

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.1 remis à :

Bureau de la coordination du Nord-du-Québec,
Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

Par :

Jimmy Poulin, Monique Bernier, Tahiana Ratsimbazafy



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

28 février 2018

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

ISBN : 978-2-89146-950-0 (version électronique)

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

Table des matières

1. Introduction.....	5
1.1. Mandat confié à l’Institut national de la recherche scientifique (INRS)	5
1.2. Localisation géographique des caméras	6
1.3. Plan du rapport.....	7
2. Sites d’observation des conditions de glace de rives au Nunavik : Analyse des photographies d’octobre 2016 à août 2017(Activité 3)	8
2.1. Site d’observation à Aupaluk.....	9
2.2. Site d’observation à Quaqtac.....	14
2.3. Site d’observation à Baie Déception	20
2.4. Site d’observation à Ivujivik.....	25
2.5. Site d’observation à Umiujaq	31
2.6. Site d’observation à Kuujuarapik.....	36
3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d’images satellitaires à Quaqtac et Kuujuarapik pour l’englacement 2017 (Activité 4).....	41
4. Validation du potentiel d’utilisation d’imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques du front de vagues à Kuujuarapik et Quaqtac (Activité 5)	44
4.1. Revue de la littérature.....	44
4.2. Méthodologie	46
4.2.1. Mécanismes de rétrodiffusion RSO	46
4.2.2. Méthode sélectionnée	48
4.3. Commande d’images.....	53
4.3.1. Images polarimétriques RADARSAT-2	53
4.3.2. Images PALSAR	54
5. Conclusions et recommandations.....	55
6. Références.....	57

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

CAIMAN	CAméras aux Infrastructures MARitimes du Nunavik
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ISMER	Institut des sciences de la mer
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports
UQAR	Université du Québec à Rimouski
RSO	Radar à synthèse d'ouverture

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

En 2015, l'INRS a reçu le mandat du ministère des Transports du Québec d'étendre le réseau de caméras aux villages de Kuujuaapik, Ivujivik, Aupaluk et à la Baie Déception, de même que de procéder à l'entretien et la mise à niveau des systèmes d'Umiujaq et de Quaqaq (Projet CC09.1) afin de poursuivre le projet entamé en 2009. 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 ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) 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, Quaqaq et Aupaluk (2017-2020) ». Afin d'améliorer la couverture de suivi des glaces, deux sites additionnels ont été instrumentés dans les villages nordiques de Kuujuarapik et de Quaqaq. Ces deux nouveaux sites localisés sur les îles Gillis et Hearn correspondent à l'emplacement des instruments déployés en mer pour le suivi des conditions de vagues (marégraphe, profileur de courant,..) dans le cadre du projet de recherche CC16.1 intitulé « Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques ». Ce projet est aussi mandaté par le MTMDET, 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, Quaqtuq (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 (Quaqtaq) 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

Ce projet de recherche a pour but de fournir des données d'observations des conditions de glace de rive. Les observations ont été 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 décrit l'interprétation des photographies du réseau de caméras CAIMAN prises entre les mois d'octobre 2016 et août 2017. Cette interprétation fut réalisée pour les sites opérationnels à l'hiver 2016-2017. Il ne sera donc pas mention des deux sites instrumentés à l'été 2017 (les îles Gillis et Hearn) pour appuyer le projet CC16.1. Le troisième chapitre décrit comment seront extraites les concentrations de glace des images satellitaires optiques. Le quatrième chapitre présente au moyen d'une revue de littérature le 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 2016 à août 2017(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.

Pour tous les sites de suivi possédant des caméras à l'hiver 2016-2017, les photos ont été récupérées lors des visites d'entretien de l'automne 2017 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 glace visible à ce moment. Ce travail a permis entre autres d'identifier les dates de la première apparition de 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 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.

Cette 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 sera 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 Inuite de Kuujuaq. Ce calendrier a été financé par Savoir Polaire Canada et le projet CC09.2 a servi de levier financier. Le projet CAIMAN est d'une durée de deux ans et se terminera en mars 2019.

Les photographies du réseau CAIMAN seront également diffusées sur un site internet public hébergé à l'INRS. La conception de ce site web a été débutée par un stagiaire à l'automne 2017 et sera poursuivie à l'été 2018. 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 sera www.caiman.ete.inrs.ca.

Dans les sections qui suivent, les résultats de l'analyse des photographies seront présentés pour chaque caméra (Tableau 1) sauf celles installées en 2017 pour appuyer le projet CC16.1.

2.1. Site d'observation à Aupaluk



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

Le comportement des glaces dans les deux zones surveillées par les caméras d'Aupaluk diffèrent sensiblement dans la mesure où la caméra orientée vers le sud-ouest (caméra 1), couvre le fond de l'anse Funnel, une zone de marnage se découvrant presque à chaque marée (Figure 1). Avec l'arrivée d'un cours d'eau dans son extrémité, le comportement des glaces dans cet estran est différent de celui plus au large dans la baie Hope Advance et n'est pas très représentatif de la région. Bien que le comportement de la glace dans l'anse soit documenté par l'analyse des photographies, les dates mentionnées dans le Tableau 2 correspondent aux dates d'englacement et de fonte hors de l'estran. Pour la caméra 1, les dates correspondent aux moments où les événements décrits ont franchi la limite droite de la photographie, représentée par le trait orangé sur la Figure 1. Ainsi, la première apparition de glace documentée correspond à la première fois où de la glace est visible vis-à-vis la ligne orange. Pour la caméra 2, il s'agit de la première fois où de la glace est visible dans la photographie. La Figure 2 montre l'évolution de l'englacement pour la saison 2016-2017 à Aupaluk. À partir du 26 octobre, du frazil apparaît près de la berge lorsque l'estran se recouvre. Au large, le frazil apparaît le 9 novembre, puis

revient en plus grande quantité le 12 novembre (Figure 2-A). Le lendemain, une mer plus agitée en détruit temporairement la structure avant de le pousser vers le fond de la baie où il s'accumulera. Tout le matériel est remis en mouvement et évacué du 16 au 18 novembre. Le 21 novembre, le frasil est de nouveau poussé vers le fond de la baie où il se solidifiera et formera un couvert complet à partir du lendemain (Figure 2-B). Dans les jours qui suivent, le front de glace progressera jusqu'à la limite de la baie d'Aupaluk et restera à cette position jusqu'à la mise en place du couvert complet. Plus au nord-ouest, de la glace et du frasil en mouvement sont alors visibles. Du 27 novembre au 17 décembre, l'objectif de la caméra est totalement, puis partiellement obstrué, empêchant de voir la progression du couvert. Le 11 décembre, la partie non obstruée sur la photographie montre un couvert complet, ce qui se confirmera le 14 avec une photographie pratiquement non obstruée où le couvert a été recouvert de neige (Figure 2-C).

Au printemps 2017, le couvert de glace se dégrade thermiquement pendant plusieurs semaines avant de réduire en superficie (Figure 3). À partir de la mi-mai, quelques journées provoquent la création de mares de fontes sur le couvert. Lors de la dernière semaine de mai, la présence de mares de fonte devient de plus en plus importante et de l'eau commence à apparaître dans la zone intertidale. Le 29 mai, on peut apercevoir de l'eau s'immiscer à travers le couvert de glace surtout dans le fond de la baie (Figure 3-A). Le 6 juin, l'eau franchira la limite droite des photographies de la caméra 1 définie comme étant la limite de l'estuaire. Le 8 juin, beaucoup d'eau provenant du fond de la baie est visible sur la caméra 2 mais toujours dans la zone intertidale (Figure 3-B). Le lendemain, 9 juin, sur les photographies de la même caméra, de l'eau est visible au large près de la rive opposée plus au nord. Le 12 juin, tout le couvert de glace est mis en mouvement (Figure 3-C) et est pratiquement complètement évacué les 16 et 17 juin (Figure 3-D). Les radeaux de glace reviennent aussitôt. Le 25 juin, une grande marée est accompagnée d'un champ de blocs de glace qui viennent se déposer contre l'infrastructure et partout dans la baie (Figure 3-E). Les blocs demeurent plusieurs jours avant de se désintégrer ou d'être emportés par les marées. La présence continue de radeaux en mouvement entraîne une première eau libre assez tardive.

Pour conclure cette section, le Tableau 2 synthétise les observations faites au courant de la saison 2016-2017 à partir des caméras installées à Aupaluk. Le Tableau 3 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2016 et août 2017.

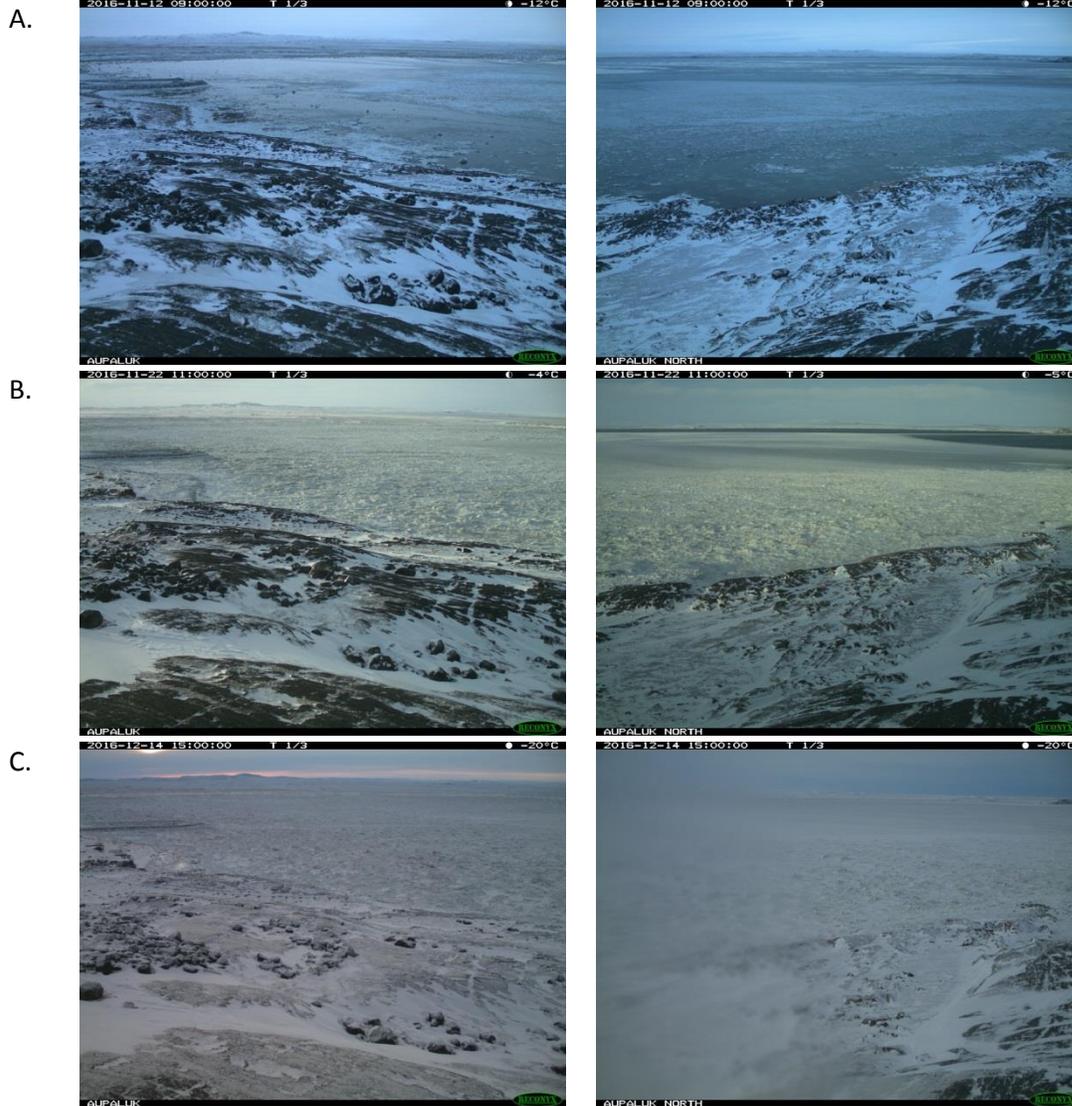


Figure 2 : Évolution de l'englacement à l'automne 2016 à Aupaluk (A- 12 novembre 2016, B- 22 novembre 2016, C- 14 décembre 2016)

A.



B.



C.



D.



E.



Figure 3 : Évolution de la fonte des glaces au printemps-été 2017 à Aupaluk (A- 29 mai 2017, B- 8 juin 2017, C- 12 juin 2017, D- 17 juin 2017, E- 25 juin 2017)

Tableau 2 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Aupaluk entre octobre 2016 et août 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (ouest)	Caméra 2 (nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	9 novembre 2016	9 novembre 2016	9 novembre 2016
Couvert de glace permanent	22 novembre 2016	11 décembre 2016	11 décembre 2016
Première apparition d'eau	6 juin 2017	9 juin 2017	6 juin 2017
Libre de glace pour la première fois	6 juillet 2017	2 juillet 2017	6 juillet 2017

Tableau 3 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Aupaluk entre octobre 2016 et août 2017.

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

2.2. Site d'observation à Quaqtq

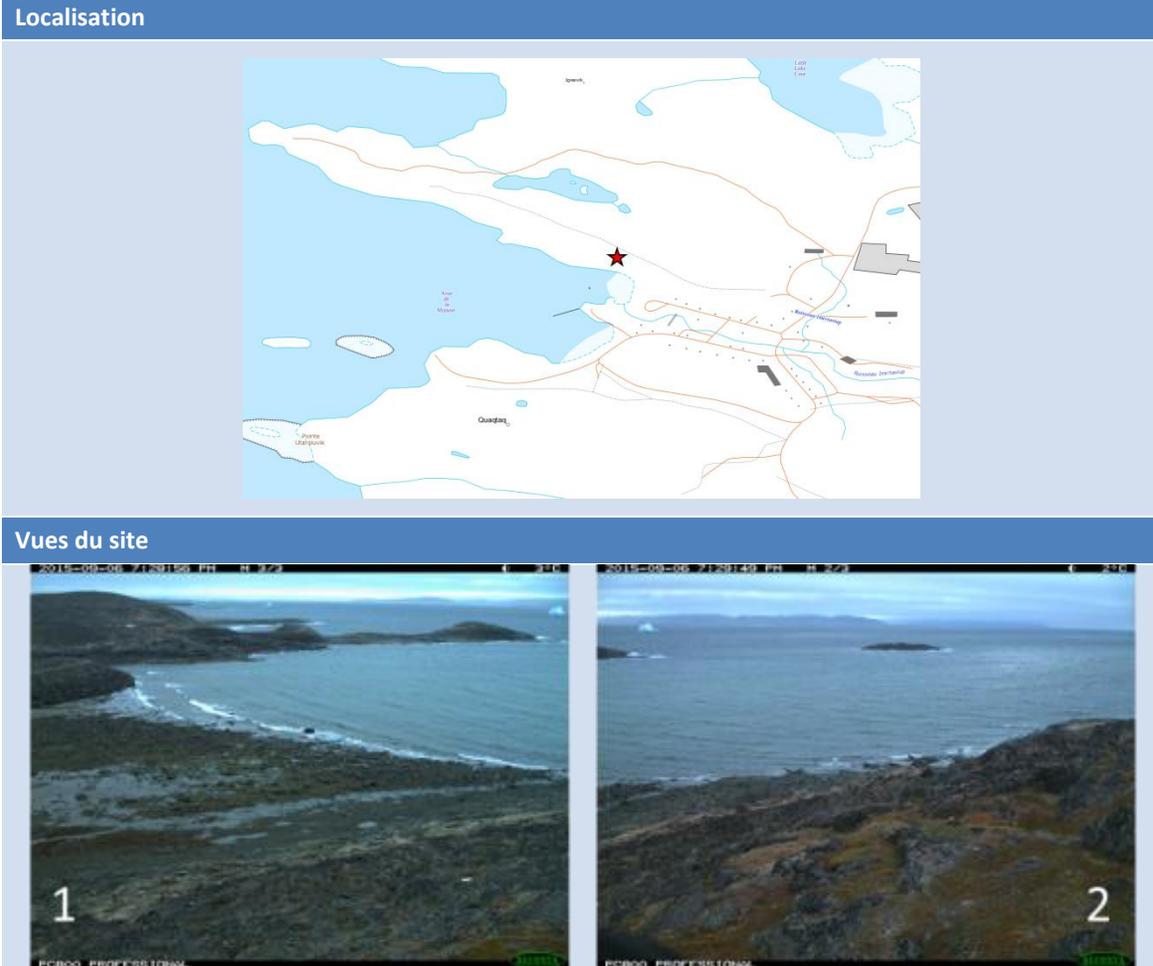


Figure 4 : Emplacement et vues des deux caméras situées à Quaqtq : Caméra 1-Sud et caméra 2-Ouest.

La figure 4 montre l'emplacement des caméras localisées à Quaqtq et les vues sur la baie. À l'automne 2016, les premières apparitions de glace surviennent les 16 et 17 novembre 2016 suite à une chute de neige (Figure 5). La neige déposée dans l'estran est inondée lors de la marée haute puis mise en mouvement sous forme de slush à la marée descendante. La faible quantité de slush est rapidement mélangée dans le volume d'eau et fond. De petits radeaux de glace apparaissent vers les 28 et 29 novembre (Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.-A**). Les radeaux sont poussés contre la côte par les vents du ouest-nord-ouest et s'y déposent à marée descendante. Ils disparaissent après quelques cycles de marées. Du 7 au 11 décembre, la formation s'accélère avec l'intensification d'un vent du nord-ouest créant de plus fortes vagues et l'apparition de frasil à l'intérieur de l'anse (Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.-B**) de sorte que le couvert est complet près des infrastructures le 13 décembre (Figure 5 **Erreur !**

Source du renvoi introuvable.-C). Pour le reste de la baie Diana, la mise en place du couvert s'étendra jusqu'au 18 décembre (Figure 5**Erreur ! Source du renvoi introuvable.-D).**

L'évolution de la fonte au printemps 2017 est illustrée à la Figure 6. À la mi-janvier, de l'eau est apparue dans la zone intertidale lors de grandes marées. Le même phénomène est survenu à la mi-mai lors du processus de fonte. À la même période, des mares de fonte ont commencées à apparaître sur le couvert de glace. Entre le 29 mai et le 1 juin 2017, les premiers signes de fracture du couvert de glace apparaissent dans la zone intertidale. Le 2 juin, des mouvements de glace laissent apparaître de l'eau dans le couvert mais toujours dans la zone intertidale (Figure 6-A). Quelques jours plus tard, le 6 juin, le réseau de fracture s'étend hors de la zone intertidale avec des apparitions d'eau (Figure 6-B). Le 18 juin, l'eau apparaît pour la première fois dans la partie nord de la baie Diana (Figure 6-C). La glace se dégrade progressivement pour laisser apparaître de l'eau au sud de la baie le 23 juin. Au même moment, une région d'environ 2km se libère de glace devant le village (Figure 6-D). Dans les jours qui suivent, beaucoup de blocs/radeaux de glace sont mis en mouvement dans la baie. Dans la nuit du 25 au 26 juin, cette glace auparavant en mouvement est poussée dans la baie qui se remplit (Figure 6-E). Une grande quantité de blocs et de radeaux viennent se coller près des infrastructures mais sans créer d'empilement. Certains de ses blocs restent sur place plusieurs jours mais la majorité des morceaux quittent avec les marées suivantes. Le phénomène se reproduit à deux reprises les 30 juin et 2-3 juillet mais avec des radeaux de plus en plus dégradés (Figure 6-F). La baie est complètement libre de glace le 7 juillet. Le bateau du *Hunter Support* est mis à l'eau ce jour-là.

De très petits blocs de glace viennent s'échouer sur les rives près du village le 6 août.

Pour conclure cette section, le Tableau 4 synthétise les observations faites au courant de la saison 2016-2017 à partir des deux caméras installées à Quaqtq. Le Tableau 5 donne la durée (en jours) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2016 et août 2017.

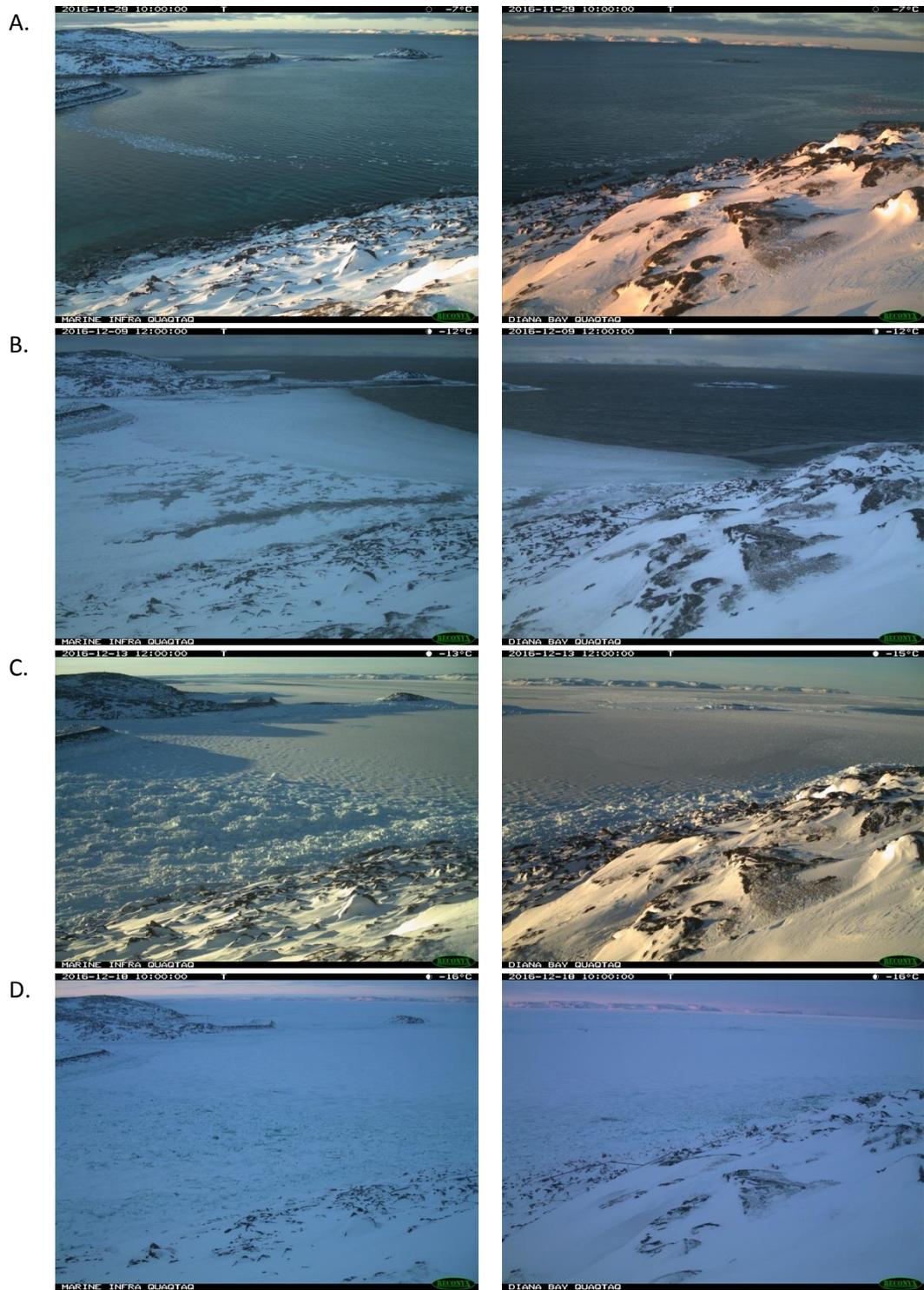


Figure 5 : Évolution de l'englacement 2016 à Quaqtaq (A- 29 novembre 2016, B- 9 décembre 2016, C- 13 décembre 2016, D- 18 décembre 2016)

A.



B.



C.



D.





Figure 6 : Évolution de la fonte 2017 à QuaqtAQ (A- 2 juin 2017, B- 6 juin 2017, C- 18 juin 2017, D- 23 juin 2017, E- 26 juin 2017, F- 3 juillet 2017)

Tableau 4 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à QuaqtAQ entre octobre 2016 et août 2017

Stade	Caméra 1 (sud)	Caméra 2 (ouest)	Ensemble du site
Première apparition de glace	7 décembre 2016	7 décembre 2016	7 décembre 2016
Couvert de glace permanent	13 décembre 2016	18 décembre 2016	18 décembre 2016
Première apparition d'eau	2 juin 2017	2 juin 2017	2 juin 2017
Libre de glace pour la première fois	7 juillet 2017	7 juillet 2017	7 juillet 2017

Tableau 5 : 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
Durée de l'englacement en 2016	11
Durée du couvert de glace permanent en 2016-2017	166
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière en 2017	35

2.3. Site d'observation à Baie Déception



Figure 7 : 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 1 de février 2018¹, le site de Pointe Noire à la Baie Déception a cessé de fonctionner quelques jours après son entretien en septembre 2016. L'hiver 2016-2017 n'est donc documenté que par les photographies de la caméra située à l'ouest de l'île Moosehead (Figure 7).

La première apparition de glace se manifeste sous forme de frasil les 21 et 22 novembre 2016 (Figure 8). Le 28 novembre, un front solide avance à partir du sud mais se retire aussitôt ne laissant que la rive est englacée (Figure 8-A). Des épisodes de frasil se succèdent ensuite jusqu'au 7 décembre où la mise en place du couvert se termine (Figure 8-B). De l'eau sera néanmoins visible sur l'estran lors des marées hautes jusqu'au 17 décembre. Le 9 décembre, le passage d'un bateau fracturera le couvert mais les impacts seront limités à la trace du bateau (Figure 8-C).

Après un hiver stable malgré les passages répétés des bateaux, la fonte s'amorce à la deuxième semaine de mai avec une augmentation des températures (Figure 9). À partir du 16 mai, de l'eau est visible sur l'estran lors des marées hautes. Une seconde période de températures élevées survient à la fin mai accélérant la fonte du couvert nival et créant un réseau de mares de fonte assez étendu (Figure 9-A). Le processus est ralenti en début juin avec une baisse des températures puis reprend vers le 5 juin. Le 10 juin (Figure 9-B), le couvert de glace se détache en suivant la trace du bateau. Tout d'abord, le côté ouest est évacué à l'aube puis la partie est s'effrite plus tard dans la journée. Le 12 juin, la glace côtière se limitera à la partie est de la baie, des îles Moosehead jusqu'au rivage (Figure 9-C). Dans la partie découverte à l'ouest, des radeaux se déplaceront avec les marées. L'arrière des îles se libèrera les 13 et 14 juin. Lors de la journée suivante, le secteur couvert par les photographies sera momentanément libre de glace (Figure 9-D). Des radeaux reviendront plus tard en journée. Jusqu'au 26 juin, des radeaux et certains petits blocs en petite quantité seront visibles devant la caméra.

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.

Pour conclure cette section, le Tableau 6 synthétise les observations faites au courant de la saison 2016-2017 à partir des caméras installées à l'ouest de l'île Moosehead à la Baie Déception. Le Tableau 7 donne la durée (en jour) des différents stades d'évolution du couvert de glace entre octobre 2016 et août 2017 pour Baie Déception.

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

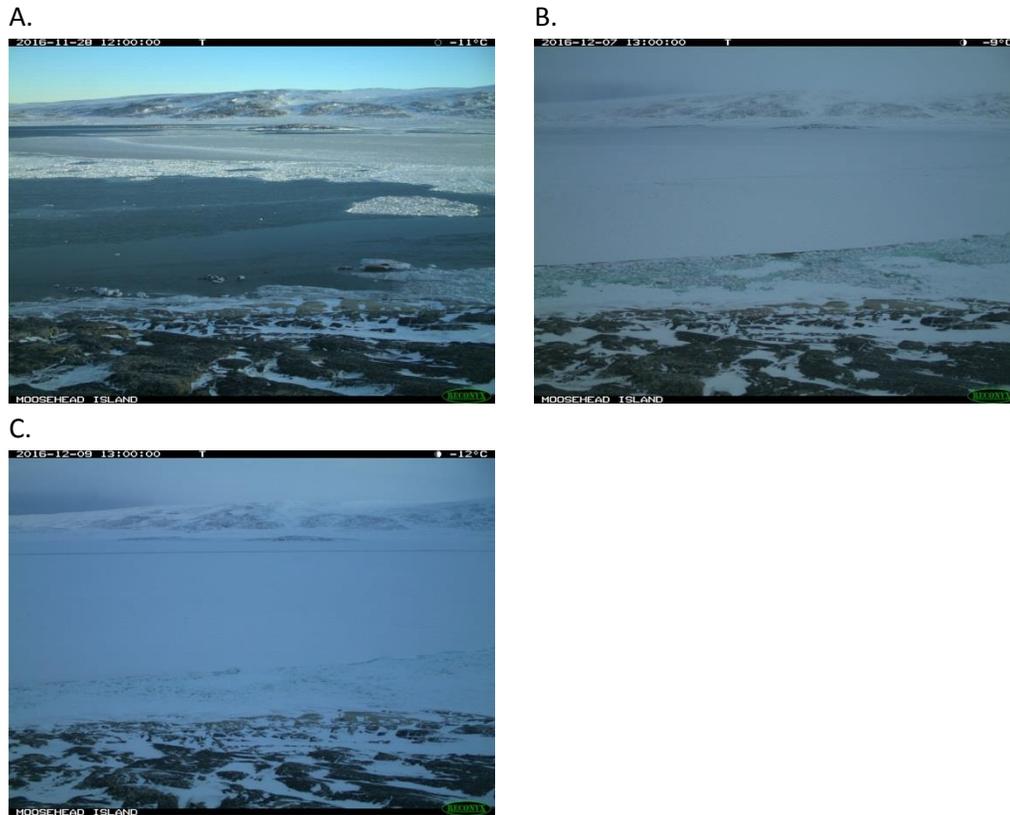


Figure 8 : Évolution de l'englacement 2016 à la Baie Déception (A- 28 novembre 2016, B- 7 décembre 2016, C- 9 décembre 2016)

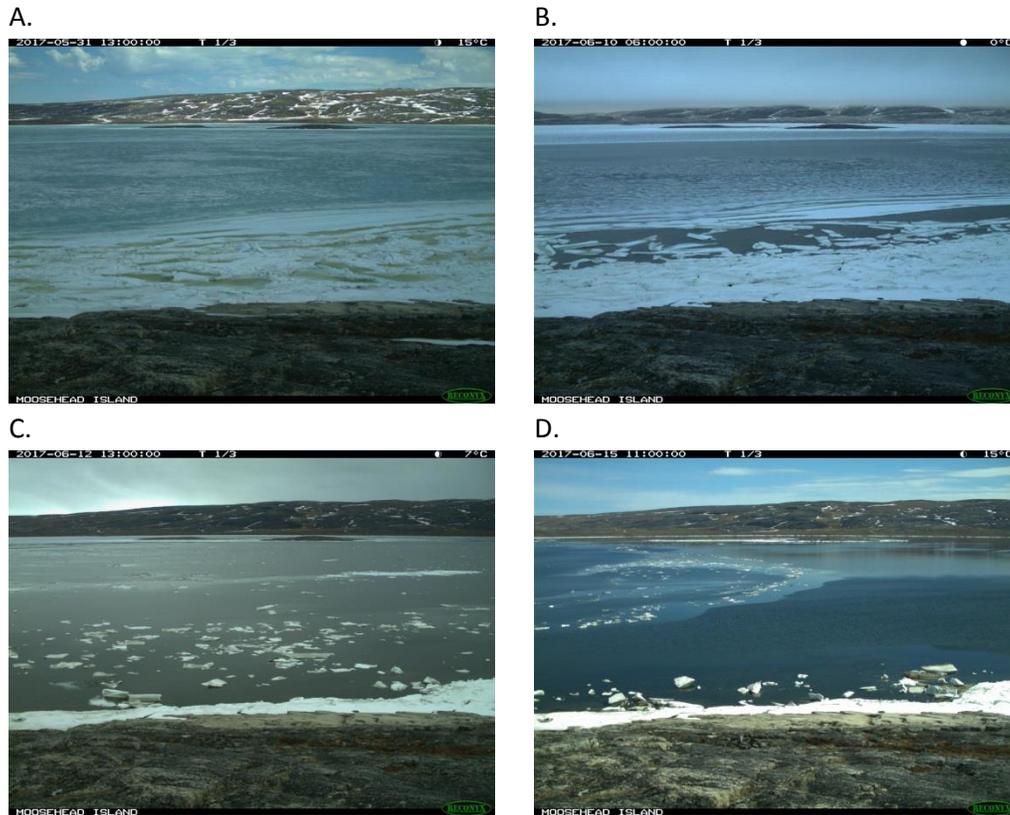


Figure 9 : Évolution de la fonte 2017 à la Baie Déception (A- 31 mai 2017, B- 10 juin 2017, C- 12 juin 2017, D- 15 juin 2017)

Tableau 6 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à l'ouest de l'île Moosehead à la Baie Déception entre octobre 2016 et août 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (ouest)	Caméra 2 (nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	21 novembre 2016	-	21 novembre 2016
Couvert de glace permanent	7 décembre 2016	-	7 décembre 2016
Première apparition d'eau	10 juin 2017	-	10 juin 2017
Libre de glace pour la première fois	15 juin 2017	-	15 juin 2017

Tableau 7 : Durée des différents stades du couvert de glace obtenue par les caméras pour Baie Déception entre octobre 2016 et août 2017

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

2.4. Site d'observation à Ivujivik



Figure 10 : Emplacement et vues des caméras situées à Ivujivik (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 10 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 8 correspondent aux dates d'englacement et de fonte de la baie en face du village. Pour la caméra 2, les dates correspondent aux moments où les événements décrits ont franchis la limite gauche de la photographie, représentée par le trait orangé sur la . 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. L'englacement 2016 s'est effectué très rapidement avec l'arrivée massive de radeaux provenant de la passe Digges (Figure 11). La région couverte par la caméra 1 s'est remplie de radeaux de glace en une seule nuit du 7 au 8 décembre 2016 (Figure 11-A) avec l'aide de forts vents provenant du nord, soit de la passe Digges. À partir de ce

moment, le couvert est demeuré complet pour l'hiver. À la même date, des radeaux ont commencé à s'agglomérer et à se fixer dans la région couverte par la caméra 2. La banquise a progressé pendant une semaine avant de s'étendre, le 14 décembre 2016, au-delà de la région correspondant à la baie telle que définie précédemment (Figure 11**Erreur ! Source du renvoi introuvable.****Erreur ! Source du renvoi introuvable.****Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-B). Ce n'est que le 28 décembre 2016 que la région couverte par la caméra 2 a présenté un couvert de glace complet et stable. Du 14 au 28 décembre, une alternance de couvert complet et partiel a été notée (Figure 11**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-C).

Le couvert n'aura pas demeuré complet très longtemps dans la passe Digges (Figure 12). Dès le 13 février 2017, une ouverture apparaît juste au nord d'Ivujivik et elle s'agrandira jusqu'au 28 février (Figure 12-A) avant de se refermer temporairement le 1 mars. La glace sera mobile à de nombreuses reprises par la suite. En particulier, le 12 mars, avec un vent provenant du sud, une partie de la glace côtière à la limite de la passe s'est fracturée et a été emportée (Figure 12-B). Dans les deux jours suivants, beaucoup de glace s'est déplacée dans la passe puis la concentration a diminué pendant 3 jours. De la vieille glace a circulé dans la passe jusqu'au 21 mars (Figure 12-C) puis le 22 mars de la nouvelle glace thermique commence à se former jusqu'à couvrir pratiquement toute la région (Figure 12-D). Le couvert durera quelques jours puis se fracturera de nouveau.

La fonte de la banquise côtière débutera lors de la deuxième semaine de mai avec plusieurs journées de chaudes températures. Des mares de fonte apparaîtront alors sur le couvert de glace (Figure 13). Le processus se poursuivra pendant 3 semaines avec une perte continue de couvert fixe à l'interface de la baie et de la passe (Figure 13-A). Le 25 mai 2017, la limite du couvert fixe reculera hors du champ de vision de la caméra 2 avec la perte d'une grande partie de la banquise (Figure 13-B). Sur la caméra 1, une première apparition d'eau surviendra le jour suivant avec la fracture du couvert. Les 26-27 mai, une légère ouverture de la fracture est observée laquelle se referme aussitôt. Le 31 mai, une arrivée massive de glaces exogènes vient pousser sur le couvert en détérioration avancée (Figure 13-C). Ces glaces restent présentes en grande quantité jusqu'au 4 juin puis elles quittent et laissent la dégradation thermique faire son travail jusqu'au 8 juin où la baie est libre de glace pour la première fois. Pendant les 3 jours suivants, une grande quantité de radeaux est transportée dans la baie (Figure 13-D) mais ils quittent le 12 juin. Par la suite, la quantité de radeaux en mouvement est en diminution mais avec des retours du 25 au 28 (Figure 13-E) puis une baisse graduelle jusqu'au 7 juillet. En juillet, peu de radeaux de glace ont cependant été vus.

Pour conclure cette section, le Tableau 8 synthétise les observations faites au courant de la saison 2016-2017 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 2016 et août 2017 pour la baie en face du village d'Ivujivik.

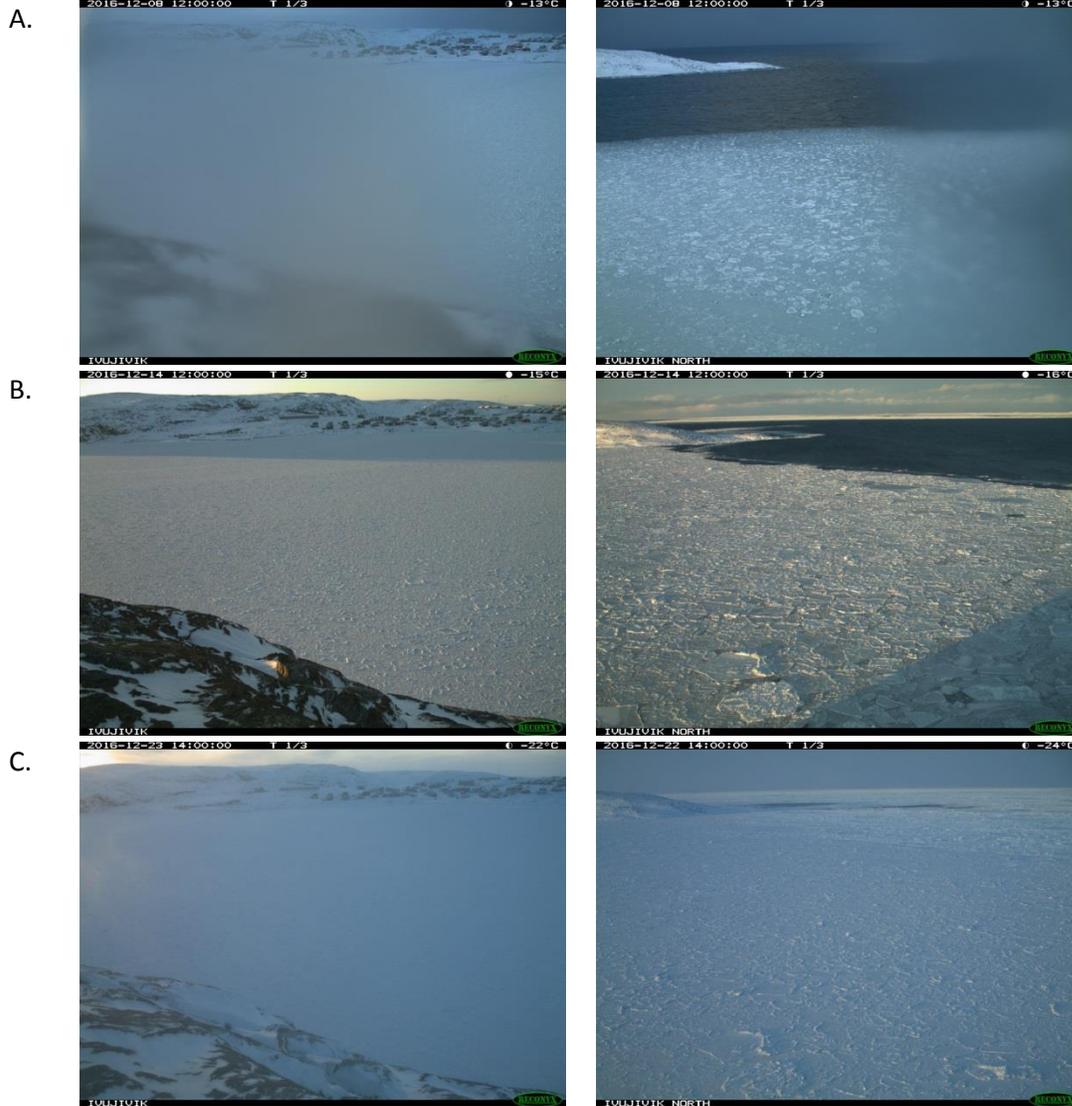


Figure 11 : Évolution de l'englacement 2016 à Ivujivik (A- 8 décembre 2016, B- 14 décembre 2016, C- 23 décembre 2016)

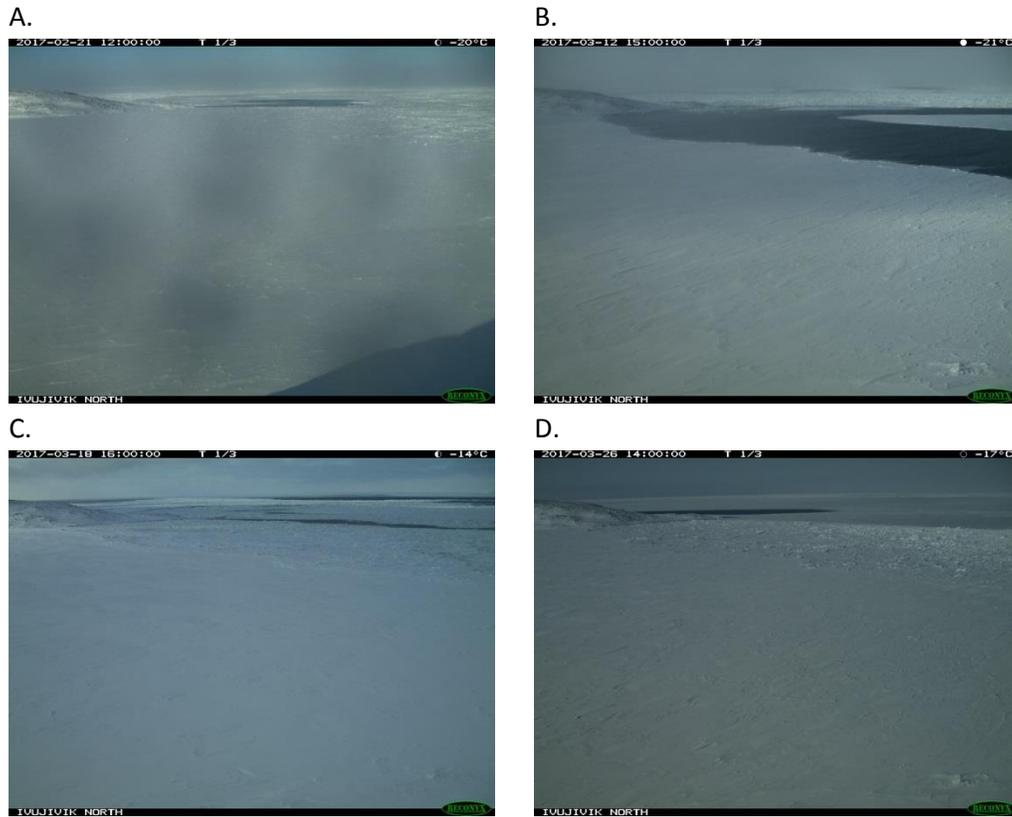


Figure 12 : Évolution de l'hiver 2017 à Iqaluit (A- 21 février 2017, B- 12 mars 2017, C- 18 mars 2017, D- 26 mars 2017)



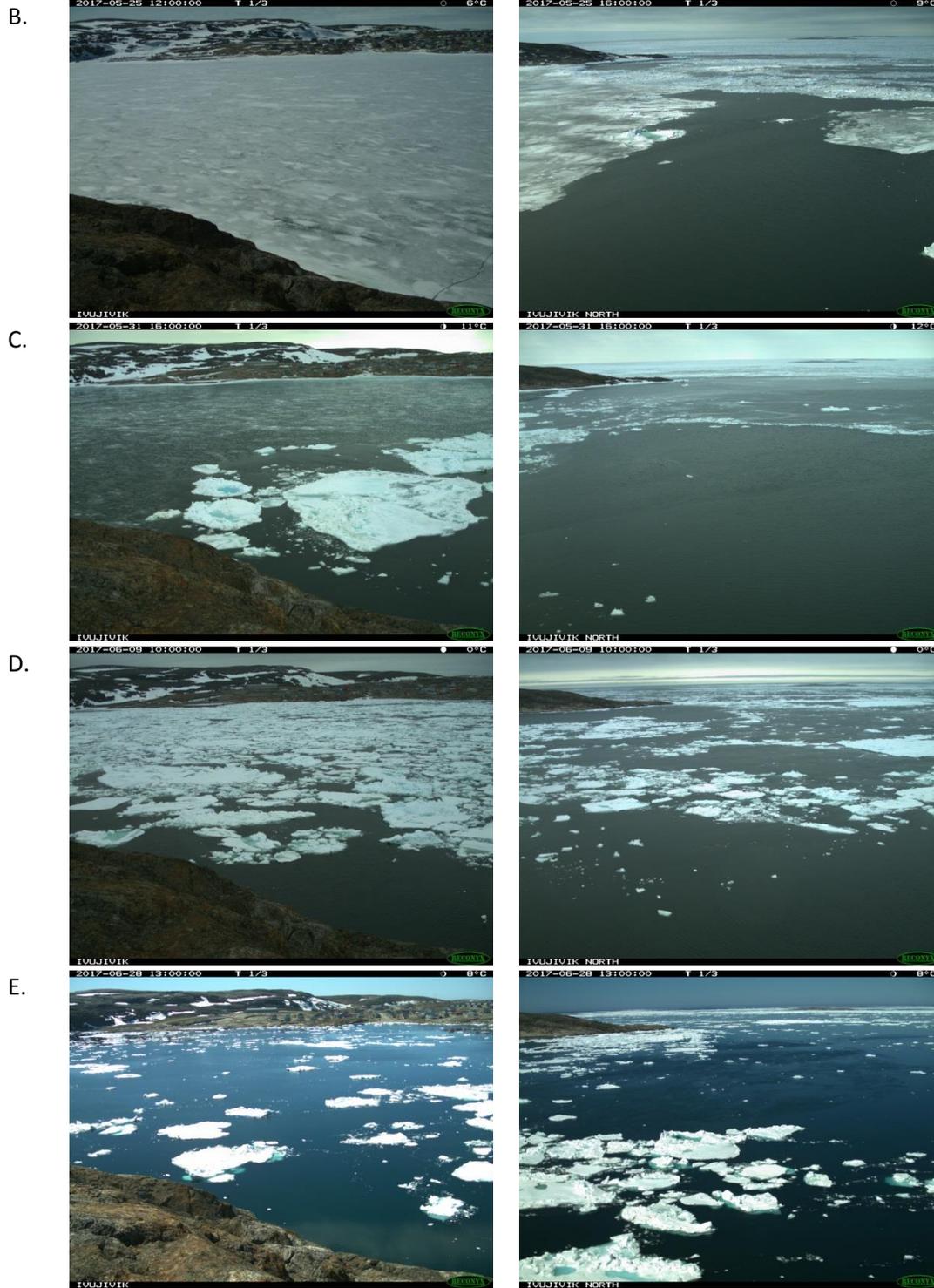


Figure 13 : Évolution de la fonte 2017 à Ivujivik (A- 20 mai 2017, B- 25 mai 2017, C- 31 mai 2017, D- 9 juin 2017, E- 28 juin 2017)

Tableau 8 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Ivujivik entre octobre 2016 et août 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Ouest)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	8 décembre 2016	8 décembre 2016	8 décembre 2016
Couvert de glace permanent	8 décembre 2016	14 décembre 2016	14 décembre 2016
Première apparition d'eau	26 mai 2017	25 mai 2017	25 mai 2017
Libre de glace pour la première fois	8 juin 2017	4 juin 2017	8 juin 2017

Tableau 9 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Ivujivik entre octobre 2016 et août 2017

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

2.5. Site d'observation à Umiujaq

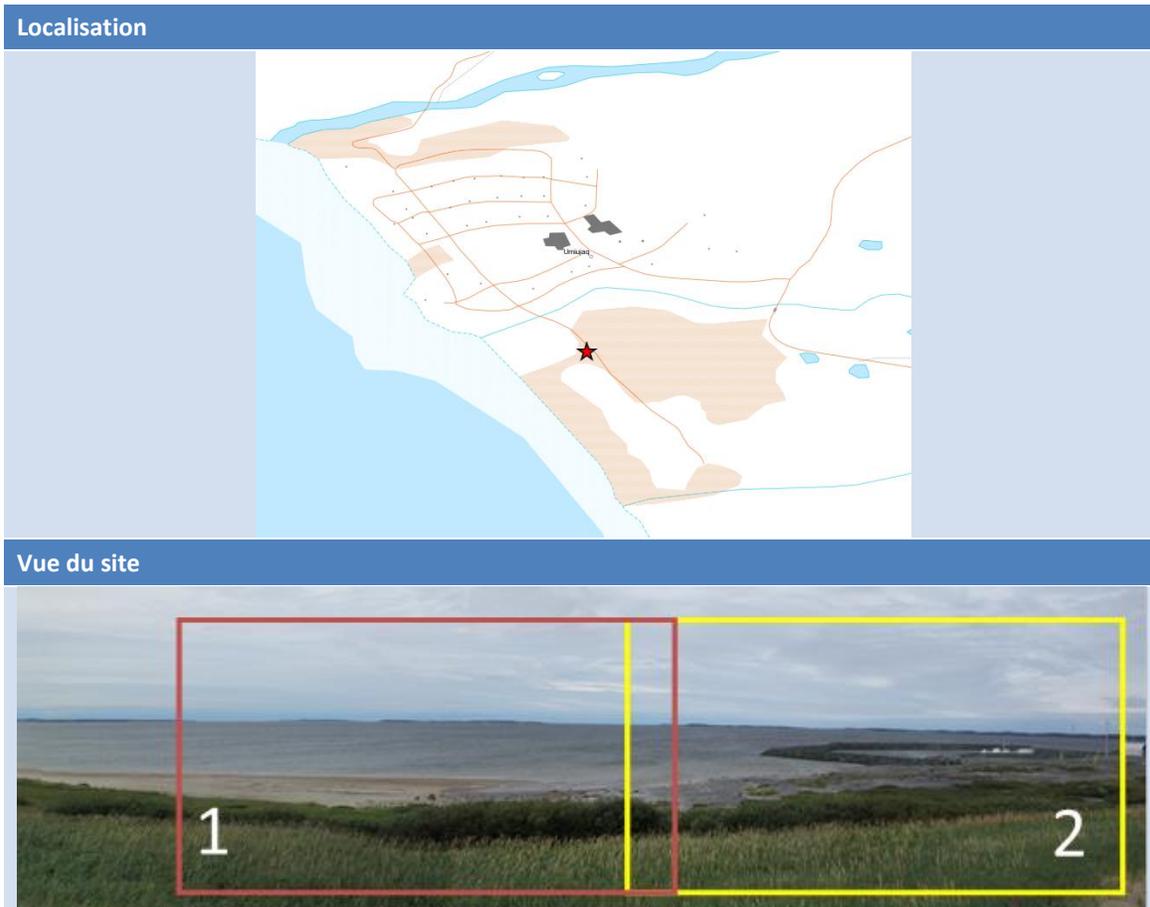


Figure 14 : Emplacement et vues des caméras situées à Umiujaq (caméra 1-ouest, caméra 2-nord-ouest)

La Figure 14 illustre l'emplacement et les vues des deux caméras installées à Umiujaq. À l'automne 2016, la première apparition de glace a été observée à l'intérieur du brise-lames de l'infrastructure maritime le 21 novembre et cette dernière demeurera jusqu'au couvert complet. Dans le détroit de Manitounouk, c'est le 30 novembre, alors que la mer est relativement calme, que la glace apparaît pour la première fois (Figure 14Erreur ! Source du renvoi introuvable.-A). Du frasil est alors présent en grande quantité dans le détroit. Les quantités ont variés à la hausse et à la baisse dans la semaine qui a suivi avant d'augmenter du 7 au 11 décembre, jour où le couvert, bien que toujours partiel, est assez solidifié pour être recouvert de neige (Figure 14Erreur ! Source du renvoi introuvable.-B). Cette glace est remobilisée le 13 décembre au niveau du détroit et ne laisse alors apparaître aux caméras que du frasil (Figure 14Erreur ! Source du renvoi introuvable.-C). La première journée de couvert complet observée a été le 18 décembre pour la caméra 2 et le 19 décembre pour la caméra 1 (Figure 14Erreur ! Source du renvoi introuvable.-D). Dans les deux cas, les caméras ont été obstruées à partir du 15 décembre occasionnant une incertitude de 4-5 jours sur la date de mise

en place du couvert complet. Durant ces journées, la température enregistrée aux caméras a oscillé entre -25°C et -30°C.

Au printemps 2017, les premiers signes de fonte apparaissent sur le rivage vers le 5 avril avec une augmentation des températures et l'arrivée d'eau douce par un petit ruisseau. La fonte de la banquise côtière a débuté davantage lors de la deuxième semaine de mai avec plusieurs journées de chaudes températures (Figure 16). Des mares de fonte sont alors apparues sur le couvert de glace. La dégradation s'est poursuivie pendant près de 3 semaines sans mouvement du couvert. L'eau de mer est apparue pour la première fois dans la zone intertidale le 26 mai et dans le détroit le 27 mai (Figure 16**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-A). Comme dans les années précédentes (2009-2016), la dégradation du couvert s'est fait du nord vers le sud et la glace a été évacuée rapidement. Dès le 29 mai, le détroit est pratiquement libre de glace en face du village à l'exception d'une bande de banquise toujours fixée aux Îles Nastapoka (Figure 16**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-B). Le 1^{er} juin, la glace a été entièrement évacuée. Lors de la 2^e semaine de juin, une grande quantité de radeaux est ramenée en face du village et repoussée sur la rive (Figure 16**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-C). Des blocs de petites tailles font partie du lot mais la faible profondeur de l'eau les freine avant qu'ils atteignent l'infrastructure. Certains blocs demeurent en place quelques jours le temps de se dégrader suffisamment pour être remobilisés par les marées. Des radeaux de glace sont visibles jusqu'au 16 juin.

Pour conclure cette section, le Tableau 10 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2016-2017 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 2016 et août 2017 pour la baie en face du village d'Umiujaq.

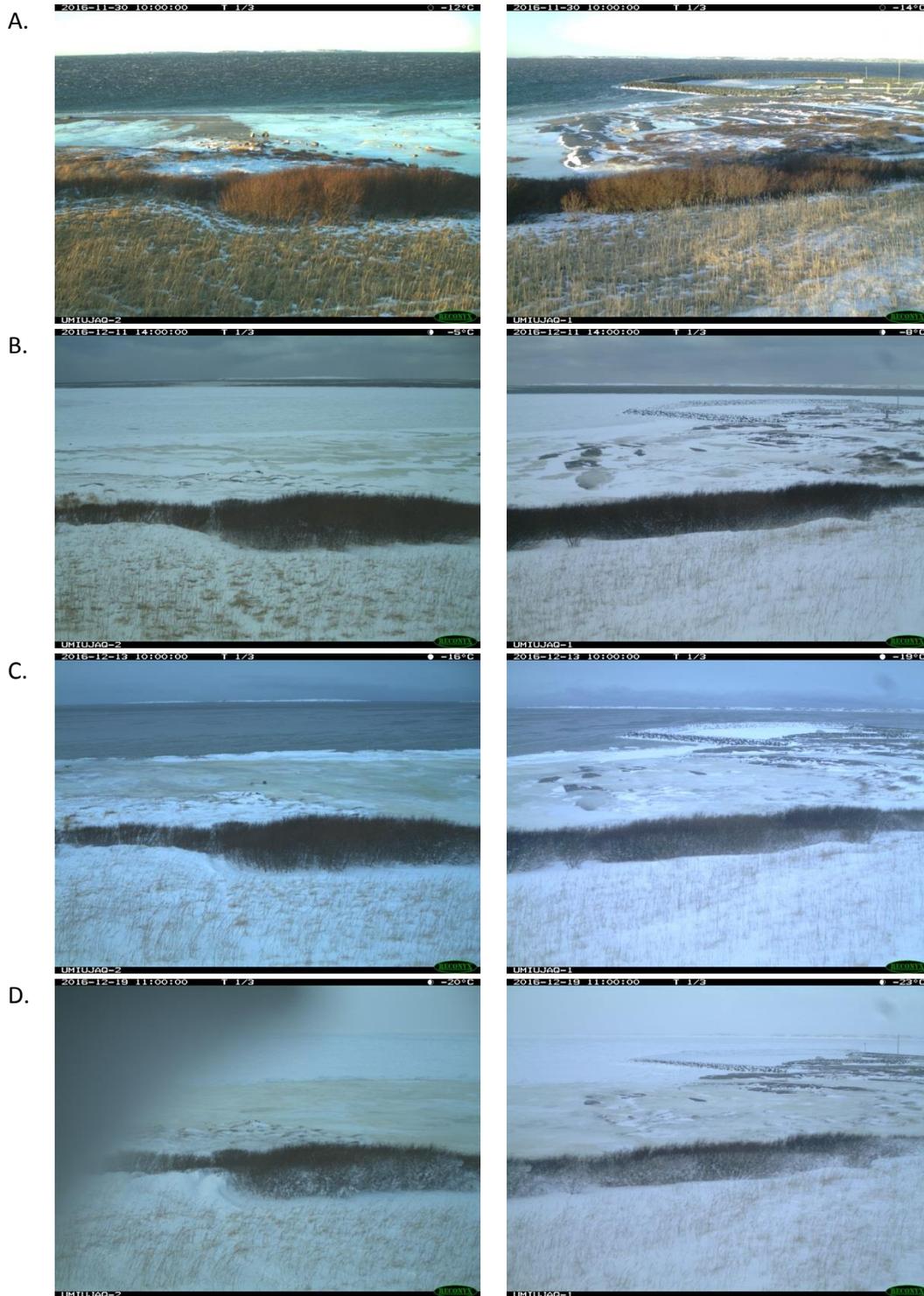


Figure 15 : Évolution de l'englacement 2016 à Umiujaq (A- 30 novembre 2016, B- 11 décembre 2016, C- 13 décembre 2016, D- 19 décembre 2016)

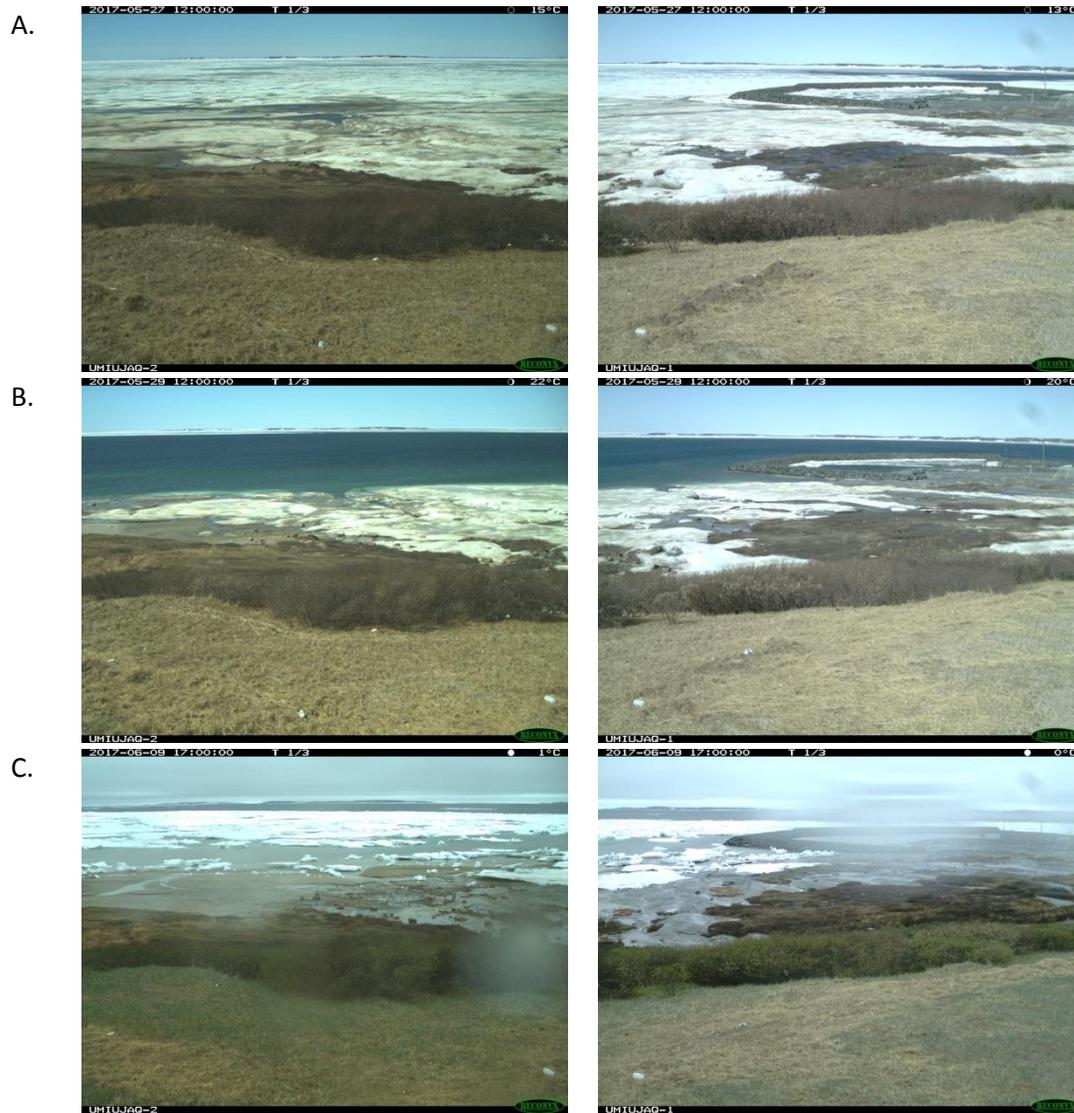


Figure 16 : Évolution de la fonte 2017 à Umiujaq (A- 27 mai 2017, B- 29 mai 2017, C- 9 juin 2017)

Tableau 10 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Umiujaq entre octobre 2016 et août 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Sud)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	30 novembre 2016	30 novembre 2016	30 novembre 2016
Couvert de glace permanent	19 décembre 2016	18 décembre 2016	19 décembre 2016
Première apparition d'eau	28 mai 2017	27 mai 2017	27 mai 2017
Libre de glace pour la première fois	1 juin 2017	1 juin 2017	1 juin 2017

Tableau 11 : 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
Durée de l'englacement en 2016	19
Durée du couvert de glace permanent en 2016-2017	159
Durée entre la première apparition d'eau et l'évacuation des glaces lors de la fonte printanière en 2017	5

2.6. Site d'observation à Kuujjuarapik

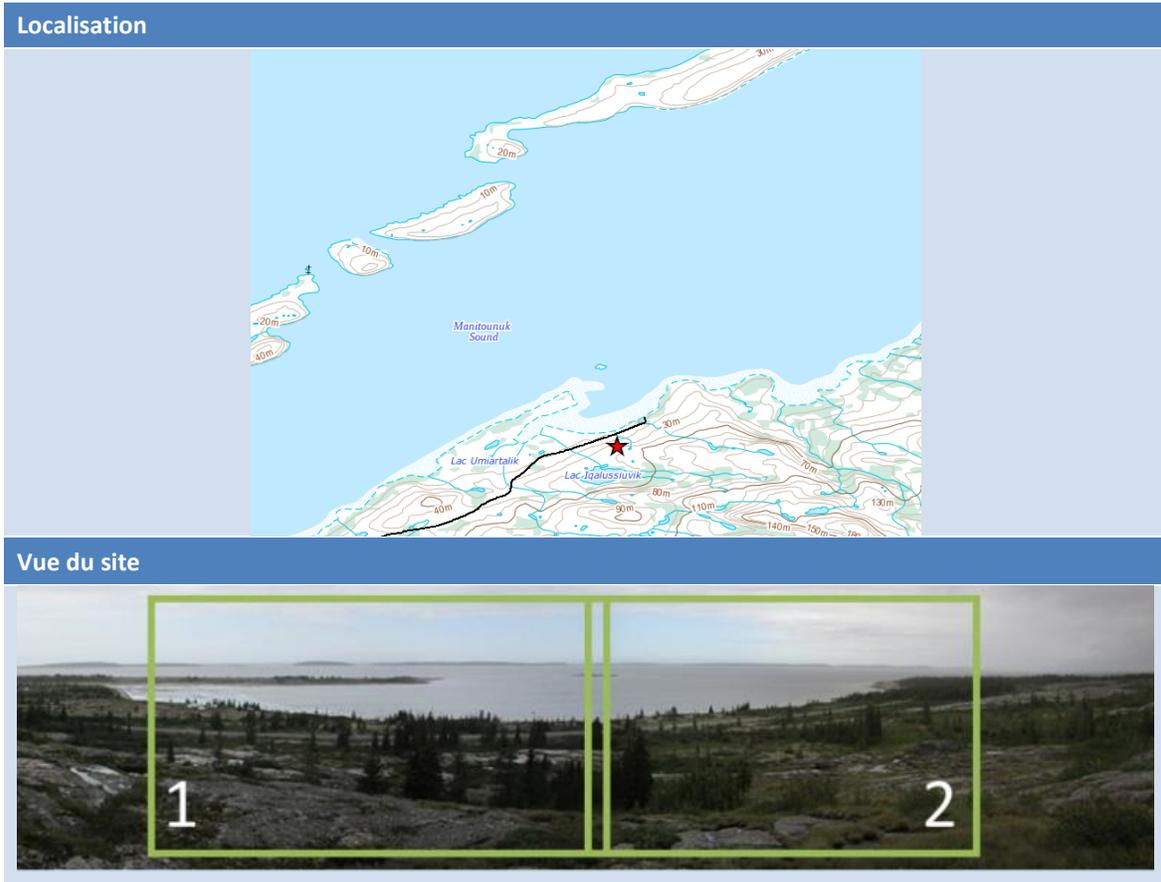


Figure 17 : Emplacement et vues des caméras situées au nord du village de Kuujjuarapik (caméra 1-nord-nord-ouest, caméra 2-nord-nord-est)

La Figure 17 illustre l'emplacement des deux caméras au nord du village de Kuujjuarapik et leurs vues. La figure 18 illustre l'évolution de l'englacement à l'automne 2016. Du frasil est visible dès le 23 novembre sur les photographies des deux caméras. Celui-ci se solidifiera près de la berge jusqu'à la limite de l'estran (Figure 18-A). L'étendue de glace diminuera les jours suivants pour disparaître de la caméra nord le 1^{er} décembre mais demeurera néanmoins dans le fond de la baie. Du 4 au 7 décembre, la limite du couvert fixe continuera de progresser vers le large alors que la quantité de frasil dans l'ensemble du détroit de Manitousuk et de la baie de l'infrastructure maritime sera en augmentation pour devenir complet le 7 décembre (Figure 18-B). De l'eau réapparaît dans la partie sud du détroit le 8 décembre puis progresse vers le nord les 9 et 10 décembre. La glace à l'intérieur de la baie est alors fixe et a commencé à se recouvrir de neige. Une fracture à la limite de la zone intertidale est cependant visible. Le 11 décembre, la fracture s'ouvre lors de la marée montante et l'ensemble de la glace est remise en mouvement par le vent du sud-sud-ouest lors de la marée descendante suivante (Figure 18-C). Du frasil est

observé les jours suivants. Le couvert se solidifie dans le détroit de Manitounuk en partant du nord vers le sud les 13-14 décembre (Figure 18-D) et s'étend à l'ensemble de la baie le 15 décembre. La glace est alors toujours en mouvement à l'ouest des îles Manitounuk.

L'évolution de la fonte de la glace au printemps 2017 à Kuujjuarapik est illustrée à la Figure 19. Au début mars 2017, une légère fonte du couvert de neige est remarquée les 7 et 8 mars alors que la température dépasse 0°C et monte jusqu'à 5°C. Un mois plus tard, vers les 8 et 9 avril, un peu de fonte se produit sur le couvert de glace alors que la température dépasse de nouveau 0°C et monte jusqu'à 5°C. Du 8 au 14 mai, la température atteint 17°C avec trois nuits au-dessus de 5°C ce qui accélère la détérioration du couvert et permet de dégager l'estran (Figure 19-A). De l'eau douce provenant entre autre de l'écoulement des lacs Umiartalik et Iqalussivik se jete dans la partie sud-ouest de cette petite baie. De l'eau apparaît donc fréquemment à cet endroit lors de réchauffement. Le 20 mai, beaucoup d'eau est visible dans le large estran du côté sud de la baie (Figure 19-B). Le couvert se détériore davantage les trois jours suivants avec des températures maximales supérieures à 13°C et minimales supérieures à 5°C. Les 22 et 23 mai de l'eau est visible à l'ouest des îles Manitounuk. Pour la zone d'intérêt, l'eau apparaît hors de l'estran le 26 mai (Figure 19-C) avec des températures supérieures à 20°C. La glace côtière fini de se détacher le 4 juin dans le détroit de Manitounuk laissant la place à des radeaux à la dérive (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-D). Les premières journées sans glace surviennent 3-4 jours plus tard. Les radeaux de glace reviennent quelques jours puis le 9 juin est la dernière journée où ils sont visibles.

Pour conclure cette section 2.6, le Tableau 13 synthétise les observations faites au courant de la saison de glace 2016-2017 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 2016 et août 2017 dans le détroit de Manitounuk à la hauteur de Kuujjuarapik.

Ceci termine la description des conditions de glace de rives observées à partir des photographies in-situ pour la saison d'englacement 2016 – 2017 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'automne 2017 et ce pour les deux sites d'étude des vagues soient Kuujjuarapik et à Quaqtak.

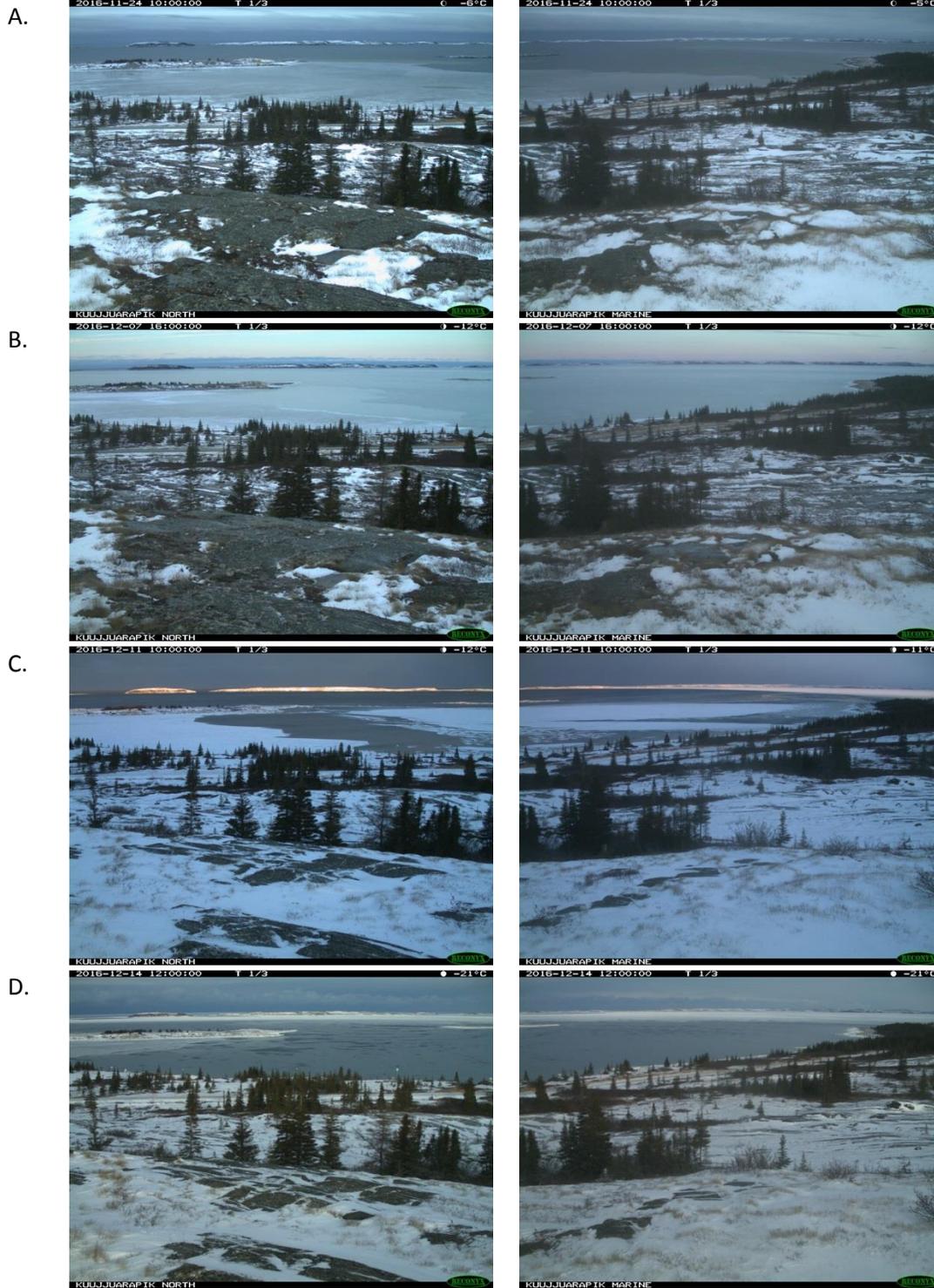


Figure 18 : Évolution de l'englacement 2016 à Kuujjuarapik (A- 24 novembre 2016, B- 7 décembre 2016, C- 11 décembre 2016, D- 14 décembre 2016)

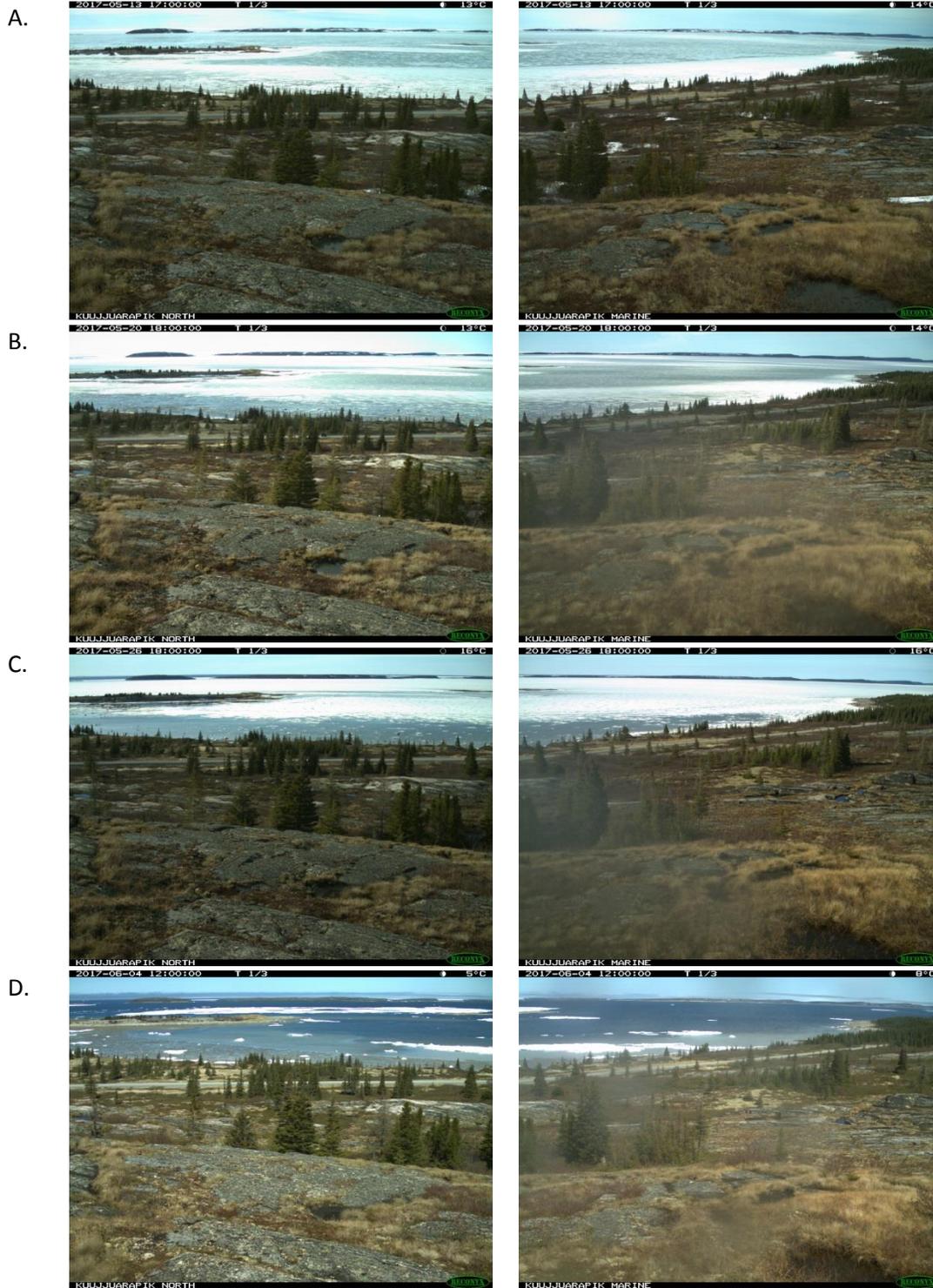


Figure 19 : Évolution de la fonte 2017 à Kuujuarapik (A- 13 mai 2017, B- 20 mai 2017, C- 26 mai 2017, D- 4 juin 2017)

Tableau 12 : Sommaire des observations de glace recueillies à partir des photographies des caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2016 et août 2017

Stade d'évolution du couvert de glace	Caméra 1 (Sud)	Caméra 2 (Nord)	Ensemble du site
Première apparition de glace	23 novembre 2016	23 novembre 2016	23 novembre 2016
Couvert de glace permanent	15 décembre 2016	14 décembre 2016	15 décembre 2016
Première apparition d'eau	26 mai 2017	26 mai 2017	26 mai 2017
Libre de glace pour la première fois	8 juin 2017	7 juin 2017	8 juin 2017

Tableau 13 : Nombre de jours des différents stades d'évolution du couvert de glace observés par les caméras à Kuujjuarapik entre octobre 2016 et août 2017

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

3. Cartes de concentration de glace réalisées à partir d'images satellitaires à Quaqtq et Kuujjuarapik pour l'englacement 2017 (Activité 4)

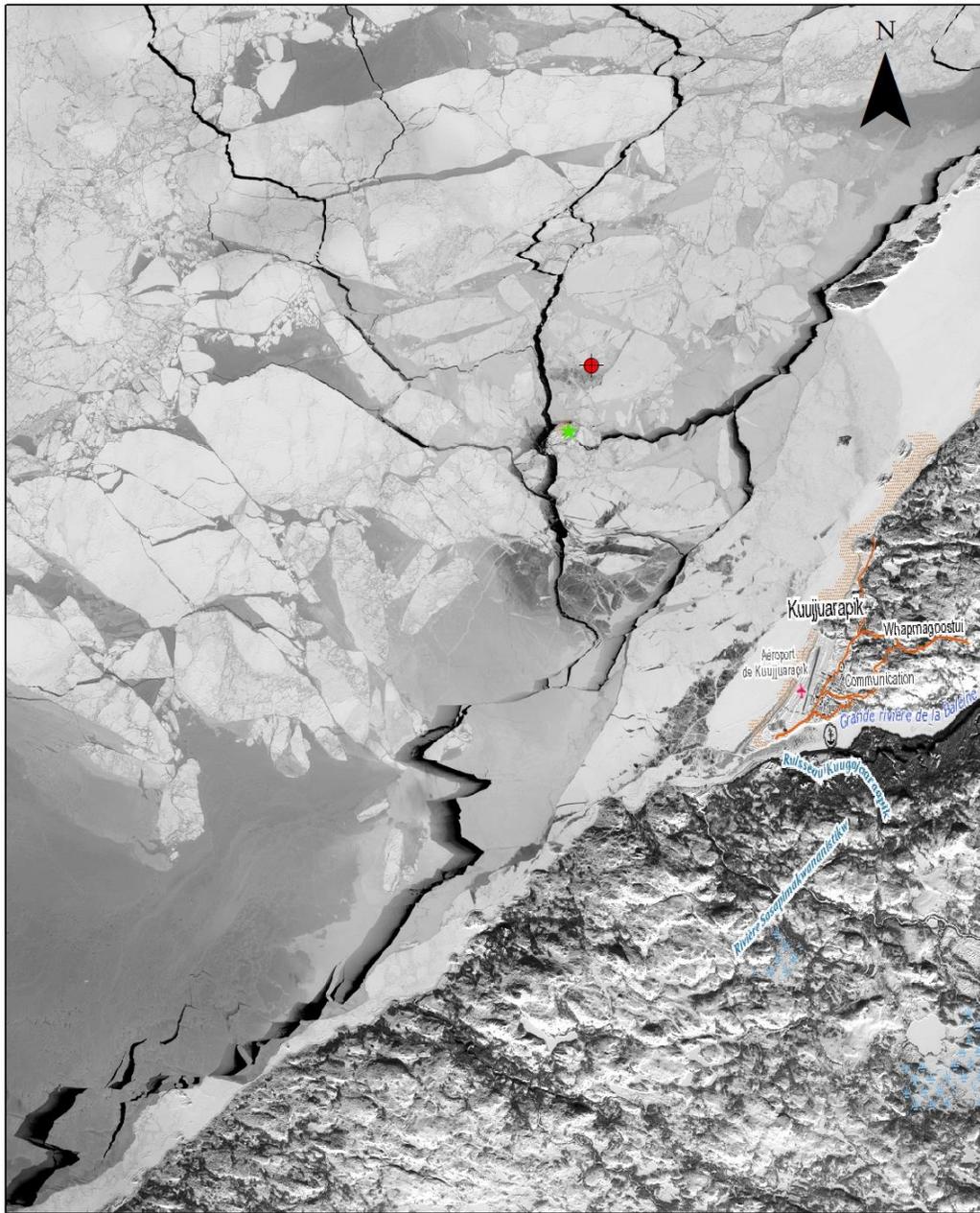
L'objectif de l'activité 4 est de produire des cartes de concentration de glace à partir d'images satellitaires Landsat-8 (25 m) et Sentinel-2 (20 m) pour les années 2017-2020, sur les sites d'étude des vagues du projet CC16.1 à Kuujjuarapik et à Quaqtq.

Pour l'englacement 2017-2018, les images satellitaires optiques de Landsat-8 et Sentinel-2 (disponibles gratuitement en ligne) couvrant les sites de Quaqtq 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 rapport 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 Figures 20 et 21. La Figure 20, 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 21 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 Quaqtq. 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. Puisque la résolution du modèle de vagues n'a pas encore été définie, le calcul de la concentration de glace n'a pas été effectué pour aucun des deux villages. Cette étape pourra être faite en même temps que le traitement des images satellitaires des prochaines saisons (fonte 2018 et englacement 2018).

Tableau 14 : Nombre d'images traitées par site pour chaque satellite

	Kuujjuarapik	Quaqtq
Landsat-8	30	27
Sentinel-2	48	22



Légende

- ◆ Position du mouillage
- ★ Caméras

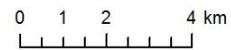
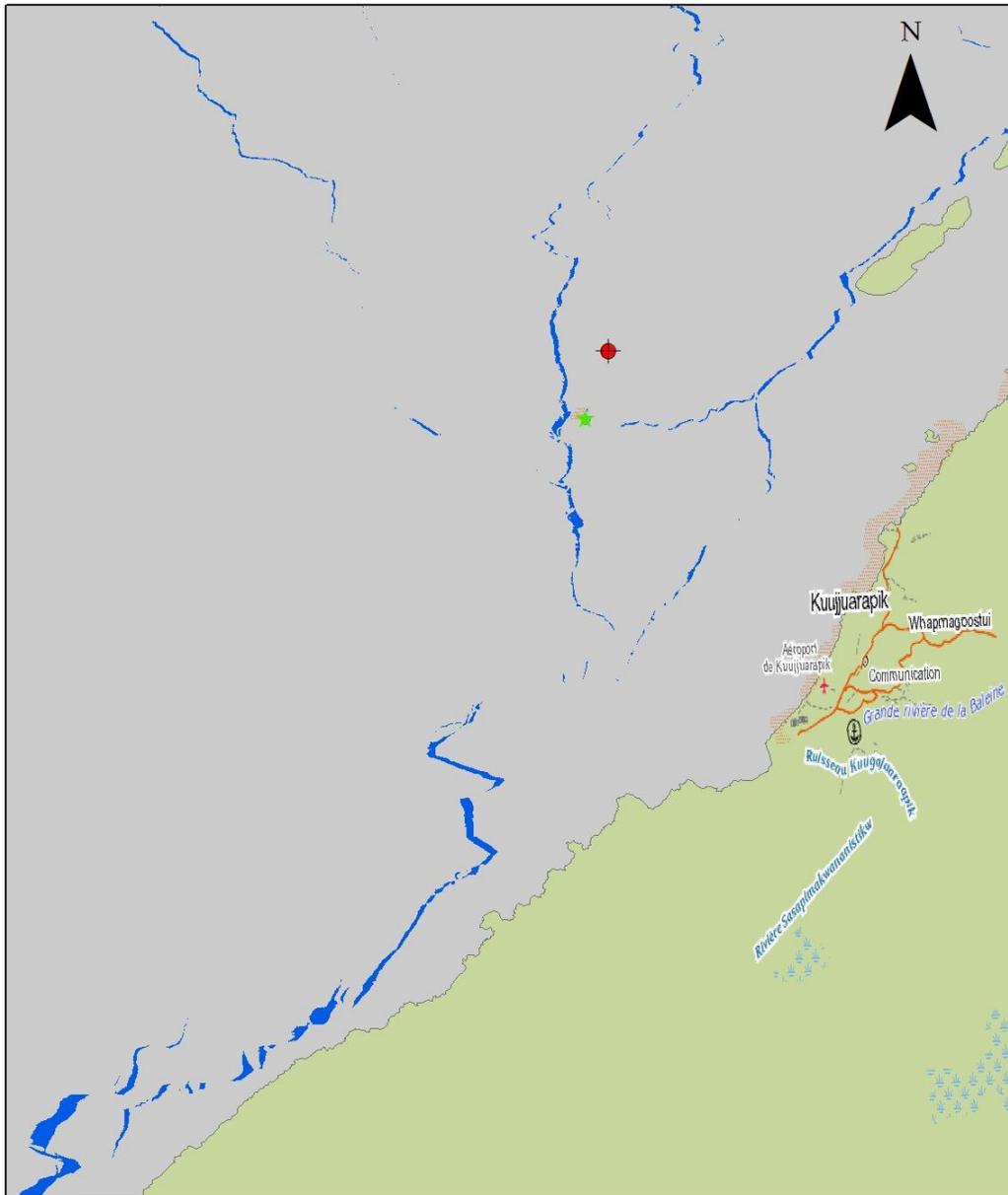


Figure 20 : Image du satellite Sentinel-2 (Bande 8 – Proche infra-rouge) acquise le 3 janvier 2018 dans le secteur de Kuujuaupik



Légende

- ◆ Position du mouillage
- ★ Caméras

Carte de glace

- Continent
- Eau
- Glace

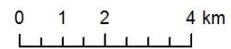


Figure 21 : Carte de glace produite à partir de l'image du satellite Sentinel-2 acquise le 3 janvier 2018 dans le secteur de Kuujuaupik

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

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

L'objectif de cette activité est d'étudier le potentiel des images satellitaires radar (RADARSAT-2 et éventuellement Constellation) 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 objectifs spécifiques de l'activité 5 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 Radar auprès de l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) et l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA).
- Tester et adapter la méthodologie sélectionnée (deuxième objectif spécifique) 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 paramètres de vagues : direction dominante, longueur d'onde dominante, hauteur significative et période dominante des vagues.

4.1. Revue de la littérature

Il existe une multitude de méthodes dans la littérature scientifique pour déterminer les paramètres des vagues d'une image radar à synthèse d'ouverture (RSO.) Une première génération de méthodes d'extraction a tenté de modéliser les mécanismes des interactions radar-océan comme fonctions de transfert, de manière généralement non-linéaire afin de pouvoir inverser le spectre de l'image RSO et extraire ainsi celui des vagues. L'image RSO des vagues étudiées était considérée comme étant figée dans le temps. Or, en raison de l'ambiguïté de 180° liée à la direction du spectre des vagues et de l'effet de coupure azimutale, cette première génération utilisait de l'information de simulations numériques comme première estimation du résultat attendu. Ainsi, les différentes fonctions de transfert étaient appliquées à la première estimation du spectre des vagues pour créer l'image RSO prédite par la simulation numérique qui, bien entendu, différait de l'image réelle. À l'aide de ces deux pièces d'information, la résultante du maximum de vraisemblance des deux images était calculée, la plupart du temps en effectuant la minimisation d'une fonction de coût entre l'image radar et celle du modèle numérique. De plus, le résultat de l'étape de vraisemblance maximale dépend

de poids associé à chacune des images. Il est ainsi possible d'ignorer les parties de l'image hautement compromises par les effets de coupure azimutales ou d'accumulation azimutale pour les remplacer par les parties de l'image du modèle numérique. Cette première méthode d'extraction a été développée par Hasselmann and Hasselmann (1991), puis améliorée en (1996) et porte communément de nom d'algorithme du Max-Planck-Institute (MPI). Krogstad, Samset et al. (1994) développèrent une simplification quasi-linéaire de la méthode et Engen, Johnsen et al. (1994) complexifièrent la fonction de transfert utilisée.

Un modèle numérique n'est théoriquement pas nécessaire pour résoudre l'ambiguïté de 180° de la direction des vagues. En effet, un certain temps est nécessaire au radar afin de faire l'acquisition de l'entièreté de l'image RSO. Ainsi, certaines parties de l'image RSO n'ont pas été acquises exactement au même moment. Les vagues présentes sur ces images ont ainsi pu se propager au fil de l'image. En observant et calculant les légers changements d'une vue à une autre successive dans l'image, il est possible de détecter la propagation et donc la direction des vagues. Engen and Johnsen (1995) amorcèrent ainsi une seconde génération de méthode d'extraction du spectre des vagues en utilisant l'inter spectre complexe de l'image RSO. Une première approximation d'un modèle numérique est toutefois tout de même nécessaire pour récupérer l'information perdue par la coupure azimutale. L'équivalent moderne de cet algorithme est le Partition Rescaling and Shift Algorithm (PARSA) développé par Schulz-Stellenfleth, Lehner et al. (2005).

Pour certaines applications, récupérer le spectre complet des vagues n'est pas nécessaire. L'information recherchée réside plutôt dans les différents paramètres intégraux de ce spectre, soient la longueur d'onde, la direction, la période et la hauteur dominante des vagues. Pour ces situations, les algorithmes empiriques, certes moins sophistiqués, mais tout aussi performant, offre la possibilité de récupérer les paramètres de vagues intégraux de manière simple et accessible. Ils ont l'avantage de ne pas utiliser des fonctions de transfert complexes.

CWAVE (Schulz-Stellenfleth, König et al. 2007) destiné au satellite ERS-2/SAR fut le premier modèle empirique développé dans le but de récupérer les paramètres intégraux océaniques à partir d'image RSO. L'algorithme a utilisé un modèle de fonction quadratique à 22 paramètres qui a été ajusté par régression séquentielle. Similairement, CWAVE_ENV (Li, Lehner et al. 2011) utilisé en paire avec les images du satellite ENVISAT/ASAR est une reproduction du premier algorithme adapté aux paramètres d'ASAR. Bien que les mêmes 22 paramètres que son précurseur soient utilisés, ce modèle est plutôt géophysique, ajusté par régression multiple. D'un autre côté, XWAVE (Bruck and Lehner 2012) est un modèle empirique développé pour traiter les images en bande X du satellite TerraSAR-X. Dans ce cas-ci, l'algorithme demande un plus petit nombre de paramètres d'entrée, soit sept (7). Toutefois, l'algorithme utilise un modèle géophysique à deux fonctions plus sophistiqué. L'algorithme a été calibré par régression linéaire. Finalement, CWAVE_S1A (Stopa and Mouche 2017) destiné au satellite SENTINEL-1 A est un dernier modèle empirique récupérant les paramètres intégraux océaniques. Contrairement aux autres algorithmes, le CWAVE_S1A a plutôt été développé en utilisant des techniques de réseaux de neurones. Ces modèles, bien qu'atteignant une précision relativement

satisfaisante, comportent tout de même plusieurs lacunes. D'abord, ils demandent pour leur calibration une très grande série d'images co-localisées en plus de mesures références provenant de modèle numérique ou de bouées. Ensuite, ils ne sont souvent applicables qu'aux lieux où ils ont été calibrés. Leur champ d'application est ainsi très réduit.

En ce qui a trait à la hauteur des vagues, d'autres approches ont été développées afin d'extraire ce paramètre des images RSO. Ces approches, dites semi-empiriques, utilisent les relations existantes entre la hauteur des vagues et d'autres paramètres pour ajuster des relations empiriques. Wang, Zhu et al. (2012) ont utilisé les relations existantes entre la coupure azimutale, la longueur d'onde dominante et la hauteur de vagues dominante pour développer un simple modèle semi-empirique d'extraction d'hauteur de vagues.

D'un autre côté, Shao, Zhang et al. (2016) a mis sur pieds un modèle semi-empirique ayant comme paramètre la longueur d'onde de coupure azimutale, l'angle d'incidence du radar et la direction des vagues relative au radar. Ces méthodes ont l'avantage d'être très simple à utiliser et de ne dépendre d'aucunes informations extérieures.

Finalement, certains algorithmes utilisent plutôt des techniques de photogrammétrie (shape-from-shading). Au lieu de tenter de retrouver la direction du spectre des vagues, cette technique génère plutôt, à partir du contraste et de la luminosité de l'image, une surface d'élévation. Le spectre de cette surface d'élévation (slope spectra) est récupéré et les paramètres océaniques y sont dérivés. Cette technique a l'avantage de ne pas demander plusieurs scènes co-localisées comme le demande l'étalonnage des modèles empiriques ou semi-empiriques. Cette technique requiert habituellement les quatre polarisations RSO (He, Perrie et al. 2004) donc des images quadpol d'où l'avantage de RADARSAT-2 par rapport au RSO de Sentinel-1.

L'accessibilité à des données quadruple polarisation rend l'application des techniques de photogrammétrie très intéressante et accessible. C'est d'ailleurs sur l'algorithme développé par Xie, Perrie et al. (2015) que se concentrera cette étude, en utilisant des données acquises en mode Standard quad-pol de RADARSAT-2 et avec des données en polarisation circulaire de la future mission Constellation RADARSAT dépendant de la disponibilité de ces nouvelles images en 2018 ou 2019.

4.2.Méthodologie

4.2.1. Mécanismes de rétrodiffusion RSO

L'écho d'un signal RSO est en grande partie généré par un effet physique surnommé résonance de Bragg (Figure 23). Ce phénomène ondulatoire explique qu'il peut y avoir interférence constructive ou destructive lorsqu'un faisceau de lumière est réfléchi sur une surface rugueuse. Dans le cas de l'eau, la rétrodiffusion du signal est dominée par la présence de vagues capillaires

produites par les vents. Ce sont ces interférences avec les vaguelettes qui donnent naissance aux différentes valeurs d'intensité de l'image (Schulz-Stellenfleth and Lehner 2001).

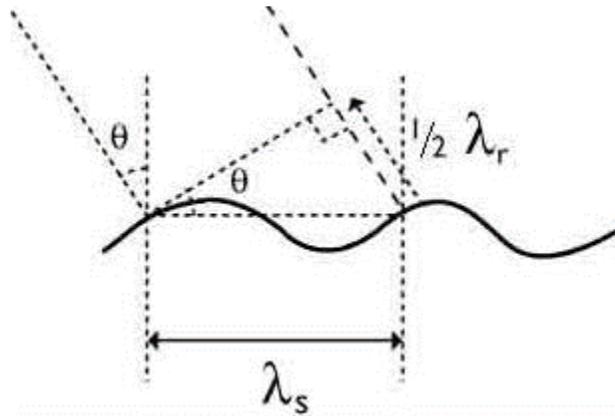


Figure 22 : Géométrie de la diffusion résonnante de Bragg. Extrait ESA Earth Online (2017).

D'ailleurs, la résonance de Bragg dépend étroitement de la longueur d'onde du faisceau de lumière émis. En bande C, les vaguelettes détectées sont de l'ordre d'une dizaine de centimètres en longueur d'onde, en L, d'une trentaine de centimètres et en X, d'au plus trois centimètres. Dans le cas où la surface d'eau ne comporte pas de vaguelettes correspondantes à la longueur d'onde du signal, la surface devient spéculaire et le radar ne capte aucun écho. La houle et les vagues ne peuvent alors pas être imagées.

Bien que la résonance de Bragg semble être à première vue un phénomène proportionnel, ils existent de nombreuses interactions radar-océan venant complexifier l'extraction des vagues. Ainsi, le spectre des vagues n'est pas directement proportionnel à celui de l'image radar, certaines fonctions de modulation doivent être définies afin d'inverser le spectre de l'image radar.

D'abord, la présence de houle de longueur d'onde au moins deux fois supérieure aux vaguelettes de Bragg provoque un phénomène d'inclinaison sur l'onde incidente (tilt modulation) illustrée à la Figure 24. En effet, l'angle local des vaguelettes par rapport à celui d'incidence du radar n'est pas constant lors de la présence de houle, ce qui crée l'illusion que les vaguelettes ne sont pas de longueurs d'onde constantes (Robinson 2004).

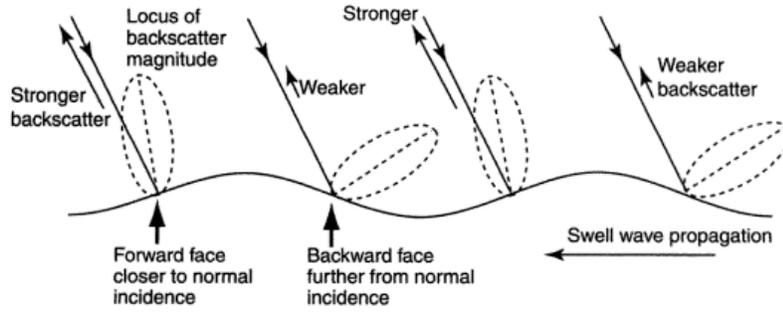


Figure 23 : Illustration de l'effet d'inclinaison sur l'onde incidente. Extrait de Robinson (2004)

4.2.2. Méthode sélectionnée

La technique de photoclinométrie (shape-from-shading) développée par Xie, Perrie et al. 2015 sera utilisée afin d'extraire les paramètres des vagues sur des images RSO. Cette technique génère une surface en 3D de la surface de la mer (Figure 25) à partir d'informations polarimétriques dans une image RSO acquise dans les quatre polarisations (HH, HV, VH et VV).

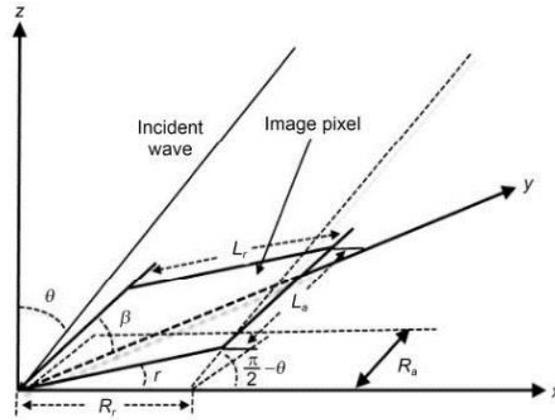


Figure 24 : Paramètres géométriques d'un pixel. Une micro-onde électromagnétique d'un angle d'incidence θ frappe un pixel où R_r , R_a , $\tan\beta$ et $\tan\gamma$ sont respectivement la résolution en distance, la résolution en azimuth, la pente en azimuth et la pente en distance

En assimilant l'océan à une surface de diffusion lambertienne, il est possible de dériver une équation liant le ratio $R(\beta, \gamma)$ de l'intensité d'un pixel $I(\beta, \gamma)$ avec l'intensité moyenne de l'image I_0 et les pentes et angle d'incidence de ce pixel (Xie, Perrie et al. 2015).

$$R(\beta, \gamma) = \frac{I(\beta, \gamma)}{I_0} = \frac{\cos\theta \cos\beta \sin^2(\theta + \gamma)}{\cos(\theta + \gamma) \sin^2\theta} \quad (1)$$

D'un autre côté, la pente en direction azimutale introduit un changement d'angle d'orientation φ qui modifie toutes les polarisations de l'image RSO. Cette relation a été dérivée par (Lee, Krogager et al. 2000) et (Pottier and Lee 2000) de manière indépendante et fait présomption que le mécanisme de rétrodiffusion principale est celui de Bragg.

$$\tan\varphi = \frac{\tan\beta}{\sin\theta - \tan\gamma\cos\theta} \quad (2)$$

Une multitude de technique existe pour évaluer l'angle de polarisation φ . Lee, Krogager et al. (2000) développèrent une technique d'extraction de cet angle basé sur la polarisation circulaire de la matrice de covariance.

$$\varphi = \begin{cases} \phi & \text{si } \phi \leq \frac{\pi}{4} \\ \phi - \frac{\pi}{2} & \text{si } \phi > \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{1}{4} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-4 \operatorname{Re} \langle (S_{HH} - S_{VV}) S_{HV}^* \rangle}{-\langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle + 4 \langle |S_{HV}|^2 \rangle} + \pi \right) \right] \quad (4)$$

À l'aide des équations [1], [2], [3] et [4], il est ainsi possible de déterminer pour chaque pixel de l'image la pente en azimut ($\tan\beta$) et la pente en distance ($\tan\gamma$). La surface d'élévation de l'image peut ainsi être établie (Figure 25).

Avant d'effectuer le calcul des paramètres des vagues sur les images, ces dernières sont prétraitées. L'information polarimétrique contenue dans les images brutes de niveau 1.1 est extraite en coefficients de rétrodiffusion complexes sous la forme de la matrice Sinclair S , où H et V indique la polarisation du faisceau (Ferro-Famil, Pottier et al. 2001, Schuler, Lee et al. 2004).

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Un traitement multi-visé est appliqué sur les images représentant les éléments de la matrice S . La matrice de cohérence T_3 est ensuite calculée et filtrée avec un filtre polarimétrique de type Boxcar de taille 7x7 afin d'éliminer le chatoiement restant et rehausser les motifs de vagues.

La première étape de l'analyse consiste à récupérer la pente en distance et en azimut pour chacun des pixels de l'image à l'aide des équations de [1]-[4]. Une fois ces pentes récupérées, le spectre des pentes sera calculé afin de déterminer les paramètres océaniques de l'image.

Un filtre gaussien 3x3 est appliqué aux images de pentes avant le calcul du spectre afin d'éliminer les valeurs extrêmes. De plus, les images sont converties de distance-oblique à distance-sol par interpolation bilinéaire. Le spectre des pentes $F(k)$ (Figure 26) est le résultat de

la somme des transformations discrètes de Fourier 2D des pentes en distance $F_r(k)$ et de celles en azimut $F_a(k)$.

$$F(k) = F_r(k) + F_a(k) \quad (6)$$

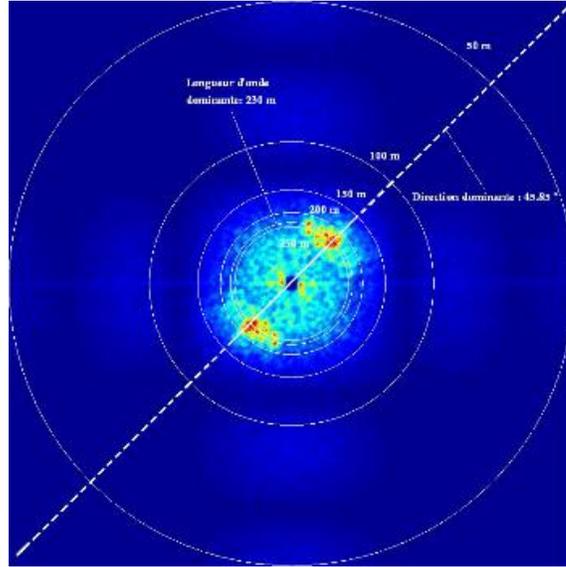


Figure 25 : Spectre des pentes, de la longueur d'onde et de la direction dominante des vagues. Extrait d'une sous-scène ALOS PALSAR-1 (rapport de stage non publié de Charles-Eric Noel-Laflamme, août 2017).

À l'aide de ce spectre des pentes, la direction dominante des vagues, la longueur d'onde dominante, la hauteur significative et la période dominante sont calculées. Il est à noter que les éléments du spectre autour de la composante de courant continu (correspondant au centre) sont masqués et le spectre calculé est par la suite lissé.

Pour ce qui est de la direction dominante des vagues φ , celle-ci est récupérée en calculant l'angle de la longueur d'onde dominante. Cet angle est projeté au préalable en latitude et en longitude afin de pouvoir être comparé directement avec celui des bouées.

La longueur d'onde dominante λ_d est déterminée en calculant la longueur d'onde au maximum du spectre.

Quant à la hauteur significative des vagues H_d , celle-ci est calculée à partir de la moyenne quadratique S_{rms} de la surface d'élévation et de la longueur d'onde dominante des vagues λ_d (Xie, Perrie et al. 2015).

$$\tan S_{rms} = \frac{2H_d}{\lambda_d} \quad (7)$$

Cette moyenne quadratique est elle-même calculée selon les pentes en distance $\tan \gamma$ et en azimut $\tan \beta$ ainsi que la direction dominante des vagues φ calculée auparavant.

$$S_{rms} = \sqrt{S_a \sin \varphi + S_r \cos \varphi} \quad (8)$$

Avec $S_r = \tan \gamma$

$S_a = \tan \beta$

Finalement, la période dominante T_d des vagues peut être calculée à partir de la profondeur des lieux D et de la longueur d'onde dominante λ_d précédemment calculée, où g est la constante gravitationnelle.

$$T_d = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_d} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda_d} D\right)}} \quad (9)$$

Figure 2627 présente des cartes de paramètres de vagues extraites avec la présente méthodologie réalisée par un stagiaire (Charles-Eric Noel-Laflamme) à l'été 2017 à partir d'une scène ALOS-PALSAR-1 en band L prise sur San Clemente aux États-Unis. Le diagramme général de la méthodologie est présenté à la Figure 28. Ces images SAR ont été choisies à cause de la disponibilité de données in-situ (bouées). Les valeurs de la profondeur de la mer utilisée dans l'équation [9] seront obtenues à partir des de mesures (haute résolution) de bathymétrie effectuées dans les baies de Kuujuarapik et Quaqtaq à l'été 2017 par l'ISMER.

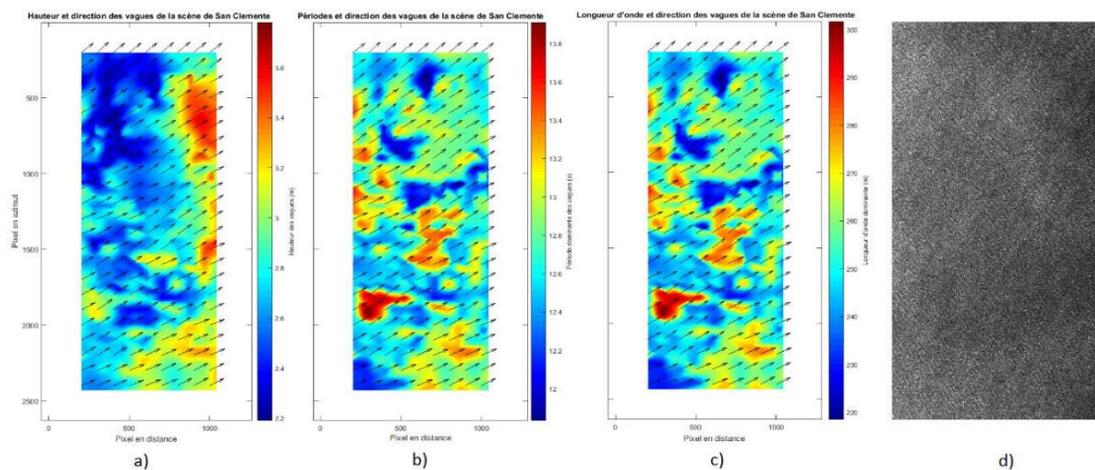


Figure 2627 : Cartes de la hauteur, de la période et de la longueur d'onde dominantes des vagues sur la mer de San Clemente aux États Unis. a) Hauteur dominante, b) période dominante, c) longueur d'onde dominante et d) image prétraitée (extrait du Rapport de stage)

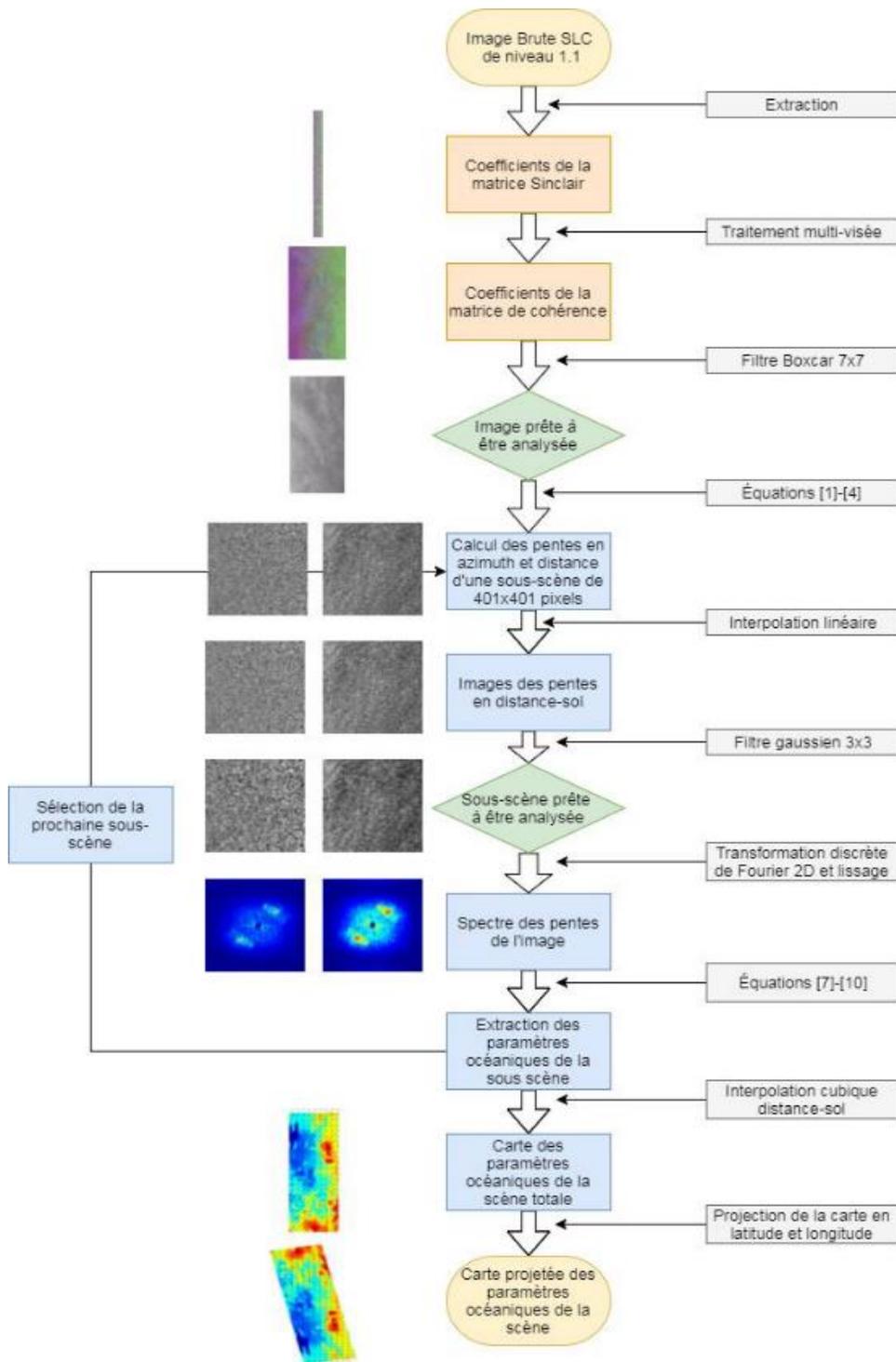


Figure 28 : Schéma de la procédure général de l'extraction des paramètres océaniques.

4.3. Commande d'images

4.3.1. Images polarimétriques RADARSAT-2

Des images polarimétriques de RADARSAT-2 ont été demandées auprès de l'Agence Spatiale Canadienne en octobre 2017. La demande a été acceptée au cours du mois de février 2018. L'acquisition de ces images va débuter dans les prochains mois. Les paramètres des images demandées sont résumés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 15 et Tableau 16). La première image pour chaque site devra être reportée à l'été ou l'automne 2018 en raison de l'acceptation tardive de la demande. La priorité est d'avoir des images polarimétriques en dehors de la période d'englacement (août à novembre).

Tableau 15 : Acquisition RADARSAT-2 à Kuujuarapik

Swath	Start Time (UTC)	Duration	Pass	Look	Beam	Tx	Rx	Frames
1	2017-Nov-04 22:49:12.041	00:00:07.300	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
2	2018-Aug-19 22:49:12.035	00:00:07.300	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
3	2018-Aug-29 11:31:45.890	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
4	2018-Sep-12 22:49:12.041	00:00:07.300	ASC	Right	SQ (SQ11)	H+V	H+V	1
5	2018-Sep-22 11:31:45.890	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
6	2018-Oct-16 11:31:45.890	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
7	2019-Aug-24 11:31:45.884	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
8	2019-Sep-17 11:31:45.896	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
9	2019-Oct-11 11:31:45.884	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
10	2019-Nov-04 11:31:45.890	00:00:07.300	DES	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1

ASC* : Orbite Ascendante

DES* : Orbite Descendant

Tableau 16 : Acquisition RADARSAT-2 à Quaqtaq

Swath	Start Time (UTC)	Duration	Pass	Look	Beam	Tx	Rx	Frames
1	2017-Oct-02 22:12:59.417	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
2	2018-Sep-03 22:12:59.386	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
3	2018-Sep-09 11:09:08.056	00:00:07.300	DES*	Right	SQ (SQ12)	H+V	H+V	1
4	2018-Sep-27 22:12:59.403	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
5	2018-Oct-03 11:09:08.030	00:00:07.300	DES*	Right	SQ (SQ12)	H+V	H+V	1
6	2019-Aug-29 22:12:59.401	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
7	2019-Sep-04 11:09:08.048	00:00:07.300	DES*	Right	SQ (SQ12)	H+V	H+V	1
8	2019-Sep-22 22:12:59.397	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
9	2019-Sep-28 11:09:08.051	00:00:07.300	DES*	Right	SQ (SQ12)	H+V	H+V	1

10	2019-Oct-16 22:12:59.393	00:00:07.300	ASC*	Right	SQ (SQ14)	H+V	H+V	1
----	--------------------------	--------------	------	-------	-----------	-----	-----	---

4.3.2. Images PALSAR

Des images RSO en bande L provenant d'un autre capteur (PALSAR) du satellite japonais ALOS ont été commandées. Ces images sont à extraire des archives de JAXA. Elles ont été également acquises en dehors de la période d'englacement, soit du mois d'août à novembre 2016.

Tableau 17 : Acquisition PALSAR à Kuujuarapik

	ID	Date	Obs_mode
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2120002500-160812	2016-08-12T17:32:41Z	obsmode: SM1, Off-nadia[deg]: 32.4
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2120002510-160812	2016-08-12T17:32:41Z	obsmode: SM1, Off-nadia[deg]: 32.4
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2135301110-161124	2016-11-24T04:41:50Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 28.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2135301120-161124	2016-11-24T04:41:50Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 28.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2136041090-161129	2016-11-29T04:50:08Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 28.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2138111100-161213	2016-12-13T04:48:48Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 32.5
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2138111110-161213	2016-12-13T04:48:48Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 32.5
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2138111120-161213	2016-12-13T04:48:48Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 32.5

Tableau 18 : Acquisition PALSAR à Quaqtaq

	ID	DATE	Obs_mode
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2120511200-160816	2016-08-16T04:03:58Z	obsmode: WD1, Off-nadia[deg]: 34.9
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2120511250-160816	2016-08-16T04:03:58Z	obsmode: WD1, Off-nadia[deg]: 34.9
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2133671220-161113	2016-11-13T04:07:03Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 36.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2133671230-161113	2016-11-13T04:07:03Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 36.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2134411210-161118	2016-11-18T04:14:00Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 36.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2134411220-161118	2016-11-18T04:14:00Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 36.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2135001220-161122	2016-11-22T04:00:05Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 28.2
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2137811220-161211	2016-12-11T04:07:03Z	obsmode: SM3, Off-nadia[deg]: 32.5
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2139141200-161220	2016-12-20T04:03:59Z	obsmode: WD1, Off-nadia[deg]: 34.9
ALOS-2 / PALSAR-2	ALOS2139141250-161220	2016-12-20T04:03:59Z	obsmode: WD1, Off-nadia[deg]: 34.9

5. Conclusions et recommandations

Le 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 ainsi que des images satellites optiques Landsat-8 et Sentinel-2.

En ce qui concerne l'interprétation des photographies extraites du réseau CAIMAM environ 50 000 photos et 130 images satellites ont été analysées pour la saison 2016-2017. Les photos horaires permettent de bien distinguer l'arrivée et le départ de la glace, ainsi que la présence de blocs en dérive qui peuvent représenter un risque pour 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 a montré peu de variabilité entre les différents sites d'observation (villages) des caméras quant à la durée du couvert de glace permanent. Aussi, les sites de la baie d'Ungava et du détroit d'Hudson ont tous été touchés par un système de très grandes marées lors de la dernière semaine de juin 2017 alors qu'un couvert de glace mobile était à proximité. Accompagné de vents en provenance du large, cela a eu pour effet de pousser une grande quantité de radeaux et de blocs de glace dans les baies. À Aupaluk et Quaqtuaq, cette glace est demeurée plusieurs jours échouée dans la zone intertidale.

Pour les sites expérimentaux du projet de modélisation des vagues, près des villages de Kuujjuarapik et Quaqtuaq, les images Landsat-8 et Sentinel-2 viennent compléter l'information des photos en fournissant une vue plus régionale des conditions de glace. Par contre, les images acquises sans nuage pendant les périodes critiques (englacement et fonte) et qui permettent de voir la zone observée par la caméra sont plutôt rares. Des images SAR dont le signal traverse les nuages des satellites européens Sentinel-1A et Sentinel-1B (également fournies gratuitement et disponibles théoriquement aux 6 jours depuis le printemps 2016) seront utilisées pour cette période critique en complément aux images optiques. Nous ferons la cartographie glace/non glace des images SAR pour les saisons 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020.

Un troisième volet du projet vise à valider le potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues pour deux sites à Kuujjuarapik et Quaqtuaq. Pour ce faire, deux sources de données seront utilisées : des images RADARSAT-2 et PALSAR du satellite japonais ALOS-2. Pour ce volet, la revue de littérature a été faite et la méthodologie sélectionnée, nous pourrions débiter la validation du potentiel de l'imagerie satellitaire radar pour déterminer les caractéristiques des vagues dès que les premières images PALSAR (bande L) déjà acquises seront téléchargées au printemps 2018. Pour RADARSAT-2, l'Agence Spatiale Canadienne a autorisé l'acquisition d'images polarimétriques par l'INRS en février 2018 (programme SOAR-Education). Nous soumettrons incessamment au bureau de commande notre liste d'images souhaitées afin de déterminer les possibles conflits d'utilisation avec d'autres

utilisateurs. Les images seront acquises qu'à compter de l'été 2018. Nous tenterons d'acquérir un maximum d'images à l'automne (fort vents) et durant la formation de la glace (décembre).

Dans la prochaine année (2018-2019), nous tenterons de mieux comprendre les liens entre les dates d'englacement et de fonte plus au moins hâtives ou tardives identifiées à partir du réseau CAIMAN et des images satellitaires avec les changements dans les conditions climatiques (vent forts, hausse des températures, ensoleillement, précipitations) et environnementales (marées).

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, Quaqtac et Aupaluk - Projet de recherche CC09.1. Rapport final.

Bruck, M. and S. Lehner (2012). Sea state measurements using TerraSAR-X data. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

Ferro-Famil, L., et al. (2001). "Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier." IEEE transactions on geoscience and remote sensing **39**(11): 2332-2342.

Hasselmann, K. and S. Hasselmann (1991). "On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion." Journal of Geophysical Research: Oceans **96**(C6): 10713-10729.

Krogstad, H. E., et al. (1994). "Generalizations of the non-linear ocean-SAR transform and a simplified SAR inversion algorithm." Atmosphere-Ocean **32**(1): 61-82.

Lee, J. S., et al. (2000). On the estimation of polarization orientation angles induced from azimuth slopes using polarimetric SAR data. IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120).

Li, X.-M., et al. (2011). "Ocean wave integral parameter measurements using ENVISAT ASAR wave mode data." IEEE transactions on geoscience and remote sensing **49**(1): 155-174.

Pottier, E. and J.-S. Lee (2000). Application of the «H/A/alpha» polarimetric decomposition theorem for unsupervised classification of fully polarimetric SAR data based on the wishart distribution. SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites.

Robinson, I. S. (2004). Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography, Springer Science & Business Media.

Schuler, D. L., et al. (2004). "Measurement of ocean surface slopes and wave spectra using polarimetric SAR image data." Remote Sensing of Environment **91**(2): 198-211.

Schulz-Stellenfleth, J. and S. Lehner (2001). "Ocean wave imaging using an airborne single pass across-track interferometric SAR." IEEE transactions on geoscience and remote sensing **39**(1): 38-45.

Schulz-Stellenfleth, J., et al. (2007). "An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data." Journal of Geophysical Research: Oceans **112**(C3).

Shao, W., et al. (2016). "Ocean wave parameters retrieval from Sentinel-1 SAR imagery." Remote Sensing **8**(9): 707.

Stopa, J. E. and A. Mouche (2017). "Significant wave heights from Sentinel-1 SAR: Validation and applications." Journal of Geophysical Research: Oceans **122**(3): 1827-1848.

Vachon, P. W., et al. (1994). "Airborne and spaceborne synthetic aperture radar observations of ocean waves." Atmosphere-Ocean **32**(1): 83-112.

Wang, H., et al. (2012). "A semiempirical algorithm for SAR wave height retrieval and its validation using Envisat ASAR wave mode data." Acta Oceanologica Sinica **31**(3): 59-66.

Xie, T., et al. (2015). "Ocean surface wave measurements from fully polarimetric SAR imagery." Science China Earth Sciences **58**(10): 1849-1861.

Zhu, Zhe; Woodcock Curtis E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, Volume 118, 15 March 2012, Pages 83–94.