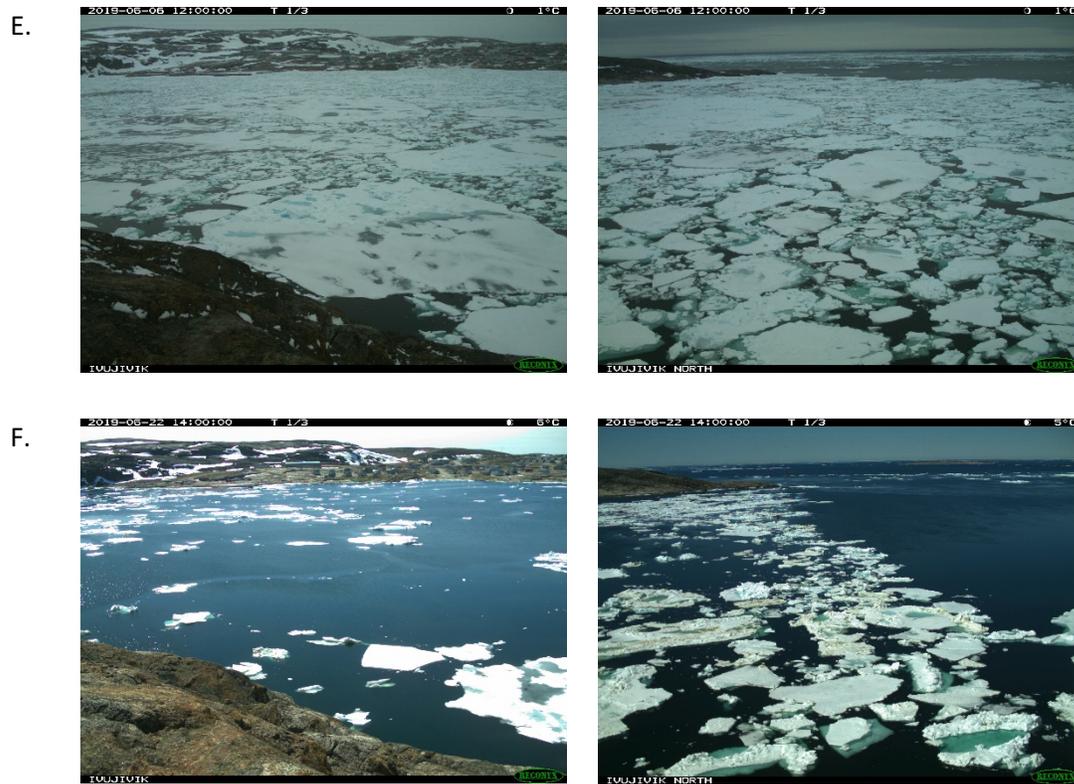


Figure 22 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Iqaluit en 2019 (A- 7 mai 2019, B- 8 mai 2019, C- 14 mai 2019, D- 26 mai 2019, E- 6 juin 2019, F- 22 juin 2019)

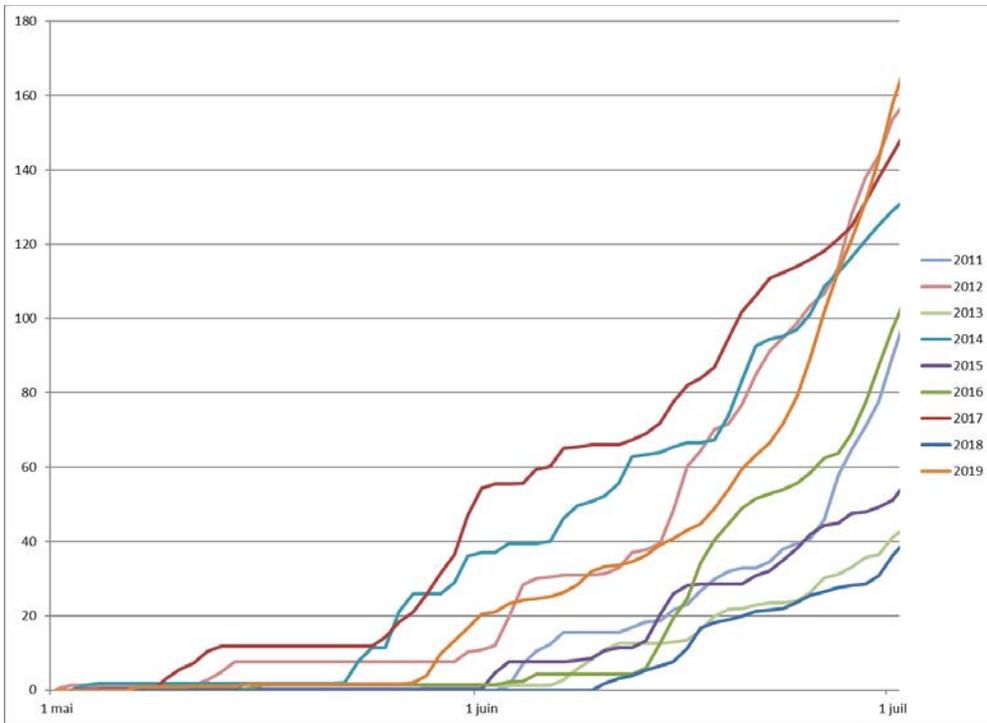


Figure 23 : Degré-jour de fonte à Iqaluit à partir du 1er mai au 1<sup>er</sup> juillet (2011-2019)

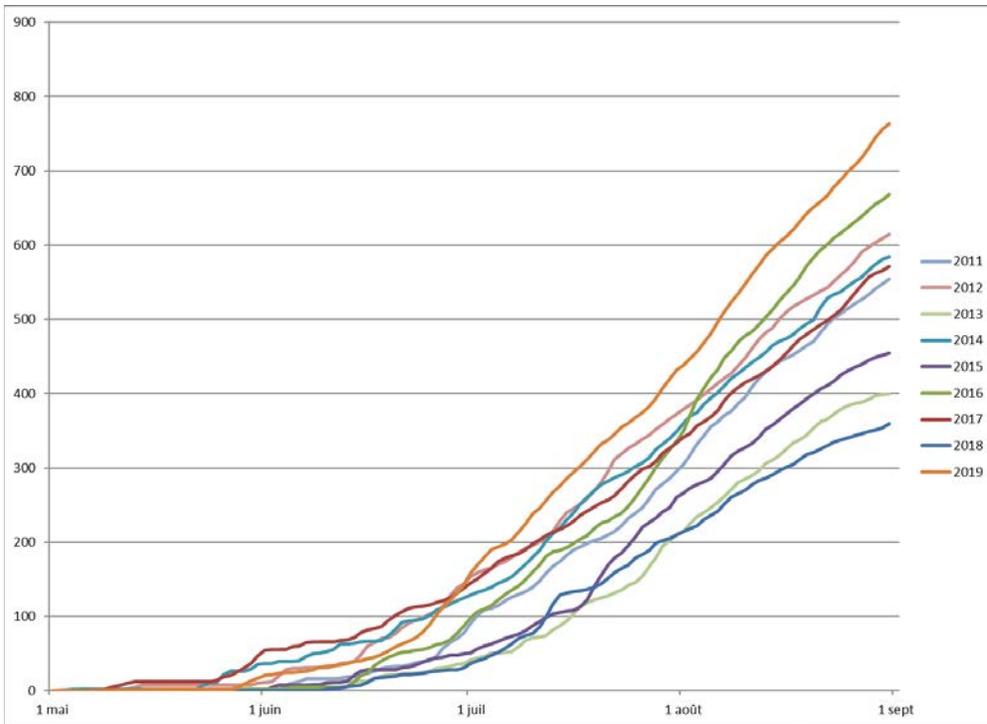


Figure 24 : Degré-jour de fonte à Iqaluit à partir du 1er mai au 1<sup>er</sup> septembre (2011-2019)

Pour conclure cette section, le Tableau 8 synthétise les observations faites au courant de la saison 2018-2019 à partir des caméras installées à Ivujivik. Le Tableau 9 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace depuis octobre 2016 pour la baie en face du village d'Ivujivik.

**Tableau 8 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Ivujivik entre octobre 2018 et août 2019**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Caméra 1 (Ouest)</b>	<b>Caméra 2 (Nord)</b>	<b>Ensemble du site</b>
Première apparition de glace	18 novembre 2018	18 novembre 2018	18 novembre 2018
Couvert de glace permanent	?	3 décembre 2018	3 décembre 2018
Première apparition d'eau	8 mai 2019	8 mai 2019	8 mai 2019
Libre de glace pour la première fois	9 juin 2019	9 juin 2019	9 juin 2019

**Tableau 9 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Ivujivik**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace à Ivujivik</b>	<b>Nombre de jours (2016-2017)</b>	<b>Nombre de jours (2017-2018)</b>	<b>Nombre de jours (2018-2019)</b>
Durée de l'englacement	6	9	15
Durée du couvert de glace permanent	162	181	156
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	14	28	32

### 2.1.5. Site d'observation à Umiujaq

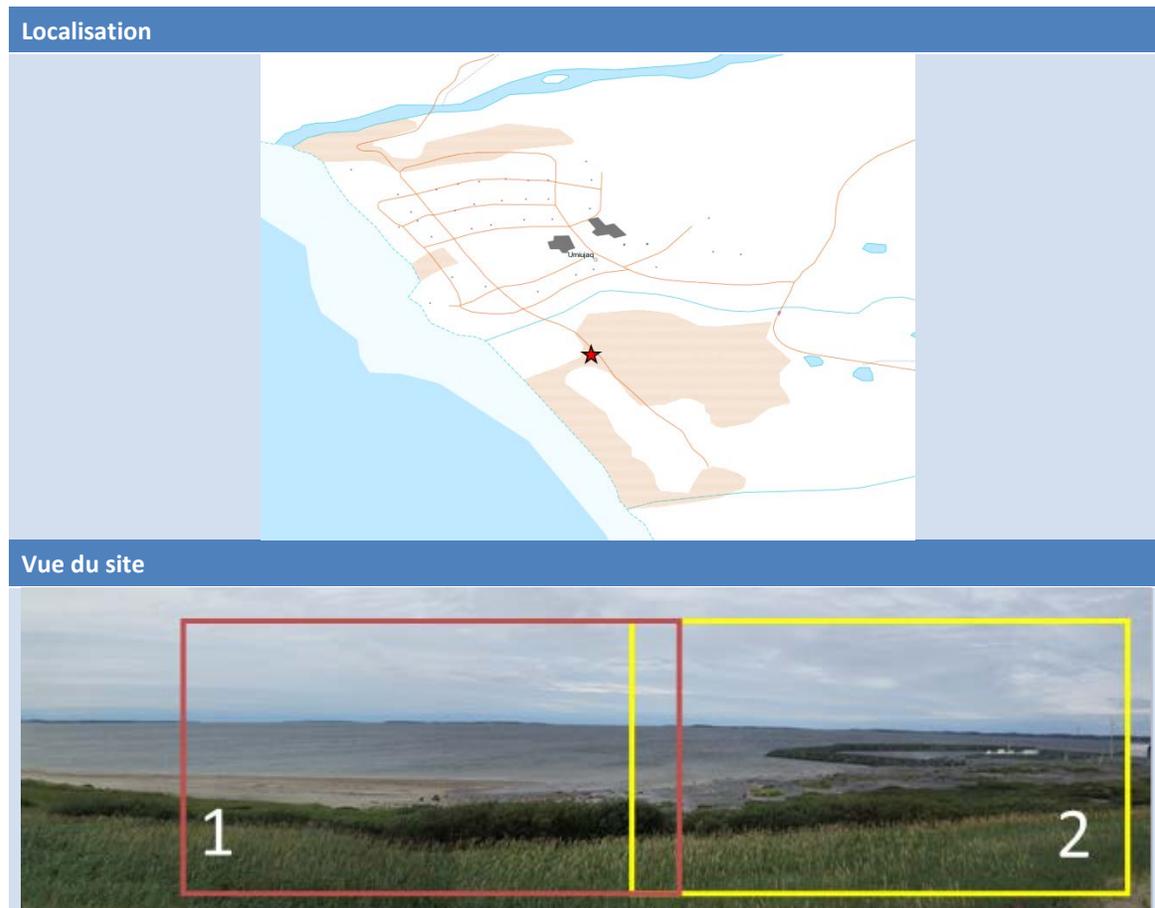


Figure 25 : Emplacement et vues des caméras situées à Umiujaq (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 25 illustre l'emplacement et les vues des deux caméras installées à Umiujaq.

À l'automne 2018, avant la mise en place du couvert de glace, quelques jours de fort vent ont été observés les 4, 5 et 6 octobre. Le 4 octobre, entre 9h et 10h, une petite brise de l'ouest est devenue une jolie brise de l'ouest puis s'est renforcit. En après-midi, à 14h, de forts coups de vent ont été enregistrés avec des pointes de violentes tempêtes. Le vent, toujours de l'ouest, a alors créé de fortes vagues (Figure 26-A). La marée était alors montante mais pas dans un régime de grandes marées. Le vent s'est maintenu en fort coup de vent avec des pointes de violentes tempêtes jusqu'à l'aube le 5 octobre. Il a par la suite diminué progressivement pour redevenir une petite brise en fin d'après-midi le 6 octobre. Une mer un peu agitée a également été observée les 15 et 18 novembre mais les vents, en provenance de l'ouest, ne dépassaient pas le grand frais (Figure 26-C).

Durant le mois de novembre, certaines apparitions de sorbet semblent observables sur les photos mais elles sont ponctuelles et difficiles à confirmer. Pour ce qui est de l'intérieur de l'infrastructure maritime, du nilas est observé le 12 novembre, principalement dans la partie opposée à l'entrée de l'infrastructure (Figure 26-B). La couverture complète à l'intérieur de l'infrastructure attendra jusqu'au 5 décembre. La veille, le 4 décembre, du sorbet est observable devant le village (Figure 26-D). Le 5 décembre au matin, le sorbet aura été poussé sur la berge par les vents d'ouest. Des observations de sorbet seront également faites les 6 et 7 décembre. Le 8 décembre, alors que les températures sont en baisses (entre -17°C et -20°C) le détroit de Manitousouk semble couvert de nilas (Figure 26-E). Le 9 décembre, la baisse de température se poursuit jusqu'à -24°C. De la vapeur recouvre le détroit alors que l'eau poursuit son changement d'état (Figure 26-F). Le lendemain matin, le détroit est recouvert de jeune glace (Figure 26-G). Les températures enregistrées descendent sous les -25°C. Le couvert demeurera stable à partir de cette date.

Lors de la période d'englacement, les températures enregistrées à Umiujaq jusqu'à la fin décembre 2018 étaient les plus froides des huit dernières années (Figure 27). Cela a certainement contribué à la mise en place plus précoce du couvert de glace permanent. Sa mise en place s'est fait 1 à 2 semaines plus tôt que les deux années précédentes. Durant l'hiver, les températures se sont rapprochées de la moyenne pour cette même période mais en demeurant au-dessus de celle-ci (Figure 28).

Lors de l'hiver 2019, la zone de marnage, particulièrement devant la caméra 1, semble avoir reçu, de façon ponctuelle mais récurrente, des arrivées d'eau (Figure 29). C'est la première fois que ce phénomène est observé sur les photographies. Durant le jour, il est parfois difficile de faire la différence entre une glace sans neige et de l'eau. Toutefois, en fin de journée, du brouillard d'évaporation, ou fumée de mer, est plus facilement visible (Figure 29-A,B). Le phénomène pourrait être dû à une très grande marée survenue le 4 janvier alors que la 3<sup>e</sup> plus basse marée des 10 dernières années était attendue. Cela aurait fracturé la banquise à un niveau plus bas qu'à l'habitude. La fumée de mer observable sur les Figure 29-A et Figure 29-B se situe à la limite inférieure de la zone de marnage. Ce secteur est aussi l'exutoire d'un ruisseau n'ayant pas un très grand débit et qui est généralement gelé tout l'hiver. Une autre hypothèse serait un dégel inhabituel du ruisseau.

Au printemps 2019, les premiers signes de fonte sur la banquise côtière apparaissent à la mi-mai (Figure 30-A). La température atteint même les 18°C le 17 mai. Les signes les plus visibles se constatent au nord-ouest de l'infrastructure maritime. Le 19 mai, une première apparition d'eau survient à cet endroit de même qu'à la limite de la zone de marnage près de l'infrastructure maritime (Figure 30-B). L'ouverture au nord-ouest progressera vers le sud pour atteindre le secteur couvert par la caméra 1 le 26 mai. La banquise côtière semble très dégradée à ce moment. La progression de l'ouverture vers le sud et vers la côte se poursuivra néanmoins tranquillement pendant plusieurs jours, jusqu'au début juin, les températures moyennes journalières étant près du point de congélation. Le 4 juin, sous des vents de l'est-nord-est, la banquise côtière se décroche et est poussée vers les îles Manitousouk (Figure 30-C). Le 5 juin, le vent passant au nord, la glace en dérive s'étend dans le détroit et le 6 juin, elle est poussée contre la côte par un vent d'ouest.

La glace y demeure compacte et immobile. Le 7 juin, la glace est remobilisée et dérivera dans le détroit pendant deux jours en banquise tantôt serrée (Figure 30-D), tantôt lâche, avant d'être évacuée temporairement une partie de la journée le 9 juin. La glace revient le long de la côte le 10 juin avec une légère brise d'ouest puis le vent tournant à l'est, elle se redistribue dans le détroit. De la glace en dérive sera observée jusqu'au 14 juin en matinée. Le 15 juin sera la première journée libre de glace. Cela se poursuivra le lendemain. Le 17 juin, la glace reviendra en grande quantité avec un vent du sud pour former une banquise serrée (Figure 30-E). Le 19 juin, la glace sera évacuée lorsque le vent passera à l'ouest puis au nord-ouest. Des blocs s'échoueront alors sur les berges (Figure 30-F). De la glace en dérive sera de nouveau observée du 20 jusqu'au 25 juin. Quatre jours en eau libre suivront. Le 30 juin, un bloc viendra s'échouer sur l'infrastructure. À partir de la mi-juillet, des glaces en dérive seront observées régulièrement en particulier, les 20 et 21 juillet où le détroit sera rempli de glace formant une banquise serrée (Figure 30-G). La concentration diminuera progressivement jusqu'au 27 juillet, date à laquelle le secteur de la caméra 2 sera libre de glace pour le reste de l'été. Dans le secteur de la caméra 1, des blocs échoués et/ou en dérives seront observés jusqu'au 3 août.

Les températures observées au printemps 2019 ont commencées à être supérieures au point de congélation légèrement plus tard que la moyenne des huit années précédentes (Figure 31). Malgré cela, la fonte a débuté plus tôt que les deux années précédentes. Il faut cependant rappeler que le printemps 2018 avait été le plus froid de tous. Pour le reste de la saison estivale, les températures se sont rapprochées de la moyenne mais en demeurant légèrement inférieures (Figure 32).

Pour conclure cette section, le Tableau 10 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2018-2019 à partir des caméras installées à Umiujaq. Le Tableau 11 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace depuis octobre 2016 pour le détroit en face du village d'Umiujaq.

A.



B.



C.



D.



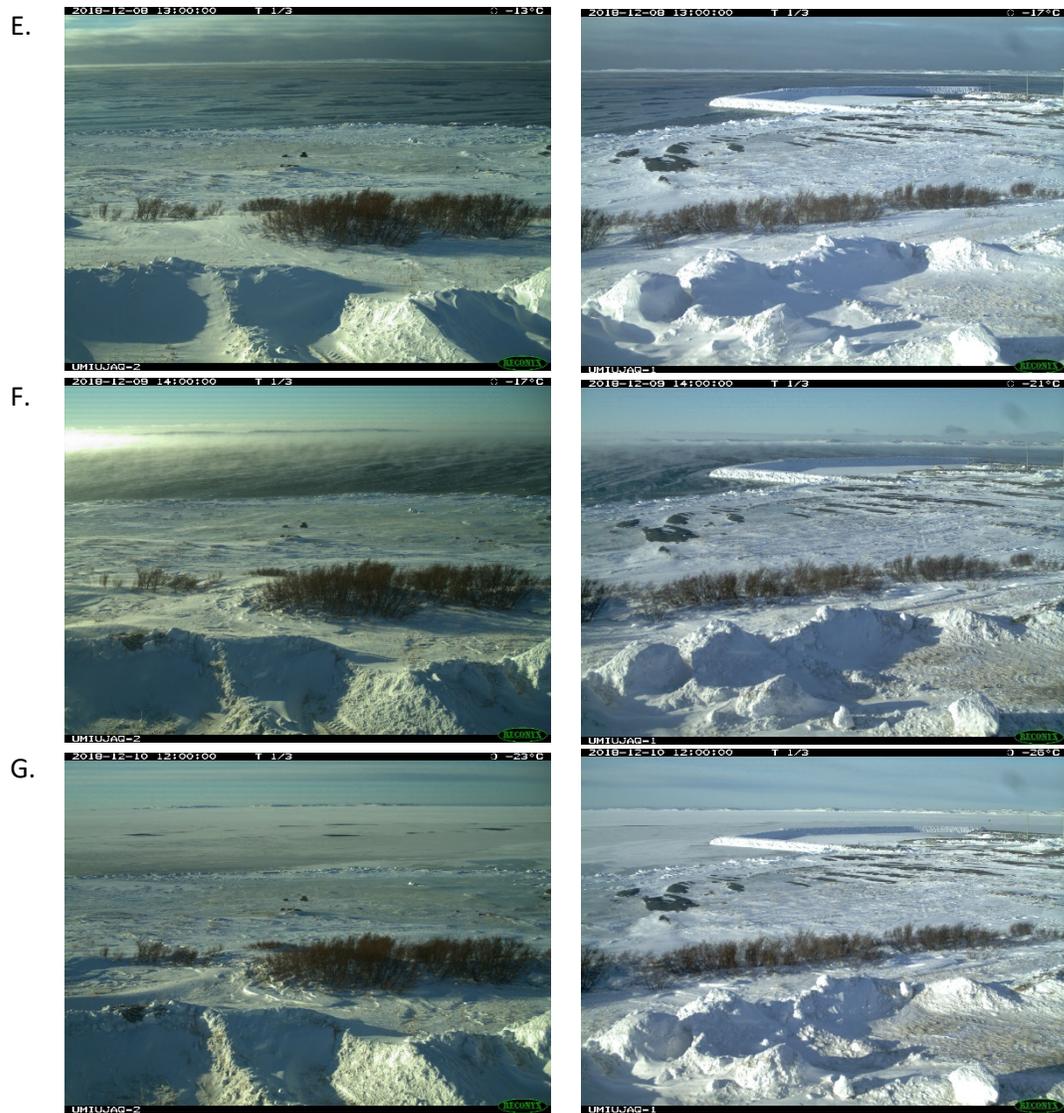


Figure 26 : Évolution de l'englacement 2018 à Umiujaq (A- 4 octobre 2018, B- 12 novembre 2018, C- 18 novembre 2018, D- 4 décembre 2018, E- 8 décembre 2018, F- 9 décembre 2018, G- 10 décembre 2018)

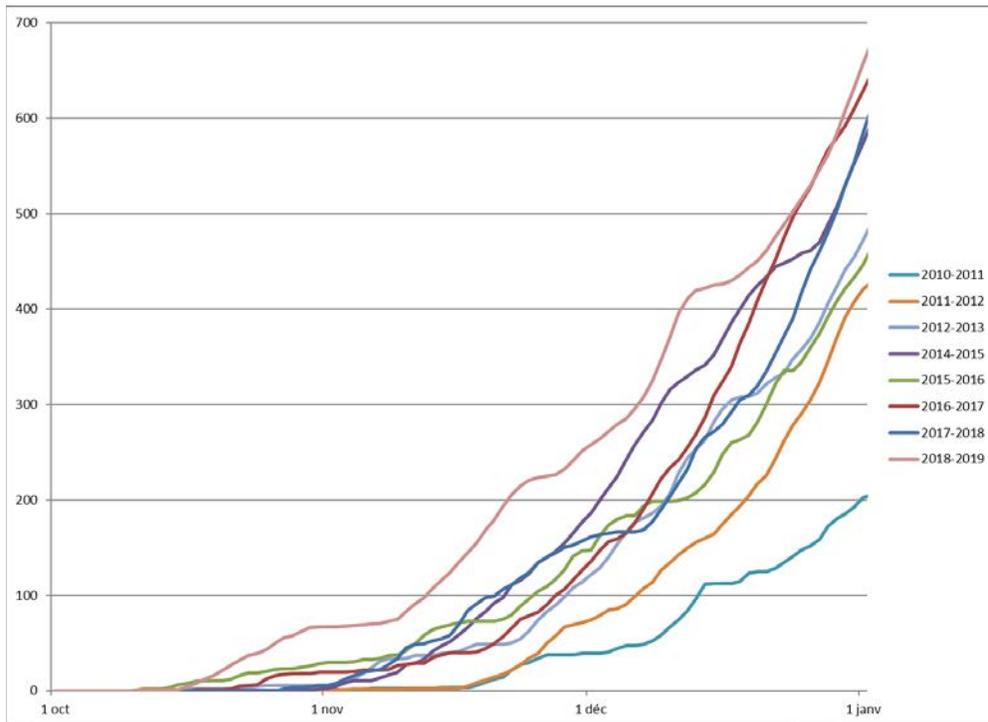


Figure 27 : Degré-jour de gel à Umiujaq lors de l'englacement du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> janvier (2010-2019)

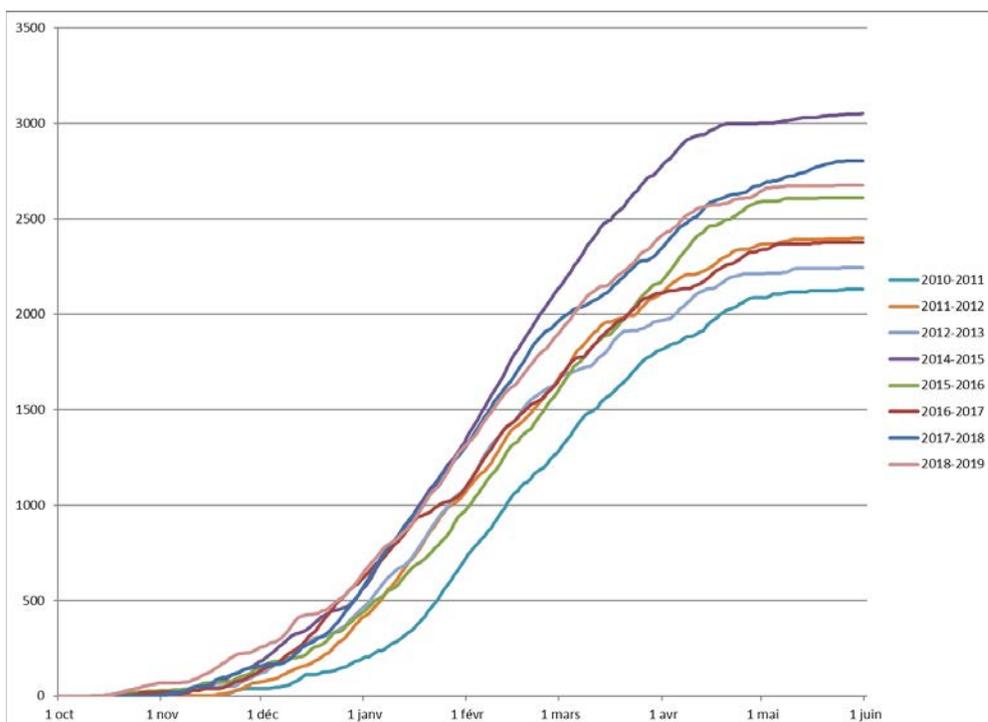


Figure 28 : Degré-jour de gel à Umiujaq pour la saison hivernale du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin (2010-2019)

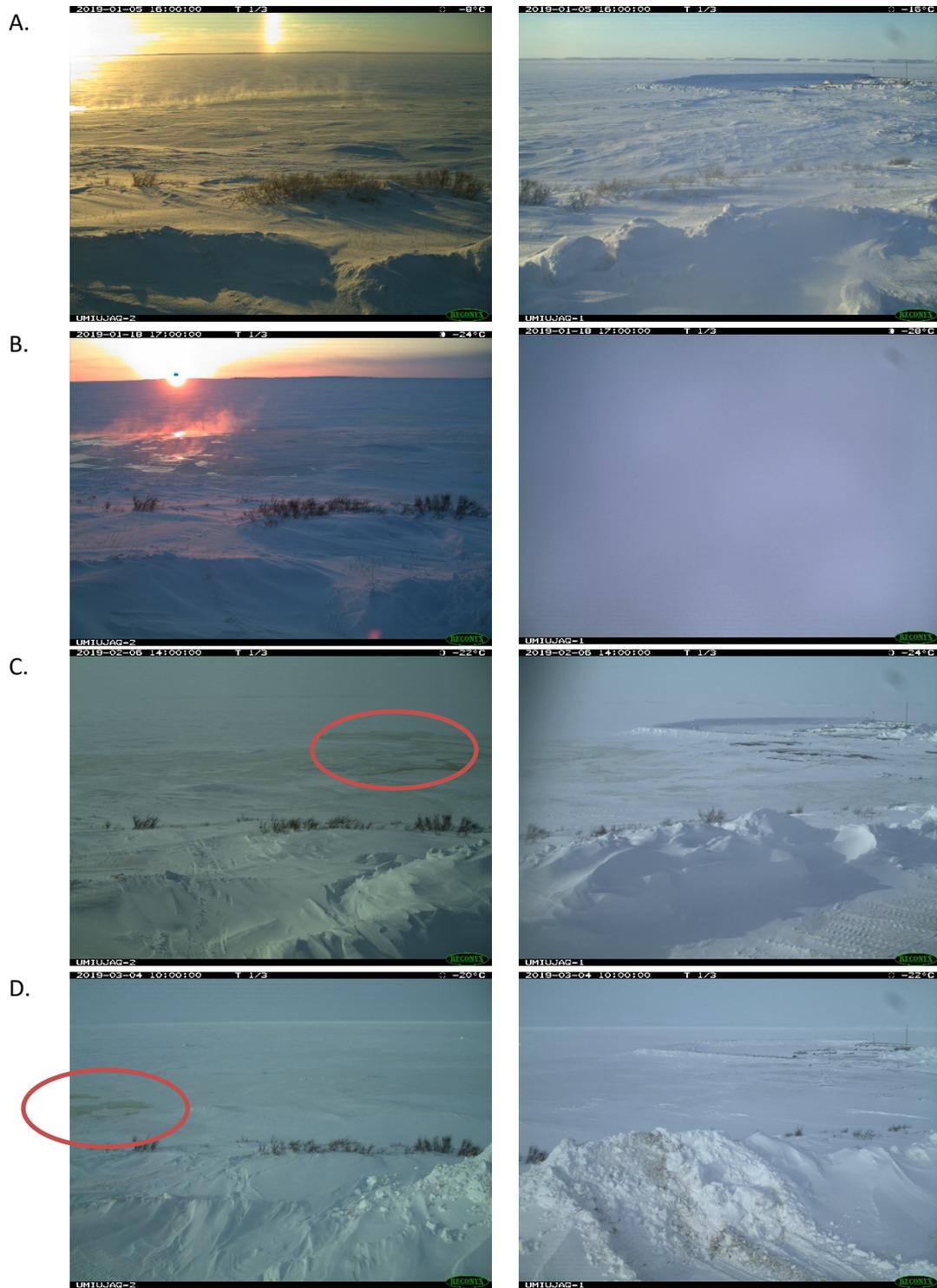


Figure 29 : Observations hivernales à Umiujaq en 2019 (A- 5 janvier 2019, B- 18 janvier 2019, C- 6 février 2019, D- 4 mars 2019)

A.



B.



C.



D.



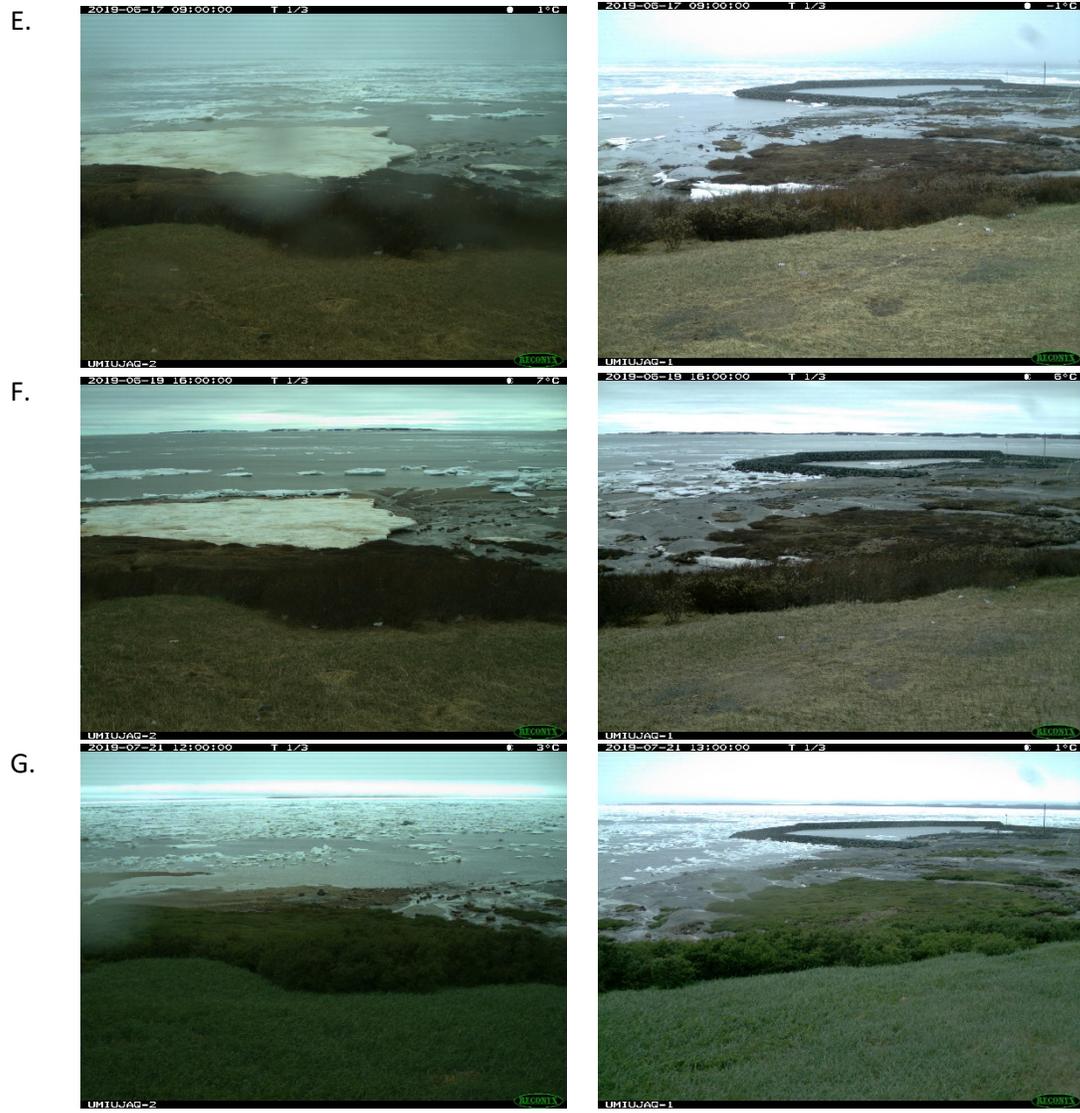


Figure 30 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Umiujaq en 2019 (A- 17 mai 2019, B- 19 mai 2019, C- 4 juin 2019, D- 7 juin 2019, E- 17 juin 2019, F- 19 juin 2019, G- 21 juillet 2019)

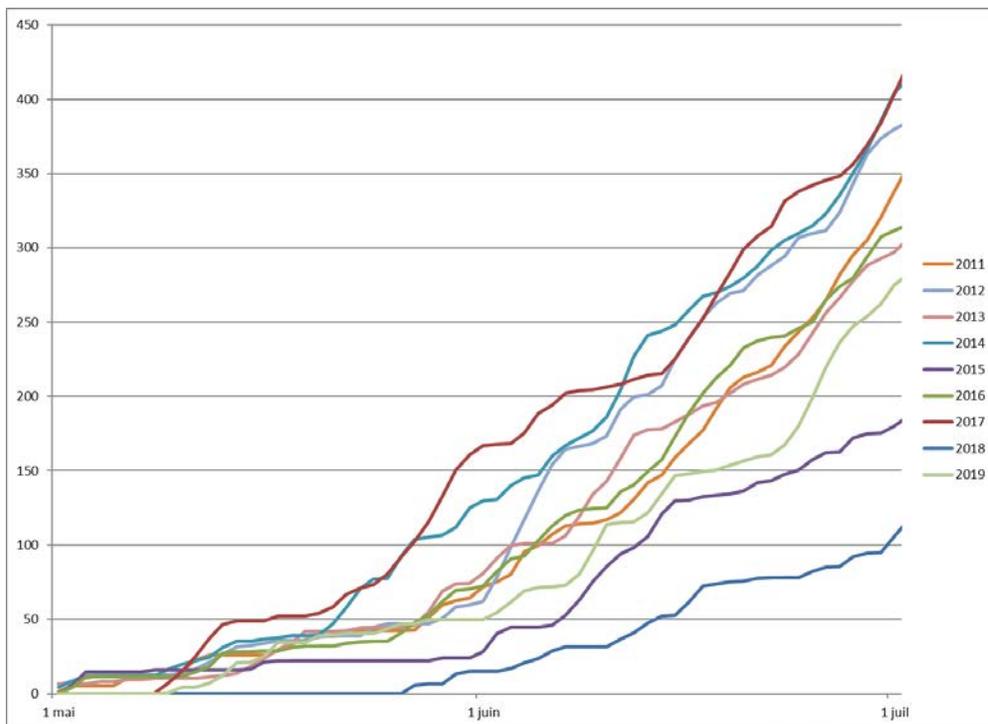


Figure 31 : Degré-jour de fonte à Umiujaq du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> juillet (printemps 2011 à 2019)

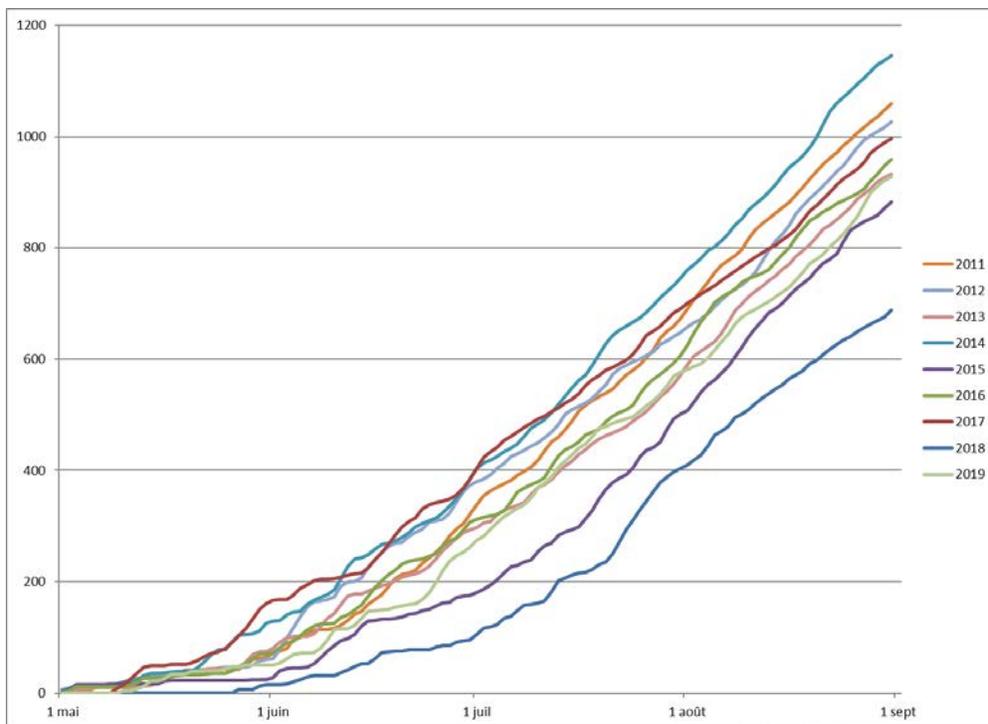


Figure 32 : Degré-jour de fonte à Umiujaq du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> septembre (été 2011 à 2019)

**Tableau 10 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Umiujaq entre octobre 2018 et août 2019**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Caméra 1 (Sud)</b>	<b>Caméra 2 (Nord)</b>	<b>Ensemble du site</b>
Première apparition de glace	4 décembre 2018	4 décembre 2018	4 décembre 2018
Couvert de glace permanent	10 décembre 2018	10 décembre 2018	10 décembre 2018
Première apparition d'eau	26 mai 2019	19 mai 2019	19 mai 2019
Libre de glace pour la première fois	15 juin 2019	15 juin 2019	15 juin 2019

**Tableau 11 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Umiujaq depuis octobre 2016**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Nombre de jours</b>		
	<b>2016-2017</b>	<b>2017-2018</b>	<b>2018-2019</b>
Durée de l'englacement	19	12	6
Durée du couvert de glace permanent	159	170	160
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	5	19	27

## 2.1.6. Site d'observation à Kuujjuarapik (infrastructure maritime)



Figure 33 : Emplacement et vues des caméras situées au nord-est du village de Kuujjuarapik (caméra 1-nord-nord-ouest, caméra 2-nord-nord-est)

La Figure 33 illustre l'emplacement des deux caméras au nord du village de Kuujjuarapik et leurs vues. L'interprétation des photographies des deux sites à Kuujjuarapik 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.

À l'automne 2018, comme toute la côte de la baie et du détroit d'Hudson, le village de Kuujjuarapik a été balayé par de forts coup de vents le 4 octobre (Figure 34-A). Ces vents d'ouest ont créé une mer très agitée devant les caméras. Le 27 octobre, de la glace semble visible sous forme de shuga mais il s'agit là d'un événement ponctuel. Le 17 novembre, suite à une averse de neige, de la gadoue apparaît le long de la côte sous une jolie brise du nord-nord-ouest. Le lendemain, avec un vent qui est devenu une bonne brise du sud, aucun signe de glace n'est visible. Le 21 novembre, une brume de mer intense est visible au-dessus de l'eau dans le détroit (Figure 34-B). La température est alors sous les  $-20^{\circ}\text{C}$ . Le lendemain matin, 22 novembre, beaucoup de nilas est visible à partir des deux caméras (Figure 34-C). Un vent frais du sud-sud-est soufflera le

23 novembre et le détroit apparaîtra libre de glace. Le 26 novembre, des plaques de nilas seront visibles puis, le 30 novembre, de la glace sera visible dans la zone de marnage. Celle-ci demeurera jusqu'au 3 décembre. Lors de cette journée, avec un vent du nord-nord-ouest, toute la côte est du détroit se couvrira de nilas et de jeune glace (Figure 34-D). Le 4 décembre en matinée, le vent est passé au sud ce qui fait décrocher une partie de la banquise nouvellement formée. Cela peut aussi être causé par le poids des caribous ☺ (Figure 34-E). Avec un vent qui demeure au sud-sud-ouest, le reste de la banquise décroche dans la nuit du 4 au 5 décembre. En après-midi, le vent repasse au nord-nord-est ce qui ramène de la glace du détroit et forme une banquise plus étendue qu'elle ne l'était le 3 décembre. Le 6 décembre, uniquement une bande d'eau semble persister à l'ouest du détroit (Figure 34-F). Le vent est alors de l'ouest. Le 7 décembre, la glace s'étend maintenant jusqu'aux îles à l'exception d'une petite étendue devant les caméras (Figure 34-G). Cette partie en eau libre gèlera dès le lendemain. Le 8 décembre, le secteur sera gelé et fixe pour l'hiver.

Lors de la période de formation de la glace, l'année 2018 a été la plus froide des huit dernières années (Figure 35). Elle a été marquée par une succession de périodes très froides puis de périodes plus douces. Cela a fait en sorte que, bien que les températures moyennes soient passées sous zéro dès la mi-octobre, l'apparition des glaces n'a pas été trop avancée par rapport aux années précédentes. En effet, les premières glaces observées en 2018 (21 novembre) l'ont été sensiblement à la même date qu'en 2016 (23 novembre). À partir de la mi-décembre, un troisième réchauffement de quelques jours a rapproché les degrés-jour de gel de la saison 2018-2019 de la moyenne des années précédentes. Les températures sont néanmoins demeurées légèrement inférieures à la moyenne (Figure 36).

A.



B.



C.



D.



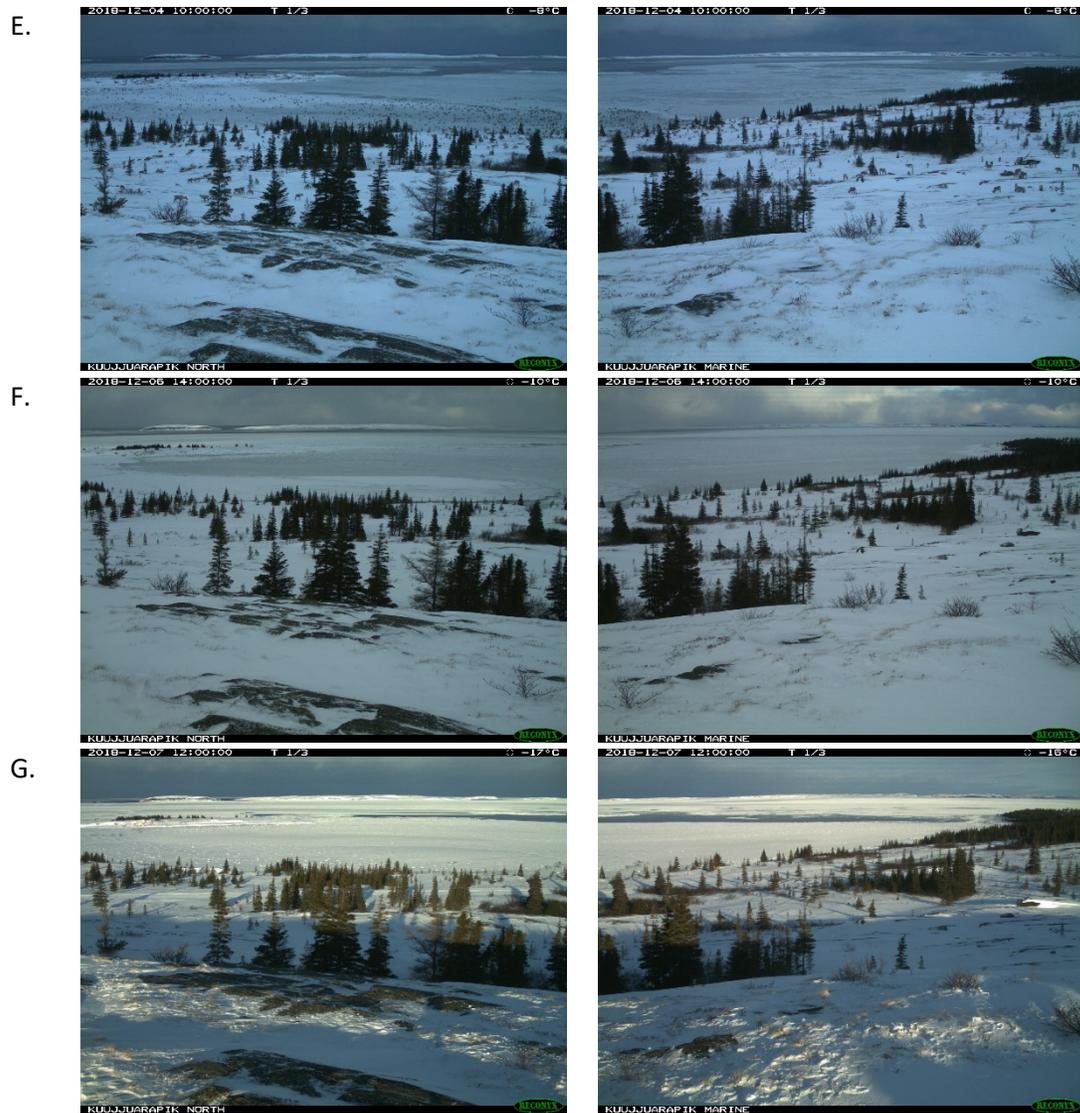


Figure 34 : Évolution de l'englacement 2018 à Kuujuaupik (A- 4 octobre 2018, B- 21 novembre 2018, C- 22 novembre 2018, D- 3 décembre 2018, E- 4 décembre 2018, F- 6 décembre 2018, G- 7 décembre 2018)

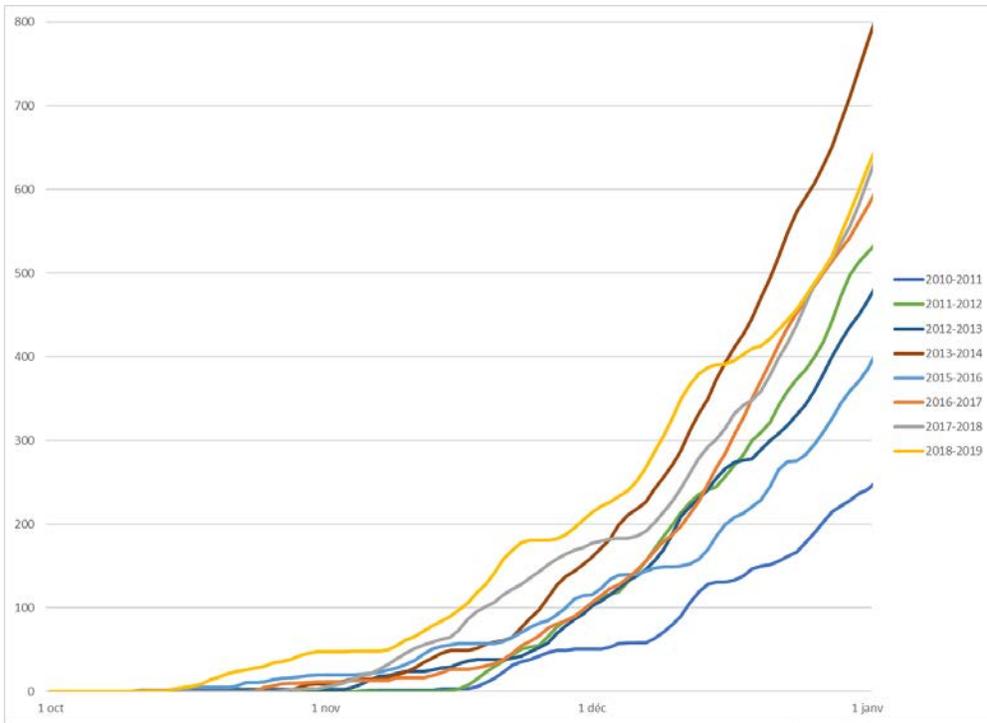


Figure 35 : Degré-jours de gel à Kuujuarapik du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> janvier (2010-2019)

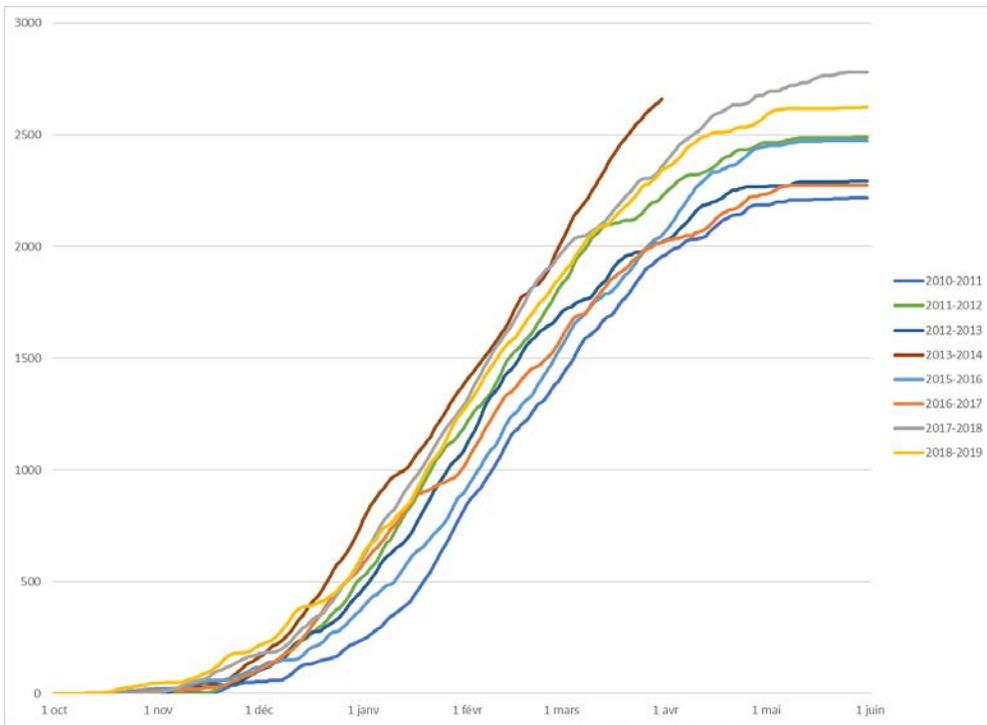


Figure 36 : Degrés-jours de gel à Kuujuarapik lors des saisons hivernales du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin (2010-2019)

L'évolution de la fonte de la glace au printemps 2019 à Kuujjuarapik est illustrée à la Figure 37. À la mi-avril 2019, une fonte du couvert de neige est remarquée les 16 et 17 avril alors que la température dépasse 0°C et monte jusqu'à 9°C. Pendant ces journées, de l'eau apparaît sur l'estran au sud-ouest de la baie. 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 fréquemment à cet endroit lors de réchauffement. La fonte du couvert de neige et de glace est ralentie par des températures sous le point de congélation à la fin avril, début mai mais reprend lors de la deuxième semaine de mai. À partir du 7 mai, les températures moyennes journalières se maintiennent au-dessus de zéro. Les premiers signes de fonte de la banquise apparaissent le 10 mai alors que la neige sur la glace commence à former des mares (Figure 37-A). À partir du 15 mai, plus d'eau sera observé sur l'estran au sud-ouest mais les températures diminueront légèrement et tourneront autour du point de congélation. Ce n'est que le 10 juin que l'eau progressera hors de la zone de marnage après une journée où la température moyenne aura été de plus de 17°C (Figure 37-B). Deux jours plus tôt, un décrochement de la banquise avait été observé à l'ouest des îles Manitounuk. Dans le détroit, les premiers mouvements seront observés le 12 juin (Figure 37-C). La fonte se poursuivra graduellement quelques jours puis le 15 juin, toute la banquise se met en mouvement. Le 16 juin la glace est poussée vers l'ouest dans le détroit (Figure 37-D). Pendant trois jours, la glace sera observée uniquement dans le détroit. Le 19 juin, un vent du nord ramène la glace vers la côte et dans la baie. Du 20 au 22 juin, une banquise parfois serrée, parfois lâche dérivera dans le détroit et dans la baie. Le 23 juin, alors que le couvert est lâche et que souffle une très légère brise du nord, des blocs s'échouent dans la baie (Figure 37-E). Ils seront remis en mouvement lors des marées suivantes. Le 24 juin, une petite brise du nord-nord-est pousse et garde dans la baie des floes et des glaçons. En fin d'après-midi, le détroit apparaît libre de glace. Le 25 juin, une bonne et jolie brise de l'est-sud-est fait sortir la glace de la baie puis le vent passe au sud-est et sud-sud-est ce qui fait sortir les derniers radeaux. Le 26 juin le secteur sera libre de glace pour la première fois. Les jours suivants, des floes seront visibles dans le détroit mais il pourra néanmoins être considéré en eau libre. Le 2 juillet, de plus gros floes sont visibles dans le détroit mais la concentration de glace demeure à moins de 10% (Figure 37-F). Le 6 juillet, la concentration augmente et la banquise devient serrée (Figure 37-G). Elle le demeurera les 7 et 8 juillet. Les vents du sud-ouest garderont alors les glaces hors de la baie. Le 9 juillet, le vent passera au nord-ouest ce qui ramènera la glace dans la baie. Le lendemain, le vent passera au sud-sud-est et la baie se videra de glace. La concentration de glace diminuera progressivement dans le détroit pour devenir en eau libre le 18 juillet. Elle le demeurera jusqu'au 25 juillet, à l'exception du 22 juillet où une banquise très lâche refera ponctuellement son apparition avec des vents du nord. Le secteur sera libre de glace du 25 au 27 juillet, le 28 étant une journée où le brouillard rend l'analyse impossible. Le 29 juillet, quelques floes dériveront dans le détroit (Figure 37-H). Il s'agira de la dernière apparition de glace.

Au printemps 2019, les températures moyennes journalières ont franchi le point de congélation légèrement plus tard que les années précédentes. Malgré une hausse des températures à la mi-mai, les semaines suivantes ont été généralement marquées par des températures moyennes négatives ce qui a probablement retardé la fonte de la banquise (Figure 38). Toutefois, bien que

la saison estivale 2019 ait suivi la tendance de l'année 2018 (année la plus froide) au niveau des degrés-jour de fonte (Figure 39), la période de fonte a évolué tout à fait différemment. En 2018, lorsque les glaces avaient quitté à la fin juin, elles n'étaient pas revenues alors qu'en 2019, la présence des glaces s'est étirée jusqu'à la fin du mois de juillet.

A.



B.



C.



D.



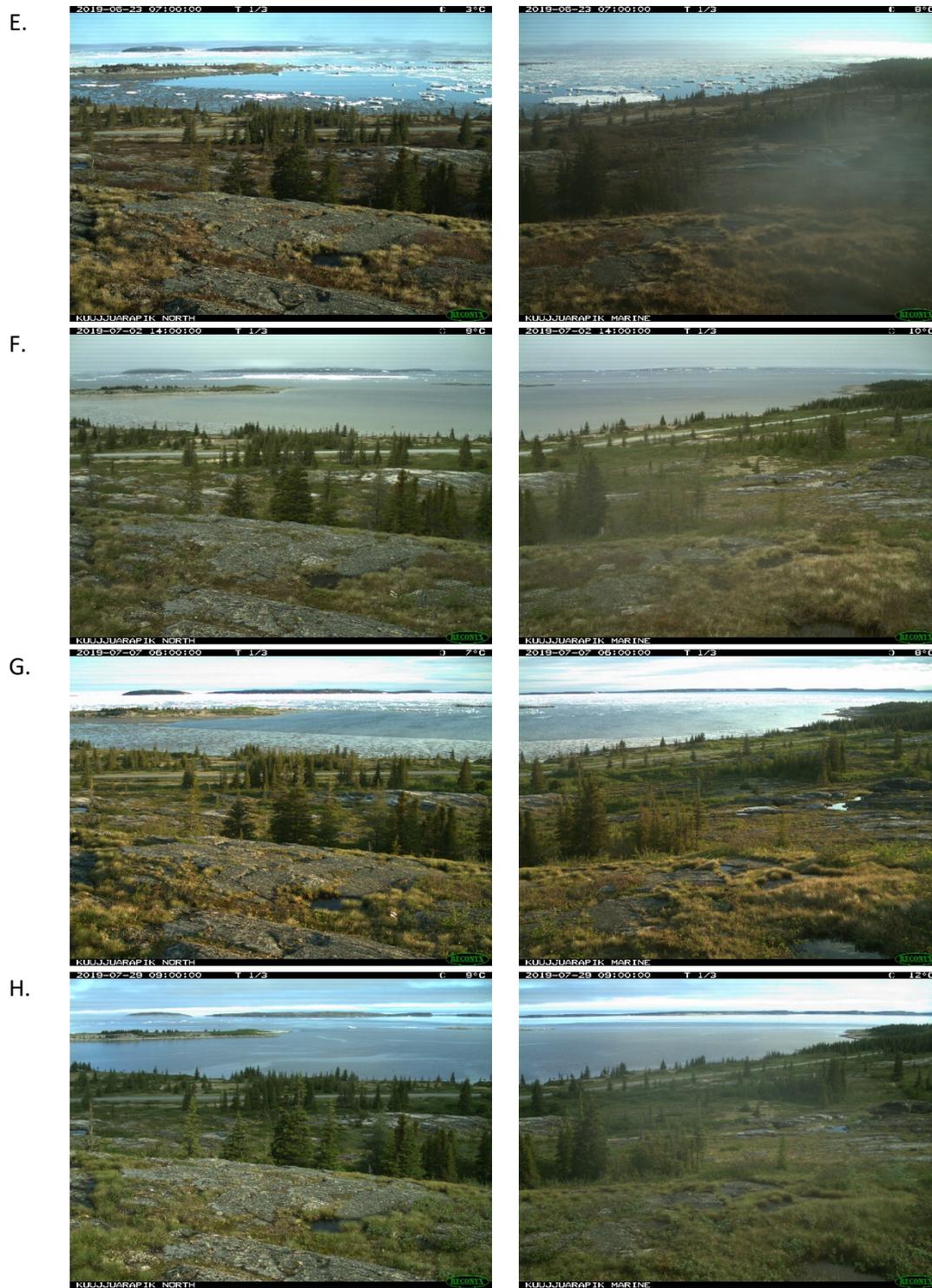


Figure 37 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Kuujuaupik en 2019 (A- 10 mai 2019, B- 10 juin 2019, C- 12 juin 2019, D- 16 juin 2019, E-23 juin 2019, F- 2 juillet 2019, G- 7 juillet 2019, H- 29 juillet 2019)

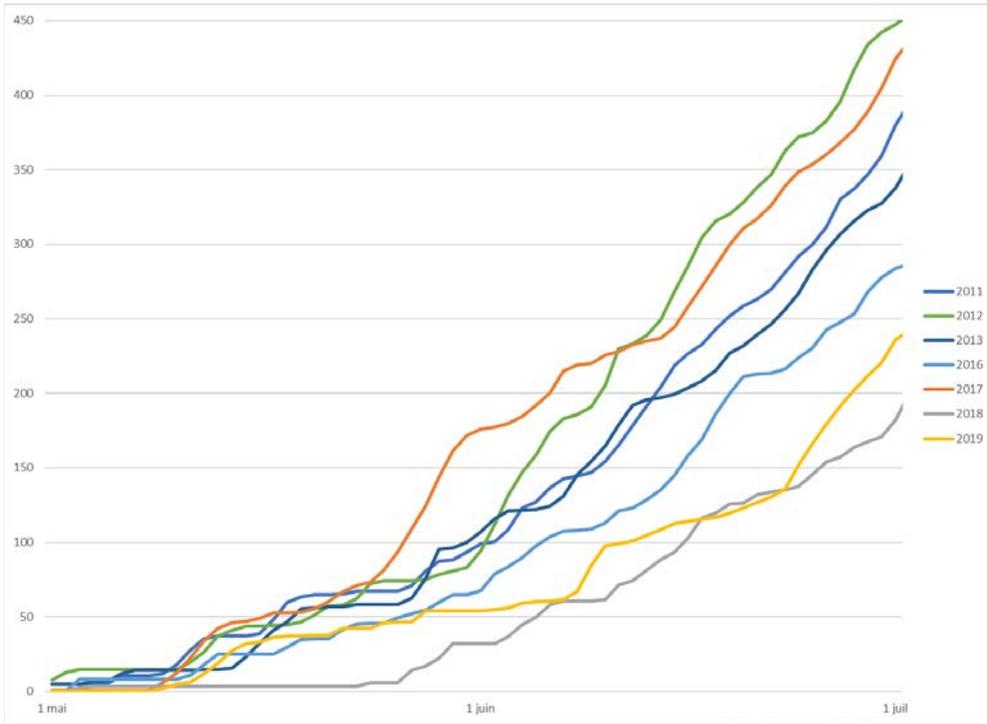


Figure 38 : Degré-jour de fonte à Kuujjuarapik (printemps 2011 à 2019)

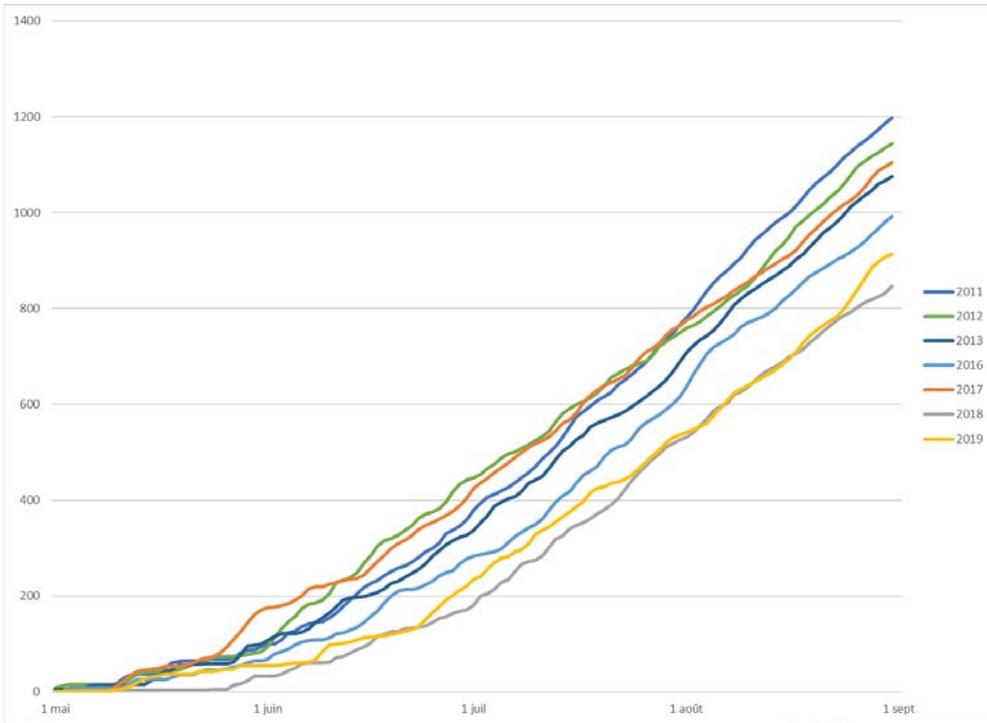


Figure 39 : Degré-jour de fonte à Kuujjuarapik lors des périodes estivales (2011 à 2019)

Pour conclure cette section, le Tableau 12 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2017-2018 à partir des caméras installées au nord du village de Kuujjuarapik. Le Tableau 13 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 dans le détroit de Manitousuk à la hauteur de Kuujjuarapik.

**Tableau 12 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2017 et août 2018**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Caméra 1 (Sud)</b>	<b>Caméra 2 (Nord)</b>	<b>Ensemble du site</b>
Première apparition de glace	22 novembre 2018	22 novembre 2018	22 novembre 2018
Couvert de glace permanent	8 décembre 2018	8 décembre 2018	8 décembre 2018
Première apparition d'eau	10 juin 2019	13 juin 2019	10 juin 2019
Libre de glace pour la première fois	26 juin 2019	26 juin 2019	26 juin 2019

**Tableau 13 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Kuujjuarapik depuis octobre 2016**

<b>Stade d'évolution du couvert de glace</b>	<b>Nombre de jours 2016-2017</b>	<b>Nombre de jours 2017-2018</b>	<b>Nombre de jours 2018-2019</b>
Durée de l'englacement	22	2	16
Durée du couvert de glace permanent	162	182	186
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	13	14	16

### 2.1.7. Site d'observation à Kuujjuarapik (île Gillis)

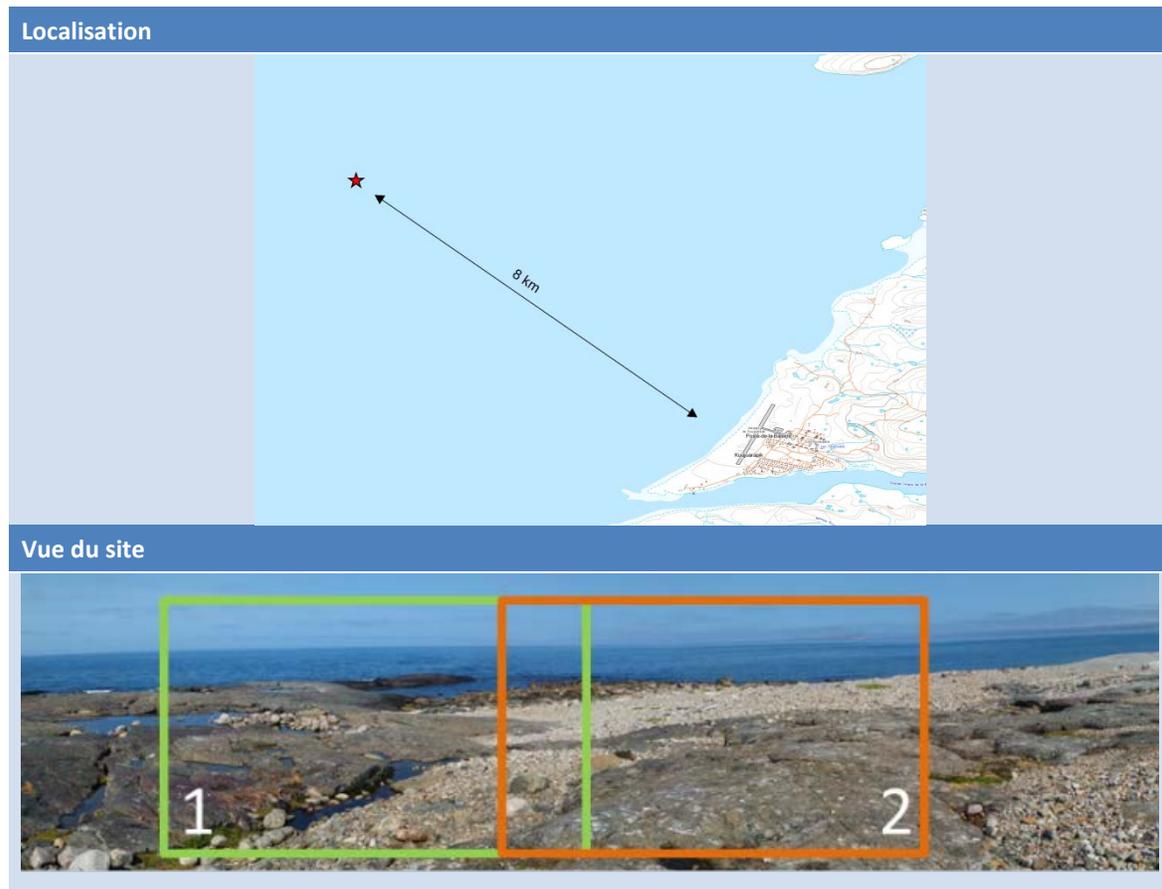


Figure 40 : Emplacement et vues des caméras situées sur l'île Gillis au nord-ouest du village de Kuujjuarapik (caméra 1-nord-nord-ouest, caméra 2-nord-nord-est)

La Figure 40 illustre l'emplacement et la vue des deux caméras situées sur l'île Gillis à environ 8 km au nord-ouest du village de Kuujjuarapik

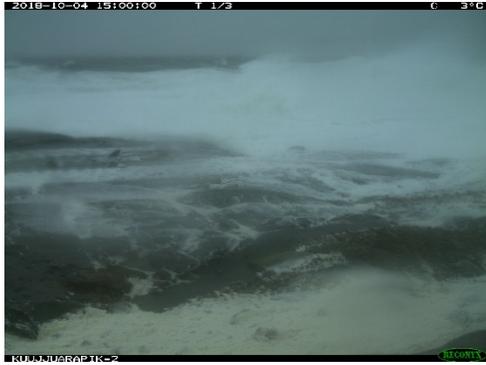
La région couverte par les caméras semble peu profonde et encline à beaucoup de turbulence. Durant les mois d'octobre et de novembre, plusieurs tempêtes ont été observées avec des vagues venant déferler sur la pointe de l'île Gillis. L'évènement du 4 et 5 octobre 2018 est celui où la mer était la plus agitée (Figure 41-A). Lors de ces journées, le déferlement des vagues et la surcote causée par les forts coups de vent ont amené l'eau jusqu'au pied des caméras.

Les premières apparitions de glace seront visibles les 29 et 30 novembre, et le 1<sup>er</sup> décembre sous forme de sorbet (Figure 41-B). Le 3 décembre, la mer est plus agitée et aucun signe de glace n'est apparent. Lorsque la mer se calme le 4 décembre, du sorbet est de nouveau visible. Une plus grande quantité de jeune glace sera visible le 7 décembre alors que le vent d'ouest tournera au

sud (Figure 41-C). Les formations de glace évolueront vers de la nouvelle glace jusqu'au 12 décembre. Les 12 et 13 décembre, sous un vent sud-sud-est, la glace nouvellement formée sera poussée plus au large. Les 14 et 15 décembre, du nilas réapparaît dans le secteur poussé par une jolie brise de l'ouest. Les vents passeront de l'ouest au sud à répétition jusqu'à l'obtention d'un couvert fixe le 21 janvier 2019, l'un apportant de la nouvelle et jeune glace, l'autre la repoussant au nord. Voici quelques évènements s'étant passés pendant cette période. Le 18 décembre, sous un vent d'ouest, la banquise apparaît compacte à partir de la mi-journée mais elle est repoussée par la suite par un vent du sud-sud-est. Le 20 décembre, les vents sont faibles et dispersés, laissant voir dériver une banquise plutôt lâche composée de floes moyens (Figure 41-D). Les 21 et 22 décembre, du givre masquera la vue et le 23 décembre à l'aube, apparaîtra un monticule formé de sarrasin poussé vers l'île par des vents du nord-ouest. De grands floes sont alors à la dérive. Le 24 décembre, avec un vent de l'ouest-nord-ouest, la banquise sera très serrée et demeurera fixe toute la journée (Figure 41-E). Jusqu'au 7 janvier, la banquise demeurera généralement compacte avec des décrochements réguliers lorsque les vents passent au sud. Le 7 janvier, un vent du sud-est fera décrocher la banquise et la poussera beaucoup plus loin au large de sorte que le 8 janvier, le secteur apparaîtra un moment en eau libre (Figure 41-F). Du nilas se reformera rapidement en présence d'une très faible brise de l'ouest. D'autres décrochements surviendront jusqu'au 21 janvier.

Durant l'hiver, des mouvements et des décrochements de la banquise sont survenus à quelques reprises. Le 8 février, sous un vent du nord, la banquise se compresse sur les hauts fonds de l'île ce qui crée un hummock devant les caméras. Par la suite, le 11 février, le vent passera au sud et la banquise décrochera sous une jolie brise. Le 15 février, de l'eau sera observable plus au large. Le vent sera alors du sud-est.

A.



B.



C.



D.



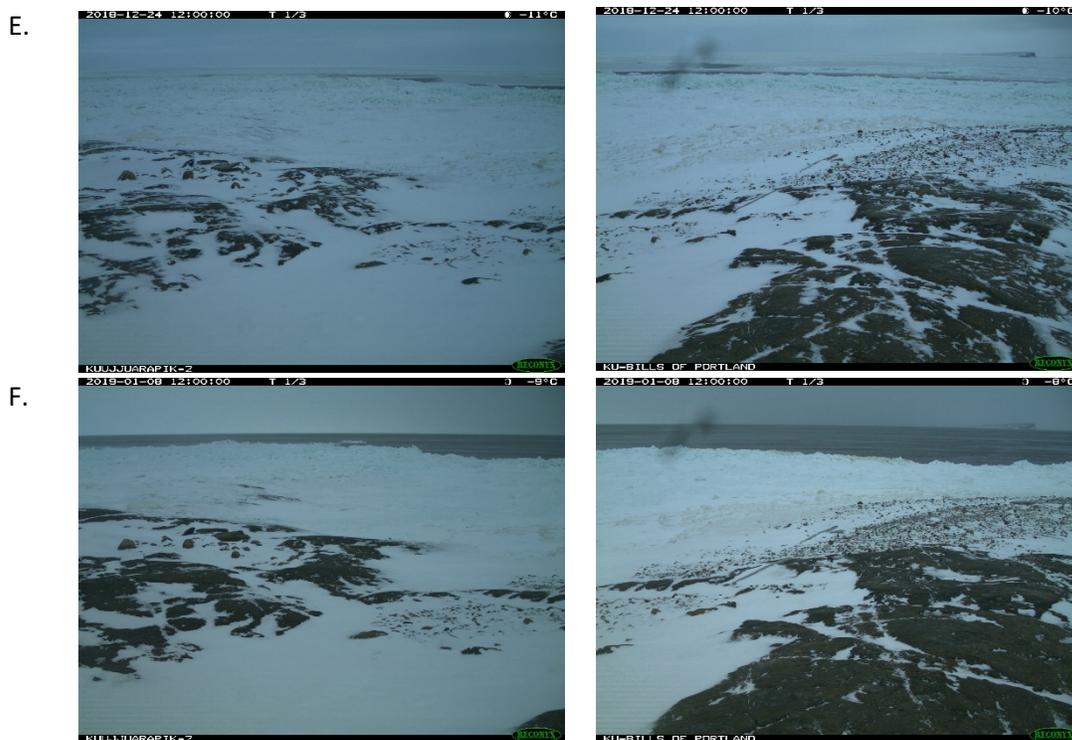


Figure 41 : Évolution de l’englacement 2018 à proximité de l’île Gillis à Kuujuarapik (A- 4 octobre 2018, B- 29 novembre 2018, C- 7 décembre 2018, D- 20 décembre 2018, E- 24 décembre 2018, F- 8 janvier 2019)

Au printemps 2019, des signes de fonte apparaissent sur la banquise vers la mi-mai puis de l’eau apparaît à travers la neige dans la zone intertidale le 4 juin. Le 8 juin, des mouvements sont perceptibles dans la banquise plus au large puis un décrochement survient plus près de l’île (Figure 42-A). Les vents proviennent de directions diverses durant cette journée. Le lendemain, un gros hummock apparaît à l’aube devant la caméra 1, tout comme cela avait été le cas en 2017 et en 2018 (Figure 42-B). Un second hummock est également visible devant la caméra 2. Un vent frais du sud-est avait soufflé durant la nuit. Durant les 10 jours suivants, des floes de plus en plus petits dériveront devant les caméras formant une banquise serrée au début puis lâche par la suite. Le 19 juin, de la glace agglomérée forme une banquise très serrée près de l’île. Une banquise plus lâche avec des morceaux plus épais sera observée à partir du 21 juin (Figure 42-C). La décomposition de l’hummock s’étendra jusqu’au 26 juin. À partir du 29 juin, quelques périodes en eau libre sont observables. La glace sera de nouveau visible en plus grande quantité dans le mois de juillet. Du 3 au 7 juillet, la concentration de glace augmentera progressivement jusqu’à l’obtention d’une banquise très serrée du 7 au 9 juillet (Figure 42-D). Les vents seront d’origine diverses pendant ces trois jours. La banquise se relâchera ensuite et les concentrations demeureront faibles jusqu’à la fin juillet. La banquise sera par moment lâche et très lâche en d’autres temps (Figure 42-E,F). Les vents seront généralement faibles pendant cette période. Les 27 et 30 juillet seront généralement en eau libre puis le 31 juillet, après 24 heures de bonne brise

et de vent frais du sud, le secteur sera libre de glace pour la première fois. Il le demeurera pour l'été.

A.



B.



C.



D.



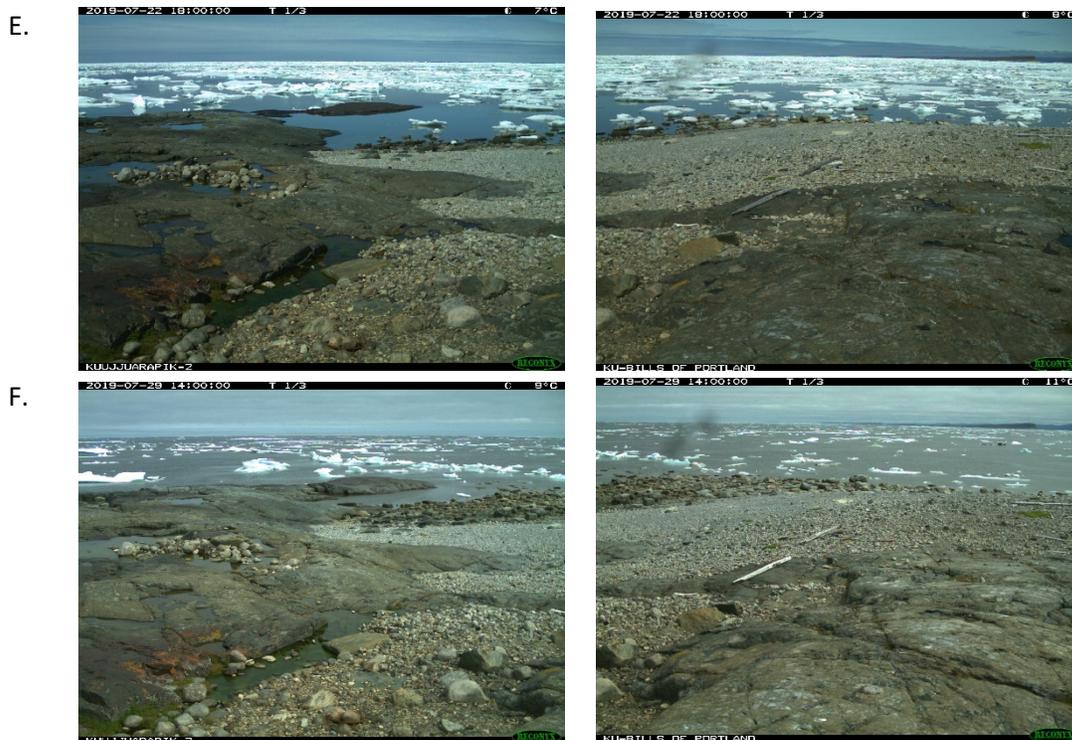


Figure 42 : Évolution de la fonte du couvert de glace à proximité de l'île Gillis en face du village de Kuujjuarapik en 2018 (A- 8 juin 2019, B- 9 juin 2019, C- 22 juin 2019, D- 7 juillet 2019, E- 22 juillet 2019, F- 29 juillet 2019)

Pour conclure cette section, le Tableau 14 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2018-2019 à partir des caméras installées sur l'île Gillis au large du village de Kuujjuarapik. Le Tableau 15 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace depuis octobre 2017 entre l'île Gillis et le village de Kuujjuarapik.

Tableau 14 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras situées sur l'île Gillis au large de Kuujjuarapik entre octobre 2018 et août 2019

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1	Caméra 2	Ensemble du site
Première apparition de glace	29 novembre 2018	29 novembre 2018	29 novembre 2018
Couvert de glace permanent	21 janvier 2019	21 janvier 2019	21 janvier 2019
Première apparition d'eau	8 juin 2019	8 juin 2019	8 juin 2019
Libre de glace pour la première fois	31 juillet 2019	31 juillet 2019	31 juillet 2019

Tableau 15 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras situées sur l'île Gillis au large de Kuujuarapik depuis octobre 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Nombre de jours 2017-2018	Nombre de jours 2018-2019
Durée de l'englacement	31	53
Durée du couvert de glace permanent	150	138
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière	14	53

## 2.2. Traitement et diffusion des photographies acquises par les caméras

Les caméras de tous les sites sont généralement configurées de façon à acquérir trois photos au début de chaque heure : une première photo à l'heure juste, suivie de deux autres après une minute et deux minutes. L'acquisition de trois photos a pour but de rendre disponible une information sur le mouvement des glaces, et ce, afin d'éventuellement être en mesure de calculer des vitesses de déplacement. Afin d'atteindre les objectifs du présent projet (CC09.2), uniquement la photographie acquise à l'heure juste a été traitée.

Le traitement des photographies se réalise en deux étapes indépendantes : 1) la rectification des photographies et 2) l'identification de la glace. Les caméras ont une vue oblique sur la surface de l'eau. Par conséquent, afin d'en tirer une information relative à la concentration de glace, les photos doivent être redressées comme si elles avaient été acquises à partir d'un drone ou d'un avion (vue verticale), corrigées géométriquement et ensuite géoréférencées. Au terme du redressement, la position sur le terrain est associée à chaque pixel des photographies est obtenue. Par la suite, la présence ou non de glace doit être déterminée pour chacun des pixels. La méthodologie développée pour le traitement des photographies est détaillée dans le rapport final du projet CC09.1 (Bernier et al., 2017) et une version résumée a été présentée dans le rapport d'étape 2 du projet CC09.2 (Bernier et al., 2019). Elle ne sera donc pas présentée dans ce rapport

Suite à la saison 2018-2019, au total, environ **22 000** photos ont été rectifiées et classifiées.

### 2.2.1. 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.caiman.ete.inrs.ca](http://www.caiman.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>

Ceci termine la section consacrée à l'interprétation, le traitement et la diffusion des photographies in-situ pour la saison d'englacement 2018 – 2019 au Nunavik (Activité 3). Le prochain chapitre décrira les cartes de concentration de glace produites à partir d'images satellitaires optiques de Landsat-8 (25 m) et Sentinel-2 (20 m) pour l'hiver 2018-2019 et ce pour les deux sites d'étude des vagues soient Kuujuarapik et Quaqtac (Activité 4).

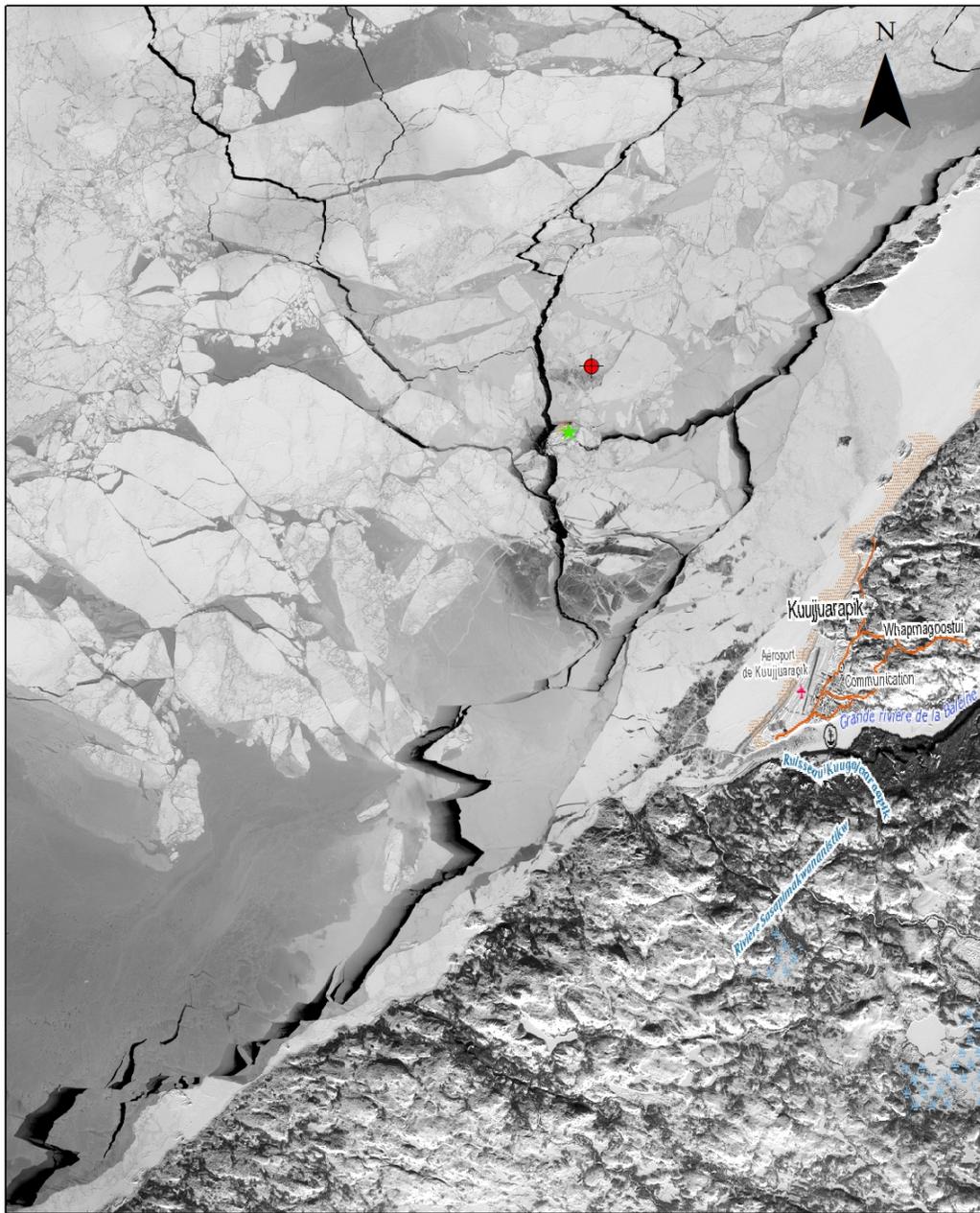
### 3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d'images satellitaires à Quaqtaq et Kuujjuarapik (Activité 4)

***L'objectif de l'activité 4 est de produire des cartes de concentration de glace à partir d'images satellitaires Landsat-8 (25 m) et Sentinel-2 (20 m) pour les années 2017-2020, sur les sites d'étude des vagues du projet CC16.1 à Kuujjuarapik et à Quaqtaq.***

Pour la saison de glace 2018-2019, les images satellitaires optiques de Landsat-8 et Sentinel-2 (disponibles gratuitement en ligne) couvrant les sites de Quaqtaq et Kuujjuarapik ont été téléchargées et traitées à partir d'un algorithme développé à l'INRS (Bernier et al, 2017) afin de produire une carte du couvert de glace. Cet algorithme est une adaptation de celui présenté par Zhu et Woodcock (2012) afin de tenir compte des spécificités du secteur d'étude, soit un milieu marin subarctique. Au moyen de différents tests (seuils et rapports de bandes), les pixels ayant une probabilité de correspondre à des nuages sont identifiés. D'autres tests permettent de séparer l'eau du reste de l'image. Pour les pixels qui ne sont pas identifiés comme étant de l'eau, une étape supplémentaire permet de déterminer s'ils correspondent à de la glace ou à des nuages. Un exemple est présenté aux Figure 43 et Figure 44. La Figure 43, extraite d'une image du satellite Sentinel-2, montre un couvert de glace pratiquement complet le 3 janvier 2018 au large de Kuujjuarapik à l'exception d'un réseau de fractures passant près du site des caméras. La Figure 44 montre une classification de la même image réalisée en utilisant l'algorithme décrit ci-dessus (Bernier et al, 2017). La glace et le réseau de fractures y sont bien représentés. Le Tableau 16 donne le nombre d'images téléchargées pour Kuujjuarapik et Quaqtaq pour la saison 2018-2019. À partir des cartes du couvert de glace produites, il sera possible de calculer la concentration de glace pour des régions d'intérêt. Le calcul de la concentration de glace n'est donc pas effectué pour le moment pour aucun des deux villages. Cette étape est triviale lorsque les données sont disponibles et elle sera faite sous peu.

**Tableau 16 : Nombre d'images téléchargées par site pour chaque satellite pour la saison 2018-2019.**

	<b>Kuujjuarapik</b>	<b>Quaqtaq</b>
Landsat-8	48	112
Sentinel-2	112	55



**Légende**

- Position du mouillage
- ★ Caméras

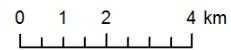
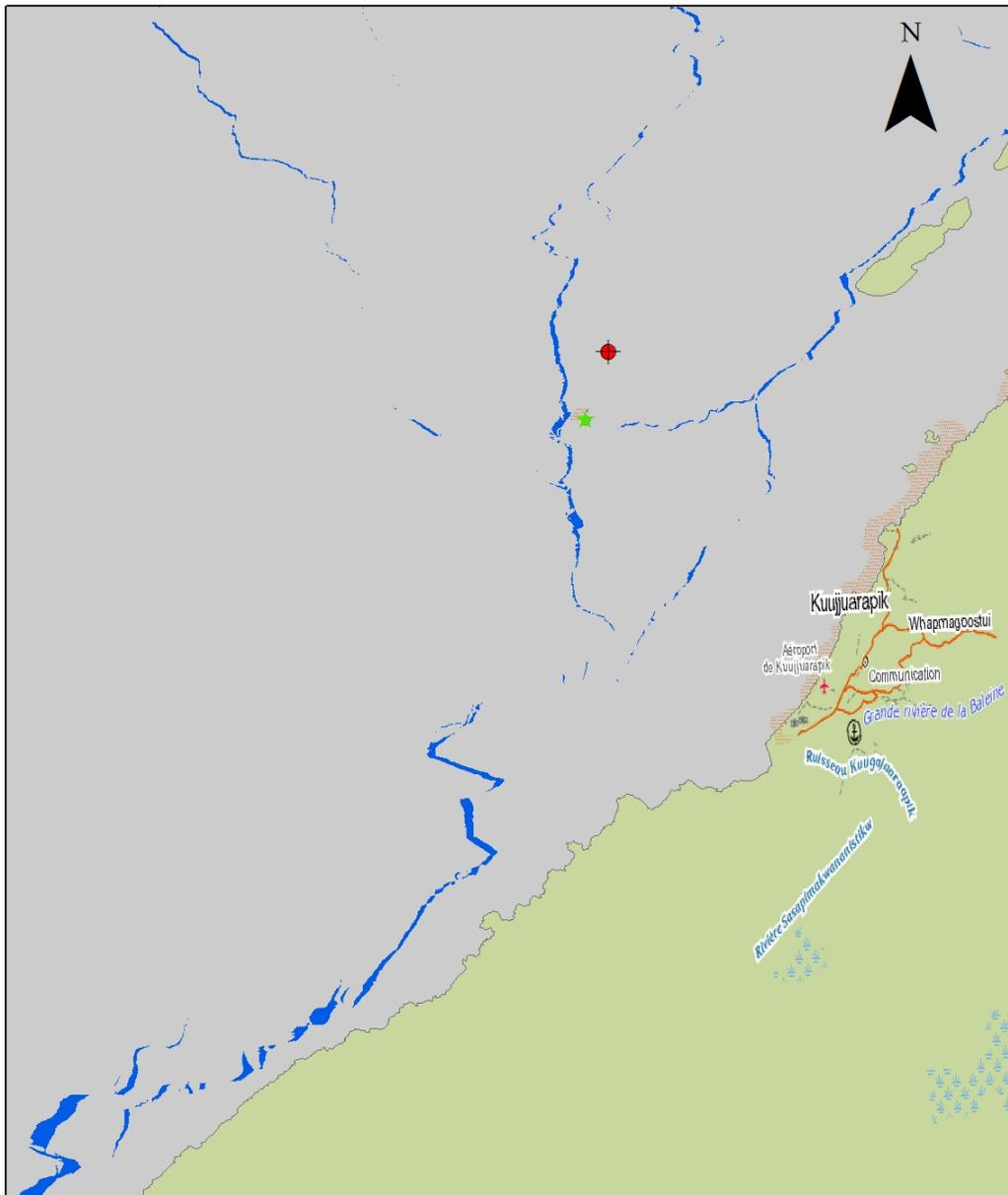


Figure 43 : Image optique acquise par le satellite européen Sentinel-2 (Bande 8 – Proche infra-rouge) le 3 janvier 2018 pour le secteur de Kuujuaq



**Légende**

- ◆ Position du mouillage
- ★ Caméras

**Carte de glace**

- Continent
- Eau
- Glace

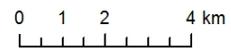


Figure 44 : Carte du couvert de glace de la baie d’Hudson au voisinage de Kuujuarapik produite à partir de l’image optique du satellite Sentinel-2 acquise le 3 janvier 2018

## 4. Validation du potentiel d'utilisation d'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues à Kuujuarapik et Quaqtq (Activité 5)

***L'objectif de l'activité 5 est de valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues (hauteur, direction, période).***

### 4.1.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), ERS (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 3m 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) et ALOS-2 de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA). Ces satellites ont 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 Retrodiffusion ou Matrice de Sinclair (Ulaby, Long et al. 2014, Ratsimbazafy et Bernier 2015, Xie, Perrie 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; la deuxième indique la polarisation du signal rétrodiffusé reçu par le capteur.

L'objectif de cette activité est d'étudier le potentiel des images satellitaires Radar à Synthèse d'Ouverture acquises en mode polarimétrique (Quad-Pol) afin de caractériser le front de vagues

(hauteur, direction, période) près des côtes du Nunavik en absence de couvert glaciaire à des fins de validation des modèles de vagues.

Les différentes étapes à réaliser 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.
- Sélection de l'approche méthodologique à utiliser dans la détermination des paramètres des vagues sur les images Radar à Synthèse d'Ouverture.
- Commander les images RADARSAT-2 auprès de l'Agence spatiale canadienne et l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise.
- Tester et adapter la méthodologie sélectionnée avec les données PALSAR du satellite japonais ALOS, les données polarimétriques (Quad-Pol) du satellite canadien RADARSAT-2 et les données en polarisation circulaire de la prochaine mission Constellation RADARSAT.
- Produire des cartes illustrant les caractéristiques de vagues : direction dominante, longueur d'onde dominante, hauteur significative et période dominante des vagues.

## 4.2. Commande d'images

### 4.2.1. Images polarimétriques RADARSAT-2

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 Kuujuarapik et Quaqtaq suite à l'acceptation de l'ASC sont résumés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 17 et Tableau 18).

**Tableau 17: Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Kuujuarapik**

Faisceaux	Temps d'acquisition	Orbite	Orientation de vue	Mode d'acquisition	Tx	Rx	Fenêtre
#1	2018-Sep-12 22:49:11.217	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#2	2018-Oct-06 22:49:11.217	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#3	2018-Oct-30 22:49:11.217	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#4	2018-Nov-23 22:49:11.217	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#5*	2018-Dec-17 22:49:11.217	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#6*	2019-Jun-27 22:49:11.216	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#7*	2019-Jul-21 22:49:11.216	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#8*	2019-Oct-01 22:49:11.216	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#9	2019-Oct-25 22:49:11.216	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#10	2019-Nov-18 22:49:11.216	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1

\* : scènes qui n'ont pas pu être acquises

L'objectif est 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 est 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 débuté en septembre 2018. Au total, quatre images sur les dix planifiées sur chaque site n'ont pas pu être acquises; soient les images correspondant aux faisceaux #5, #6, #7 et #8 pour Kuujuarapik et #5, #6, #7, et #10 pour Quaqtq. L'acquisition des scènes du 15 décembre 2018 (Quaqtq) et du 17 décembre 2018 (Kuujuarapik) 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 du mois de juin et juillet 2019. Les images (faisceau #8 du Tableau 17 et #10 du Tableau 18) 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 18: Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Quaqtq**

Faisceaux	Temps d'acquisition	Orbite	Orientation de vue	Mode d'acquisition	Tx	Rx	Fenêtre
#1	2018-Sep-10 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#2	2018-Oct-04 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#3	2018-Oct-28 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#4	2018-Nov-21 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#5*	2018-Dec-15 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#6*	2019-Jun-25 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#7*	2019-Jul-19 22:08:50.102	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#8	2019-Sep-29 22:08:50.101	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#9	2019-Oct-23 22:08:50.101	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
#10*	2019-Nov-16 22:08:50.101	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1

\* : scènes qui n'ont pas pu être acquises

#### 4.2.2. Images PALSAR-2

Des images RSO en bande L provenant du capteur PALSAR-2 du satellite japonais ALOS-2 avaient été extraites des archives de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise. Toutefois, ces images ne sont pas polarimétriques. Il a été constaté que leur utilisation pour l'extraction des paramètres des vagues nécessiterait des algorithmes complètement différents de celui présenté dans le premier rapport d'étape (Poulin et al, 2018). Il a donc été décidé de laisser tomber l'utilisation de ces images pour les sites de Kuujuarapik et de Quaqtq (Bernier et al, 2019). L'étude se focalisera donc sur les données polarimétriques en bande-C de RADARSAT-2 en raison de l'absence d'image PALSAR-2 acquises en mode polarimétrique dans la région d'étude.

### 4.2.3. Traitements des images

Les images acquises ont été traitées. Afin de faciliter l'accès 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. Un code en python a été écrit tout au long du traitement des images présenté dans la méthodologie dans cette approche. Les traitements effectués sont :

- 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 azimuth. 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.

Les images de pente en distance ont été projetées en distance au sol. Selon la géométrie d'acquisition de l'image radar, celle-ci nécessite d'être projetée au sol car elle est différente de la distance au sol en raison de la vue inclinée du radar par rapport à sa cible. Par contre, la pente en azimuth n'a pas besoin d'être projetée. Les directions des vagues ont été projetées en longitude/latitude.

L'analyse des résultats et la comparaison avec les mesures locales provenant des ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) sont présentés dans les paragraphes ci-dessous. L'ADCP est un appareil qui mesure les vitesses des courants d'eau à une profondeur donnée et produit un profil des valeurs mesurées. Il utilise l'effet Doppler à travers les ondes sonores qu'il a émises et rétrodiffusées en retour par les particules dans la colonne d'eau.

## 4.3. Résultats

### 4.3.1. RADARSAT-2

L'approche proposée a été appliquée sur les images RADARSAT-2 acquises. Les matrices de cohérence C3 et T3 ont été extraites sur les images. Les pentes en distance et en azimuth ont été calculées sur les images. Celles-ci sont présentées sur les Figure 45 et Figure 46 respectivement.

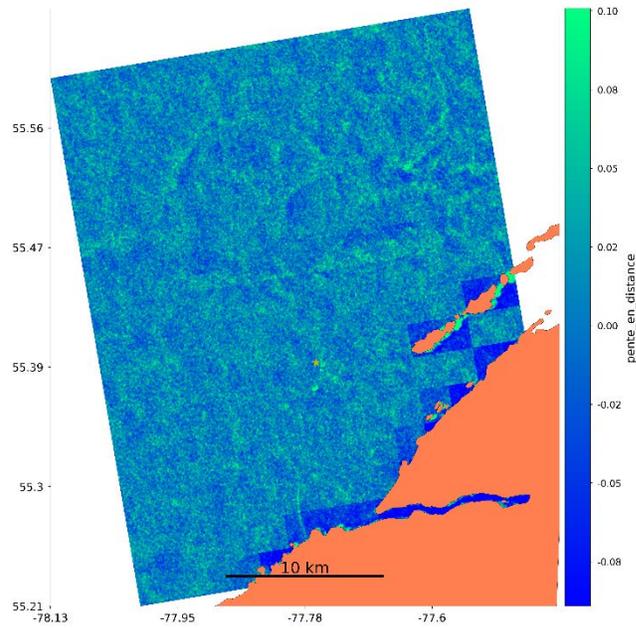


Figure 45: Pente en distance extraite de la scène RADARSAT-2 acquise le 06 octobre 2018 à 22H48 temps universel à Kuujjuarapik

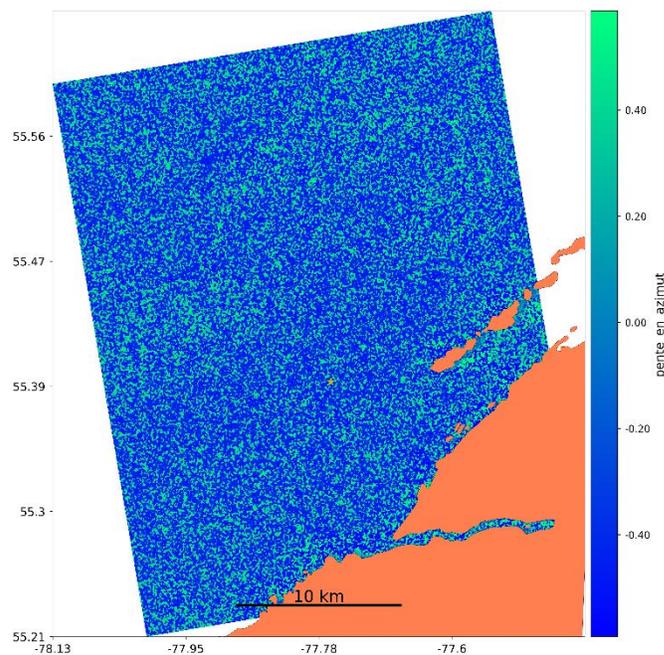


Figure 46: Pente en azimuth extraites sur l'image RADARSAT-2 le 06 octobre 2018 à 22H48 temps universel à Kuujjuarapik

L'application de fenêtres spatiales de taille 128x128 et 400x400 pixels a permis d'obtenir une résolution spatiale d'environ 2,5km par 2,5km 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, Perrie et al. (2015), avaient utilisés une fenêtre de 512x512 pixels. Cette taille ne permettra pas d'extraire

les paramètres de vagues proches de la côte comme le cas dans ce projet sachant que les appareils servant aux mesures des vagues (AWAC) sont installés à environ 1-km de l'île Hearn pour Quaqtq et à 1,6-km de l'île Gillis pour Kuujjuarapik. Par contre une taille trop petite entrainerait un biais important dans le calcul du spectre de Fourier sur les sous-images dans lesquelles les paramètres des vagues significatives seront 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 fera l'objet d'un article lorsque les données correspondant aux images acquises durant l'automne 2019 seront 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 série de succession de valeurs positives et négatives. Ces structures linéaires représentent les formes géométriques des fronts de vagues. La Figure 47 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 2.5km.

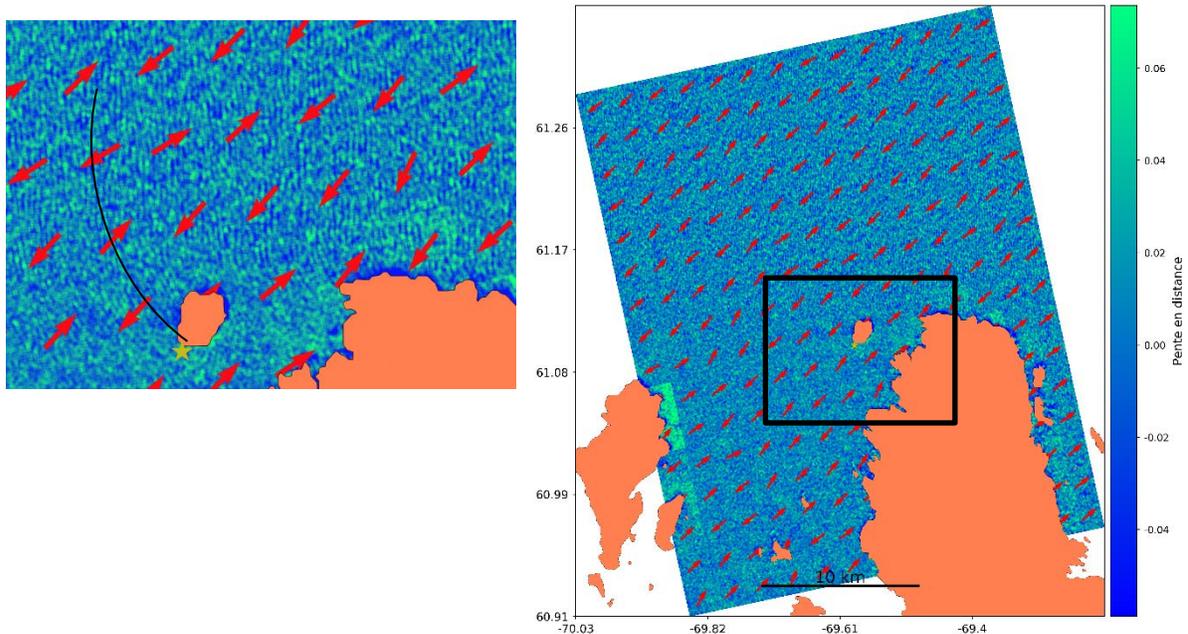


Figure 47: Pente et directions des vagues sur l'image RADARSAT-2 du 2018-10-04 (Quaqtq). L'arc en noire en haut à gauche indique la forme des vagues après avoir été diffracté sur son déplacement depuis l'Est vers l'ouest.

L'image acquise le 04 octobre 2018 correspond à un évènement de fort vent à Quaqtq et dans tout le Nunavik. En raison des forts vents observés par des membres de l'équipe INRS-ETE sur le terrain à Kuujjuaq lors de cette journée, 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 48 et Figure 49).

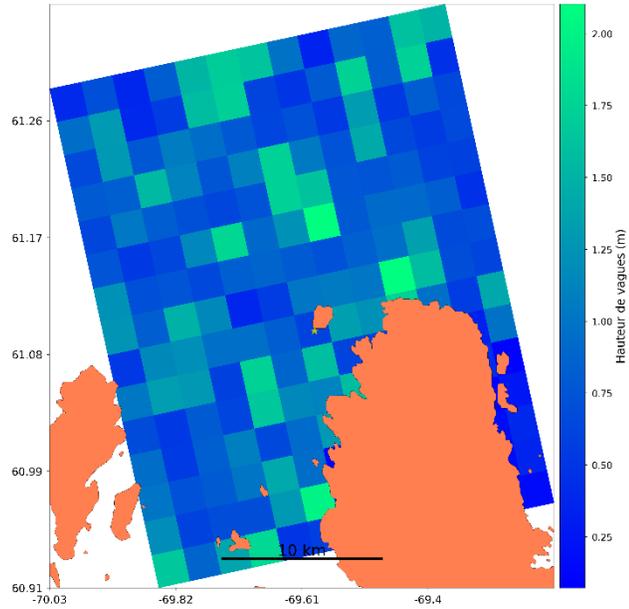


Figure 48: Hauteur des vagues extraites de l'image RADARSAT-2 du 04-10-2018 (Quaqtaq)

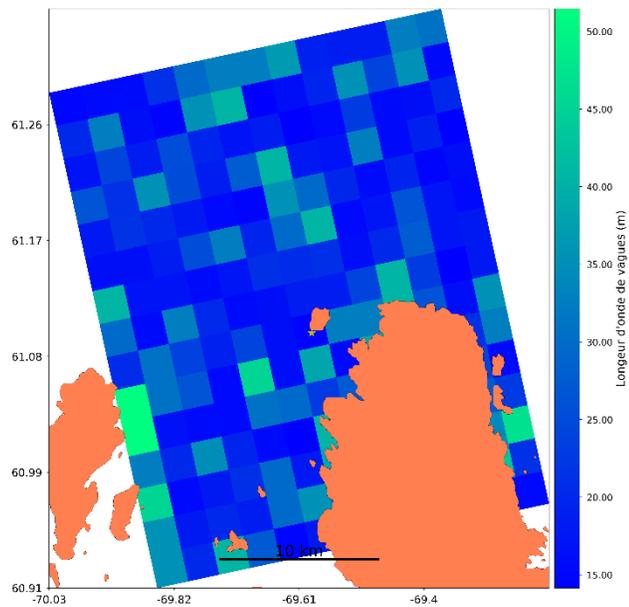


Figure 49: Longueurs d'ondes des vagues extraites sur l'image du 04 octobre 2018 à l'Île Hearn, Quaqtaq.

## 4.4. Validations

Les mesures in situ provenant des instruments de mouillage traitées par l'équipe de l'ISMER ont été utilisées pour la validation. Celles qui se rapprochent le plus du temps d'acquisition de chacune des images ont été sélectionnées pour être comparé 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, Perrie et al. 2015).

La racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (RMSE) a été utilisé pour valider. Malgré le nombre réduit des images disponibles présentement pour la validation, une validation a été effectuée sur chacun des deux sites d'études. Le nombre d'images total acquises durant la saison d'automne 2018 est de 4 pour chacun des sites. Les images acquises durant l'automne 2019 pourront être validées avec les données terrain qui seront récoltés durant la prochaine campagne de terrain en 2020 ou en 2021. Les figures suivantes (Kuujuarapik, Quaqtac,) présentent les comparaisons des valeurs des paramètres de vagues extraites sur les images avec celles provenant des mesures *in situ*.

Les hauteurs de vagues  $H_m$ ,  $H_{m0}$ ,  $H_{1/3}$  et  $H_{1/10}$  ont toutes 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. Différentes valeurs de RMSE ont été notées pour chacun d'entre eux (Tableau 19).

<b><math>H_{m0}</math></b> :	hauteur significative des vagues calculée par la méthode spectrale
<b><math>H_{1/3}</math></b> :	hauteur significative des vagues calculée par la méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues)
<b><math>H_{1/10}</math></b> :	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
<b><math>H_m</math></b> :	hauteur moyenne des vagues (méthode zero-crossing)

Sur les deux tableaux (Tableau 19, Tableau 20), 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 0,2m et un biais de -0,032m pour Kuujuarapik et un RMSE de 0,6m et biais de 0,075m pour Quaqtac. Les valeurs de RMSE et de biais obtenus à Kuujuarapik étant inférieures à celles obtenues à Quaqtac, cela montre l'impact des pixels terrestres sur la qualité des valeurs extraites des images. Malgré que la distance de localisation de l'ADCP à Kuujuarapik soit de 1,6km de l'île Gillis (à 1-km de l'île Hearn pour le site à Quaqtac), nous avons obtenu une meilleure estimation de la hauteur des vagues. La petite taille de l'île Gillis fait qu'il y a moins de pixels terrestres dans la fenêtre de calcul. Sur la Figure 48, nous pouvons constater que presque le quart de la fenêtre de calcul est présenté par des pixels terrestres (île Hearn). En somme, plus le groupe de pixels considéré dans le calcul du spectre de Fourier est contaminé par des pixels terrestres, plus la précision des paramètres de vagues est moindre.

Dès que nous aurons les données in situ correspondant aux images de l'automne 2019, nous pourrons tester d'avantage et discuter de l'influence de la taille de la fenêtre spatiale à considérer 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 permettrait de faire différents tests lorsque toutes les données in situ auront été récupérées.

Tableau 19: 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 20: 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

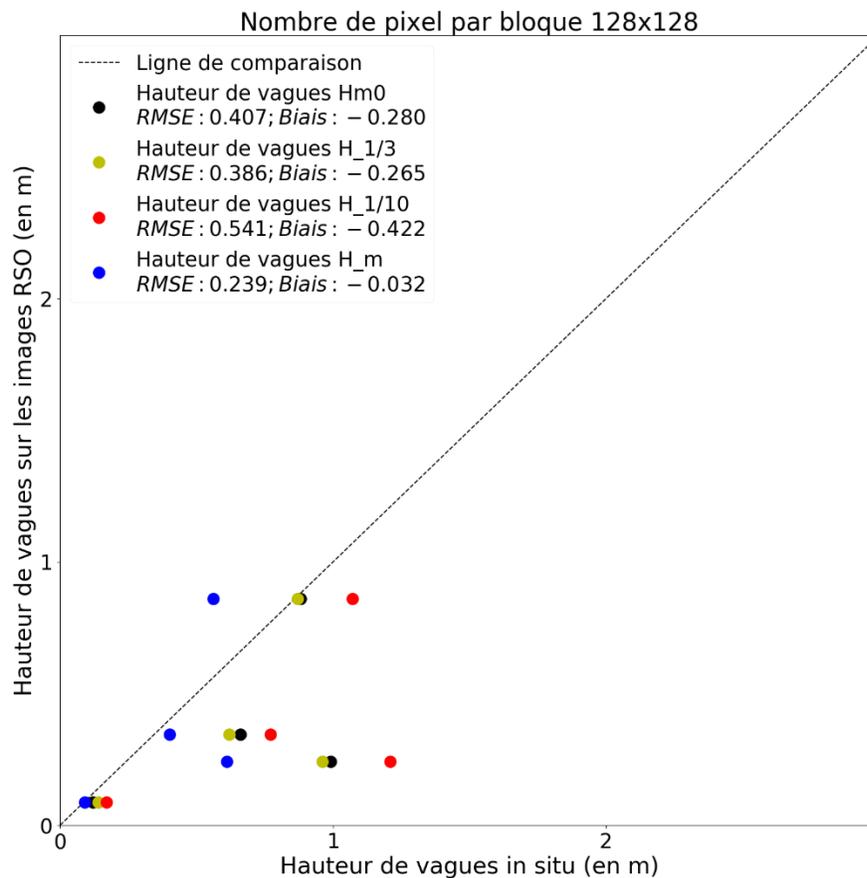


Figure 50: Validation des hauteurs de vagues pour le site à Kuujjuarapik pour l'automne de l'année 2018.

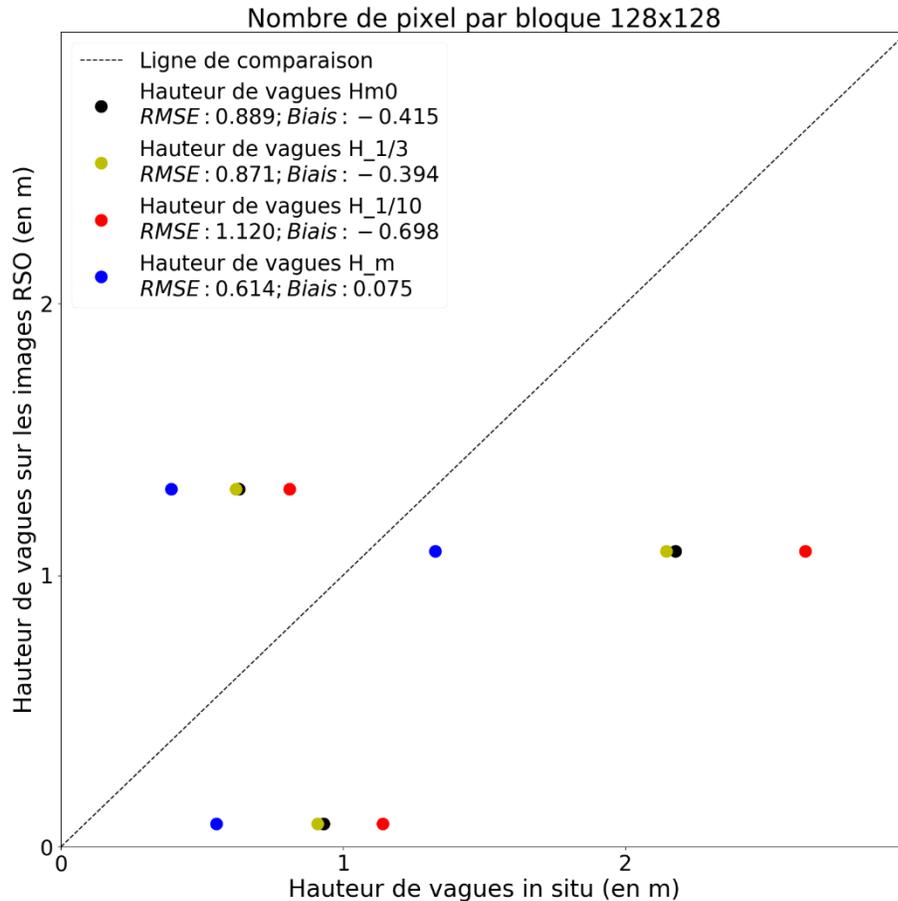


Figure 51: Validation des hauteurs de vagues pour le site à Quaqtq pour l'automne de l'année 2018.

Concernant les directions 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). 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 ( $S_{rms}$ ) 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. Les Figure 52 et Figure 53 présentent les résultats de validation des directions extraites des images par rapport aux directions de provenance des vagues mesurées in situ. Vu les 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. Lorsque les données in situ de l'automne 2019 seront disponibles, nous aurons une meilleure validation des précisions sur les directions et les hauteurs des vagues dominantes qui pourraient être obtenues de ces sites.

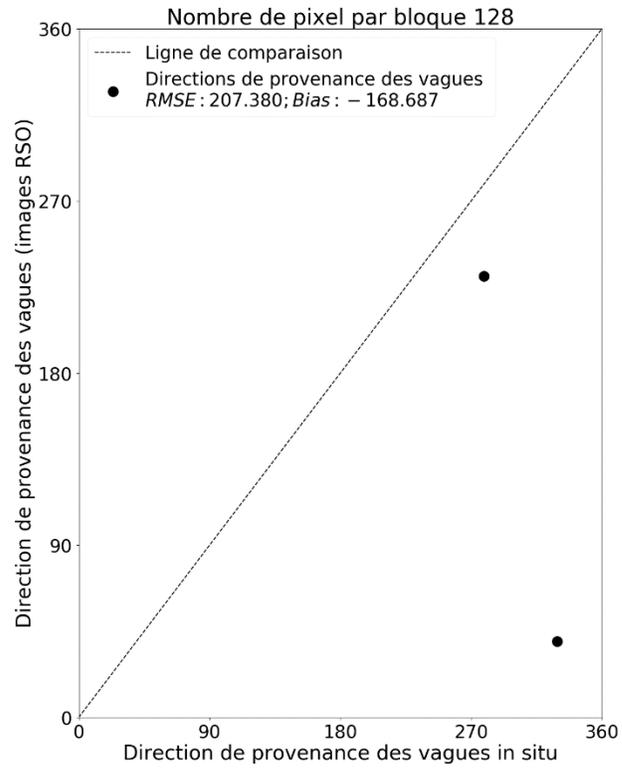


Figure 52: Validation des directions de vagues pour le site à Kuujjuarapik pour l'automne de l'année 2018.

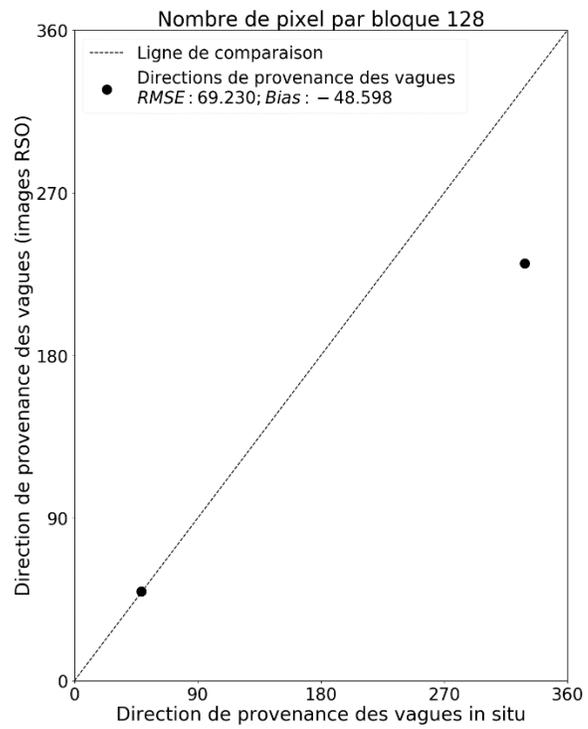


Figure 53: Validation des directions de vagues pour le site à Quaqaq pour l'automne de l'année 2018.

## 5. Conclusions

Ce projet de recherche a pour but de fournir des observations des conditions de glace de rive pour huit sites d'intérêt au Nunavik dans un contexte de changements climatiques. Les observations ont été réalisées en utilisant deux sources de données : des photographies provenant de caméras in situ (réseau CAIMAN) ainsi que des images satellites optiques Landsat-8 et Sentinel-2.

En ce qui concerne l'interprétation des photographies extraites du réseau CAIMAN, environ 55 000 photos et 400 images satellites ont été analysées pour la saison 2018-2019. Les photos horaires ont permis 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 les infrastructures maritimes. Elles ont permis de déterminer les dates d'englacement et de fonte, ainsi que la durée de la saison de glace. Elles ont également permis de documenter les conditions de glace qui peuvent représenter un risque pour les ouvrages côtiers.

Les températures plus froides observées durant la saison 2017-2018 se sont prolongées à l'automne 2018 ce qui a occasionné une arrivée plus hâtive des glaces dans tous les sites suivis à l'exception d'Umiujaq. Pour les sites le long du détroit d'Hudson, le début de la fonte et l'évacuation des glaces ont été plus hâtifs en 2019 qu'en 2018 mais comparables aux dates de 2017. Plus spécifiquement, les faits saillants de chaque site sont les suivants :

À Aupaluk, les caméras n'ayant pas bien fonctionnées, alors qu'en 2017-2018 elles avaient disparues, les comparaisons avec les années précédentes sont limitées. La glace a néanmoins été observée à l'automne 2018 deux semaines et demie plus tôt qu'en 2016-2017, les températures étant alors plus froides qu'à l'habitude, ce qui a étiré la durée de l'englacement d'autant, la prise du couvert permanent se faisant sensiblement à la même date.

À Quaqtqaq, les températures observées à l'automne 2018 étaient les plus froides des huit dernières années. Les glaces y ont été observées 14 à 19 jours plus tôt que les deux années précédentes. Le couvert se fixant vers les mêmes dates, l'englacement a été plus long. Malgré des températures semblables aux années précédentes au printemps, la première apparition d'eau fut observée 11 à 23 jours plus tôt que les deux années précédentes mais la fonte s'est prolongée et les glaces ont quittées à la même date qu'en 2017. Les températures de l'été 2019 ont été dans les plus chaudes des huit dernières années.

À la Baie Déception, l'arrivée des glaces a été plus hâtif et la prise du couvert plus tardif en 2018 que les années précédentes de sorte que l'englacement a été très long (160% vs 2017, 350% vs 2016). Au printemps 2019, la fonte s'est déroulée de la même façon et au même moment qu'en 2017.

À Ivujivik, la saison estivale 2018 avait été très froide et l'automne s'est poursuivi de la même façon. Les glaces ont été observées dès la mi-novembre, soit près de 3 semaines plus tôt que les deux années précédentes. Le couvert a été fixe près de deux semaines plus tôt également. La

durée du couvert de glace permanent a cependant été plus courte, la fonte débutant 17 à 38 jours plus tôt. Les glaces ont néanmoins quitté la baie au même moment qu'en 2017. Les températures mesurées à l'été 2019 ont été les plus chaudes des huit dernières années, celle de 2018 étant les plus froides.

À Umiujaq, les températures à l'automne 2018 ont été les plus froides des huit dernières années mais la glace y est apparue dans les mêmes dates que les deux années précédentes. Cependant, la prise du couvert a été plus hâtive de 9 à 14 jours. La période du couvert permanent a décalé par rapport aux années précédentes, la longueur étant la même qu'en 2017. La fonte y a duré plus longtemps. Les températures journalières estivales ont été légèrement inférieures à la moyenne des huit dernières années.

À Kuujuarapik, tout comme à Umiujaq, les températures à l'automne 2018 ont été les plus froides des huit dernières années mais la glace est apparue dans le secteur de l'infrastructure maritime dans les mêmes dates qu'en 2016. Toutefois, la prise des glaces a également été un peu plus hâtive. La fonte s'est déroulée comme l'année précédente, les deux printemps étant plus froids que la moyenne. Au large, près de l'île Gillis, la glace est apparue un peu plus tardivement qu'à l'infrastructure maritime mais néanmoins plus tôt que l'année précédente. Pour la saison de glace 2018-2019, la combinaison des durées d'englacement et de fonte donne deux fois plus de journées avec de la glace mobile par rapport à l'hiver 2017-2018 (106 jours vs 46 jours)

Les nouveaux sites instrumentés sur les îles Gillis et Hearn ont permis de voir une dynamique différente des autres sites. À partir de l'île Hearn, un certain nombre d'icebergs ont pu être observés dans la baie Diana. L'île Gillis étant au large dans la baie d'Hudson, davantage de mouvements de glace y ont été observés. Lors de la fonte, la pression des glaces a créé devant les caméras d'impressionnants hummocks. À l'englacement, les caméras ont capté des images de plusieurs tempêtes où les vagues venaient déferler sur la pointe de l'île devant les caméras. Pour ces sites, les photographies ont également été classifiées glace/non glace et une rectification a été faite pour représenter l'interprétation sur une carte. Cela permettra ainsi le calcul de concentration de glace pour le modèle de vagues utilisés dans le projet CC16.1 réalisé à l'ISMER.

Pour les sites expérimentaux du projet de modélisation des vagues, près des villages de Kuujurapik et Quaqtaq, les images Landsat-8 et Sentinel-2 viennent compléter l'information des photos en fournissant une vue plus régionale des conditions de glace. L'utilisation des deux satellites vient maximiser les chances d'obtenir des images sans nuage au-dessus de la zone d'intérêt. L'automne et le printemps demeurent néanmoins des périodes problématiques en raison de la différence de température entre l'air, la glace, l'eau et la terre qui crée des situations propices à la formation d'un couvert nuageux ou de brume. L'utilisation d'images SAR pour le suivi du couvert de glace durant ces périodes brumeuses ont déjà fait leur preuve (Gignac, 2012). La disponibilité prochaine des images gratuites de la Constellation SAR (3 satellites) de l'Agence spatiale canadienne et des satellites Sentinel-1 (A et B) va faciliter un suivi régulier.

Un troisième volet du projet vise à valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues pour deux sites, soient Kuujjuarapik et Quaqtq. Au cours des derniers mois, nous avons appliqué la méthodologie choisie sur les images RADARSAT-2 (bande-C) acquises en 2018. La validation a été effectuée avec les mesures des vagues in situ prises par les ADCP (Kuujjuarapik et Quaqtq) installées par l'ISMER. L'analyse des images RADARSAT-2 acquises en mode Standard Quad-Pol a montré le potentiel de ces images dans l'estimation des hauteurs significatives des vagues. Sachant que l'algorithme utilisé dans ce projet a été développé sur des images RADARSAT-2 en mode Fine Quad-Pol (Xie, Perrie et al. 2015), les analyses effectuées sur les hauteurs significatives des vagues montrent des valeurs de RMSE et de biais plus faibles lorsqu'elles sont comparées avec les hauteurs moyennes des vagues mesurées in situ par les AWAC. À propos de la direction des vagues dominantes, le nombre de mesures (deux seulement pour l'année 2018) ne permet pas la validation des résultats obtenus. Il reste à compléter les analyses après l'acquisition des données de l'ADCP de l'année 2019-2020.

Pour l'extraction des vagues, l'utilisation des images acquises en dehors des périodes d'englacement est préférable. D'autre part, le code (programme informatique écrit en python) conçu tout au long de la réalisation de ce projet est prêt pour traiter les images RADARSAT-2 Standard Quad-Pol de l'automne 2019 et de futures images semblables sur les deux sites dans le cas où il y aurait une suite au projet. Le code prend en entrée des images brutes et produit des cartes des paramètres des vagues dominantes avec une taille de fenêtre spatiale fournie avant l'exécution du code.

## 6. Références

Alpers, W. and W. Huang (2011). "On the Discrimination of Radar Signatures of Atmospheric Gravity Waves and Oceanic Internal Waves on Synthetic Aperture Radar Images of the Sea Surface." IEEE transactions on geoscience and remote sensing 49(3): 1114-1126.

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 : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq 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 : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk - Projet de recherche CC09.1. Rapport final.

Bernier, M., Latapie, R., Poulin, J. Gignac, C., Thériault, D., Gauthier, Y. (2015) Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Deception, Quaqaq et Aupaluk. Présenté au Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports du Québec. Rapport de recherche INRS R-1627, 26 pages

Gignac C (2012) Utilisation de la télédétection radar haute-résolution pour l'étude du régime glacial marin au voisinage des infrastructures maritimes du Nunavik. Masters (INRS - Eau Terre Environnement). 107 p

Jackson, C. R. and J. R. Apel (2004). Synthetic Aperture Radar: Marine User's Manual, U.S Department of Commerce.

Li, X. (2017). SAR imaging of internal gravity waves: From atmosphere to ocean. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).

McCandless, S. and 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 : Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqaq et Aupaluk (2017-2020) - Projet de recherche CC09.2. Rapport d'étape 1.

Ratsimbazafy, T. and 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., W. Perrie, Y. He, et al. (2015). "Ocean surface wave measurements from fully polarimetric SAR imagery." Science China Earth Sciences 58(10): 1849-1861.

Zhu, Z. and C. E. Woodcock (2012). "Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery." Remote Sensing of Environment 118: 83-94.