

ACCROÎTRE LA SÉCURITÉ ET L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE LA GLACE DE MER PAR LA COMMUNAUTÉ DANS LA RÉGION DE KITIKMEOT À L'AIDE DU DÉVELOPPEMENT ET DU PARTAGE D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION.



R.K. Scharien^{1*}, R.A. Segal¹, C.-L. Tam², et A. Wynden¹

¹ Département de géographie, Université de Victoria, Victoria, Colombie-Britannique, Canada

² Département de géographie, Université de Calgary, Calgary, Alberta, Canada

* randy@uvic.ca

Résumé

Les communautés nordiques ont un intérêt pour l'utilisation des technologies modernes leur offrant des renseignements sur les conditions météorologiques et les conditions de la glace de mer afin de les aider dans la planification et la réalisation d'activités fondées sur la glace de mer. Dans le cadre de notre projet financé par Savoir polaire Canada (POLAIRE), des collaborateurs de Kugluktuk et de Cambridge Bay ont participé aux travaux de recherche sur le terrain pendant trois saisons (printemps et automne 2017 et printemps 2018) afin de définir les caractéristiques importantes de la glace de mer pour la sécurité et la traficabilité. Les renseignements obtenus des réponses aux entrevues et des activités guidées sur la glace de mer ont été fusionnés aux données de télédétection par satellite disponibles. Des produits d'images améliorées ont été créés pour guider les futures activités sur la glace de mer de la communauté et ont été donnés aux communautés ayant collaboré au projet. La rugosité de la glace de mer est ressortie comme étant une des principales variables d'intérêt pour les résidents locaux se déplaçant essentiellement par motoneige sur la glace de mer. Des cartes prototypes de la rugosité de la glace de mer ont été développées à l'aide de données d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR) du satellite Sentinel-1 et ont été transmises par voie électronique ou sous format papier. La rétroaction des communautés a ensuite été

utilisée pour améliorer l'utilité des cartes. Les cartes de rugosité étaient soit échelonnées en niveaux de gris, ou générées en trois couleurs correspondant à la terminologie Inuinnaqtun locale pour la glace de mer — glace lisse : manniqtuk hiku ; glace modérément rugueuse : manitutun hiku ; et glace rugueuse : manipiatuk hiku. En général, les produits d'image améliorés ont eu une incidence immédiate ; les résidents les ont trouvés très exacts, utiles pour sauver du temps et du gaz lorsqu'ils étaient utilisés pour la planification et efficaces pour améliorer la sécurité. Les travaux en cours comprennent la validation de la rugosité de la glace de mer à l'aide de données aéroportées, la création d'un format pour la transmission en ligne et le partage des nouveaux produits avec les partenaires intéressés.

Introduction

La portée du retrait de la glace d'été accroît la possibilité que les passages libres de glace s'étalent sur une plus longue période et que l'activité marine augmente. Toutefois, la variabilité annuelle des conditions régionales de la glace, la gravité des dangers engendrés par la glace et la capacité à les gérer commencent tout juste à être explorées. Des incertitudes relatives à la sécurité humaine et à la traficabilité de l'utilisation de la glace de mer,

Références suggérées :

Scharien, R.K., Segal, R.A., Tam, C.-L., et Wynden, A. 2019. Accroître la sécurité et l'efficacité de l'utilisation de la glace de mer par la communauté dans la région de Kitikmeot à l'aide du développement et du partage de produits d'images de télédétection. *Savoir polaire* : Aqhaliat 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 61–73. DOI: 10.35298/pkg.2019.06

combinée à des stratégies d'intervention d'urgence sous-développées, empêchent l'élaboration de pratiques et de politiques de gestion efficace pour les eaux sujettes aux glaces. Il est d'abord nécessaire d'augmenter la capacité d'observation et de prédiction des conditions de la glace de mer.

Les systèmes de radar à synthèse d'ouverture (SAR) génèrent une imagerie des conditions glaciaires à haute résolution spatiale (1 à 1 000 mètres), sans égard à la couverture nuageuse ou à la noirceur. Les SAR offrent un excellent potentiel d'information pertinente sur la glace de mer à l'échelle locale et régionale pour la sécurité et la traficabilité de la communauté (Druckemiller et al., 2009 ; Gauthier et al., 2010 ; Laidler et al., 2011). Très utilisés pour la cartographie des glaces, les SAR peuvent également distinguer les types de glace ou leurs étapes de formation et fournir des contrastes entre la glace, la terre et l'eau. Leur accessibilité restreinte, les méthodes complexes de traitement de l'image et les niveaux d'intensité de rétrodiffusion qui se chevauchent dissuadent généralement les utilisateurs d'employer les SAR directement. La mission Sentinel-1 de l'Agence spatiale européenne est composée de deux plateformes SAR identiques fonctionnant comme une constellation de satellites en orbite polaire, espacés de 180° l'un de l'autre en orbite (ESA, 2016). Sentinel-1 fait partie de *Copernicus*, le programme européen de l'observation de la Terre, conçu pour faire de la surveillance environnementale en intégrant les données transmises par satellite et par les capteurs de surfaces et systèmes pour veiller à la sécurité civile (Commission européenne, s.d.). Sentinel-1 revisite d'ailleurs fréquemment des emplacements en haute altitude comme l'Arctique canadien — aussi souvent qu'au < 1 jour, selon le format d'image. Cette grande fréquence de visite, jumelée au fait que les données de Sentinel-1 sont totalement gratuites et en libre accès, représentent un changement fondamental dans l'imagerie par SAR et ouvrent de nouvelles voies pour l'obtention d'information dans les domaines de la recherche et opérationnels.

Il est important de souligner que certains Inuit souhaitent employer des données scientifiques pour prévoir leurs activités de subsistance. Lorsqu'elles sont combinées au savoir traditionnel du comportement de la faune, les données sur la glace de mer et l'identification des dangers peuvent être utiles pour les personnes pratiquant la chasse, la trappe et la pêche dans les communautés de l'Arctique. Ces données peuvent également être utilisés

dans une gamme d'outils destinés aux jeunes afin d'ajouter au savoir traditionnel acquis des anciens par l'exposition aux connaissances scientifiques. Cette participation aux programmes jeunesse de la communauté peut nourrir la fierté culturelle, réduire les problèmes sociaux comme l'absentéisme, l'apathie, le vandalisme et le suicide et servir de modèle à de futurs citoyens et leaders.

Savoir polaire Canada (POLAIRE) a financé le projet « Télédétection multi-paliers de la glace de mer dans la mer de Kitikmeot : utilisation des nouvelles missions de constellations d'observation de la Terre pour la surveillance et la prévision des conditions des glaces de mer » dans le cadre de son programme de Sciences et technologies de POLAIRE 2017-2019. Ce projet rassemble :

- une expertise en télédétection radar, en géophysique de la glace de mer et en recherche sur le climat atmosphère-océan ;
- des champs de recherche ethnographique et participative auprès de population autochtone et de la communication sur les changements climatiques ; et
- l'assimilation et la prédiction des données relatives à la glace de mer.

L'objectif principal du projet est d'améliorer la capacité des chercheurs, des résidents du Nord et des partenaires gouvernementaux à surveiller et à prédire les conditions de la glace de mer. Ce projet vise également à préparer le lancement de la mission de la Constellation RADARSAT (MCR), la mission SAR phare du Canada, en 2019. Le présent article traite de la recherche liée aux objectifs du projet : *Travailler avec les communautés de Cambridge Bay et Kugluktuk pour définir les dangers associés à la glace de mer et les obstacles aux voyages et trouver de nouvelles façons de cartographier ces caractéristiques à l'aide de données de satellites*. Une étude portant sur les caractéristiques de la détectabilité et de la cartographie à l'aide des nouvelles données SAR colligées et de données de télédétection connexes a été menée. Cette étude a été alimentée par les connaissances autochtones et les renseignements de la communauté sur les routes associées à la glace de mer, les dangers et obstacles des voyages et les perspectives à propos des récents changements. Un des résultats de ces travaux, soit des renseignements améliorés sur la glace de mer, a été transmis aux communautés étudiées, dans des formats traditionnels et modernes.

Recherche communautaire

La stratégie de recherche choisie se fonde sur le besoin de créer un projet de recherche dirigé localement, donnant lieu à un résultat final applicable, au moyen d'implications formelles et informelles auprès des membres de la communauté (Ford et al., 2018). Trois visites de terrain ont eu lieu à Cambridge Bay et Kugluktuk : au printemps 2017, à l'automne 2017 et au printemps 2018. En plus de ces visites, les relations ont été maintenues à distance par téléphone, courriels et médias sociaux. Le processus de recherche communautaire s'est déroulé en trois étapes. Au cours de la première étape, des relations ont été créées par la participation à des rassemblements sociaux, en nous présentant à la communauté locale et en démontrant un intérêt authentique à s'impliquer auprès des gens locaux comme partenaires sociaux, plutôt qu'uniquement comme chercheurs de l'extérieur (Castleden, Morgan et Lamb, 2012). La seconde étape impliquait la cueillette de données formelle au moyen d'entrevues et de séances d'information. La troisième étape consistait en une validation de la communauté, au moyen d'ateliers de cartographie participatifs et du partage des cartes fondées sur les images SAR ébauchées à l'aide de la connaissance locale de la glace de mer et des choix de voyage.

Dans le cadre de la seconde étape de recherche communautaire, trois rencontres publiques et quatre séances d'information en soirée ont été tenues. Le Hamlet Offices, la Hunters and Trappers Organizations et la Kitikmeot Inuit Association (KIA) connaissaient le projet de recherche et ont été invités à offrir leurs conseils sur la conception de la recherche et les protocoles locaux. Des entrevues semi-structurées sur le sujet de la traficabilité de la glace de mer et l'évaluation de l'image de la carte SAR ont été menées au cours des trois visites sur le terrain. Le public cible des entrevues enregistrées était des résidents âgés de plus de 14 ans utilisant activement (ou ayant utilisé) la glace de mer pour leurs déplacements et leur subsistance. Certaines entrevues ont également eu lieu avec des personnes qui possédaient moins d'expérience relative à la glace de mer, mais qui souhaitaient participer et possédaient des connaissances sur l'environnement. Des cartes prototypes fondées sur des images SAR (ci-après désignées les produits SAR) des conditions locales de la glace de mer ont été examinées dans chacune des entrevues. Au total, 47 personnes ont formellement participé au processus, et 20 personnes ont participé formellement à plus d'une reprise. Les détails relatifs à la méthodologie et aux questions utilisées pour les entrevues seront publiés dans un autre article (Segal et al., 2019).

Au cours des visites sur le terrain, les chercheurs ont également participé à des excursions de printemps et d'automne sur la glace de mer. Ces excursions ont eu lieu soit comme voyages guidés dans le cadre du présent projet de recherche, soit dans le cadre d'activités reliées à un autre projet POLAIRE. Pendant ces excursions, les résidents ont établi des zones et des caractéristiques particulières liées aux dangers de la glace de mer et à sa traficabilité. Trois entrevues formelles ont été menées sur la glace de mer.

Les analyses d'entrevue comprennent la transcription des entrevues enregistrées et l'identification des codes thématiques tirés des modèles d'information rencontrés au cours des entrevues (p. ex : la « glace pluriannuelle » et la « glace rugueuse »). Ces codes ont été réunis en thèmes, à l'aide du logiciel NVivo Pro 11. Puisque l'information relative à la glace de mer a été abordée par tous les participants, on perçoit d'importants chevauchements entre les thèmes.

Produits SAR provenant de Sentinel-1

Les étapes initiales de la participation dans la communauté comprenaient le partage des produits SAR rudimentaires obtenus de la mission Sentinel-1. Dérivées d'images de zones locales, ces cartes rudimentaires montraient les conditions de la glace de mer dans une échelle de tons de gris, associée à une image SAR à canal unique (Figure 1). Des cartes en tons de gris reflétant les périodes d'automne (engel), d'hiver et de printemps (début de la fonte) ont été produites. Après une chaîne de traitement normal comprenant le retrait du bruit thermique, le filtrage de la granularité (bruit), le calibrage et la projection de la carte, ces cartes SAR en tons de gris présentaient des variations de tons relatives à l'intensité de l'énergie rétrodiffusée reçue par le SAR. Des cartes prototypes indiquant trois niveaux d'intensité de rétrodiffusion pendant l'hiver, lorsque l'intensité de rétrodiffusion de la glace de première année est connue pour être intimement liée à la rugosité de la surface, ont également été produites pour les régions de Cambridge Bay et de Kugluktuk (Figure 2). D'autres produits SAR découlant des images de Sentinel-1 ont été conçus et raffinés tout au long du processus d'implication dans la communauté. Renforcé par des communications régulières avec les membres de la communauté, ce processus itératif a permis de veiller à ce que le contenu et la conception des extrants (les cartes) soit le plus pertinent possible et compréhensibles pour les chasseurs, trappeurs et autres voyageurs sur glace.

This map shows imagery from a synthetic aperture radar (SAR) satellite image. PLEASE USE CAUTION WHEN USING THIS MAP AS IT IS A TEST PRODUCT ONLY. THE UNIVERSITY OF VICTORIA CANNOT CONFIRM ITS ACCURACY AT THIS TIME. Over sea ice, SAR responds mainly to the roughness of the ice surface, but also to its electrical properties (which are influenced by water and salt content). In general, rougher surfaces appear brighter (whiter). Water in windy areas will appear bright due to the roughness of waves, but calm water will appear black. Smooth, first year ice will also appear black. If you have any comments, suggestions, or questions about this product, please contact Becky Segal or Randy Scharien (rasegal@uvic.ca, or randy@uvic.ca)

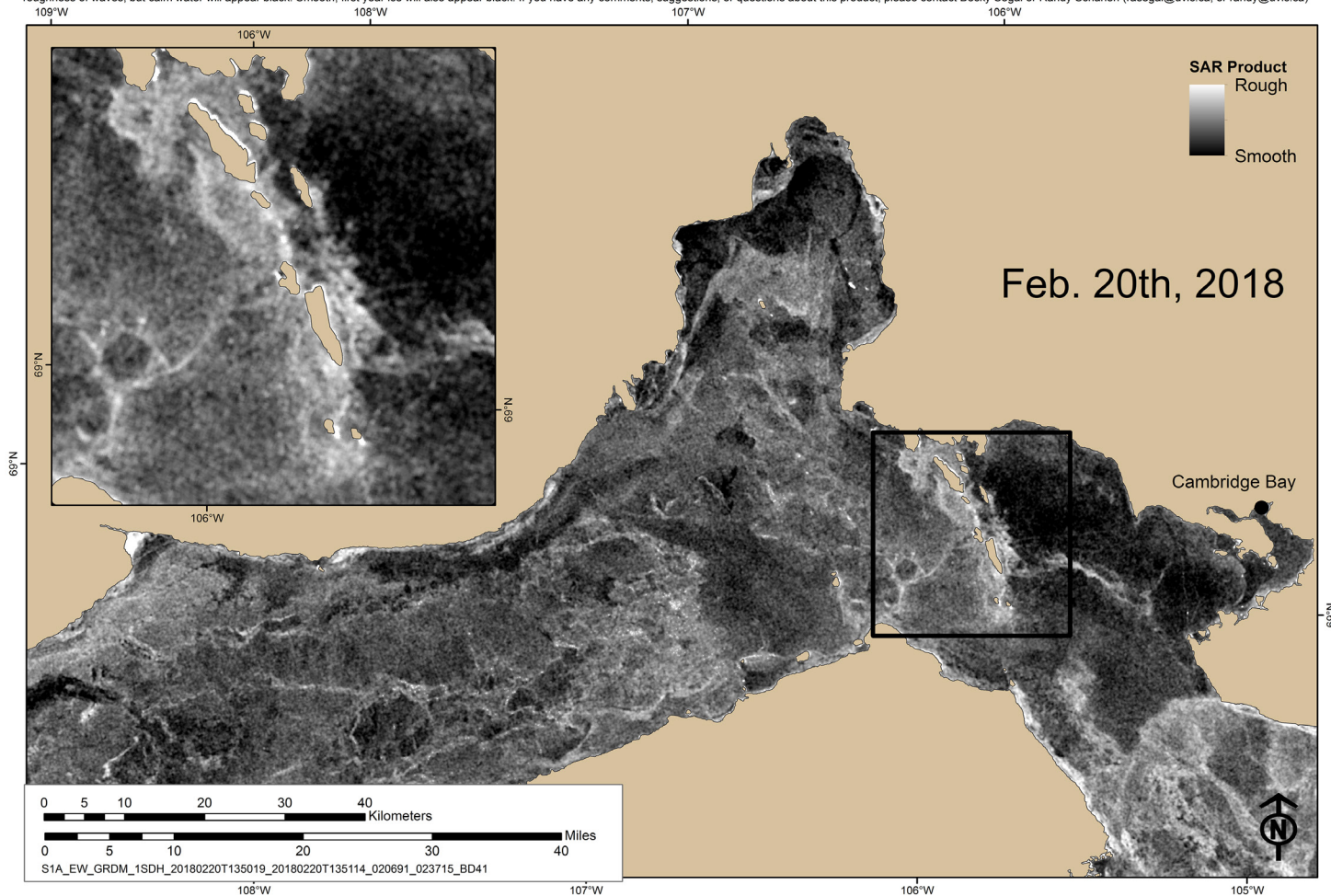


Figure 1 : Produit SAR en tons de gris de la région de Cambridge Bay dérivé d'une image de Sentinel-1 obtenue dans des conditions hivernales. Les zones marines montrent une intensité de rétrodiffusion passant de faible (noir) à élevée (blanc). La carte en médaillon montre une zone connue pour ses conditions de glace dangereuses.

La mission Sentinel-1 opère dans la fréquence de bande C, qui est la fréquence normalement utilisée par les organisations de cartographie de la glace pour produire des cartes sur la glace de mer. Les images SAR obtenues sur la fréquence de bande C peuvent délimiter différents types de glaces et caractéristiques de rugosité, comme les crêtes de pression et la glace cassée et reformée. Cette caractéristique est particulièrement utile pendant l'hiver, lorsque les effets de la fonte sur la rétrodiffusion sont absents. Au-dessus de la région de Kitikmeot, Sentinel-1 opère en mode « faisceau extra large » (Extra Wide Swath Mode, ou EW). Ce mode est conçu pour l'usage maritime, plus particulièrement pour produire des images de glace de mer avec un large faisceau. Les scènes en mode EW couvrent un faisceau de 400 km, avec une résolution spatiale nominale de 20 m sur 40 m (ESA, 2018). Deux

canaux de données sont obtenus pour chaque scène : un premier canal transmis et reçu en format horizontal (HH) et un second canal transmis et reçu en format horizontal vertical (HV). Chaque canal est constitué de cinq sous-faisceaux, qui, ensemble, couvrent un angle d'incidence pouvant aller de 19 à 47 degrés. Les données de Sentinel peuvent être téléchargées sur la plateforme en libre partage Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Les scènes en format EW se trouvant sur la plateforme sont traitées en résolution moyenne, format de produit standard niveau 1, avec un espace mesuré en pixel de 40 m sur 40 m. Dans ce format, il est possible d'obtenir une couverture des voies navigables se trouvant dans la région de Kitikmeot dans un délai d'au plus 14 jours (Figure 3).

This map shows imagery from a synthetic aperture radar (SAR) satellite image. PLEASE USE CAUTION WHEN USING THIS MAP AS IT IS A TEST PRODUCT ONLY. THE UNIVERSITY OF VICTORIA CANNOT CONFIRM ITS ACCURACY AT THIS TIME. Over sea ice, SAR responds mainly to the roughness of the ice surface, but also to its electrical properties (which are influenced by water and salt content). If you have any comments, suggestions, or questions about this product, please contact Becky Segal or Randy Scharien (rasegal@uvic.ca, or randy@uvic.ca)

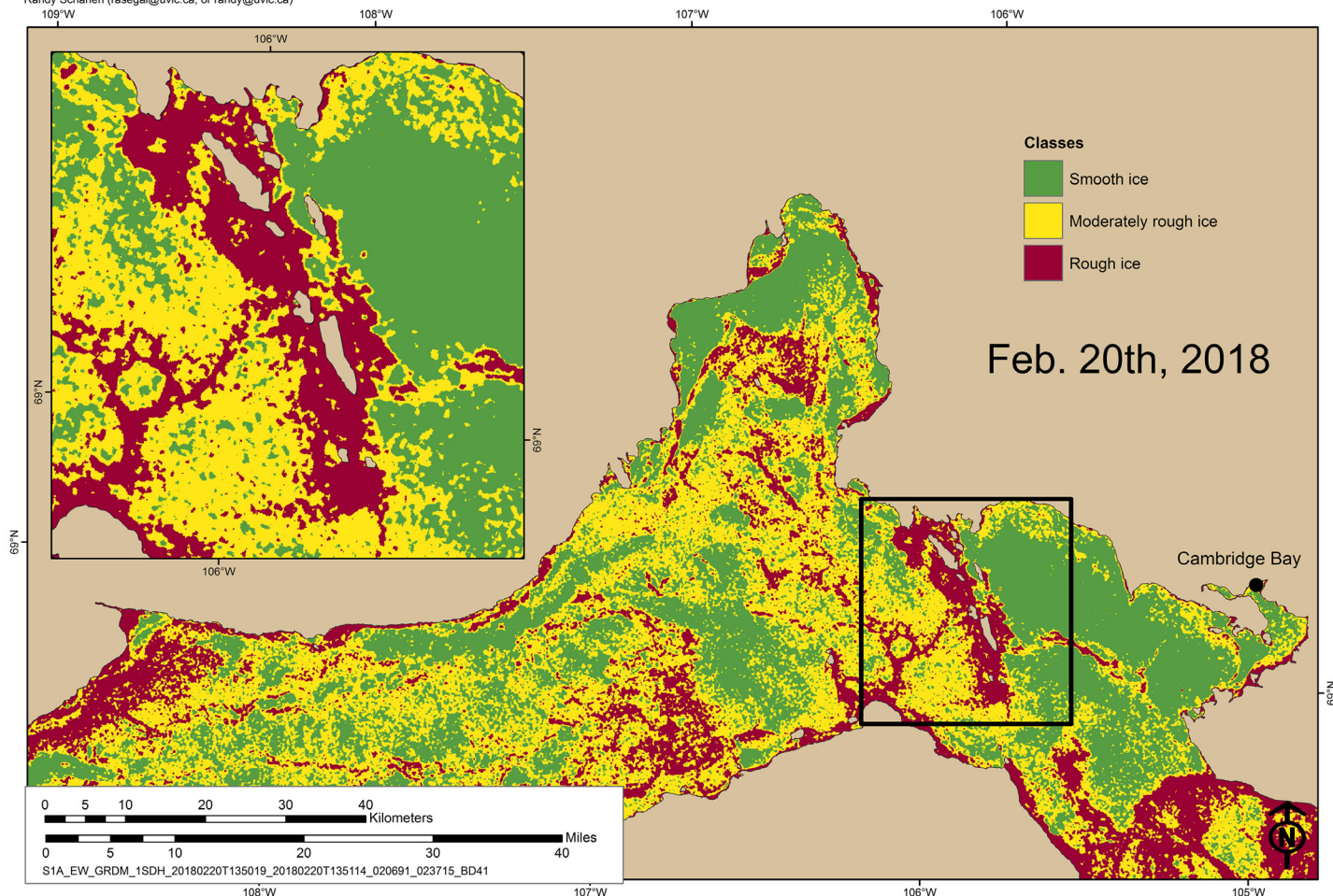


Figure 2 : Le produit SAR de la figure 1, après avoir établi le seuil de trois niveaux relatifs à la rugosité.

Caractéristiques de la glace de mer

Les membres de la communauté ont ciblé plusieurs caractéristiques majeures et conditions saisonnières de la glace importantes dans un contexte de sécurité et de traficabilité. Ces caractéristiques comprennent :

- la glace lisse de première année ;
- la glace modérément rugueuse et la glace rugueuse de première année ;
- la glace pluriannuelle ;
- la glace de mer enneigée ;
- la glace mince ;
- la glace de début de saison ;
- la glace de fin de saison ;
- la boue glaciaire et l'eau sur la glace ;
- la glace rencontrant les navires ; et

- les fracturations de la glace, notamment les craques, les chenaux et les crêtes de pression.

Des renseignements relatifs à la présence des caractéristiques principales de la glace de mer et des conditions saisonnières de la glace de mer a à j se trouvent dans le tableau 1. Des renseignements relatifs à l'utilisation des caractéristiques principales de la glace de mer et des conditions saisonnières de la glace, de même que les changements observés et les conséquences potentielles, se retrouvent au tableau 2.

Évaluation des produits SAR et importance de la rugosité de la glace de mer

Les membres de la communauté souhaitent posséder des renseignements provenant de SAR et d'autres technologies à propos de l'ensemble des caractéristiques de la glace de mer et des conditions

qui ont une incidence sur la sécurité et la traficabilité. Les images SAR présentent des renseignements sur la glace de mer qui sont pertinents pour les Inuits *Qaujimajatuqangit*, aussi désignés IQ. Plusieurs membres de la communauté croient également qu'il s'agirait d'un outil éducatif positif pour les écoliers et les citoyens qui ne peuvent pas observer directement les conditions de la glace de mer.

Il a été déterminé que la rugosité de la surface est la principale condition de glace de mer pour laquelle la cartographie par SAR présente des avantages substantiels. Par exemple, 91 % des participants souhaitent utiliser des cartes de rugosité par SAR. Ils sont d'avis que le produit évalué offre une observation de la traficabilité exacte et cohérente entre les routes existantes et la prévalence de zones de glace lisse. Les avantages anticipés des cartes de rugosité par SAR comprennent :

- la planification de routes sécuritaires et efficaces ;
- la possession des renseignements sur des zones moins connues ;
- l'évaluation exacte de la durée des voyages et/ou la réduction de leur durée ;
- l'aide aux recherches et sauvetages locaux et aux opérations des patrouilles de rangers ; et
- constituer une ressource éducative.

Les personnes possédant de l'expérience dans l'utilisation d'images SAR préfèrent les représentations en tons de gris (Figure 1), alors que les personnes novices avec ce type d'image préfèrent le produit défini par seuil indiquant les catégories de rugosité (Figure 2). Les catégories de rugosité favorites correspondent à la terminologie Inuinnaqtun locale pour la glace de mer — glace lisse : *manniqtuk hiku* ; glace modérément rugueuse : *manitutun hiku* ; et glace rugueuse : *manipiatuk hiku*.

D'autres caractéristiques d'intérêt de la glace de mer comprennent les zones de glace de mer mince (toutes saisons), les fractures de la glace de mer (toutes saisons) et les zones de boue glaciaire et d'eau stagnante (fonte du printemps). Toutefois, les zones de glace mince et de fractures de glace ne peuvent pas être détectées de façon fiable à l'aide de l'imagerie SAR en format EW de Sentinel-1, principalement en raison de sa faible résolution spatiale. Plus d'expérimentation sur

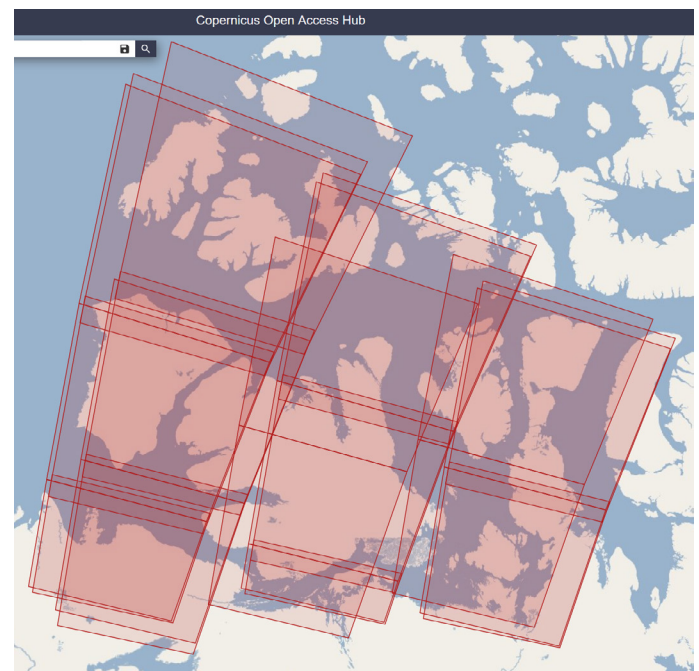


Figure 3 : Couverture de Sentinel-1 des voies navigables de la région de Kitikmeot en format EW, pour la période du 1^{er} au 14 janvier 2018. 59 images téléchargées en format SAR standard niveau 1 sont accessibles sur la plateforme Copernicus Open Access Hub pour cette période.

l'utilisation d'un faisceau fin (p. ex. de RADARSAT-2) et d'une plus haute fréquence (p. ex. bande X) de données SAR est nécessaire. En l'espèce, les routes connues et les emplacements susceptible d'amincissement déterminés par des experts ont été cartographiés (Figure 4) et des zones vectorisées ont été ajoutées aux produits SAR. Les zones d'eau stagnante sur la glace de mer pendant la fonte du printemps sont appelées des mares de fonte. En raison de la petite taille de ces mares en comparaison de la résolution SAR, les mares de fontes ne peuvent pas être directement identifiées à l'aide des données SAR. Il est toutefois possible de prédire la fraction de la surface d'eau de la mare de fonte sur la glace de mer, appelée fraction de mare de fonte, par l'imagerie SAR en format EW de Sentinel-1 pendant la période hivernale (Scharien et al., 2017). Il est donc possible d'offrir aux communautés des produits SAR comprenant des prédictions relatives aux fractions de mare de fonte. Les zones de boue glaciaire pourraient être délimitées par l'emploi de données SAR plus évoluées, nécessitant des recherches futures.

Les images des conditions glaciaires saisonnières, comme la formation de la glace pendant la période d'engel, la débâcle des glaces pendant les conditions

Tableau 1 : Caractéristiques de la glace de mer et leur présence dans un contexte de glace dangereuse et de traficabilité. Voir le libellé pour l'identificateur de caractéristiques.

ID	Occurrence
a	Se développe dans les zones de vent faible et de courant faible pendant la période de gel, et dans les zones qui gèlent après la période de gèle (par exemple, les chutes de neige).
b	Se développe dans les zones de vents forts (environ 80-100 km/h)/de courants forts pendant la prise de la glace. Les dalles prennent le vent et exercent une plus grande force sur la glace. On les trouve souvent près du rivage. Les dalles peuvent fondre et diminuer la rugosité (généralement à la fin du printemps mais peut également se produire en automne).
c	Peu fréquent dans le golfe du Couronnement mais rencontré plus au nord.
d	La première tempête de neige après la prise de la glace remplit les dépressions. La neige s'accumule et peut recouvrir la glace de mer rugueuse. Les tempêtes d'hiver/printemps créent des monticules de neige durcis (rugosité de la neige). Devient mou lors de la fonte des neiges au printemps.
e	Les zones persistent pendant l'hiver ou sont saisonnières. Souvent des endroits similaires d'une année à l'autre. Les routes de glace deviennent minces tôt.
f	Se forme rapidement à proximité des communautés en raison des influences de l'eau douce et de la terre. Zones au nord du golfe du Couronnement et les régions où le courant est fort gèlent plus tard.
g	Moment plus variable que le gel. La débâcle de la rivière Coppermine accélère la fonte de la glace de mer en s'écoulant sur la glace (Kugluktuk). La neige retarde la fonte de la glace grâce à l'isolation.
h	Généralisé en automne/printemps ; seulement dans les zones d'eau en mouvement en hiver. S'accumule près du littoral au printemps, surtout s'il y a beaucoup de neige. Les bassins de fonte inondent la glace de mer à la fin du printemps, puis s'écoulent en laissant des cratères secs.
i	Commence lorsque les fissures près de la ville se transforment en chenaux suffisamment larges (9 à 12 m du rivage). Habituellement, en juin, lors des ruptures de la rivière Coppermine (Kugluktuk), ou début août (Cambridge Bay). Se termine avec la prise de glaces.
j	Se produisent dans les zones à fort courant et près des côtes, souvent dans des endroits similaires au fil des ans. Crêtes de pression de type 2 généralement loin de la terre. Les crêtes de pression se forment à la fin de l'automne/début de l'hiver et s'ouvrent au printemps (deviennent des fissures/plombs). La plupart des fissures apparaissent et s'élargissent au printemps. Les plombs se forment généralement à partir des fissures/crêtes de pression à la fin du printemps.

de fonte et la délimitation de la glace et de l'eau libre pendant ces périodes sont également intéressantes pour la communauté. Puisque les données de Sentinel-1 sont gratuites et en libre accès, il est possible de fournir des séquences d'image. Il pourrait toutefois être difficile d'interpréter le contenu des images pendant ces périodes de transition.

Une évaluation du lien entre la rugosité de la surface et la rétrodiffusion du SAR de Sentinel-1 a été menée à l'aide de données obtenues par laser à balayage aéroporté (ALS) de la hauteur des surfaces quadrillées. En avril 2017, des données ont été obtenues grâce à un partenariat avec la campagne terrain et aéroportée de ESA CryoVEx/EU ICE-ARC 2017. Cette campagne comportait une expérience de validation de CryoSat-2 (CryoVEx) et un projet financé par l'Union européenne (ICE-ARC) visant à valider des satellites (CryoSat-2, Sentinel-3 et SARAL/AltiKA) et à surveiller la glace de

mer. Une partie de la campagne aéroportée de CryoVEx/EU ICE-ARC a été lancée à Cambridge Bay et s'est dirigée, au moyen de la SFC Alert, vers Svalbard, en Norvège. Un Twin Otter de la British Antarctic Survey, équipé d'instruments de télédétection, a réalisé des vols à partir de l'aéroport de Cambridge Bay (YCB) concordant avec la cueillette de données de terrain du 5 avril au 8 avril 2017. Les vols ont ensuite été réalisés au-dessus de points de cheminement dans le canal M'Clintock en transit vers Resolute Bay le 11 avril 2017. Les données ALS traitées ont été livrées sous forme de nuée de points géolocalisés, en ligne de 200 à 300 mètres de largeur à pleine résolution (1 m par 1 m). Les nuées de points comprennent l'heure, la latitude, la longitude, la hauteur donnée relative à l'ellipsoïde de référence WGS84, l'amplitude et le nombre séquentiel de points de données par ligne de balayage (1-251).

Tableau 2 : Utilisation des principales caractéristiques et conditions de la glace de mer et changements observés.

ID	Utilisation	Changements et conséquences
a	Facilite les déplacements rapides en motoneige (environ 50-110 km/h), bon l'efficacité énergétique et l'usure légère des équipements.	Ces dernières années, les conditions sont devenues plus difficiles.
b	Voyage lent et difficile (environ 5-30 km/h ; zigzag et raccourcissement de remorquage) ; dur pour l'équipement ; moindre efficacité énergétique ; dur pour naviguer par temps sombre/mauvais. Zones de répartition des ours polaires et bon pour les abris d'urgence. Moins prévisible dans les déplacements ; risque accru d'accidents et de pannes. Peut être plus rude ces dernières années, ce qui exacerbe le risque d'accidents ou de pannes, consommant du temps, et l'augmentation des coûts.	Un gel retardé peut entraîner la formation se produit à la période la plus venteuse de l'année.
c	Plus lisse que la rugosité, mais plus rugueuse que la lisse. Zone de parcours de l'ours polaire ; glace bonne pour l'eau potable.	Pas discuté ; présence trop rare près de la ville.
d	Modifie la surface de la glace pour la rendre plus lisse/plus rugueuse. Isole la mer et contrôle l'épaisseur de la glace. La neige d'automne fait voyager plus facile. L'accumulation de neige peut permettre à la glace rugueuse d'être traficable. La neige dure et la neige molle rendent les déplacements plus faciles plus difficile.	Changements possibles en raison de la fréquence des tempêtes hivernales.
e	Risque de chute à travers la glace de mer ; provoquer des embrassades chez les voyageurs les rivages.	L'amincissement lié au réchauffement de l'océan et au changement les modèles de chutes de neige. Nouvelles/grandes zones d'eau libre maintenant trouvés ; par exemple, la région de Cape Krusenstern.
f	L'utilisation commence lorsque la glace de mer a une épaisseur de 5 à 15 cm (tolérant aux risques et voyageurs expérimentés à proximité des communautés) ou environ 0,6-0,9 m d'épaisseur (plus loin de la terre). Les déplacements sur glace sont préférables à les déplacements terrestres en raison de l'absence relative de couverture neigeuse.	Retardé/prolongé : utilisation en septembre/octobre maintenant reporté à novembre/décembre.
g	Utilisez les extrémités lorsque les fissures ou les fils deviennent trop dangereux (juin ou juillet). La plupart s'arrêtent lorsqu'il est difficile d'y accéder depuis à terre mais toujours en sécurité.	Le délai est naturellement variable, mais peut être de environ 1 mois plus tôt et plus rapidement.
h	Les trous de fusion et les bassins de fusion profonds indiquent un amincissement rapide la glace de mer ; il faut l'éviter et dissuader de nombreuses personnes voyage. Les motoneiges peuvent rester coincés dans la boue ou l'eau, se briser par les couvercles de glace des bassins de fonte recongelés et déraiper, ou s'arrêter courir si la courroie est mouillée. Les traîneaux peuvent tourner en raison de la perte de de friction sur les bassins de fusion. Les voyages par temps frais peuvent être plus facile lorsque la neige fondue ou la neige fondue molle est plus ferme.	La gadoue côtière est devenue un problème plus important ces dernières années.
i	Il faut prévoir un voyage en bateau pour éviter d'être coincé à l'intérieur/en dehors de la communauté par la glace. Allongement de la saison de navigation bénéfique pour ceux qui ont des bateaux, mais pas pour ceux qui sont sur la glace activités. Doit être conscient du déplacement des glaces (en particulier MYI) causant des vagues dangereuses pour les petits bateaux.	La saison sans glace est plus longue d'environ un mois que par le passé (les deux communautés). Les gens qui font plus de bateau voyages. Navigation plus tôt au printemps et plus tard en automne (mi-octobre à Cambridge Bay, mi-novembre à Kugluktuk).
j	Utilisés comme points de repère pour identifier les lieux. Régulièrement croisés lorsqu'il est étroit, sinon il est traversé par un pont naturel de glace de mer, en faisant un pont de glace de mer (en dernier recours), ou en sautant un motoneige (saut à l'eau). Lieu de chasse en mer les animaux. Possibilité de tomber à travers des fractures en eau libre (assez courant) ; certains portent des combinaisons de flottaison au printemps comme une précaution. Il peut être difficile de voir dans l'obscurité ou la météo.	La plupart n'ont pas remarqué de changements. De nouvelles fissures et fissures en zigzag (autrefois droites) observées. Les fissures près de Locker Point se sont déplacées vers le nord sur les dernières environ 30 années de quelques centaines de mètres, mesurée par un chasseur de Kugluktuk à l'aide d'un GPS. Le nombre de crêtes de pression peut avoir augmenté au cours des 10 à 15 dernières années (Kugluktuk). Pression Les crêtes étaient autrefois droites de Long Point à la continentale ; récemment, elle s'est déplacée.

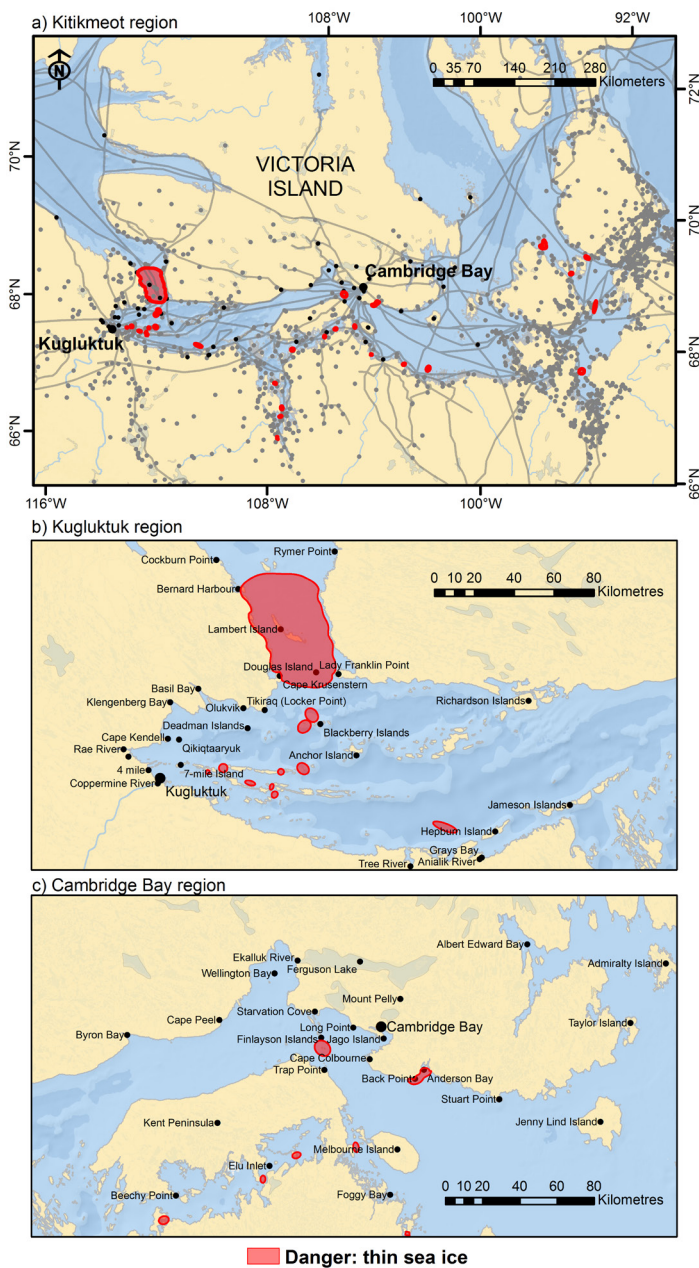


Figure 4 : Cartes affichant des zones dangereuses relevées par des experts locaux : a) utilisation de la glace de mer, et a-c) emplacements de glace de mer mince ou d'eau libre dans trois régions distinctes. Ceci ne constitue pas une liste complète des zones dangereuses, certaines d'entre elles pouvant apparaître de façon saisonnière, à l'année longue ou en raison d'un climat changeant. Les principales routes (lignes grises) et les lieux importants (points gris) ont été déterminés par le Inuit Heritage Trust (<http://iht.ca/eng/iht-proj-plac.html>).

Des images coïncidentes dans l'espace de LiDAR et de Sentinel-1 ont été utilisées du 9 avril au 20 avril 2017. La rugosité fondée sur LiDAR a été mesurée dans des cellules de 1,2 x 0,4 km le long de la ligne de passage

comme déviation de la moyenne quadratique d'un avion ayant un ajustement optimal :

$$\text{rugosité} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

où z_i représente la hauteur de la surface LiDAR quadrillée aux points n de la grille dans une région d'intérêt (RI), et \bar{z} représente les hauteurs moyennes de la grille dans la même RI. La rugosité établie par les données de Sentinel-1 a été définie comme la rétrodiffusion moyenne en polarisation HH, moyennée dans la même RI.

La rugosité de la glace de mer est comparée visuellement (Figure 5) et quantitativement (Figure 6) à la rétrodiffusion HH de Sentinel-1. Il existe un lien significatif entre la rugosité et la rétrodiffusion (R^2 de 0,61 ; $p < 0,0001$). Dans la figure 5, les zones lisses correspondent à des valeurs de rétrodiffusion faibles, alors que les zones rugueuses correspondent à des valeurs de rétrodiffusion élevées. On retrouve également des emplacements où la glace de mer pluriannuelle présente une rugosité modérée, mais une rétrodiffusion élevée. Ce lien déroutant est dû à la diffusion volumétrique retrouvée à l'intérieur de la glace pluriannuelle rafraîchie. Cela a une incidence sur le lien retrouvé à la figure 6. À l'avenir, il serait utile de prendre en compte la présence de glace de mer pluriannuelle (p. ex. par un masque de classification) ou d'employer une source de donnée complémentaire pour quantifier la rugosité. En ce qui a trait à la glace de première année, qui constitue le principal type de glace entourant les communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk, il existe un lien fort entre la rétrodiffusion et la rugosité. À la lumière de la validation en cours, tous les prototypes de produits SAR fournis aux communautés sont accompagnés d'un avertissement relativement à leur exactitude.

Transfert des connaissances

L'implication de la communauté et la pertinence constituent des facteurs clés de notre étude. Les cartes, composantes essentielles de l'implication et de la mobilisation des connaissances, ont servi d'outils de communication tactiles et visuels. Au cours de l'étape de cueillette de données, les répondants ont indiqué des caractéristiques du paysage sur les cartes et ont partagé leurs connaissances de la glace de mer avec

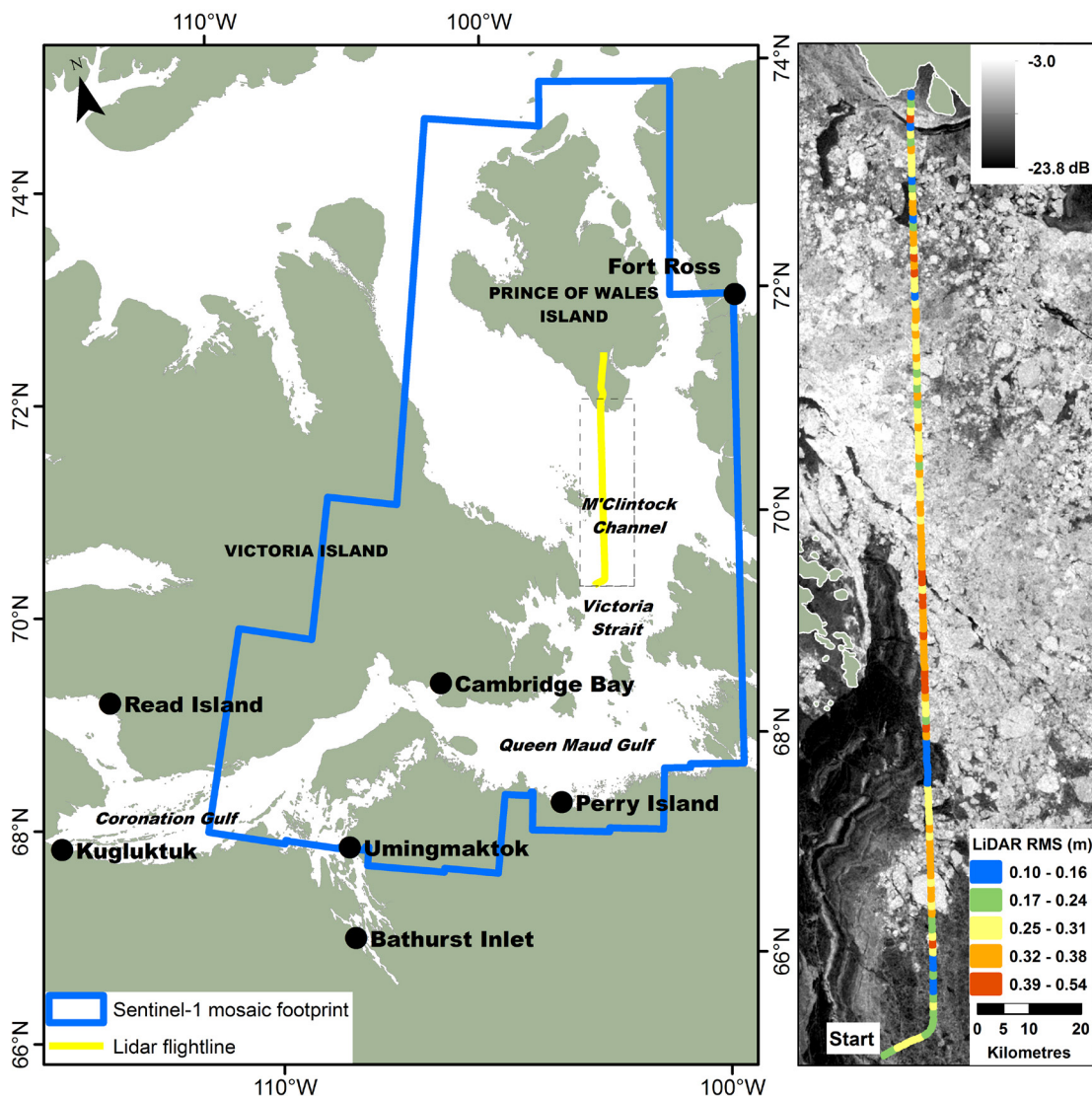


Figure 5 : (Gauche) Emplacements des données SAR de Sentinel-1, des données LiDAR et carte en médaillon (ligne pointillée noire). (Droite) Rugosité dérivée des données de LiDAR superposée sur l'imagerie par SAR.

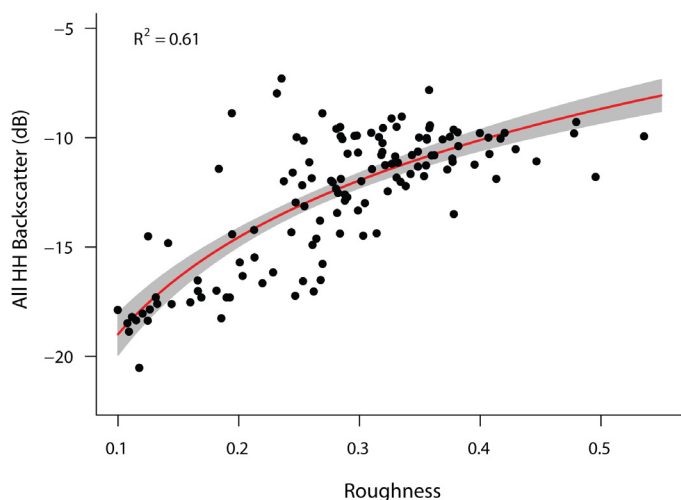


Figure 6 : Lien entre la rétrodiffusion HH de Sentinel-1 et la rugosité de la surface de la glace de mer dérivée des données LiDAR.

l'équipe de recherche. Un peu plus tard, lors du retour dans les communautés avec les produits SAR, des échanges d'information semblables ont eu lieu dans le cadre d'ateliers et dans des endroits publics, comme des épiceries locales, où les chercheurs ont installé une table d'information. Les cartes ont donc servi de produit (source d'information), mais également de processus (comme outil pour faire participer la communauté).

Ces cartes ont été (et sont encore) remises à la communauté de trois façons :

1. sous forme de copie papier imprimée, pour être affichées dans la communauté ;

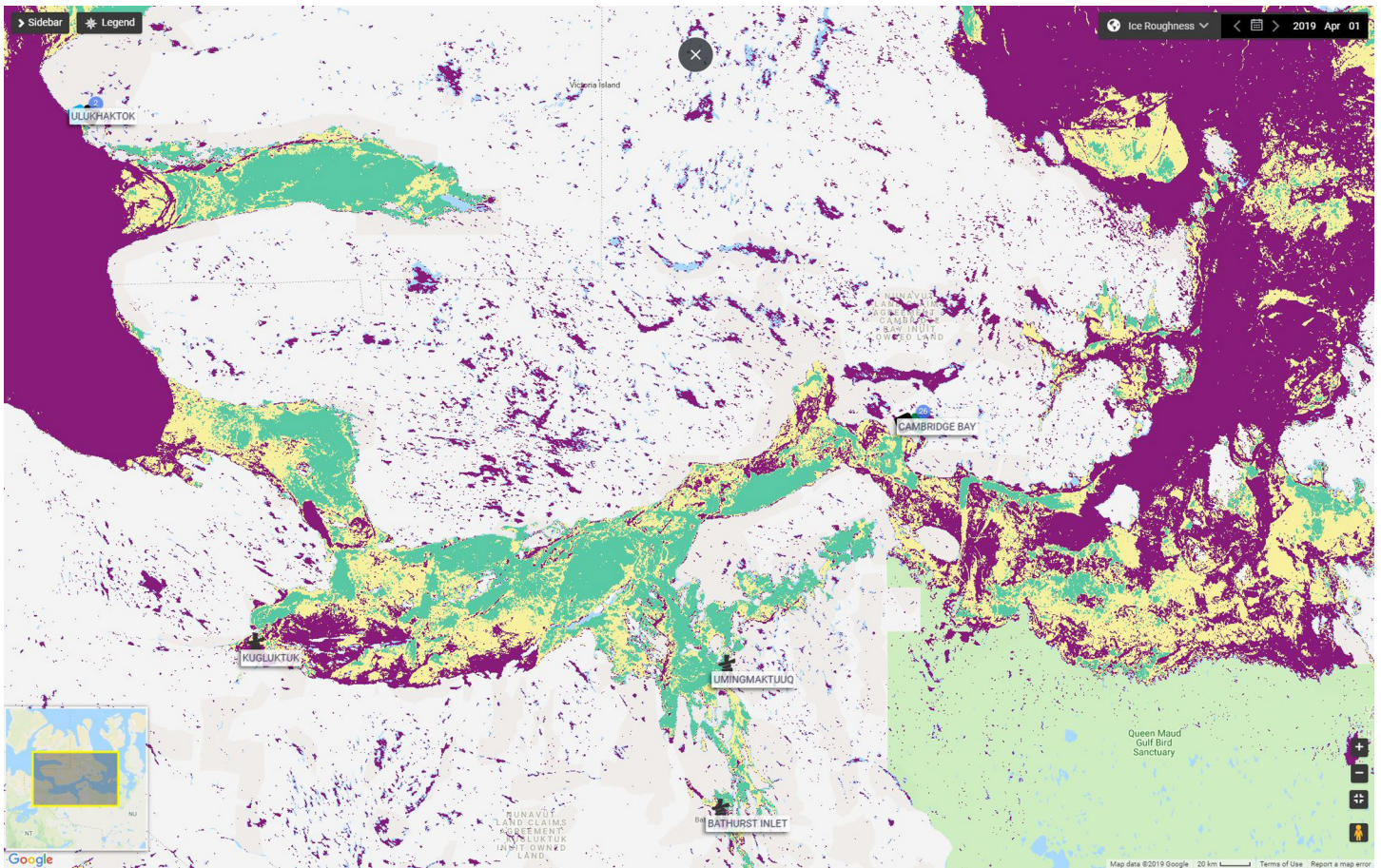


Figure 7 : Publication du produit relatif à la rugosité de la glace dans SIKU. Un nouveau masque pour la terre est en développement afin d'inclure les lacs dans le processus de masquage.

2. sous forme d'image numérique, dans un format de compression d'image entraînant des pertes, pour être facilement envoyées par courriel et sur les médias sociaux ; et
3. sur SIKU, une plateforme de connaissance Inuit Wiki et de cartographie sociale, développée par la Artic Eider Society (AES : <https://arcticeider.com/en/about>).

L'éditeur de code Google Earth Engine (GEE) permet le développement indépendant et le partage de scripts. Il offre également beaucoup plus de puissance de calcul que celle à laquelle peut généralement avoir accès un laboratoire typique, ce qui permet un accès facile aux produits d'image. En traduisant les algorithmes développés dans la plateforme Javascript de GEE, nous sommes en mesure de partager tant le script que les images finales avec SIKU, donnant ainsi accès aux communautés aux données sur la rugosité de la glace de mer. En raison des retards du Earth Engine, il y a actuellement un délai d'environ un à trois jours

entre la disponibilité des images de Sentinel-1 et leur publication sur SIKU.

La bande de données HH de Sentinel-1 inscrite dans Earth Engine est prétraitée à l'aide de la boîte à outils de Sentinel-1. Cela signifie que le retrait du bruit thermique, l'étalonnage radiométrique et les étapes de correction du terrain ont lieu avant l'exécution de nos scripts. Pour être utiles pour la navigation dans un contexte de glace de mer, nos scripts filtrent l'ensemble des images par date et masquent la terre. Cela simplifie également la création des cartes de rugosité, qui classent la rétrodiffusion de la bande-HH en trois catégories : lisse, moyenne et rugueuse. Les produits d'image non classés et classés sont publiés dans l'application SIKU, permettant aux utilisateurs de choisir entre une image en tons de gris ou un produit simplement classé par couleur (Figure 7). Puisqu'il est possible de partager les scripts de Earth Engine et qu'ils peuvent être générés très rapidement, ils sont envoyés directement à AES pour être publiés dans l'application SIKU. Cette publication est faite à la demande des

utilisateurs, ce qui leur permet de choisir les dates les intéressantes.

Conclusions

Ce projet a adopté une approche multidisciplinaire et participative novatrice. L'équipe de recherche a travaillé de concert avec des participants de la communauté pour établir les besoins relatifs aux données sur la glace de mer, réaliser une validation des conclusions par la communauté et créer ensemble des façons efficaces de propager les données sur la glace de mer à des fins pratiques et d'implication dans la communauté. Ce type d'approche répond aux intérêts stratégiques du Nunavut et du Canada, soit d'offrir des connaissances utiles afin de permettre des déplacements avisés dans les zones arctiques marines et de répondre à la mission canadienne plus vaste multipartiste, multiculturelle et d'inclusion des autochtones.

La rugosité de la glace de mer est un paramètre d'intérêt essentiel pour la population de la région de Kitikmeot et plus particulièrement pour les communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk, qui utilisent la glace de mer pour leurs déplacements. Les renseignements sur la rugosité complètent les Qaujimajatuqangit Inuit et offrent une meilleure compréhension des conditions glaciaires en cette période de changements sociaux et de conditions environnementales incertaines. Les données SAR de la mission de Sentinel-1, une mission SAR phare offrant de l'imagerie gratuitement et en libre accès, donnent des renseignements sur la rugosité de la surface de la glace de première année et les emplacements de la glace pluriannuelle pendant la période hivernale. Grâce à cette information, des cartes, sous format papier et numérique, peuvent être produites, améliorant ainsi la sécurité et la traficabilité sur la glace de mer et fournissant un outil éducatif.

Considérations d'ordre communautaire

Les connaissances autochtones et les renseignements de la communauté sur les routes associées à la glace de mer, les dangers et obstacles des voyages et les perspectives à propos des récents changements ont été recueillis à Cambridge Bay et Kugluktuk. Cette connaissance, ces renseignements et ces perspectives ont été utilisés pour la conception du projet. Les produits d'images et de cartes qui en résultent sont offerts aux membres des communautés de Cambridge Bay et de Kugluktuk.

Remerciements

Les auteurs remercient Savoir polaire Canada (POLAIRE), le CRSNG (financement accordé à R.K. Scharien), le CRSH (financement accordé à C.-L. Tam), et ACUNS, la SGRC, AINA et le Programme de formation scientifique dans le Nord (financement accordé à R.A. Segal) pour le financement accordé, ainsi que la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique pour le soutien logistique offert. Nous remercions la Ekaluktutiak et la Kugluktuk Hunters & Trappers Organizations, la Kitikmeot Inuit Association et Hamlets de Cambridge Bay et de Kugluktuk pour leurs conseils et leur aide. Nous remercions Ocean Networks Canada et le Service canadien des glaces de leur soutien à la recherche et leur collaboration.

Références

- Castleden, H., Morgan, V.S., Lamb, C. 2012. "I spent the first year drinking tea": Exploring Canadian university researchers' perspectives on community-based participatory research involving Indigenous peoples. *The Canadian Geographer*, 56(2):160–179. Retrieved from: <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2012.00432.x>
- Druckenmiller, M.L., Eicken, H., Johnson, M.A., Pringle, D.J., Williams, C.C. 2009. Toward an integrated coastal sea-ice observatory: System components and a case study at Barrow, Alaska. *Cold Regions Science and Technology*, 56(2–3):61–72. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.12.003>
- ESA. 2016. Sentinel-1 radar mission. European Space Agency. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/en/media/images/sentinel-1-radar-mission>
- ESA. 2018. Sentinel-1 SAR user guide introduction. Retrieved from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
- European Commission. No date. Copernicus: Europe's eyes on Earth. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/en/media/images/sentinel-1-radar-mission>
- Ford, J.D., Couture, N., Bell, T., Clark, D.G. 2018. Climate change and Canada's north coast: research trends, progress, and future directions. *Environmental Reviews*, 26(1):82–92. Retrieved from: <https://doi.org/10.1139/er-2017-0027>

Gauthier, Y., Tremblay, M., Bernier, M., Furgal, C. 2010. Adaptation of a radar-based river ice mapping technology to the Nunavik context. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(S1):S168–S185. Retrieved from: <https://doi.org/10.5589/m10-018>

Laidler, G.J., Hirose, T., Kapfer, M., Ikummaq, T., Joamie, E., Elee, P. 2017. Evaluating the Floe Edge Service: How well can SAR imagery address Inuit community concerns around sea ice change and travel safety? *The Canadian Geographer*, 55(1):91–107. Retrieved from: <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2010.00347.x>

Scharien, R.K., Segal, R., Nasonova, S., Nandan, V., Howell, S.E.L., Haas, C. 2017. Winter Sentinel-1 backscatter as a predictor of spring Arctic sea ice melt pond fraction. *Geophysical Research Letters*, 44. DOI: 10.1002/2017GL075547

Segal, R.A., Scharien, R.K., Duerden, F., Tam, C.-L. 2019. “The best of both worlds” - Connecting remote sensing and Arctic communities for safe sea ice travel - Part 1 - Uncertain trafficability. (in preparation for submission to *Applied Geography*)