

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, Quaqaq et Aupaluk
(2017-2020)

Rapport d'étape no.2 remis à :

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

Par :

Monique Bernier, Jimmy Poulin, Tahiana Ratsimbazafy, Yves Gauthier, David Éthier



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

Rapport INRS R1852

28 février 2019

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2019
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-932-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

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 2017 à août 2018 (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	14
2.1.3. Sites d'observation à Baie Déception.....	23
2.1.4. Site d'observation à Ivujivik.....	31
2.1.5. Site d'observation à Umiujaq	40
2.1.6. Site d'observation à Kuujjuarapik (infrastructure maritime)	45
2.1.7. Site d'observation à Kuujjuarapik (île Gillis)	50
2.2. Traitement des photographies acquises par les caméras	55
2.2.1. Rectification des photographies.....	55
2.2.2. Classification glace/non glace	57
2.2.3. Diffusion des photographies et des informations dérivées	59
3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d'images satellitaires à Quaqlaq et Kuujjuarapik pour l'englacement 2017 (Activité 4).....	60
4. Validation du potentiel d'utilisation d'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues à Kuujjuarapik et Quaqlaq (Activité 5)	63
4.1. Principe de fonctionnement des radars imageurs	63
4.2. Commande d'images.....	64
4.2.1. Images polarimétriques RADARSAT-2	64
4.2.2. Images PALSAR-2	66
4.3. Résultats préliminaires.....	66
5. Conclusions.....	70

6. Références	72
---------------------	----

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>

Banquise lâche	Banquise dont la concentration est de 4/10 à 6/10 avec de nombreux chenaux et polynies; les floes ne sont généralement pas en contact les uns avec les autres.
Banquise serrée	Banquise dont la concentration est de 7/10 à 8/10 et qui est composée de floes dont la plupart sont en contact.
Banquise très lâche	Banquise dont la concentration est de 1/10 à 3/10 et où il y a plus d'eau que de glace.
Banquise très serrée	Banquise dont la concentration est de 9/10 à moins de 10/10.
Banquise/pack	Terme utilisé au sens large pour désigner toute zone de glace autre que la banquise côtière, quelle que soit sa forme ou sa disposition. Lorsque les concentrations sont élevées, par exemple 7/10 ou plus, on utilise normalement le terme « pack »; sinon, on parle de « banquise ».
Crête (Glace)	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 ».
Eau libre	Grande étendue d'eau librement navigable dans laquelle la glace de mer est présente à des concentrations inférieures à 1/10. Aucune glace d'origine terrestre n'est présente.
Gadoue	Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou la glace ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.
Glace en crêpes	Morceaux de glace plutôt circulaires, ayant de 30 cm à 3 m de diamètre et jusqu'à 10 cm d'épaisseur, avec des bords relevés du fait du frottement des morceaux les uns contre les autres. Ils peuvent se former par houle faible à partir de sorbet, de gadoue ou de shuga ou du fait de la fragmentation de glace vitrée ou de nilas, ou encore à partir de glace grise s'il y a une forte houle ou de grosses vagues. La glace en crêpes se forme aussi parfois en profondeur, à l'interface entre deux masses d'eau ayant des caractéristiques physiques différentes, d'où elle remonte en surface. Elle peut rapidement couvrir de grandes étendues d'eau.
Glace pourrie	Glace criblée de trous de fonte et à un stade avancé de désintégration.
Hummock	Monticule de glace brisée qui a été soulevée par la pression. Il peut être récent ou érodé. Le volume de glace brisée qui s'est enfoncé sous l'effet de la pression et se trouve submergé sous le hummock est appelé « bummock ».
Nilas	Couche de glace mince et élastique, ondulant facilement sous les vagues et la houle et formant, sous la pression, des avancées en forme de « doigts » entrecroisés. Cette couche a une surface mate et peut atteindre 10 cm d'épaisseur. On distingue le nilas sombre et le nilas clair.
Nilas clair	Nilas ayant plus de 5 cm d'épaisseur et plus claire que le nilas sombre.

Nilas sombre	Nilas ayant moins de 5 cm d'épaisseur et une couleur très sombre.
Polynie	Toute ouverture de forme non linéaire entourée de glace. Les polynies peuvent contenir des sarrasins ou être couvertes de nouvelle glace, de nilas ou de jeune glace; les sous-mariniens les appellent des claires-voies.
Sarrasins (Brash)	Accumulation de glaces flottantes composées de fragments qui n'ont pas plus de 2 m d'extension et qui proviennent de la destruction d'autres formes de glace.
Shuga	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.
Sorbet	Stade de la congélation postérieur au frasil; les cristaux commencent à s'agglutiner pour former en surface une couche épaisse comme de la soupe. À ce stade, la mer réfléchit peu la lumière et prend une apparence mate.

Pour d'autres définitions, se référer au site web susmentionné.

Tableau de l'échelle Beaufort

Force	Vitesse du vent (Km/h)	Appellation	Effets observés sur mer	Effets observés sur terre
0	< 1	Calme	La surface de la mer est unie comme un miroir, mais pas forcément plane.	La fumée s'élève verticalement.
1	1 à 5	Très légères brises	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans écume.	La fumée, mais non la girouette, indique la direction du vent.
2	6 à 11	Légère brise	Vaguelettes courtes mais plus accusées. Leur crête a une apparence vitreuse mais elles ne déferlent pas. Par bonne visibilité, la ligne d'horizon est toujours très nette.	On sent le vent sur le visage; les feuilles frémissent et les girouettes bougent.
3	12 à 19	Petite brise	Très petites vagues. Les crêtes commencent à déferler. écume d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars.	Feuilles et brindilles bougent sans arrêt. Les petits drapeaux se déploient.
4	20 à 28	Jolie brise	Petites vagues devenant plus longues. Moutons franchement nombreux.	Poussières et bouts de papier s'envolent. Les petites branches sont agitées.
5	29 à 38	Bonne brise	Vagues modérées prenant une forme plus nettement allongée. Formation de nombreux moutons. Parfois quelques embruns.	Les petits arbres feuillus se balancent. De petites vagues avec crête se forment sur les eaux intérieures.
6	39 à 49	Vent frais	De grosses vagues, ou lames, commencent à se former. Les crêtes d'écume blanche sont parfois plus étendues. Habituellement, quelques embruns.	Les grosses branches sont agitées. On entend le vent siffler dans les fils téléphoniques et l'usage du parapluie devient difficile.
7	50 à 61	Grand frais	La mer grossit. L'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent.	Des arbres tout entiers s'agitent. La marche contre le vent devient difficile.
8	62 à 74	Coup de vent	Lames de hauteur moyenne et plus allongées. De la crête 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.
9	75 à 88	Fort coup de vent	Grosses lames. épaisses traînées d'écume dans le lit du vent. La crête des lames commence à vaciller, s'écrouler et déferler en rouleaux. Les embruns peuvent réduire la visibilité.	Peut endommager légèrement les bâtiments (bardeaux de toitures).
10	89 à 102	Tempête	Très grosses lames à longues crêtes en panache. épaisses traînées d'écume. La surface des eaux semble blanche. Le déferlement en rouleaux devient intense et brutal. Visibilité réduite.	Déracine les arbres et endommage sérieusement les bâtiments.
11	103 à 117	Violente tempête	Lames exceptionnellement hautes. Mer complètement recouverte de bancs d'écume. Visibilité réduite.	Dégâts considérables.
12	118 à 133	Vent d'ouragan	L'air est plein d'écume et d'embruns. La mer est entièrement blanche, du fait des bancs d'écume dérivants. Visibilité très fortement réduite.	Rare. Possibilité de grands étendus de dommages à la végétation et de dommages structuraux importants.

1. Introduction

1.1. 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, Quaqtaq 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 Quaqtaq (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: Kuujuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk (2017-2020) ». Afin d'améliorer la couverture de suivi des glaces, deux sites additionnels ont été instrumentés dans les villages nordiques de Kuujuarapik et de Quaqtaq. 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 situées 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
Kuujjuarapik (Île Gillis)	77,85327°O 55,33865°N	X	X
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
Quaqtaq (Île Hearn)	69,68658°O 61,06687°N	X	X
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 2017 et août 2018. 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, deux sources de données seront utilisées, des images RADARSAT-2 et PALSAR. Le rapport se termine par une conclusion.

2. Sites d'observation des conditions de glace de rives au Nunavik : Analyse des photographies d'octobre 2017 à août 2018 (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 2018 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 le rapport technique numéro 2, les caméras installées à Aupaluk ont été subtilisées entre l'entretien annuel effectués à l'automne 2017 et le mois d'août 2018. Il n'y a donc pas de photographies de disponibles pour l'hiver 2017-2018.

2.1.2. Sites d'observation à Quaqtq

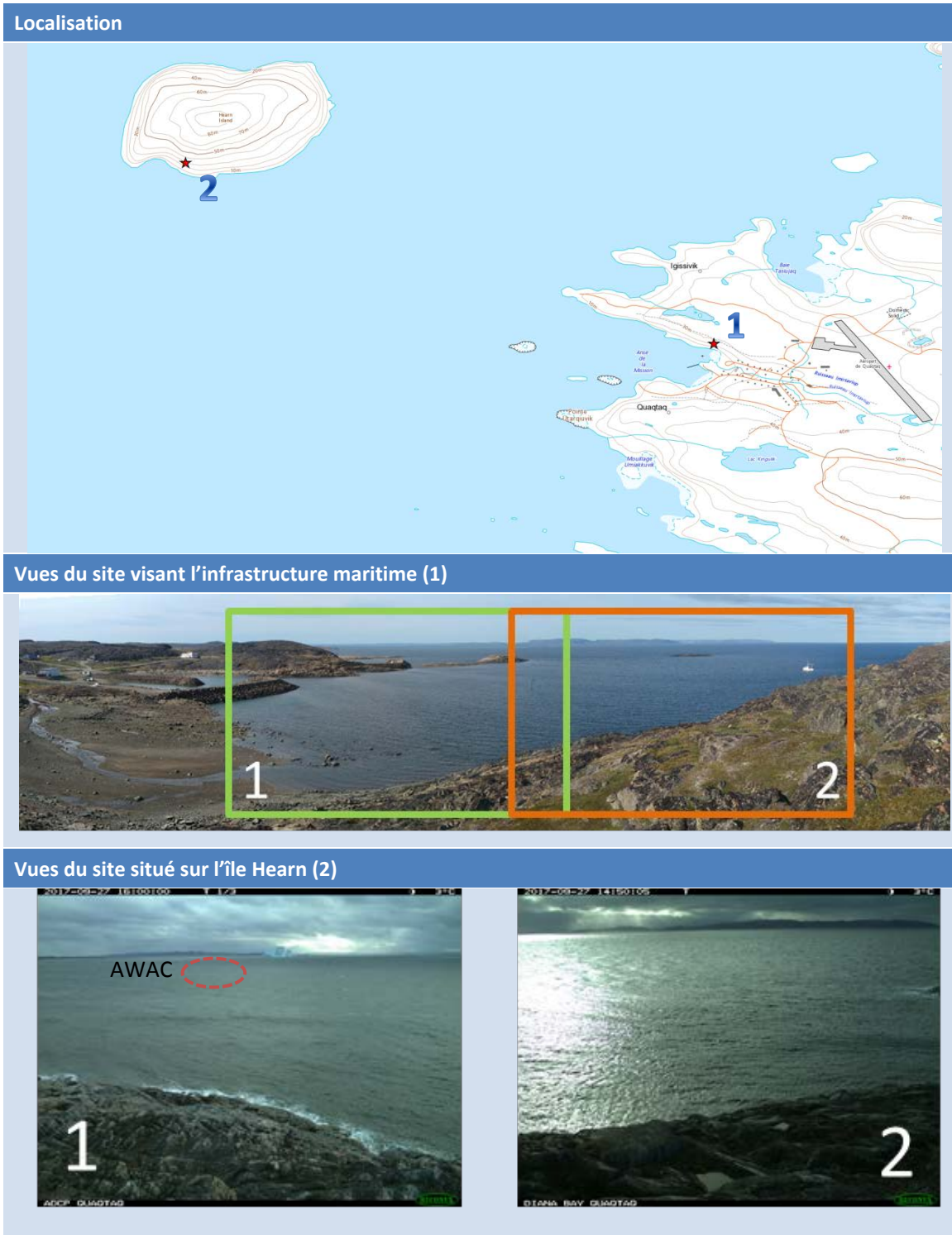


Figure 2 : Emplacement et vues des caméras situées à Quaqtq (site 1- Infrastructure maritime, site 2- île Hearn)

La Figure 2 montre l'emplacement des sites de caméras à Quaqtaq. Un premier site en place depuis 2009, vise les infrastructures maritimes. Le second, installé en 2017, est situé sur l'île Hearn. Pour ce dernier, suite à un problème de manipulation, seule la caméra 1 a fonctionné de l'automne 2017 à l'automne 2018. Heureusement, cette caméra 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 2.

Lors de l'installation des caméras sur l'île Hearn, un iceberg était présent dans la baie Diana directement devant la caméra 1. Il est demeuré passablement immobile et intact jusqu'au 4 octobre où il s'est fracturé et a commencé à dériver dans la baie (vent sud, sud-est). Dans les jours qui suivent, d'autres icebergs apparaissent au fond de la baie. Il n'est pas possible de dire s'il s'agit de fragments de l'iceberg initial ou de nouveaux provenant du détroit d'Hudson. Le 20 octobre, suite à une grande marée, les icebergs ont libéré la baie, sauf un qui demeurera tout l'hiver au fond de la baie. Le mois de novembre a été ponctué de plusieurs tempêtes de vent et de neige mais aucune glace n'a été observée.

La première glace est observée le 2 décembre dans l'anse de la mission. Elle est présente près du rivage sous forme de gadoue (Figure 3-A). Plus au large, la première glace est observée le 3 décembre en matinée. Elle se présente sous forme de glace en crêpe accompagnée de sorbet (Figure 3-A). Le 4 décembre, une bonne brise en provenance du sud-sud-est pousse la glace vers le nord, hors de la baie. Une faible quantité est poussée sur la côte sud de l'île Hearn devant les caméras avant de sortir à son tour de la baie. Quelques épisodes de gadoue, de sorbet et de shuga surviennent jusqu'au 9 décembre. De la glace en provenance du détroit, toujours sous forme de sorbet et de shuga, reviendra le 10 décembre en matinée avec la marée montante et une jolie brise de l'ouest-nord-ouest. À partir de cette date, la glace se transformera en nilas puis en jeune glace dans l'anse de la mission (Figure 3-B). Le couvert y sera fixe pour l'hiver. Le 12 décembre, à l'aurore, la baie Diana est couverte de glace exogène (Figure 3-C). Celle-ci a probablement pénétrée dans la baie avec la marée montante de la nuit précédente accompagnée de vents frais du nord-nord-ouest et de l'ouest-nord-ouest. La glace présente ce jour-là est plus épaisse que celle vue précédemment et forme des radeaux de plus grande dimension (Figure 3-C). La glace est suffisamment épaisse pour que de petites crêtes de pression soient visibles au pourtour des radeaux. Durant les trois jours suivants, des mouvements sont observés dans le couvert de glace créant des ouvertures qui se referment rapidement. Les 14 et 15 décembre, le nord de la baie semble se vider sous l'effet des coups de vent du nord-est. Le 16 décembre, alors que le vent passe au nord-ouest, la baie se remplit complètement. Les radeaux laissent la place à du sarrasin bien compact devant l'île Hearn (Figure 3-D). De grandes ouvertures apparaissent dans le couvert le 18 décembre bien que le sarrasin demeure bien compact ailleurs. Le 19 décembre, sous l'effet d'une petite brise du sud et d'une marée descendante, le couvert devient plus lâche et des radeaux se reforment à travers le sarrasin (Figure 3-E). La glace demeurera en mouvement jusqu'au 21 où, avec une jolie brise de l'ouest-nord-ouest, la glace est poussée dans la baie. Certains radeaux demeureront intacts et se consolideront avec le sarrasin environnant (Figure 3-F). Les premières grandes marées à survenir suite à la prise du couvert, soit au début janvier, feront apparaître de l'eau dans la partie intertidale. Le couvert demeurera néanmoins complet tout l'hiver.

A.



B.



C.



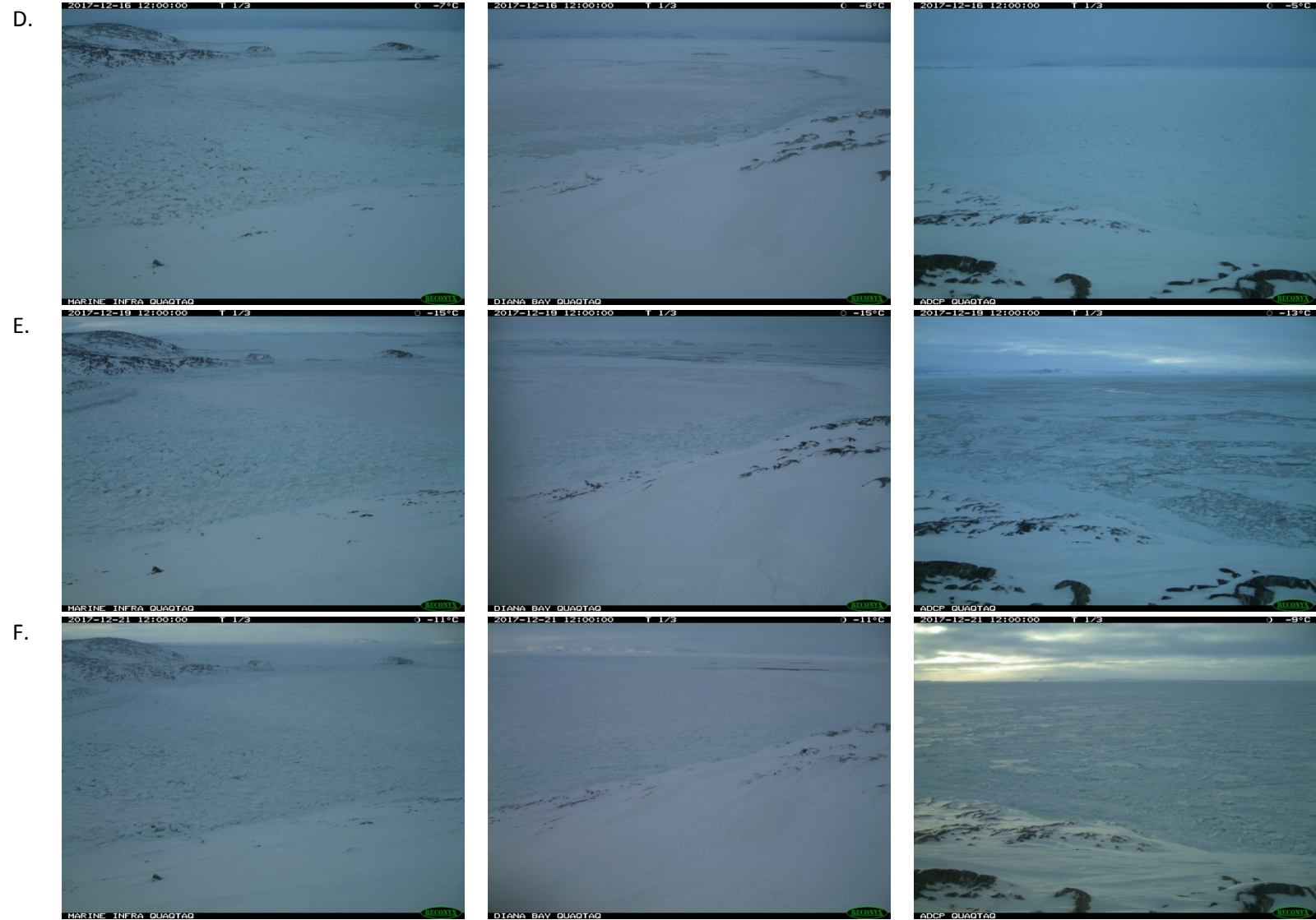


Figure 3 : Évolution de l'englacement 2017 à Quaqtaq (A- 2 et 3 décembre 2017, B- 10 décembre 2017, C- 12 décembre 2017, D- 16 décembre 2017, E- 19 décembre 2017, F- 21 décembre 2017)

Au printemps 2018, les premiers signes de fonte surviennent le 29 mai avec une arrivée d'eau douce au fond de l'anse de la Mission en provenance du ruisseau Imirtaviup. Peu de changements seront visibles les deux semaines suivantes. Les premières mares de fonte sur la glace apparaissent le 17 juin avec des températures dépassant 8°C et continuent de s'étendre le 18 juin avec des températures de 6 - 7°C. Dans l'anse de la Mission, les premiers mouvements de glace surviennent le 21 juin sur la berge, accélérés par l'arrivée d'eau douce. Quatre jours plus tard, soit le 25 juin, la glace commence à être mobilisée hors de la zone de marnage (Figure 4-A). Jour après jour, aidée par les marées et des températures diurnes principalement au-dessus de 0°C, la zone de glace mobile s'étendra vers la baie Diana, où le couvert de glace se détériore sur place. Le 4 juillet 2018, une première fracture s'étendant de l'île Hearn et allant vers l'ouest apparaît dans le couvert. Celle-ci demeurera néanmoins fermée. Les 6 et 7 juillet, de l'eau commence à apparaître à travers le couvert de glace de la baie Diana, d'abord tout juste à l'extérieur de la zone intertidale sur l'île Hearn puis plus loin à l'est en provenance du passage entre l'île Hearn et le continent (Figure 4-B). L'eau progressera jusqu'au 10 juillet, jour où la glace de la partie nord de la baie Diana est mobilisée. Jusqu'à ce moment, bien que la glace soit mobilisée depuis deux semaines dans l'anse de la Mission, aucune glace exogène ne s'y retrouve en raison de la présence d'une bande de glace ceinturant l'anse (Figure 4-C). Les blocs de glace s'échouant près des infrastructures sont alors de petites tailles et leur distribution est peu compacte. Leur épaisseur peut néanmoins attendre plus de 1,25m. Le 11 juillet, cette ceinture se brise. De la glace dérivera dans la partie nord de la baie Diana les jours suivants alors que la partie sud continuera à se dégrader sur place. Le 14 juillet, l'eau progressera plus au sud et tout le couvert de glace sera mobilisé (Figure 4-D). Une bonne brise du sud-est dans la nuit du 14 au 15 juillet ainsi qu'une marée descendante feront en sorte que la baie sera vide de glace le matin du 15 juillet, à l'exception d'un iceberg et de quelques radeaux (Figure 4-E). Jusqu'au 20 juillet, des radeaux de glace en forte dégradation se déplaceront dans la baie et dans l'anse de la Mission. Le cordon autour de l'infrastructure deviendra discontinu le 18 juillet et disparaîtra complètement quelques jours plus tard. Le 20 juillet, et pendant les 3-4 jours suivant, une glace moins dégradée en concentration variable fera son entrée dans la baie. Bien que les radeaux présents ne soient pas de grande taille, ils semblent plus épais. Dans la nuit du 20 au 21 juillet, lors d'une marée montante de faible amplitude avec une petite brise de l'ouest qui est passée à une jolie brise du nord-ouest, une grande quantité de radeaux de glace est allée se déposer devant l'infrastructure mais sans trop l'atteindre (Figure 4-F). La même chose se reproduira les 24 et 27 juillet. Le 30 juillet sera la première journée sans observation de radeaux de glace et aucune autre observation significative ne se produira. Deux icebergs sont néanmoins présents. L'un d'eux restera accroché directement devant la caméra très près de l'île Hearn pendant une semaine, se faisant bercer par les marées et le vent. L'autre demeurera au fond de la baie jusqu'à la nuit du 11 au 12 août où une grande marée le remettra en mouvement.

Pour conclure cette section, le Tableau 2 synthétise les observations faites au courant de la saison 2017-2018 à partir des caméras installées à Quaqtak près du village et sur l'île Hearn. Le Tableau 3 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 pour la baie Diane et l'Anse de la Mission à Quaqtak.

Tableau 2 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Quaqtq entre octobre 2017 et août 2018

Stade	Infrastructure maritime		Île Hearn	Ensemble du site
	Caméra 1 (sud)	Caméra 2 (ouest)	Caméra 1(sud)	
Première apparition de glace	2 décembre 2017	2 décembre 2017	3 décembre 2017	2 décembre 2017
Couvert de glace permanent	12 décembre 2017	23 décembre 2017	21 décembre 2017	23 décembre 2017
Première apparition d'eau	22 juin 2018	25 juin 2018	6 juillet 2018	22 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	30 juillet 2018	30 juillet 2018	30 juillet 2018	30 juillet 2018

Tableau 3 : Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Quaqtq entre octobre 2016 et août 2017

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

A.



B.



C.

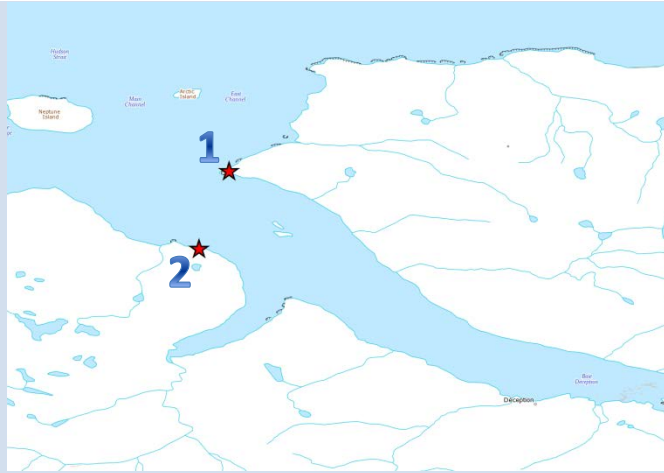




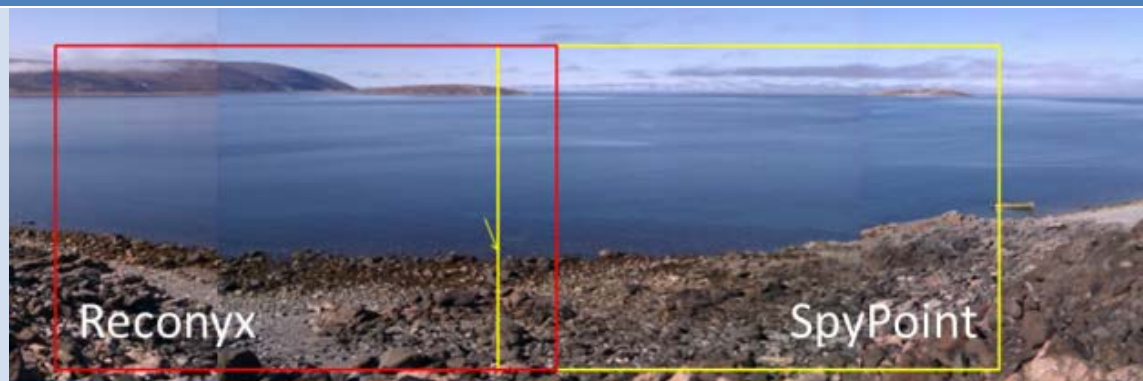
Figure 4 : Évolution de la fonte printanière du couvert de glace à Quaqtaq en 2018 (A- 25 juin 2018, B- 7 juillet 2018, C- 10 juillet 2018, D- 14 juillet 2018, E- 15 juillet 2018, F- 21 juillet 2018)

2.1.3. Sites d'observation à Baie Déception

Localisation



Vue du site 1 (Pointe-Noire)



Vue du site 2 (Ouest de l'île Moosehead)

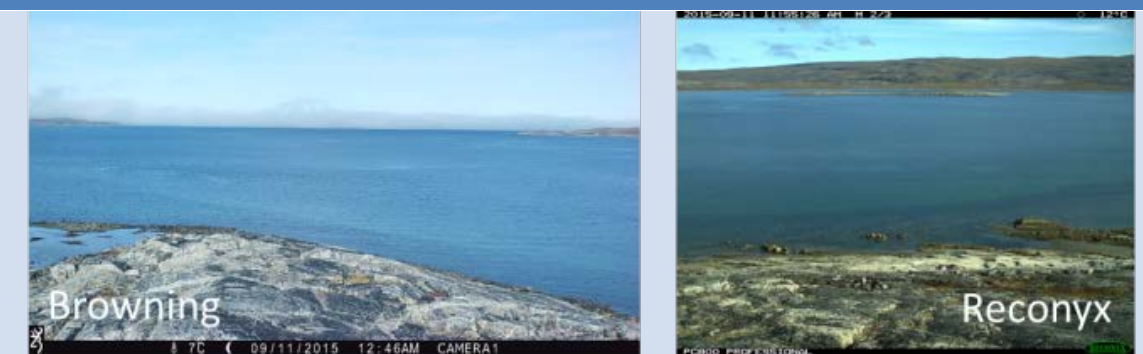


Figure 5 : Emplacement et vues des caméras situées à la Baie Déception (site 1-Pointe-Noire, site 2-Ouest de l'île Moosehead)

Tel que mentionné dans le rapport technique 2 de février 2019¹, la caméra Reconyx installée sur le site de Pointe Noire à la Baie Déception a cessé de prendre des photographies la journée même de son entretien en octobre 2017. La caméra est néanmoins toujours fonctionnelle. La caméra SpyPoint a, quant à elle, été remplacée temporairement par une caméra Harbortronics qui offre passablement la même vue. Au site situé à l'ouest de l'île Moosehead, une troisième caméra a été installée en janvier afin d'en tester les performances. Celle-ci a été orientée de la même façon que la caméra Browning, qui, elle, a présenté un dysfonctionnement rendant impossible la lecture de la carte mémoire.

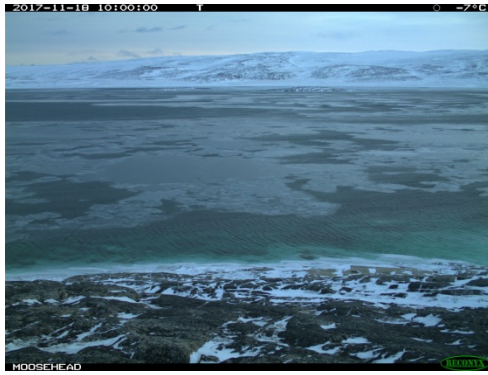
Les premières apparitions de glace se manifestent sous forme de bandes de shugas le 5 novembre dans le nord de la baie. Celui-ci s'agglutine pour former de petites crêpes le lendemain puis le tout disparaît. Des concentrations variables, mais faibles, et des formes différentes (sorbet, shuga et crêpe) s'alternent au nord de la baie jusqu'au début décembre (Figure 6-A). Plus au sud, vis-à-vis l'île Moosehead, de la glace est visible à partir du 17 novembre pour la rive est puis le 18 novembre pour la rive ouest. Le matin du 18, une grande quantité de nilas est visible (Figure 6-B). Plus tard dans la journée, le nilas sera limité à la partie est alors que du shuga sera visible à l'ouest. La glace disparaîtra pour revenir les 26 et 27 novembre sous forme de sorbet et de nilas. À partir de ce moment, l'est de la baie, à partir de l'île Moosehead, restera gelé pour l'hiver. Pendant les 10 premiers jours de décembre, une température constamment autour de -15°C augmente la fréquence des apparitions de glace avec davantage de nilas et de glace en crêpe (Figure 6-C). À certains moments, comme les 7 et 8 décembre, la marée montante accompagnée de vents du nord brise la glace existante et remplit la baie au-delà de l'île Moosehead mais pas jusqu'à l'embouchure (Figure 6-D). La marée descendante dans la nuit du 8 au 9 décembre évacue cette glace concassée puis, à partir du 10 décembre, une couche de nilas sombre prend place, d'abord sur le centre puis sur le nord de la baie (Figure 6-E). Cette couche épaissira dans les jours suivants pour se transformer partiellement en nilas clair vers le 14 décembre (Figure 6-F). Le 15 décembre, une tempête de neige recouvrira la glace. Le couvert restera en place pour l'hiver.

¹ Rapport technique du 5 février 2018 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, Quaqtaq et Aupaluk (2017-2020)

A.



B.



C.



D.



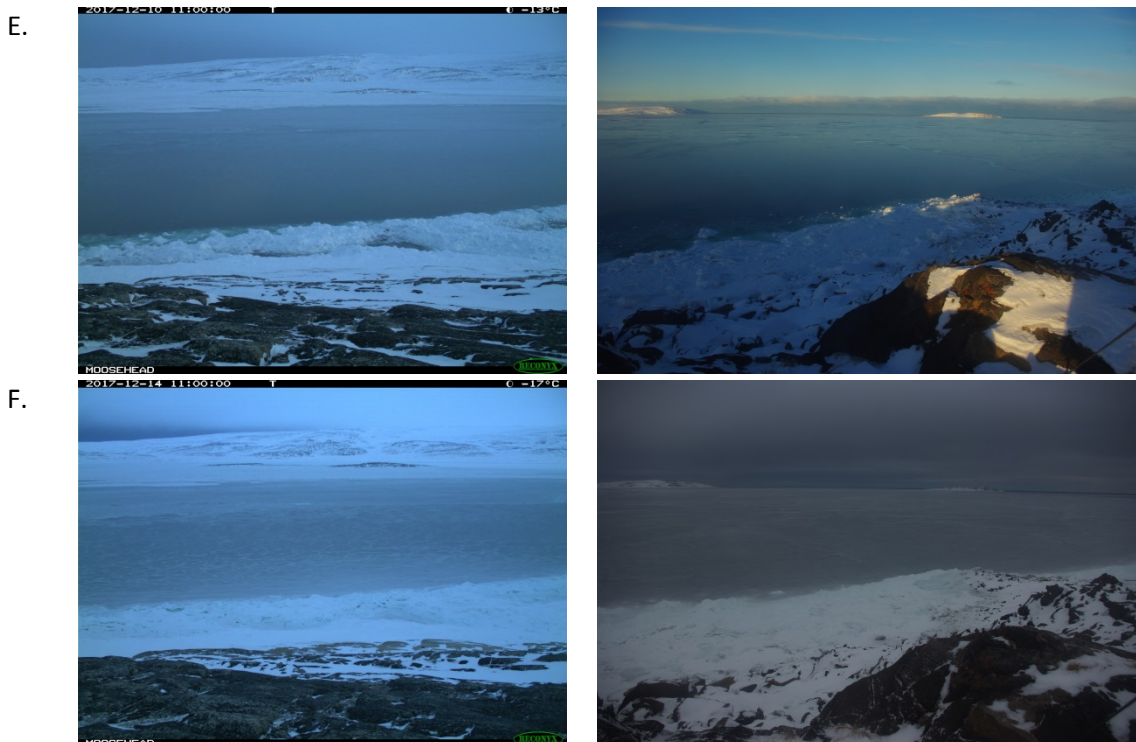


Figure 6 : Évolution de l'englacement 2017 à la Baie Déception (A- 6 novembre 2017, B- 18 novembre 2017, C- 6 décembre 2017, D- 8 décembre 2017, E- 10 décembre 2017, F- 14 décembre 2017)

Après un hiver où le couvert de glace est resté stable malgré les passages répétés des bateaux, les premiers signes de fonte apparaissent lors des derniers jours de mai avec une température légèrement supérieure au point de congélation (1°C - 2°C). Ce réchauffement se traduit visuellement par une fonte du couvert de neige sur la glace. Les températures sous 0°C en début de juin ralentissent les processus de fonte. À partir du 10 et 11 juin, la température de l'air diurne (à Salluit) est généralement au-dessus de 0°C et dépasse les 10°C à quelques reprises. Les mares de fonte sont alors de plus en plus présentes (Figure 7-A). Le 17 juin, les deux navires de FedNav entre dans la baie pour la première fois du printemps. Le 25 juin en matinée, les deux navires quittent la baie. Leur passage créera une ouverture au nord-ouest de la baie (Figure 7-B). Au centre de la baie, vis-à-vis l'île Moosehead, leur passage ne sera pas perceptible sur les photographies (Figure 7-B). Durant cette même journée, la première apparition d'eau est remarquée sur la rive ouest de la baie près de la berge. Le 29 juin, les premiers mouvements de glace sont observés près des berges de pointe Noire. Au centre de la baie, lors de la marée descendante, une fracture apparaît et s'ouvre entre la trace laissée par les navires et l'île Moosehead. Elle se refermera à marée montante puis sera réactivée le 1^{er} juillet lors de la marée descendante. À partir de cette date, la glace devient de plus en plus mobile dans toute la baie (Figure 7-C). Le 3 juillet, toute la glace est mobilisée (Figure 7-D). Le 4 juillet, de la glace provenant du détroit d'Hudson pénètre dans la baie mais demeure dans la partie nord et n'atteint pas le milieu de la baie. Les 8 et 9 juillet, la baie est libre de glace (Figure 7-E). Des

radeaux en provenance du détroit reviendront le 10 juillet et demeureront jusqu'au 12. S'en suivra 3 jours où la baie sera libre de glace puis 10 jours de glace en dérive en très faible concentration. Du 26 juillet au 9 août, les glaces seront absentes de la baie. Le 10 août, une très grande quantité de morceaux de glace envahissent la baie (Figure 7-F). Le couvert demeurera presque complet pendant 2 jours. Durant la nuit du 11 au 12 août, une grande quantité de glace est évacuée avec la marée descendante. La concentration de glace réaugmentera le 14 août mais dans une plus faible proportion (Figure 7-G). La glace sera totalement évacuée le 17 août et la baie demeurera libre de glace à partir de ce moment.

Le passage des bateaux dans la baie Déception durant l'hiver semble avoir un impact limité à la trace laissée par le bateau lorsqu'il fracture la glace. Au printemps, l'impact de cette navigation est plus perceptible sur les photographies alors que la trace des bateaux, même si celle-ci remonte à plusieurs semaines, agit comme ligne de fracturation préférentielle lors de la fonte. Le passage des navires le 25 juin fera décrocher la banquise dans le nord-ouest de la baie. La banquise est alors dans un état avancé de détérioration. À noter qu'un des navires est arrivée à la baie Déception plus d'une semaine avant son incursion dans la baie. Il est demeuré dans le détroit d'Hudson en attente du second navire. Ce dernier semble avoir dû s'y prendre à plusieurs reprises pour faire un chemin dans la glace pour permettre au premier navire de passer.

Pour conclure cette section, le Tableau 5 synthétise les observations faites au courant de la saison 2017-2018 à partir des caméras installées à la pointe Noire et à l'ouest de l'île Moosehead à la Baie Déception. Le Tableau 6 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 pour Baie Déception.

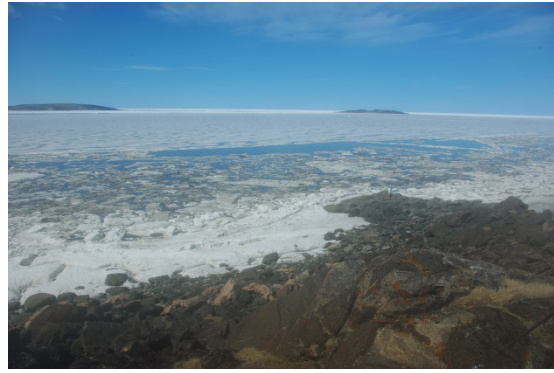
A.



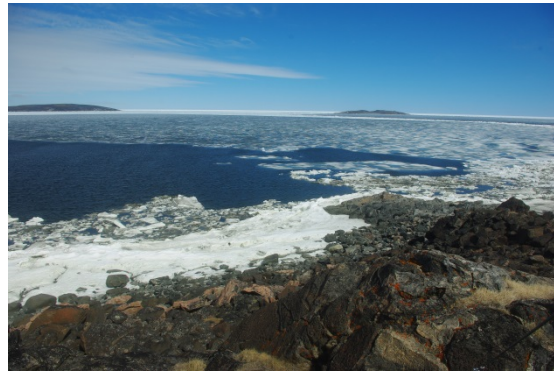
B.



C.



D.



E.



F.



Absence de photos

G.



Absence de photos

Figure 7 : Évolution de la fonte du couvert de glace à la Baie Déception en 2018 (A- 11 juin 2018, B- 25 juin 2018, C- 1 juillet 2018, D- 3 juillet 2018, E- 8 juillet 2018, F- 10 août 2018, G- 14 août 2018)

Tableau 4 : 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

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (ouest)	Caméra 2 (pointe Noire)	Ensemble du site
Première apparition de glace	17 novembre 2017	5 novembre 2017	5 novembre 2017
Couvert de glace permanent	10 décembre 2017	10 décembre 2017	10 décembre 2017
Première apparition d'eau	25 juin 2018	29 juin 2018	25 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	5 juillet 2018	8 juillet 2018	8 juillet 2018

Tableau 5 : Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Baie Déception

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

2.1.4. Site d'observation à Ivujivik

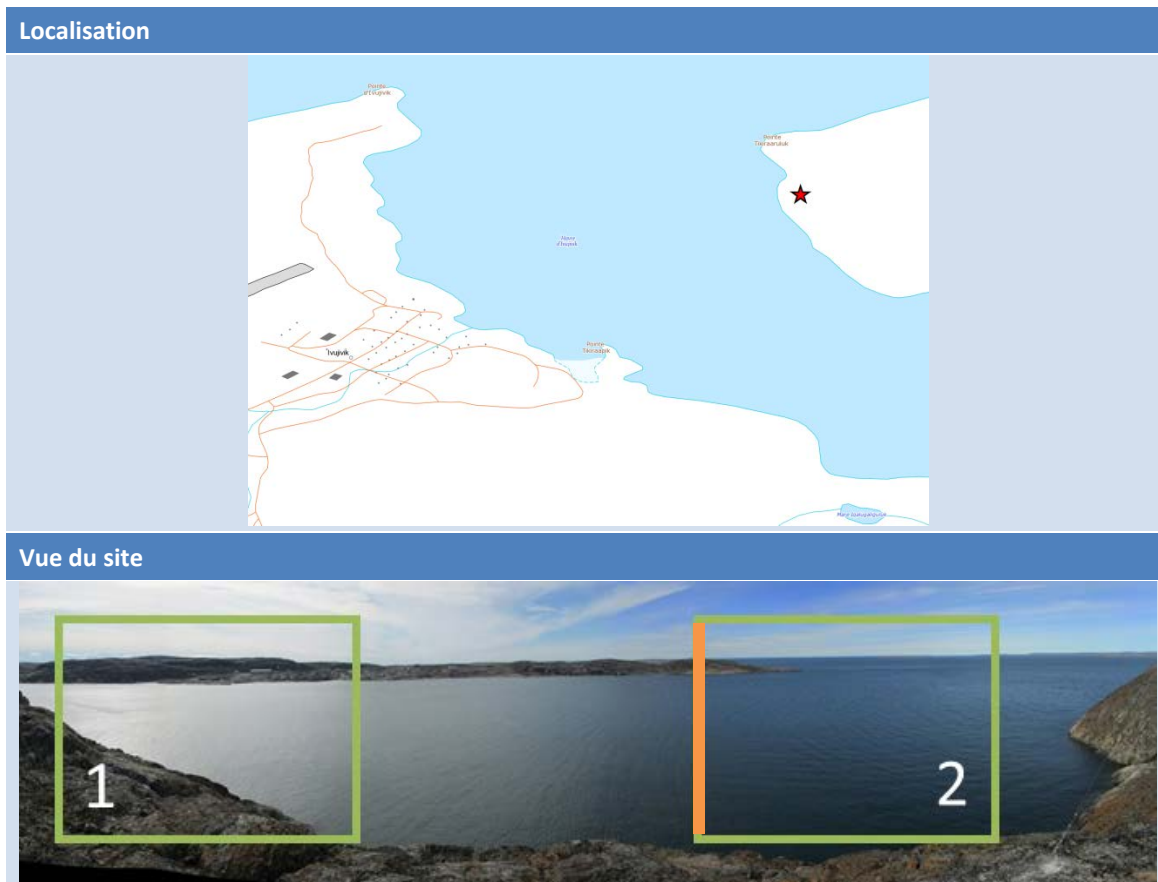


Figure 8 : Emplacement et vues des caméras situées à Ivujivik (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 8 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 diffèrent 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 6 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 8. 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.

Les toutes premières observations de glace dans la baie d'Ivujivik ont eu lieu au début novembre, les 4 et 5, avec une très faible concentration du shuga. Cela se reproduira à quelques reprises jusqu'au 4 décembre (Figure 9-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 7 décembre, du nilas et de la glace en crêpe sont observables dans la passe Digges en début de journée. Cette glace pénétrera dans la baie en après-midi à la marée descendante avec un vent frais du nord qui passera à une bonne brise du nord-nord-ouest (Figure 9-B). Le vent frais passera au nord-ouest la nuit suivante et, avec la marée montante, la glace sera poussée dans la baie. Le fond de la baie sera rempli de glace plus broyée alors que vers l'embouchure, des crêpes seront bien visibles (Figure 9-C). La passe sera libre de glace à ce moment. La glace quittera la baie le jour suivant avec un vent frais du sud-ouest. La glace reviendra du large le 11 décembre sous forme de sorbet et de crêpes en fin de journée avec la marée montante. Le 12 décembre, une bonne brise de l'ouest-sud-ouest déplacera les crêpes vers la rive est de la baie (Figure 9-D). Le 13 décembre, la baie se vide lors d'une marée descendante combinée à une bonne brise du sud. La glace est visible dans la passe Digges. Le 14 décembre, du sorbet et du nilas en formation dans la passe pénètre dans la baie. Ils sont poussés devant le village par une petite brise de l'est-sud-est. Le lendemain matin, le fond de la baie est recouvert de nilas clair et de la nouvelle glace est poussée dans la baie par un vent frais du nord-nord-est (Figure 9-E). Une partie de la glace poussée bloque à l'embouchure de la baie faisant une barrière avec la passe. La barrière cèdera rapidement et le 16 décembre, sous un grand frais du nord, de la nouvelle glace fera son entrée dans la baie pour former une banquise serrée (Figure 9-F). La banquise y demeurera fixe. Dans le détroit la glace sera mobile jusqu'au 1^{er} janvier 2018.

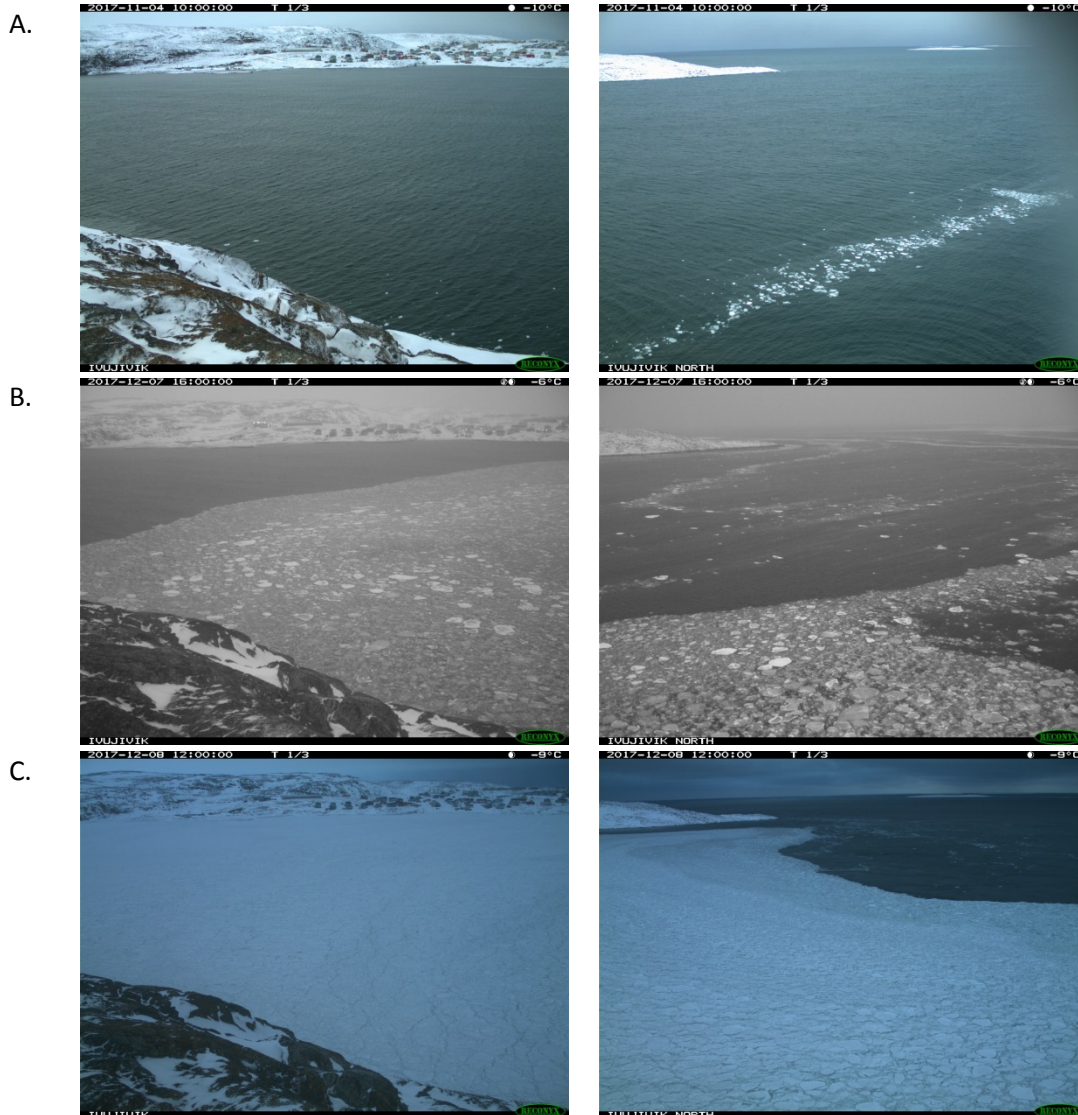
Comme les années précédentes, de l'eau apparaît dans une petite région au nord de la pointe d'Ivujivik au début février (Figure 10-A). La polynie restera visible jusqu'au 10 février. Elle réapparaîtra le 2 mars mais avec une plus grande étendue. Le 4 mars, une ouverture apparaît dans la passe en partant de la polynie et s'étendant vers le nord-est. La glace de toute la passe est ensuite mobilisée (Figure 10-B). Le 6 mars en matinée, deux fractures sont visibles à l'entrée de la baie dans la banquise encore intacte. En après-midi, avec la marée descendante et de très faibles vents, la fracture la plus près de la passe Digges s'est ouverte et le morceau de banquise s'est mis en mouvement. Le couvert de glace redeviendra complet le 9 mars lors de la marée haute en après-midi. Le vent souffle alors une petite brise du sud-ouest. Le 19 mars, la fracture apparue le 6 mars mais demeurée inactive s'ouvre et emportera vers le large le morceau de banquise (Figure 10-C). La glace demeurera mobile en concentration variable jusqu'au 7 avril. Les deux semaines suivantes, le couvert sera fixe à proximité du village mais de l'eau semble visible au loin à l'occasion. Le 21 avril, le couvert de glace dans la baie redevient partiellement mobile et des apparitions d'eau surviennent plus près de la côte. Le 23 avril, un nouveau décrochement de la banquise se produit à l'embouchure de la baie malgré une marée montante et une jolie brise du nord-est (Figure 10-D). Le 29 avril, un décrochement survient plus profondément dans la baie de sorte que l'eau atteint la limite de la baie telle que définie en introduction de cette section. La passe est alors pratiquement libre de glace (Figure 10-E). Cette date n'a pas été considérée comme la première apparition d'eau car l'évènement ne relevait pas de la fonte. Il est cependant important de le noter car une modification du régime des glaces dans la passe peut affecter la stabilité du couvert dans la baie. Par la suite, des concentrations

variables de glace se succéderont jours après jours jusqu'au début juin (Figure 10-F). Durant cette période, peu de journées où le couvert est complet et immobile sont observées.

Les premiers signes de fonte sur la banquise intacte apparaissent vers le 28 mai mais demeurent léger avec des températures encore sous le point de congélation. Les signes de détérioration de la banquise sont plus présents vers le 10 juin alors que de plus en plus de mares de fonte sont visibles (Figure 11-A). La banquise commence également à se désintégrer à la limite du couvert mobile. La température atteint alors 3°C. La désintégration se poursuit le 14 juin puis, le 15 juin, la banquise a reculé en deçà de la limite définie pour la baie sous l'effet de la pression des glaces mobiles venant de la passe (Figure 11-B). La banquise continue de se détériorer sur place puis le 17 juin au matin, elle se met en mouvement dans la partie nord de la baie. Une petite brise du nord-est avec la marée montante apportent cependant une grande quantité de radeaux en provenance de la passe plus tard en journée. Le couvert demeurera compact jusqu'au 20 juin sous l'effet de vents septentrionaux. Le 21 juin en matinée, après une nuit de bonnes brises du sud, le nord de la baie est libre de glace. Le vent passant au nord-ouest en après-midi, la baie se remplit à nouveau de glace. Dans le sud de la baie, ce n'est que le 22 juin que la glace se met légèrement en mouvement et que l'eau est visible (Figure 11-C). Jusqu'au 24 juin, les vents majoritairement de l'ouest et du nord-ouest maintiendront une pression sur le couvert de glace mobile faisant en sorte qu'il demeurera dans la baie, et dans la passe Digges. Le vent passera au sud par la suite et une bonne brise se transformant progressivement en tempête fera en sorte que la banquise décrochera peu à peu durant la journée du 25 juin (Figure 11-D). En fin de journée, uniquement la banquise au fond de la baie sera encore présente. L'infrastructure se trouve alors encore à l'intérieur de la banquise. Le lendemain, à l'aube, la baie sera remplie de glace. Pendant la semaine suivante, les vents majoritairement de l'ouest et du nord-ouest maintiendront de nouveau le couvert de glace mobile à l'intérieur de la baie (Figure 11-E). Pendant cette période, la banquise continuera de se détériorer et de perdre en superficie. Le 3 juillet, le couvert deviendra moins serré puis le 4 juillet en matinée, sous l'effet d'une jolie brise du sud-ouest, la baie se videra temporairement de glace. C'est alors la première fois que l'infrastructure est exposée bien qu'un mince cordon soit toujours présent sur ses côtés (Figure 11-F). Ce dernier disparaîtra totalement le 14 juillet. Le 4 juillet en après-midi, malgré des vents toujours du sud-ouest et une marée descendante, la baie se remplit de nouveau de glace pour former une banquise serrée. De la glace en mouvement sera présente tout le mois de juillet en concentration variable. Des épisodes de banquises très serrées surviendront dans les 3 premières semaines du mois. À partir du 22 juillet, et jusqu'au milieu de la première semaine d'août, le maximum de concentration journalier dans la baie variera de 0 à 30% (banquise très lâche). Le 1^{er} août, des blocs plus épais sont visibles dans la baie mais ils ne forment qu'un couvert très lâche (Figure 11-G). La pente de l'estran autour de l'infrastructure maritime étant assez importante, peu de radeaux de glace viennent s'y échouer. Cela permet cependant à des blocs plus épais d'atteindre l'infrastructure. À partir du 4 août, la concentration de glace augmente dans la passe Digges et dans la baie. Le 5 août, le couvert formera à certain moment une banquise serrée lors de la marée montante (Figure 11-H). Une petite brise du sud-ouest souffle à ce moment. La situation se reproduira le 10 août lors de la marée montante mais

initiiée par une bonne brise du nord-ouest qui passera en petite brise de l'ouest (Figure 11-I). À chacun de ces évènements, la taille des fragments de glace est faible mais la glace ne semble pas dans un état de détérioration avancé. Dans les heures suivantes du 10 août, la direction du vent continuera de tourner vers le sud, jusqu'au sud-sud-est, soit dans l'alignement de la baie. Une jolie brise évacuera alors toute la glace de la baie. À partir du 12 août, la baie et la passe seront à l'eau libre pour le reste de l'été.

Pour conclure cette section, le Tableau 8 synthétise les observations faites au courant de la saison 2017-2018 à partir des caméras installées à Ivujivik. Le Tableau 9 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 pour la baie en face du village d'Ivujivik.



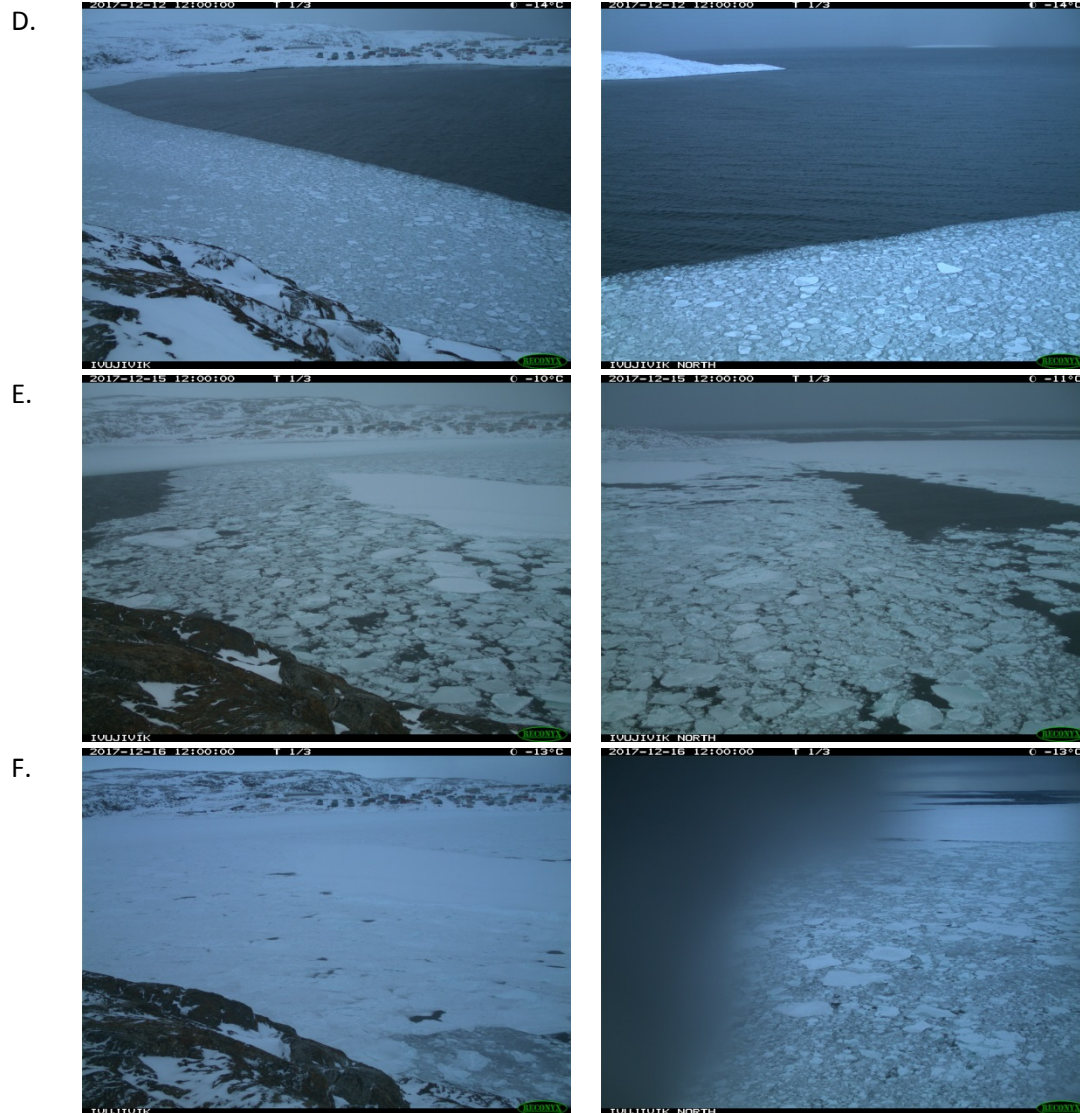


Figure 9 : Évolution de l'englacement à Iqaluit en 2017 (A- 4 novembre 2017, B- 7 décembre 2018, C- 8 décembre 2018, D- 12 décembre 2017, E- 15 décembre 2017, F- 16 décembre 2017)

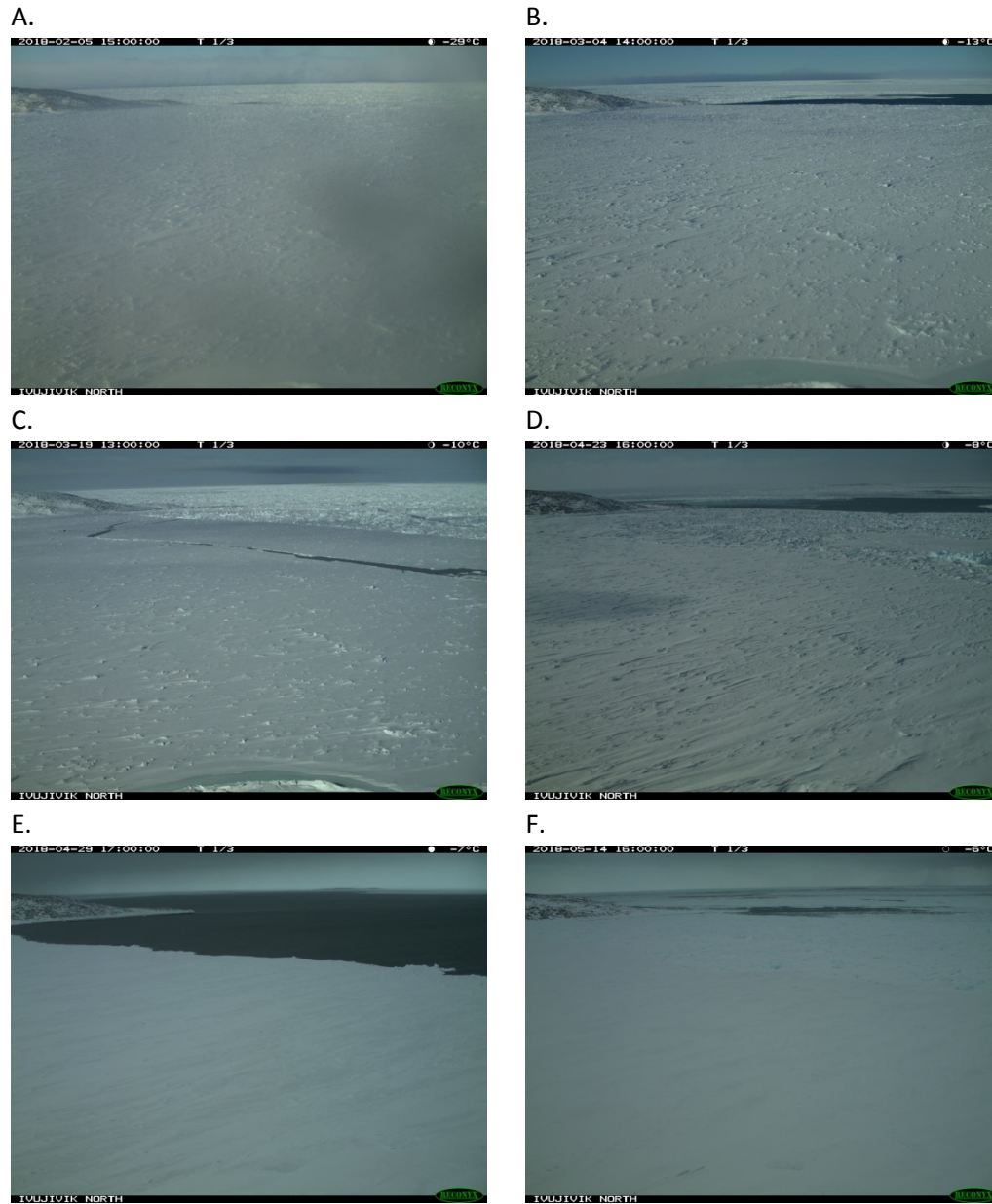
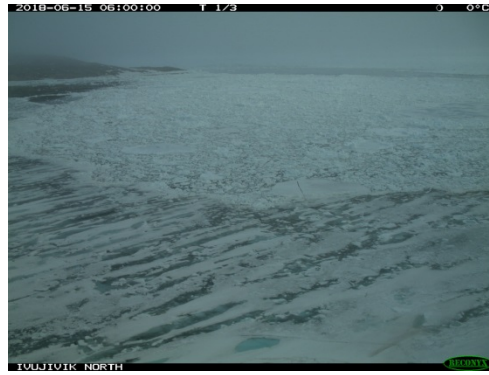


Figure 10 : Évolution des conditions du couvert de glace durant l'hiver 2018 à Ivujivik (A- 5 février 2018, B- 4 mars 2018, C- 19 mars 2018, D- 23 avril 2018, E- 29 avril 2018, F- 14 mai 2018)

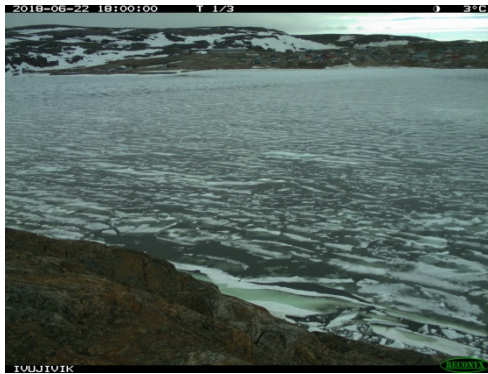
A.



B.



C.



D.



E.



F.



G.



H.



I.

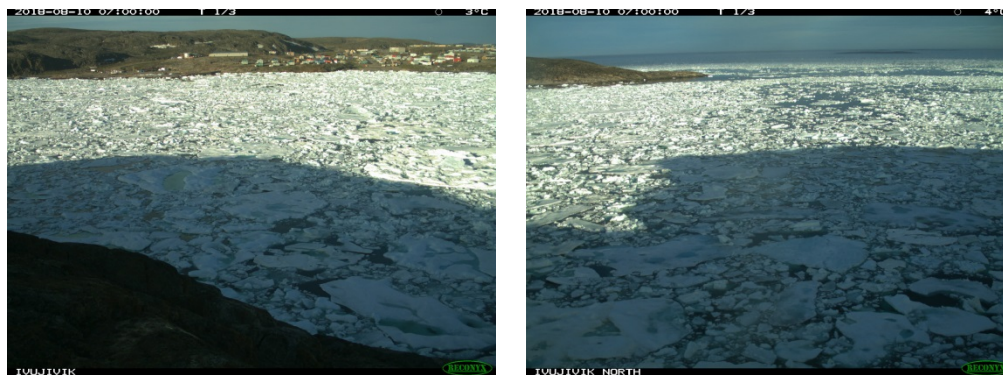


Figure 11 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Ivujivik en 2018 (A- 10 juin 2018, B- 15 juin 2018, C- 22 juin 2018, D- 25 juin 2018, E- 29 juin 2018, F- 4 juillet 2018, G- 1 août 2018, H- 5 août 2018, I- 10 août 2018)

Tableau 6 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Ivujivik entre octobre 2017 et août 2018

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Ouest)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	7 décembre 2017	7 décembre 2017	7 décembre 2017
Couvert de glace permanent	16 décembre 2017	16 décembre 2017	16 décembre 2017
Première apparition d'eau	22 juin 2018	15 juin 2018	15 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	13 juillet 2018	13 juillet 2018	13 juillet 2018

Tableau 7 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Ivujivik

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

2.1.5. Site d'observation à Umiujaq

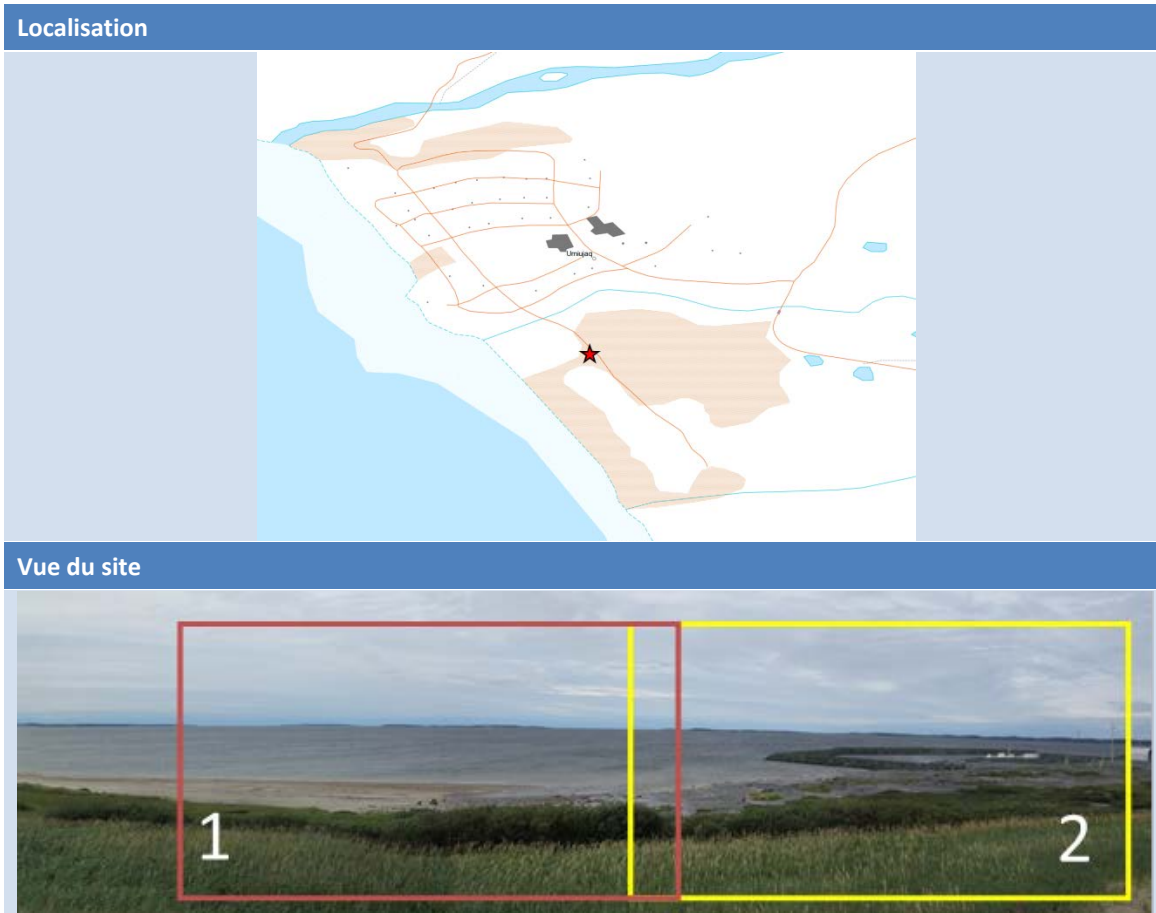


Figure 12 : Emplacement et vues des caméras situées à Umiujaq (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 12 illustre l'emplacement et les vues des deux caméras installées à Umiujaq.

À l'automne 2017, la première apparition de glace a été observée à l'intérieur du brise-lames de l'infrastructure maritime sous forme de sorbet le 22 novembre, soit approximativement la même date que l'année précédente. Alors qu'en 2016, la glace y était demeurée jusqu'au couvert complet, en 2017, elle disparaîtra dès le lendemain. De nouvelles traces de sorbet sont visibles les 1^{er} et 2 décembre. Le 9 décembre, du nilas se forme à l'intérieur de l'infrastructure maritime. À partir du 11 décembre, ce dernier sera fixe pour l'hiver. Le lendemain, de la gadoue est visible le long du littoral accompagné d'une bande de sorbet au large (Figure 13-A). Du nilas sombre sera visible lors des matinées du 15 et 16 décembre alors que la marée est descendante. Le lendemain, un grand frais de l'ouest amènera la formation d'un sorbet épais le long de la côte (Figure 13-B). Les 18 et 19 décembre, de la nouvelle glace en provenance du nord est visible dans le détroit de Manitounouk. Plus près de la côte, du nilas est visible (Figure 13-C). Le 20 décembre à l'aube, une banquise serrée s'étend le long du littoral à la marée haute alors que

souffle une jolie brise du sud-sud-ouest. En journée, la jolie brise passera à l'est ce qui remobilisera le couvert de glace. Le 21 décembre, la banquise viendra de nouveau se serrer le long de la côte. Elle demeurera fixe jusqu'au 23 où un grand frais de l'est fera décrocher de quelques dizaines de mètres la banquise à marée haute (Figure 13-D). L'ouverture se transformera rapidement en nilas lors de la marée descendante alors que le vent ne sera plus qu'une bonne brise du sud-est. Suite à cela, le couvert sera fixe pour l'hiver.

Au printemps 2018, les premiers signes de fonte sur la banquise apparaissent lors de la dernière semaine de mai. La fonte se poursuit sur place au début juin alors que la température monte légèrement, mais régulièrement, au-dessus de zéro. Les signes les plus visibles se constatent au nord-ouest de l'infrastructure maritime. Le 12 juin, une première apparition d'eau survient à cet endroit. L'ouverture s'étend vers le sud jusqu'au 14 juin où, en présence d'une marée descendante, la banquise fortement pourrie décroche (Figure 14-A). Malgré une petite brise du nord-ouest, la glace est vite amenée loin du littoral. Elle sera ramenée vers la rive lors de la marée montante le lendemain. Jusqu'au 20 juin, un couvert tantôt lâche, tantôt très lâche, avec ponctuellement des périodes d'eau libre, défile devant les caméras. À partir du 21 juin, une banquise dans un état de détérioration moins avancé fait son apparition. Le 23 juin, une bonne brise de l'ouest amène la formation d'une banquise très serrée le long de la côte à la marée haute (Figure 14-B). La banquise demeurera très serrée jusqu'au 25 juin où le vent passant au sud-ouest, le couvert de glace deviendra lâche. Puis le lendemain, la banquise deviendra très lâche près des berges avec la présence d'une bonne brise de l'est. La concentration de glace diminuera dans les jours suivants. L'infrastructure maritime sera en eau libre le 29 juin tandis qu'il faudra attendre au 1 juillet pour le détroit de Manitounuk. Les 3 et 4 juillet, de la glace en provenance du sud apparaît, poussée par une jolie brise du sud-sud-ouest (Figure 14-C). Dans les jours suivants, la concentration variera en fonction des vents. Le 5 juillet, un vent frais de l'est repoussera les glaces vers le large alors que le 7 juillet, une jolie brise du sud ramènera une banquise lâche et pourrie près de la côte (Figure 14-D). La fonte se poursuivra encore quelques jours puis le détroit sera en eau libre pour l'été à partir du 11 juillet.

Pour conclure cette section, le Tableau 10 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2017-2018 à partir des caméras installées à Umiujaq. Le Tableau 9 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 pour le détroit en face du village d'Umiujaq.

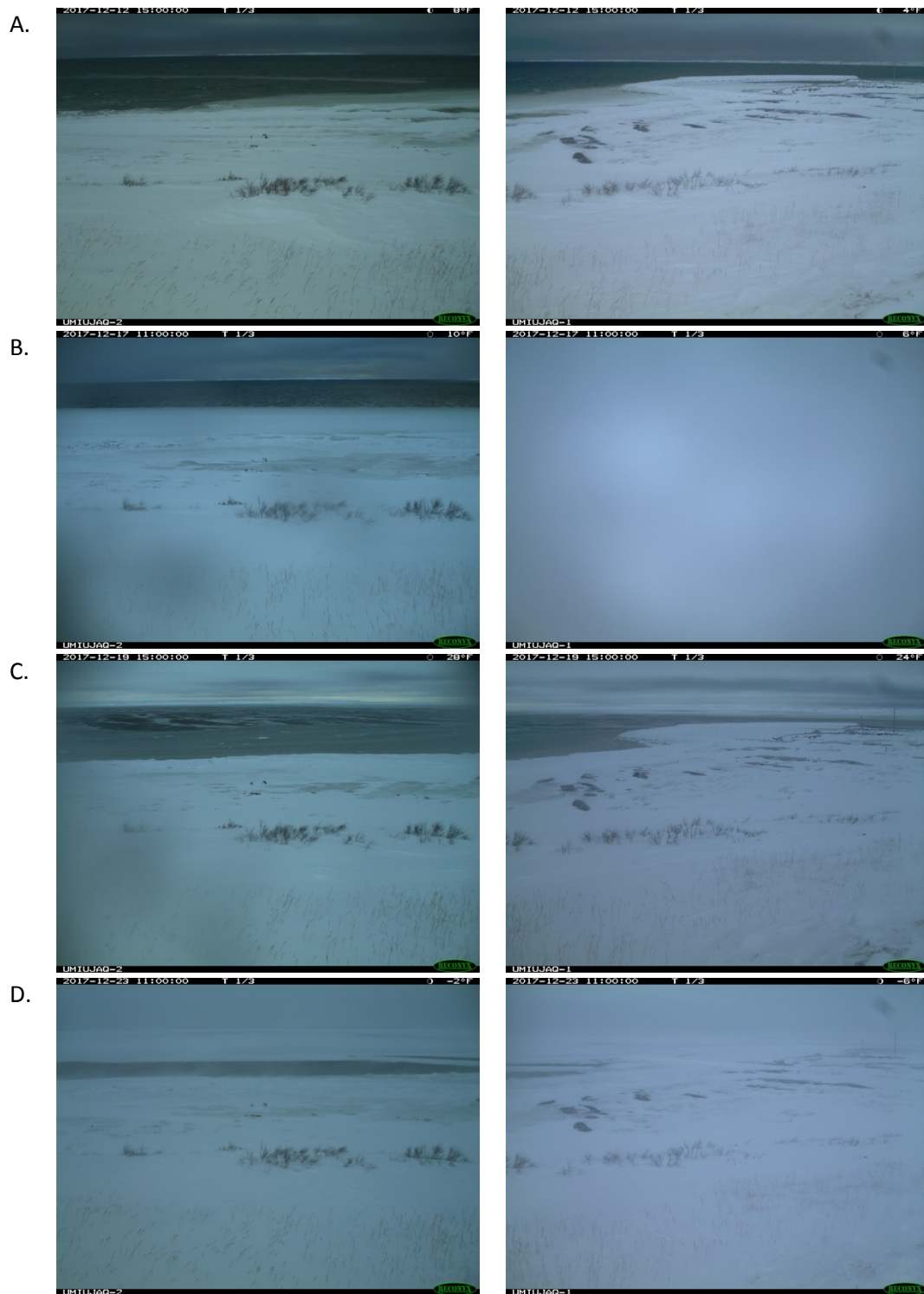


Figure 13 : Évolution de l'englacement 2017 à Umiujaq (A- 12 décembre 2017, B- 17 décembre 2017, C- 19 décembre 2017, D- 23 décembre 2017)

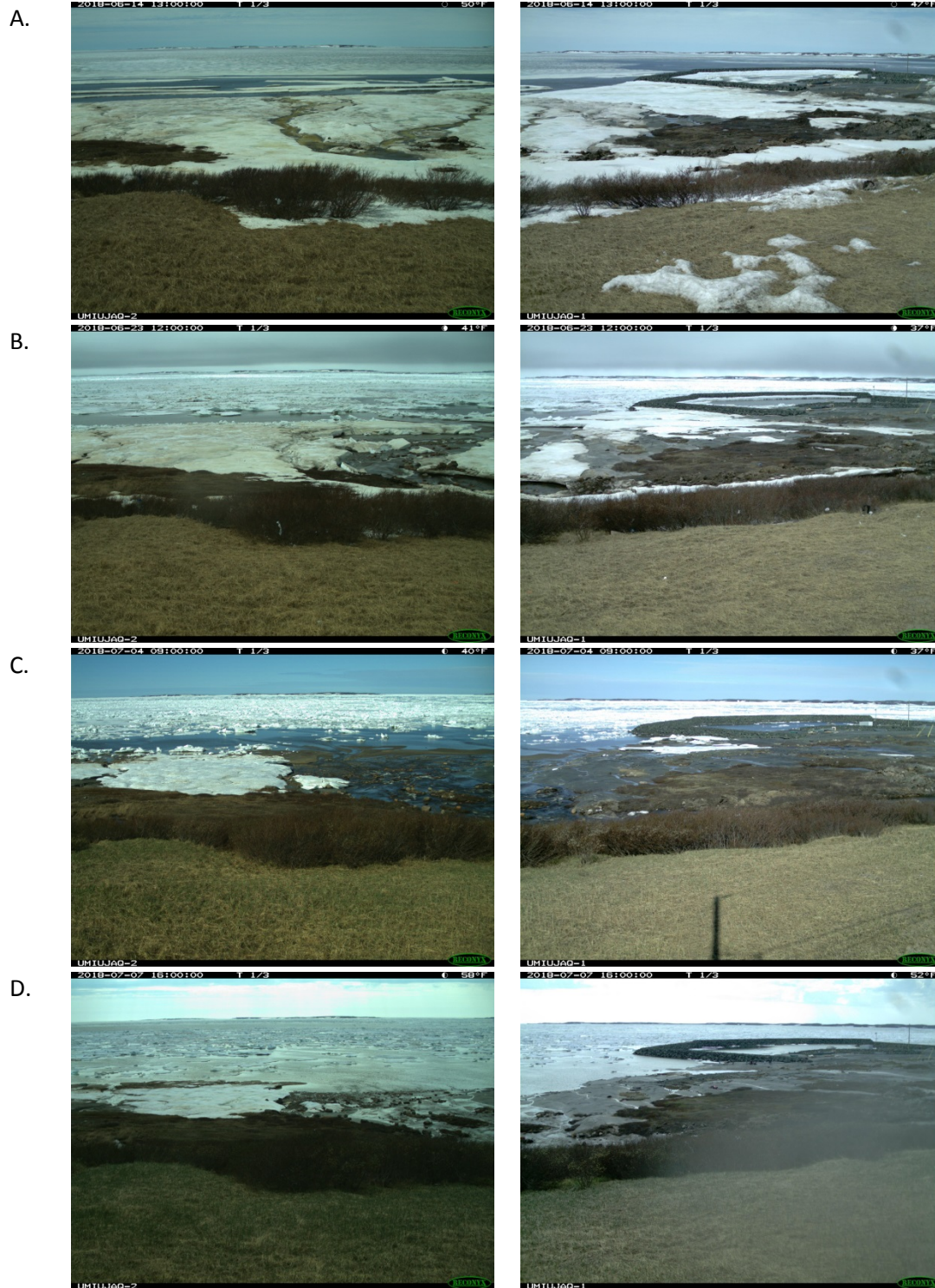


Figure 14 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Umiujaq en 2018 (A- 14 juin 2018, B- 23 juin 2018, C- 4 juillet 2018, D- 7 juillet 2018)

Tableau 8 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Umiujaq entre octobre 2017 et août 2018

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Sud)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	12 décembre 2017	12 décembre 2017	12 décembre 2017
Couvert de glace permanent	24 décembre 2017	24 décembre 2017	24 décembre 2017
Première apparition d'eau	14 juin 2018	12 juin 2018	12 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	1 ^{er} juillet 2018	1 ^{er} juillet 2018	1 ^{er} juillet 2018

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

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

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



Figure 15 : 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 17 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.

La Figure 16 illustre l'évolution, très rapide, de l'englacement à l'automne 2017. À partir du 7 décembre, la température de l'air commence à descendre significativement sous le point de congélation et se maintient sous les -10°C . Le 10 décembre, après une période de petite à bonne brise venant du nord-est, soit parallèlement au détroit de Manitounuk, le vent tourne pour devenir une bonne brise de l'est ce qui a pour effet de calmer la mer. Du nilas se forme aussitôt (Figure 16-A). Le 11 décembre, le vent redevient une jolie brise du nord-est ce qui a pour effet de partiellement défaire le couvert qui prenait place (Figure 16-B). Le 12 décembre à l'aube, après que la température ait descendue aux environs de -20°C et en présence d'une petite brise du nord-ouest perpendiculaire au détroit, le nilas se reforme et passe rapidement du sombre au

clair (Figure 16-C). Le couvert est alors en place pour l'hiver. La banquise semble également formée à l'ouest des îles Manitounuk.

L'évolution de la fonte de la glace au printemps 2018 à Kuujjuarapik est illustrée à la Figure 19. À la fin avril 2018, une légère fonte du couvert de neige est remarquée les 23 et 24 avril alors que la température dépasse 0°C et monte jusqu'à 5°C. Un peu plus d'une semaine plus tard, de l'eau apparaît sur l'estran au sud-ouest de la baie. De l'eau douce provenant entre autre 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 se poursuit et le 8 mai, la limite de l'eau peut être distinguée sous le couvert de glace dans la zone de marnage. Les températures diminuent ensuite ralentissant les processus de fonte. À partir du 18 mai, les températures augmentent de nouveau mais dépassent peu le point de congélation. Le 27 mai, la température dépasse les 13°C puis le lendemain, de l'eau commence à faire son apparition dans la zone intertidale. Il faudra encore 2 semaines de fonte avant que de l'eau apparaisse hors de la zone intertidale le 12 juin (Figure 17-A). Le 13 juin, la glace commence à se fracturer et à se mobiliser près du littoral. La banquise s'éloignera progressivement des côtes pour offrir, le 19 juin, une grande zone libre de glace (Figure 17-B). Une jolie brise du large vient repousser la glace vers la côte le 20 juin pour former une banquise serrée (Figure 17-C). Le vent passe au sud et sud-ouest les 21 et 22 juin ce qui a pour effet d'évacuer la glace mobile. Il ne reste alors qu'une banquise côtière le long des îles Manitounuk et dans la partie nord-est du détroit. Le 23 juin, la glace revient de nouveau former une banquise serrée devant les caméras. La banquise devient ensuite plus lâche les 24 et 25 juin alors que la banquise côtière dans le détroit disparaît peu à peu (Figure 17-D). Le 26 juin, le secteur est libre de glace pour la première fois et le demeurera.

Pour conclure cette section, le Tableau 13 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 14 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2017 et août 2018 dans le détroit de Manitounuk à la hauteur de Kuujjuarapik.

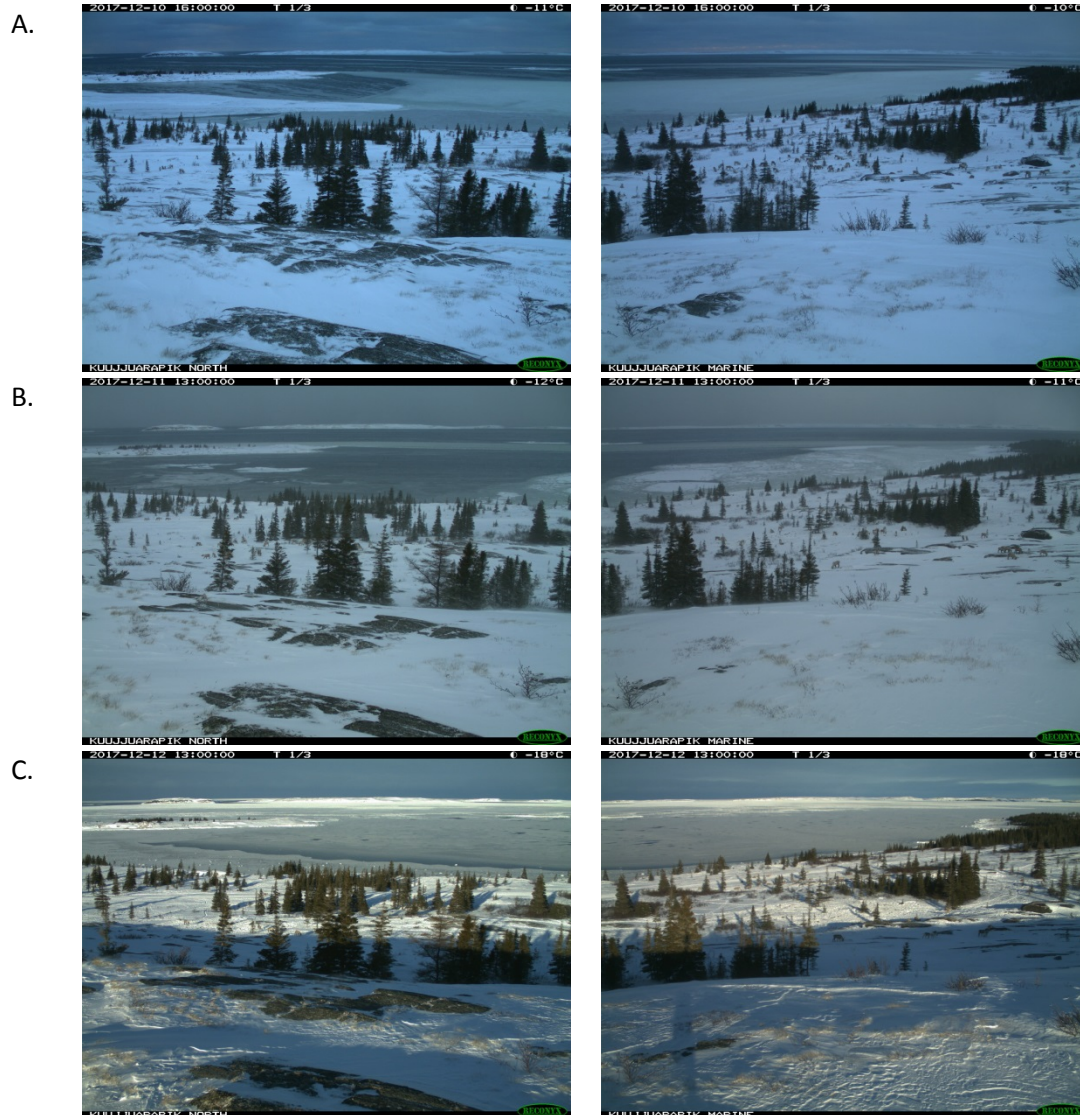


Figure 16 : Évolution de l'englacement 2017 à Kuujjuarapik (A- 10 décembre 2017, B- 11 décembre 2017, C- 12 décembre 2017)

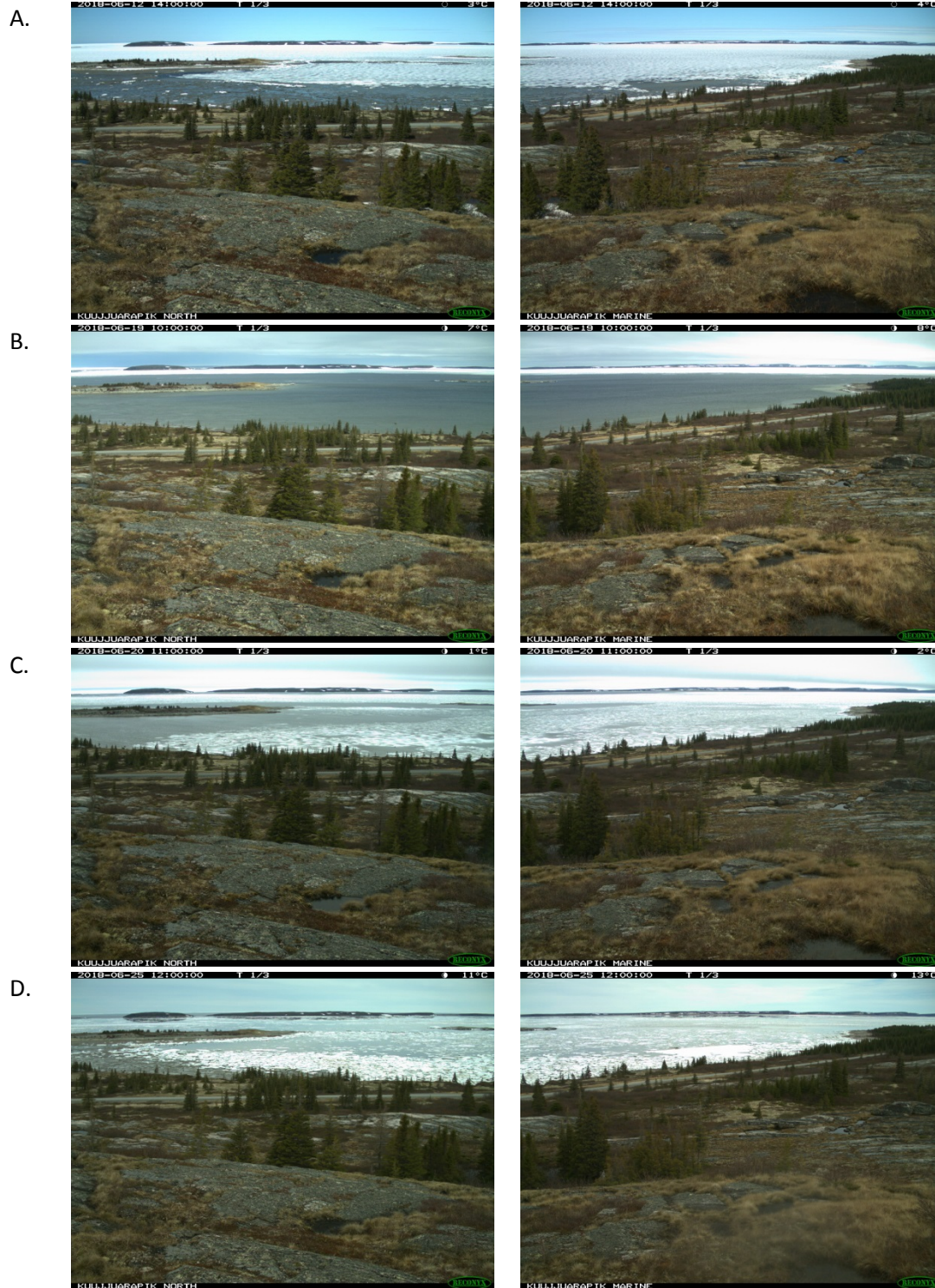


Figure 17 : Évolution de la fonte du couvert de glace à Kuujuaupik en 2018 (A- 12 juin 2018, B- 19 juin 2018, C- 20 juin 2018, D- 26 juin 2018)

Tableau 10 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2017 et août 2018

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Sud)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	10 décembre 2017	10 décembre 2017	10 décembre 2017
Couvert de glace permanent	12 décembre 2017	12 décembre 2017	12 décembre 2017
Première apparition d'eau	12 juin 2018	13 juin 2018	12 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	26 juin 2018	26 juin 2018	26 juin 2018

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

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

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

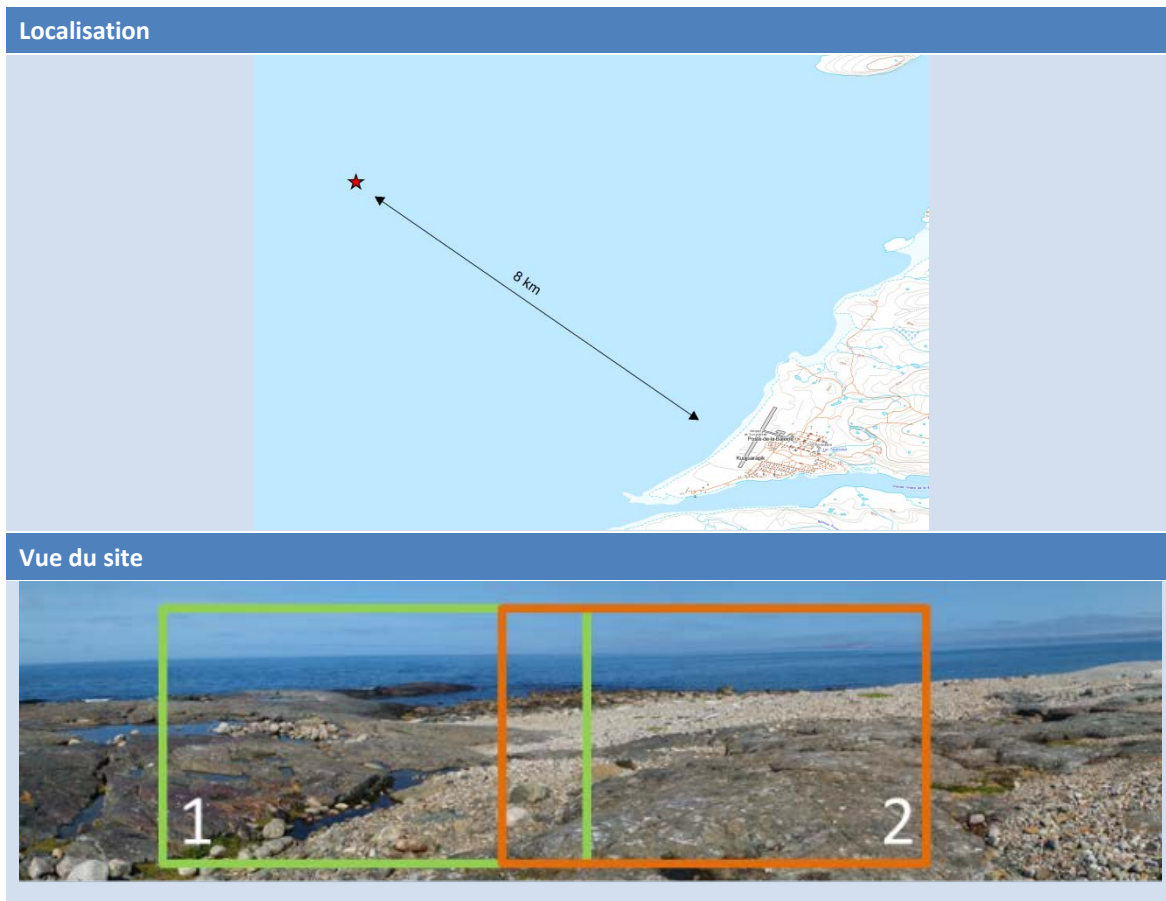


Figure 18 : Emplacement et vues des caméras situées sur l'île Gillis au nord-ouest du village de Kuujjuarapik (caméra 1-nord-nord-ouest, caméra 2-nord-nord-est)

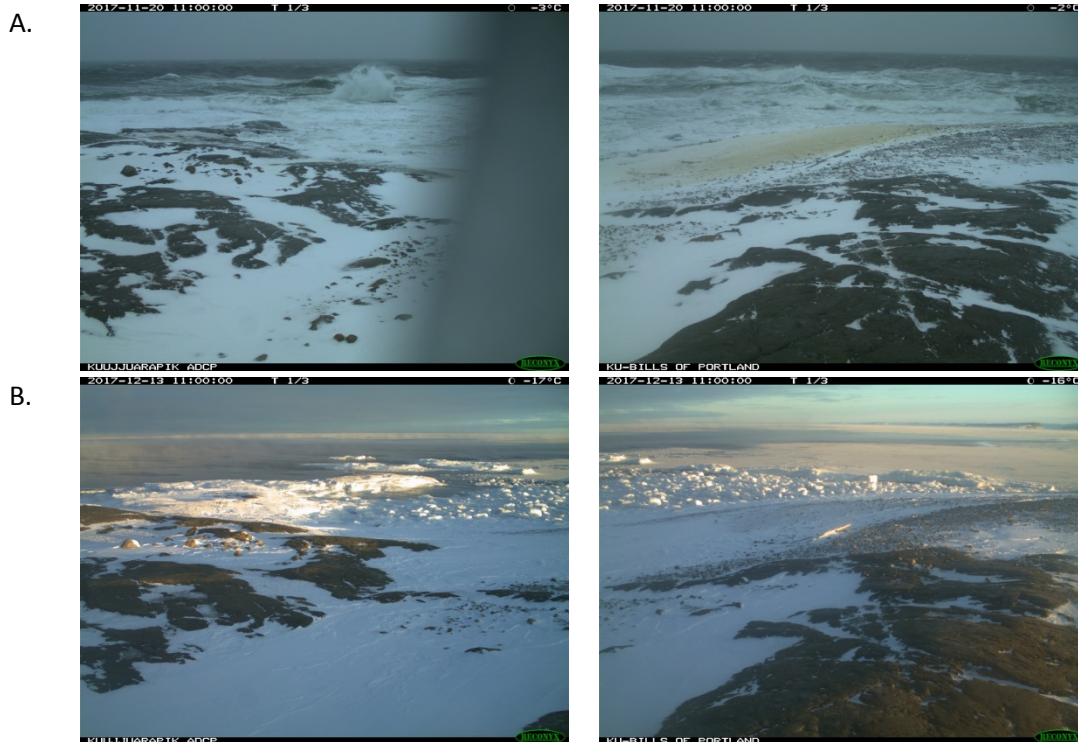
La Figure 18 illustre l'emplacement et la vue des deux caméras situées sur l'île Gillis à environ 8km au nord-ouest du village de Kuujjuarapik

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 (Figure 19-A). Les premières apparitions de glace sont visibles le 12 décembre sous forme de nilas. En absence de vents, ou en présence de vents très faibles, une formation de nilas se produit mais dès que le vent se lève, la glace se défait. Selon la direction des vents, beaucoup de sorbet et de nilas fragmenté sont poussés sur l'île et forment des monticules. C'est ce que l'on peut voir à l'aube le 13 décembre (Figure 19-B). Le 14 décembre, le nilas fragmenté est visible sous forme de crêpes. Deux jours plus tard, le couvert est complet mais demeure en mouvement. La banquise se fragmentera et se déplacera dans les jours suivants. Le 22 décembre, en présence d'une petite brise du sud, davantage de nilas est présent (Figure 19-C). Le 27 décembre, le couvert est de nouveau complet. Il est composé principalement de sarrasins à proximité et de plaque de nilas au loin. Le couvert

restera complet jusqu'au 1^{er} janvier alors que des fractures apparaissent. La glace est ensuite remobilisée. Durant la semaine suivante, la banquise est poussée à de nombreuses reprises vers l'île créant ainsi des crêtes de pression (Figure 19-D). Le 12 janvier, le couvert est complet. Les crêtes de pression masquent partiellement la nature de la banquise mais elle est généralement formée de sarrasins à proximité et de radeaux de nilas plus loin (Figure 19-E).

Au printemps 2018, la première apparition d'eau survient le 11 juin avec l'ouverture d'une fracture dans la banquise. Une jolie brise pousse alors une partie de la banquise vers le nord-est lors de la marée descendante (Figure 20-A). Lors de la marée montante suivante, avec une petite brise du nord, la banquise revient en force vers l'île et crée, sous l'effet de la pression, un hummock de plusieurs mètres de haut (Figure 20-B). Par la suite, la banquise devient lâche et très lâche, jusqu'au 18 juin où, sous l'effet d'une petite brise de l'ouest, la banquise se resserre près du rivage (Figure 20-C). Jusqu'à ce moment, une banquise côtière est toujours en place du côté sud-est entre l'île Gillis, l'île Bill of Portland et le continent. Le 18 juin, cette banquise se fracture. Le lendemain à l'aube, un nouvel hummock s'est formé juste à l'ouest de celui formé le 12 juin après une nuit sous l'effet d'une jolie brise de l'ouest (Figure 20-D). Plus au large, la banquise est formée de sarrasins serrés. Le 22 juin, les hummocks s'effritent et dans la nuit suivante, la marée haute soulève et évacue les deux monticules (Figure 20-E). Un peu de glace en dérive demeurera visible jusqu'au 24 juin puis le 25, le secteur sera libre de glace pour l'été.

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 sur l'île Gillis au large 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 entre l'île Gillis et le village de Kuujjuarapik.



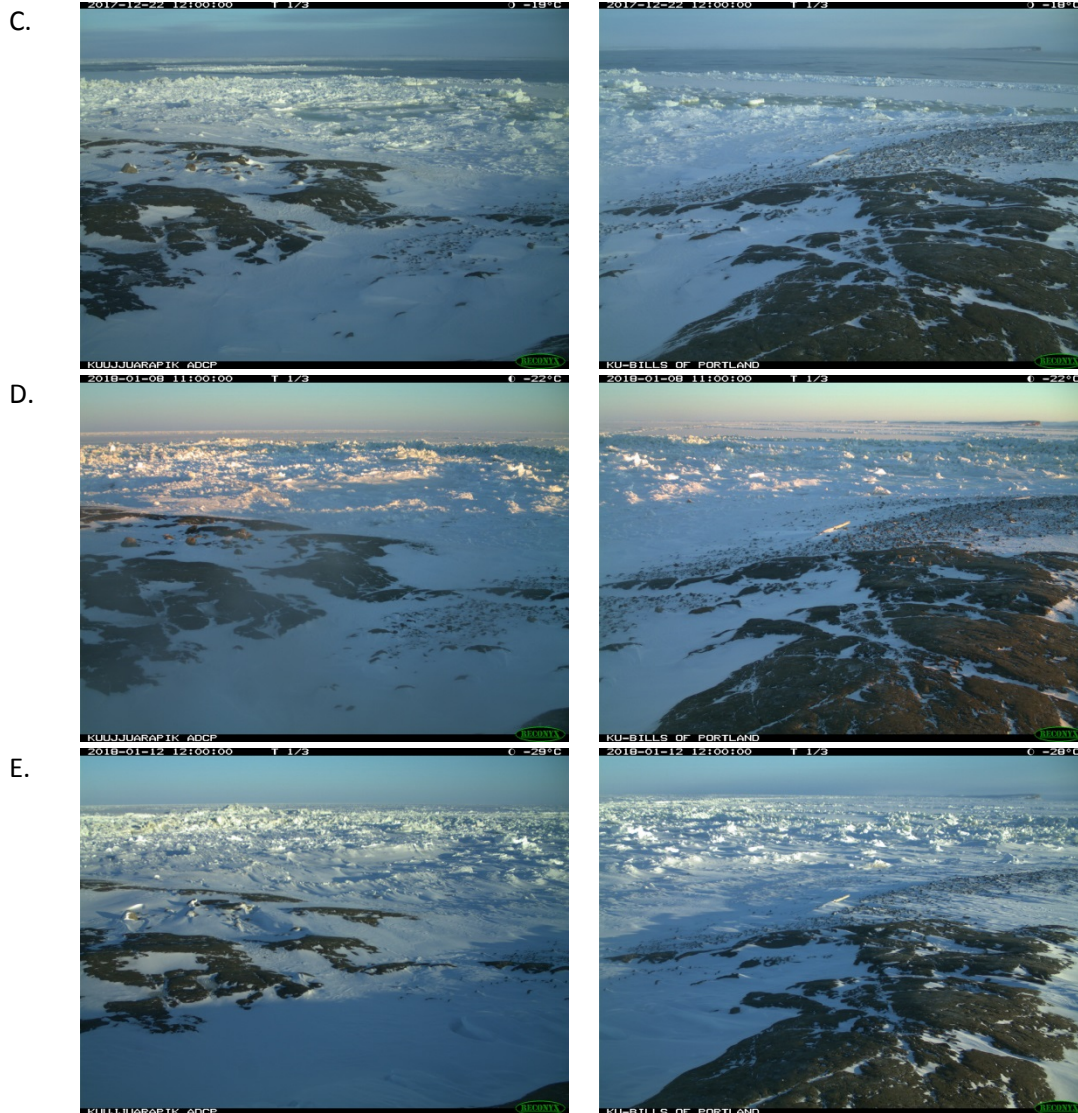


Figure 19 : Évolution de l'englacement 2017 à proximité de l'île Gillis à Kuujjuarapik (A- 20 novembre 2017, B- 13 décembre 2017, C- 22 décembre 2017, D- 8 janvier 2018, E- 12 janvier 2018)

A.



B.



C.



D.



E.



Figure 20 : Évolution de la fonte du couvert de glace à proximité de l'île Gillis en face du village de Kuujjuarapik en 2018 (A- 11 juin 2018, B- 12 juin 2018, C- 18 juin 2018, D- 19 juin 2018, E- 22 juin 2018)

Tableau 12 : Sommaire des observations de la glace recueillies à partir des photographies des caméras situées sur l'île Gillis au large de Kuujjuarapik entre octobre 2017 et août 2018

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1	Caméra 2	Ensemble du site
Première apparition de glace	12 décembre 2017	12 décembre 2017	12 décembre 2017
Couvert de glace permanent	12 janvier 2018	12 janvier 2018	12 janvier 2018
Première apparition d'eau	11 juin 2018	11 juin 2018	11 juin 2018
Libre de glace pour la première fois	25 juin 2018	25 juin 2018	25 juin 2018

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

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

2.2. Traitement 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 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).

2.2.1. Rectification des photographies

La rectification des photographies nécessite de connaître les coordonnées géographiques (latitude, longitude) précises d'éléments présents sur les photos. Or, comme l'environnement sur la majorité des photos est dépourvu d'éléments anthropiques, il est difficile de déterminer ces coordonnées à partir des banques de données existantes. De plus, l'absence d'éléments facilement distinguables sur les photographies au niveau de la zone de marnage rend complexe le choix de points. Afin d'éliminer ce problème, une procédure d'acquisition de points de contrôle a été mise en place pour l'ensemble des sites à l'étude. Cette procédure est décrite dans le rapport final du projet CC09.1 (Bernier et al., 2017).

Pour les nouveaux emplacements situés sur l'île Gillis à Kuujuarapik et Hearn à Quatqaq, les points de contrôle ont été acquis lors de la tournée d'entretien en août et septembre 2018. La Figure 21 montre le trajet effectué en bateau pour l'acquisition des points de contrôle au large de l'île Gillis ainsi que la position du bateau au moment où des photographies ont été acquises. Pour l'acquisition des points de contrôle, la fréquence d'acquisition des photos a été augmentée à une (1) image toutes les 20 secondes. La Figure 22 montre la position des points de contrôle calculés, représentés par un X rouge (X) par rapport aux points de référence, représentés par des cercles bleus (O). Les lentilles des caméras Reconyx déforment sensiblement la réalité lors de la prise de photo. Un traitement est appliqué pour réduire cette déformation mais il n'est pas parfait et cela se remarque davantage pour les points les plus éloignés de la caméra. La Figure 22 montre également le résultat de la rectification sans corriger préalablement la déformation. Une ligne tiretée a été ajoutée afin de montrer la déformation circulaire causée par la lentille. Dans une situation idéale, en absence de déformation, les X à proximité de la ligne tiretée

s'aligneraient avec la lignée de ● la plus près. Le même traitement a été réalisé pour le site de l'île Hearn à Quaqtaq.

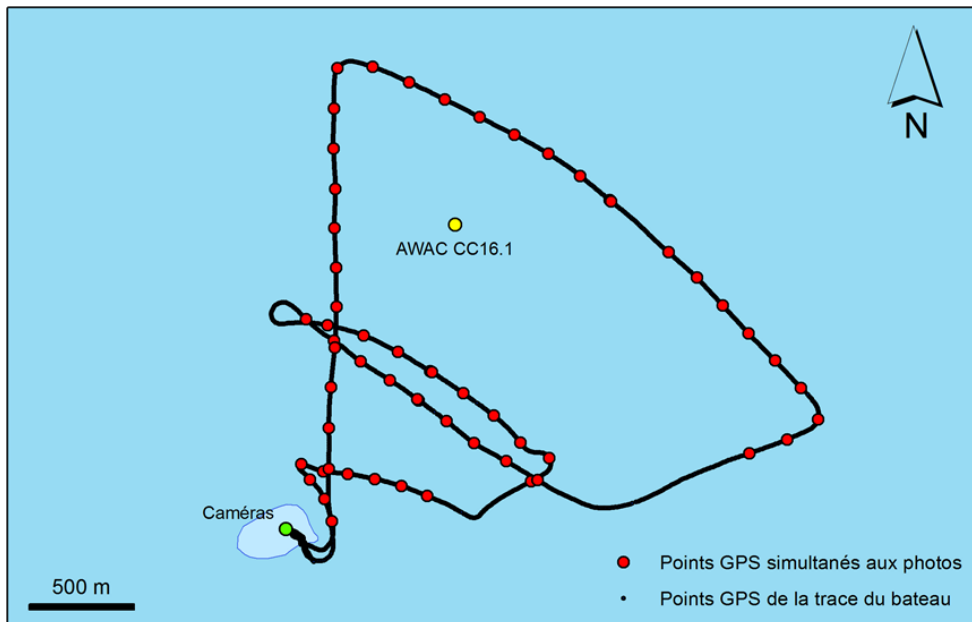


Figure 21 : Points GPS acquis en bateau pour servir de points de contrôle (haut) et emplacement du bateau sur les photos lors de la prise des points de contrôle (bas).

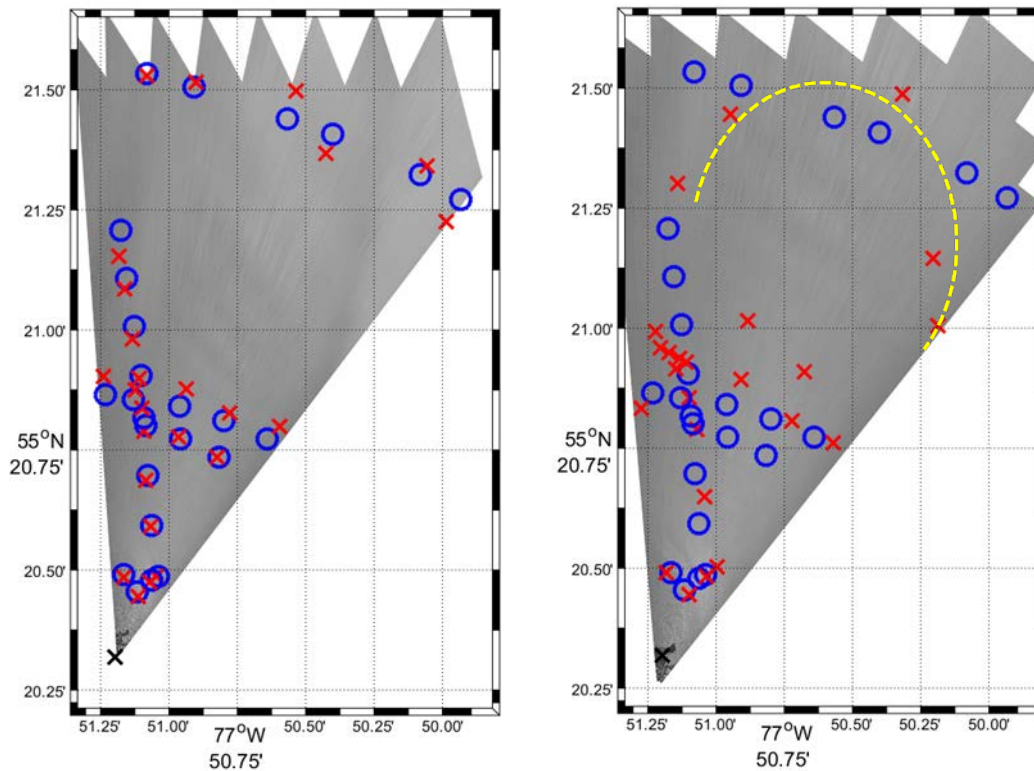


Figure 22 : Position des points de contrôle calculés (X rouge) par rapport aux points de référence (O). À gauche, résultats après avoir corrigé la déformation causée par la lentille. À droite, résultats sans la correction de la déformation

2.2.2. Classification glace/non glace

La classification glace/non glace sur les photographies comporte son lot de défis tel que discuté dans le rapport final du projet CC09.1 (Bernier et al., 2017). La classification se fait donc encore de façon semi-automatique et comporte des étapes manuelles. Dans une perspective de tenter d'automatiser la procédure par apprentissage approfondi (deep learning), une grande attention a été portée à la qualité de la classification manuelle. Ces images classifiées pourraient ainsi servir à entraîner un réseau de neurones pour la reconnaissance automatique de la glace. La qualité a donc été privilégiée à la quantité de sorte que pour la caméra située sur l'île Gillis à Kuujuarapik ne visant pas le mouillage du projet CC16.1, une photo toutes les trois heures a été traitée. Pour les caméras visant les mouillages, une photo toutes les heures a été traitée. Au total, environ **11 000** photos ont été rectifiées et classifiées. Un exemple d'image classifiée est présenté à la Figure 23. Sur l'image classifiée, le blanc représente la glace, le gris représente l'eau et le noir représente ce qui n'est pas d'intérêt (terre et ciel).

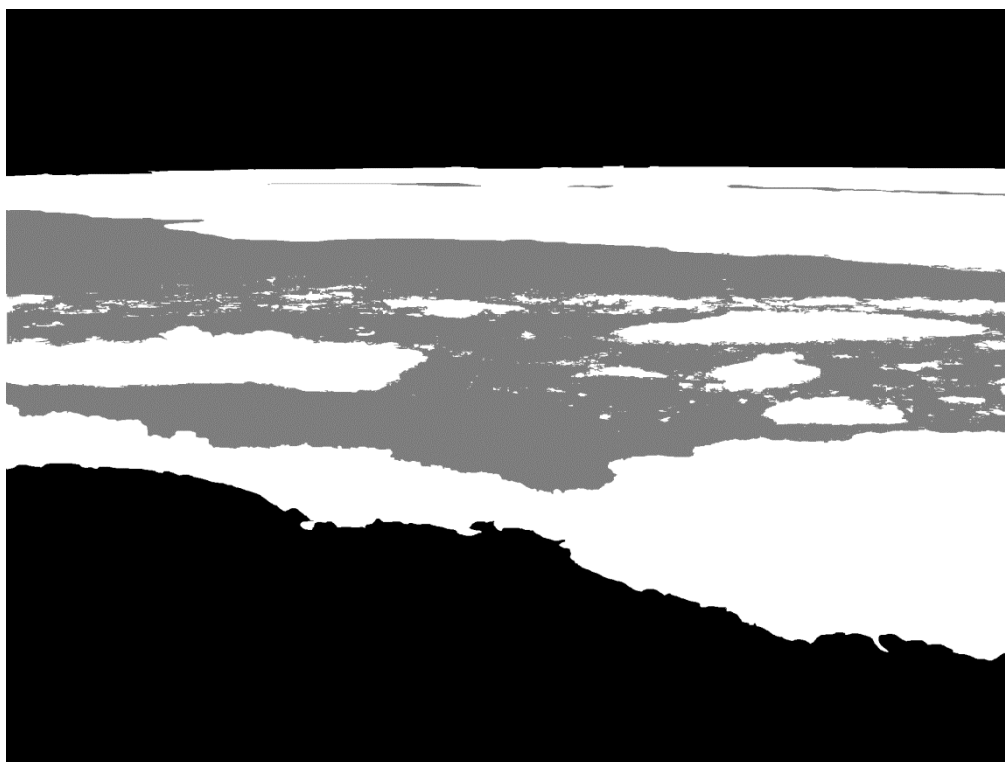


Figure 23 : Résultat (bas) d'une classification glace (blanc), eau (gris) et autre (noir) réalisée sur une photographie (haut) de Quaqtac acquise le 19 décembre 2017

2.2.3. Diffusion des photographies et des informations dérivées

L'information relative au cycle saisonnier de la glace, ainsi qu'un échantillon de photographies ont 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. Le projet CAIMAN était d'une durée de deux ans et s'est terminé en mars 2019. Un nouveau calendrier est en production pour l'année 2019-2020 et portera sur l'observation des conditions météorologiques à partir des photos du réseau CAIMAN.

Les photographies du réseau CAIMAN sont également diffusées sur un site internet public hébergé à l'INRS depuis l'automne 2018. La conception de ce site web a été débutée par un stagiaire à l'automne 2017 et s'est poursuivie à l'été 2018. Une version plus adaptée aux appareils mobiles est présentement en développement. Outre les photographies, les images satellites utilisées dans CC09.1 et CC09.2 pour calculer des concentrations de glace autour des villages seront également diffusées. 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.

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 2017 – 2018 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 2017-2018 et ce pour les deux sites d'étude des vagues soient Kuujuarapik et à Quaqaq (Activité 4).

3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d'images satellitaires à Quaqtaq et Kuujjuarapik pour l'englacement 2017 (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 2017-2018, 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 24 et Figure 25. La Figure 24, 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 25 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 14 donne le nombre d'images téléchargées pour Kuujjuarapik et Quaqtaq. À partir des cartes du couvert de glace ainsi produites, il sera possible de calculer la concentration de glace pour des régions d'intérêt. Afin d'appuyer le projet CC16.1, il est prévu de calculer les concentrations de glace pour des mailles de taille définies par l'ISMER en fonction du modèle de vagues. Au moment d'écrire ces lignes, les grilles pour la modélisation à Kuujjuarapik étaient terminées mais pas celles de Quaqtaq. 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 pourra être faite en même temps que le traitement des images satellitaires des prochaines saisons (hiver 2018-2019).

Tableau 14 : Nombre d'images téléchargées par site pour chaque satellite. Le nombre entre parenthèse indique le nombre d'images ayant peu ou pas de nuages dans la zone d'étude

	Kuujjuarapik	Quaqtaq
Landsat-8	59 (36)	67 (27)
Sentinel-2	178 (104)	94 (38)

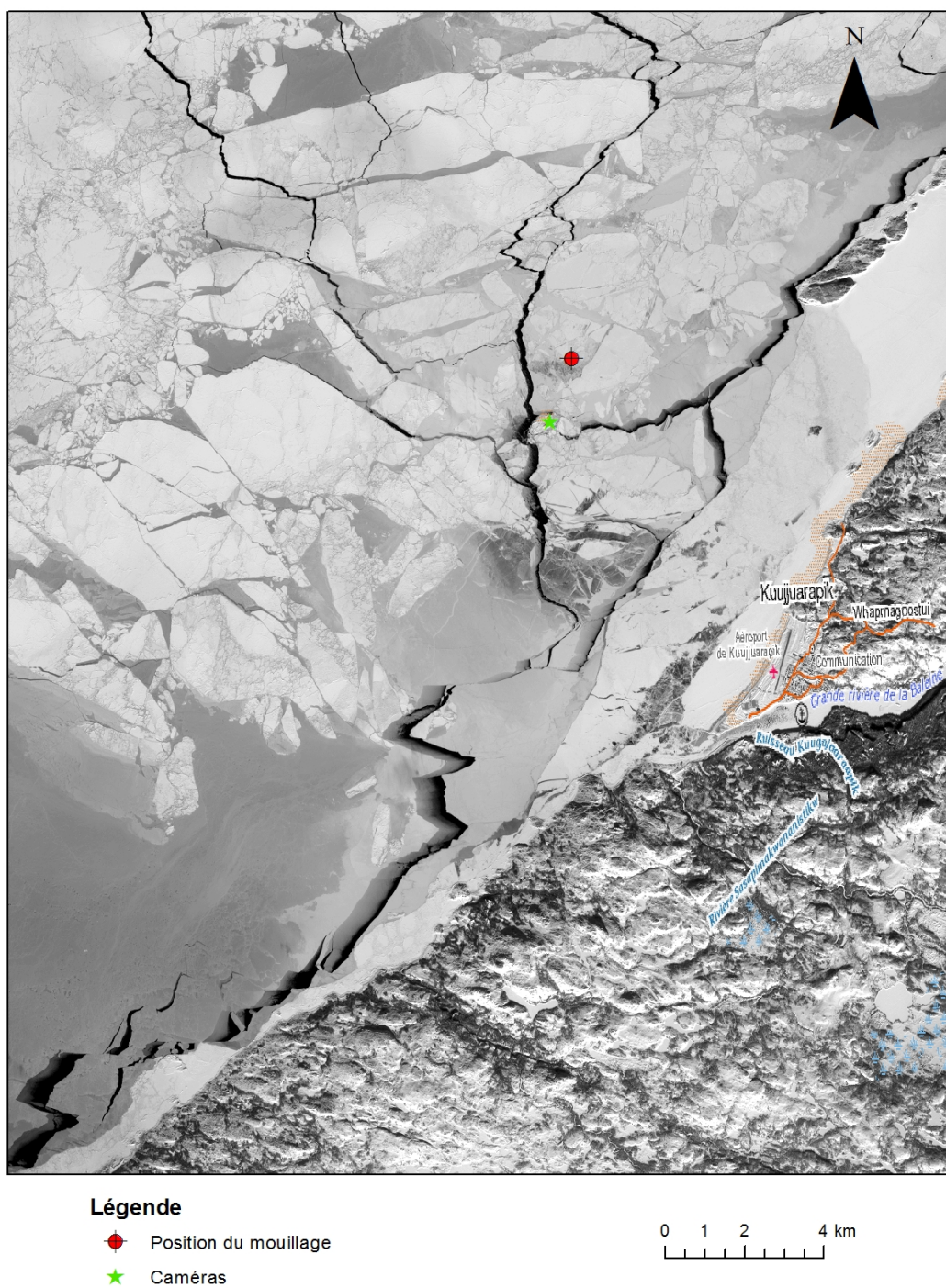


Figure 24 : Image optique acquise par le satellite européen Sentinel-2 (Bande 8 – Proche infra-rouge) le 3 janvier 2018 pour le secteur de Kuujuaq

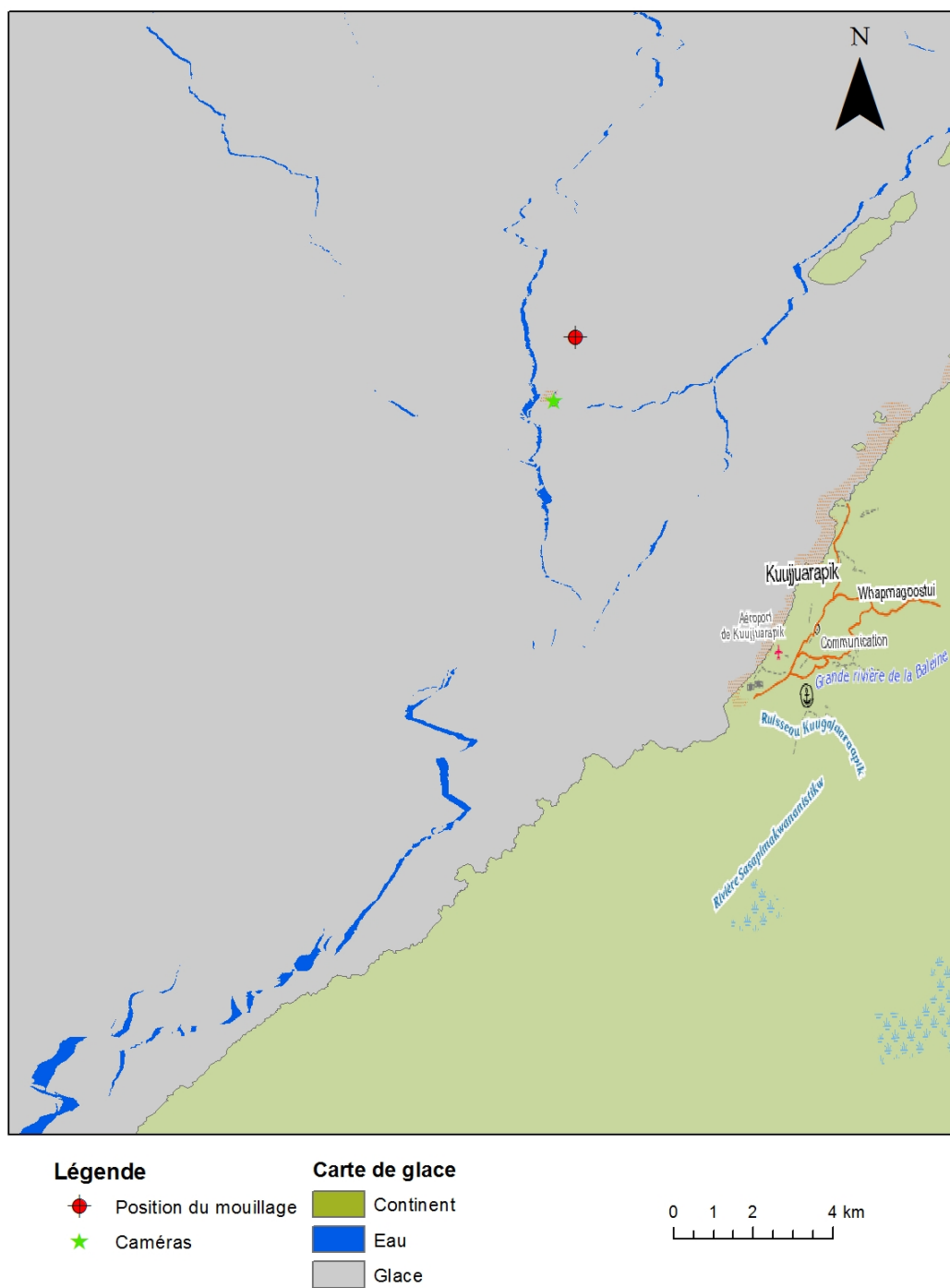


Figure 25 : Carte du couvert de glace de la baie d'Hudson au voisinage de Kuujuaupik produite à partir de l'image optique du satellite Sentinel-2 acquise le 3 janvier 2018

4. Validation du potentiel d'utilisation d'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues à Kuujuarapik et Quaqtaq (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 retrodiffusé. 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 retrodiffusé 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 Kuujuaupik et Quaqtaq suite à l'acceptation de l'ASC sont résumés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 15 et Tableau 16). 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. Les images correspondant aux faisceaux #1 à #4 ont été acquises. L'acquisition des scènes du 15 décembre 2018 (Quaqtaq) et du 17 décembre 2018 (Kuujuaupik) ont échouées en raison d'une anomalie du satellite RADARSAT-2 signalée par l'ASC au cours de ce mois.

Tableau 15: Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Kuujuaupik

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 déjà acquises

Tableau 16: Planification d'acquisitions RADARSAT-2 à Quaqtaq

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 déjà acquises

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) pour le traitement des images. À ce jour, les traitements effectués sont :

- lecture et calibration des images;
- traitement multi-vue et filtrage: ceux-ci servent à diminuer les bruits (en 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 en utilisant des fenêtres de 128 x 128 pixels pour radarsat-2 et 400 x 400 pixels pour ALOS-2 PALSAR. Afin d'obtenir des images de pente possédant la même résolution spatiale de 2.5-km pour les deux type d'images (RADARSAT-2 et ALOS-2), des fenêtres de tailles différentes ont dûes être utilisées;
- calcul des spectres de Fourier en 2-D des sous-images pour chacune des fenêtres;
- calcul de la direction, de la longueur d'onde, et de la hauteur des vagues dominantes.

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 azimut n'a pas besoin d'être projetée. Les directions des vagues ont été projetées en longitude/latitude.

Il reste à analyser les résultats en comparaison avec les mesures locales provenant des ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et bouées. Cette étape sera à réaliser dans les prochains mois. L'impact de la taille de la fenêtre spatiale à considérer dans les calculs des spectres des vagues sera analysé pour les images en bande C et L respectivement en se basant sur les mesures in situ de hauteur et de direction des vagues issues de l'ADCP ou des bouées. 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.

4.2.2. 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 (Bernier et al, 2018). Il a donc été décidé de laisser tomber l'utilisation de ces images pour les sites de Kuujuarapik et de Quaqtaq. 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.

Par contre, deux images polarimétriques en bande-L provenant du capteur PALSAR-2 du satellite ALOS-2 sont disponibles, mais sont localisées en dehors des sites d'étude. Ces images ont pu être extraites des archives de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise. Ces deux scènes sont localisées dans le golfe du fleuve Saint-Laurent dans la province de Québec. Des données de hauteur de vagues sont disponibles pour un site situé au large de la municipalité de Cap-d'Espoir en Gaspésie qui, bien que situé à l'extérieur des images, est assez proche pour valider l'ordre de grandeur des hauteurs des vagues extraites des images. Puisque les données nécessaires à la validation des hauteurs des vagues extraites des images RADARSAT-2 de l'automne 2018 n'ont pas encore été recueillies, les images PALSAR-2 peuvent servir à valider temporairement la méthode.

4.3. Résultats préliminaires

L'approche proposée est appliquée sur des images acquises avec des fréquences différentes (bande-C et bande-L). Les pentes en distance et en azimut ont été calculées sur les images pour les deux bandes C (Figure 26) et L (Figure 28). La succession des valeurs positives et négatives de pentes calculées montrent les formes géométriques linéaires des fronts de vagues. Les valeurs des directions (présentées par les flèches colorées en rouge) ont été extraites de l'image par bloc de 2.5km.

L'image acquise le 04 octobre 2018 correspond à un évènement de fort vent à Quaqtaq et dans tout le Nunavik. En raison des forts vents observés par des membres de notre équipe sur le terrain à Kuujuaq, cette image a été choisie afin d'effectuer un premier test pour appliquer l'algorithme. Il faudra attendre que les données de mesures in situ soient disponibles afin de pouvoir estimer la précision de l'algorithme. Les données in situ correspondant à la période d'acquisition des images, soit du septembre à décembre 2018, n'ont pas encore été récoltées.

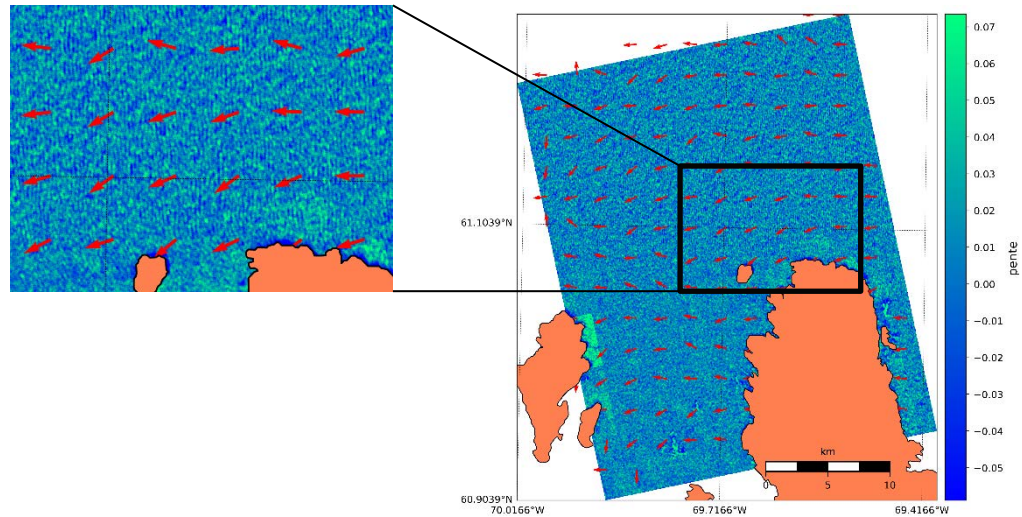


Figure 26: Pente et directions des vagues sur l'image RADARSAT-2 du 2018-10-04 (Quaqtaq)

Les directions extraites sont perpendiculaires à la direction des crêtes et du front des vagues observées sur l'image. À la hauteur de l'île Hearn, la diffraction des vagues est perceptible. Les vagues changent de direction se déplaçant du nord-est au sud-ouest alors qu'au nord de l'île, elles se déplacent d'est vers l'ouest.

L'effet des pixels terrestres utilisés lors des calculs des pentes est visible proche des côtes. Plus il y a de pixels terrestres dans la fenêtre considérée pour ce calcul, plus ces effets sont visibles. Ils sont présentés par un changement brusque des valeurs de la pente dans une fenêtre en comparaison des fenêtres voisines (voir à côté des deux îles à la bordure ouest de l'image à droite de la Figure 26).

Les hauteurs des vagues extraites varient de 0 à 0.7m (Figure 27 et Figure 29). À cause de la taille des blocs utilisés (soit 128 X 128 pixels) pour RADARSAT-2 et 400 x 400 pixels pour ALOS-2), les valeurs des hauteurs de vagues proches des côtes sont faibles ou presque nulles. Celles-ci seront analysées de plus près en diminuant la taille de la fenêtre utilisée. 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) Les mesures in situ provenant des instruments de mouillage installés au sud-est de l'île Hearn pourront servir à valider nos résultats.

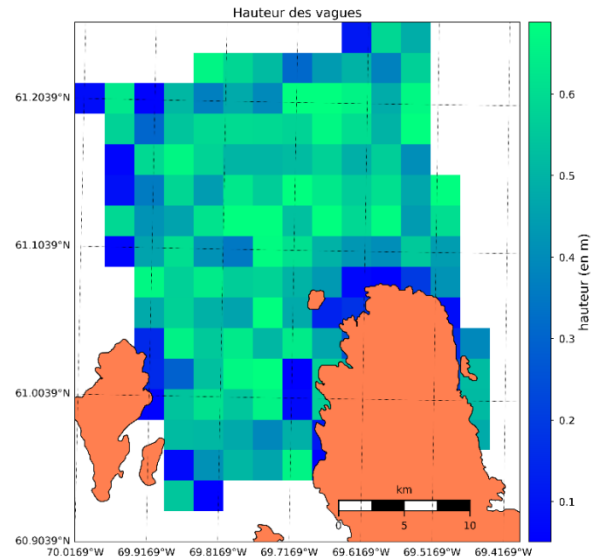


Figure 27: Hauteur des vagues extraites de l'image RADARSAT-2 du 04-10-2018 (Quaqtac)

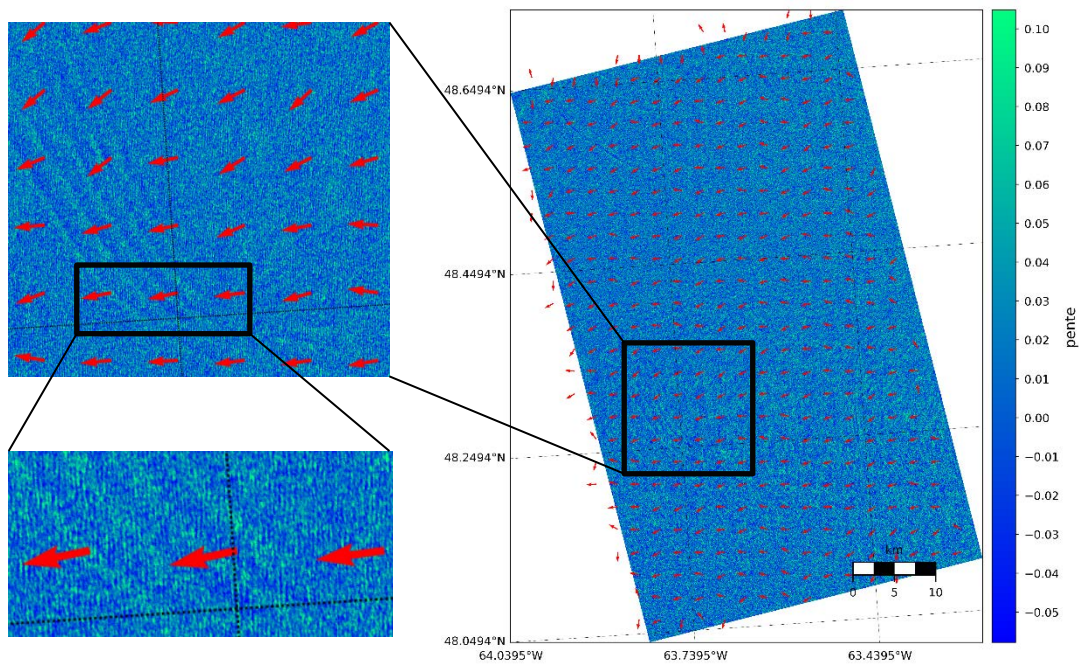


Figure 28: Pente des vagues sur l'image ALOS PALSAR (Est de la station Cap-d'Espoir)

Le phénomène physique qui se produit entre les ondes incidentes et la surface de la mer est la diffusion de Bragg. Les vagues qui créent les signaux de retour vers le satellite sont celles qui ont une longueur d'onde avec le même ordre de grandeur que le signal incident. Pour la fréquence en bande-C, ces vagues ont une largeur d'environ 5 cm et 23 cm pour la bande-L. Ces vagues, appelé aussi vague de Bragg peuvent être modulé par d'autre type de vagues de taille plus grande comme celles observées sur la Figure 28 (vagues de gravité atmosphérique). À cause de la modulation des vagues de Bragg par les autres systèmes de vagues de taille plus large, ces

derniers peuvent être visibles sur l'image. Pour le cas de la scène PALSAR, deux types de vagues sont observables sur la Figure 28. L'image extraite en haut à gauche de la Figure 28 montre une signature de vagues de gravité atmosphériques. L'état (stable ou instable) de la couche limite (CL) atmosphérique ainsi que le mouvement de déplacement des masses d'air dans la CL peut laisser des traces des formes géométriques différentes à la surface de la mer. Quelques exemples montrant ces formes sur des images radar sont présentés dans les travaux de (Jackson et Apel 2004, Alpers et Huang 2011, Li 2017).

Sur la Figure 29, les hauteurs des vagues varient de 0 à 0.8m. Nous pouvons observer les vagues les plus hautes dans la partie sud de l'image. Des données extraites de la station Cap-d'Espoir ont été utilisées pour contrôler les résultats obtenus sur ces images en bande-L. Une valeur de hauteur moyenne des vagues de 0.5m a été enregistrée le 18-08-2014 à 23:00 temps local, à la station Cap-d'Espoir localisée à environ 50 kilomètres au Nord-Ouest de la bordure de l'image RSO utilisée.

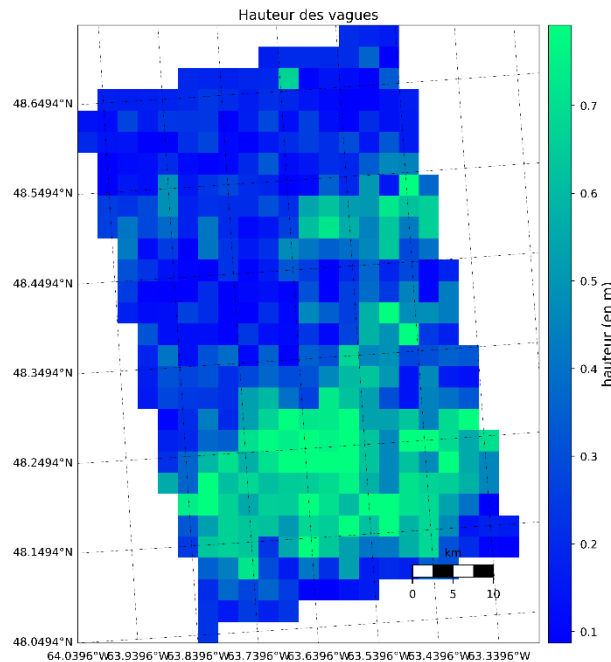


Figure 29: Hauteur des vagues sur l'image ALOS-2 PALSAR-2 acquise le 18-08-2014 à 20:00 à 50 kilomètres au Sud-Est de la station Cap-d'Espoir

5. Conclusions

Ce projet de recherche a pour but de fournir des données d'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 2017-2018. 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. L'interprétation des photographies 2017-2018 a montré une plus grande variabilité entre les différents sites d'observation (villages) des caméras quant à la durée du couvert de glace permanent par rapport à la saison 2016-2017. De plus, l'hiver plus froid s'est traduit par une plus grande durée du couvert de glace permanent, en moyenne 9% plus long sur l'ensemble des sites comparables.

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 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 Kuujjurapik et Quaqlaq, 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.

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 Quaqlaq. Pour ce volet, nous avons appliqué la méthodologie choisie sur les images RADARSAT-2 (bande-

C) et ALOS-2 PALSAR (bande-L). Les caractéristiques des vagues ont été déterminées sur les deux types d'images. Pour les données RADARSAT-2, la validation sera effectuée avec les mesures des vagues in situ prises par les ADCP (Kuujjuarapik et Quaqtaq) lorsqu'elles seront fournies par l'ISMER. Nous pourrions alors tester et discuter de la taille de la fenêtre spatiale à considérer lors de la procédure de traitement des images. Les deux images RADARSAT-2 non acquises (15 décembre et 17 décembre 2018) en raison de difficultés techniques rencontrées par le satellite, seront à reprogrammer dans la routine d'acquisition d'images de l'ASC. Pour les données PALSAR, nous avons pu utiliser les hauteurs moyennes des vagues mesurées à la station Cap-d'Espoir pour vérifier l'ordre de grandeur de la hauteur des vagues au moment du passage du satellite ALOS-2 au-dessus du Golfe du Saint-Laurent.

L'ordre de grandeur de la hauteur des vagues extraite sur l'image est la même que celles mesurées à la station Cap-d'Espoir. Scientifiquement, ce n'est pas assez pour juger la précision de l'algorithme pour le cas des images en bande-L. La station se trouve à plusieurs kilomètres de la bordure de la scène. De plus il n'y a que deux scènes ALOS-2 qui ont pu être acquises. Il reste à analyser les résultats provenant des images RADARSAT-2 acquises en mode Standard Quad-Pol, afin de pouvoir évaluer l'efficacité de l'algorithme à fonctionner avec ces types d'images; sachant que l'algorithme utilisé a été développé sur des images RADARSAT-2 en mode Fine Quad-Pol (Xie, Perrie et al. 2015).

Pour l'extraction des vagues, l'utilisation des images acquises en dehors des périodes d'englacement est préférable. Les glaces à la surface de l'eau dissimulent les vagues. Après les processus de comparaison et l'analyse des résultats avec les données de mesures des paramètres des vagues in situ, d'autres recommandations pourront s'ajouter.

6. Références

Bernier, M., Poulin, J., Gignac, C., et Y. Gauthier, (2017). Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk - Projet de recherche CC09.1. Rapport final.

Poulin, J., Bernier, M., et T. Ratsimbazafy, (2018). Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk (2017-2020) - Projet de recherche CC09.2. Rapport d'étape 1.

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.

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.

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.