

Centre Eau Terre Environnement



Suivi de la glace de mer par imagerie satellitaire radar, photographie automatique et mesures directes aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq au Nunavik

 Par

Sophie Dufour-Beauséjour

Thèse présentée pour l'obtention du grade de *Philosophiæ Doctor*, Ph.D. en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne	Prof. Normand Bergeron Institut national de la recherche scientifique
Examinatrice externe	Adrienne Tivy, Ph.D. Services opérationnels des prévisions Conditions maritimes, glaces et Est Environnement et Changement climatique Canada
Examinateur externe	Prof. Derek Mueller Geography and Environmental Studies Carleton University
Directrice de recherche	Prof. Monique Bernier Institut national de la recherche scientifique
Co-directeur de recherche	Prof. Saeid Homayouni Institut national de la recherche scientifique

© Droits réservés de Sophie Dufour-Beauséjour, août 2020

À mes ami.e.s

Remerciements

Je tiens à remercier ma directrice de thèse Monique Bernier pour sa bienveillance et son expertise. C'est un privilège d'avoir été une de ses dernières étudiantes, avec Chaima Touati que je salut affectueusement. Merci à mon jury d'avoir révisé ma thèse, ainsi qu'à Saeid Homayouni d'avoir accepté de me co-diriger dès son arrivée à l'INRS. Merci aussi à la belle équipe du laboratoire de télédétection de l'INRS, notamment Yves Gauthier et Jimmy Poulin pour leur enthousiasme et leur humour. Merci à mes complices du 5e Valérie Plante Lévesque et Marc-Antoine Persent, ainsi qu'à Élisabeth Viry et Laureline Berthot, pour votre joyeuse occupation de l'INRS.

Merci aux collègues nordiques, notamment Véronique Gilbert et Juupi Tuniq : je garde un souvenir impérissable de nos journées sur la glace. Merci aux communautés de Salluit et Kangiqsujuaq pour leur accueil, à l'équipe du Parc national des Pingualuit, ainsi qu'aux équipes du camp de Baie Déception et du département d'environnement de Mine Raglan.

Merci à Samuel Tremblay, Émilie Tremblay, Catherine Girard, Jean-Gabriel Young, Catherine Lefrançois, Éléna Drouin, Martin Teasdale, Ariane Petitclerc, Olivier et Éléonore Amiot, François Ferland-Bilodeau, Alix et Lux, ma cousine Sophie Hamel-Dufour et ma mère Jocelyne Dufour. Merci à tous et toutes de partager ma vie, et parfois aussi ma thèse.

À Valérie, Sabina et Catherine – cette thèse n'aurait pas vu le jour sans vous, ou j'en aurais été beaucoup moins fière. Encore merci.

«In choosing what to study and how to study it, [scientists] need to reckon with the long history of representations and interventions that precedes them.»

— Andrew Stuhl, Unfreezing the Arctic: Science, Colonialism, and the Transformation of Inuit Lands

«Sa prétention abusive à formuler d'«inexorables» lois naturelles grâce à une stratégie d'observation, d'expérimentation et de généralisation des résultats – et sa réputation tant vantée d'«objectivité» et de compétence intellectuelle universelle – ont valu à la science l'accusation d'arrogance et d'insensibilité face aux sentiments, aux principes éhiques et à la crise de plus en plus aiguë de la condition humaine.»

— Murray Bookchin, Pouvoir de détruire, pouvoir de créer

Résumé

La glace de mer est liée au bien-être des communautés Inuit, dont les ancêtres ont su habiter l'Arctique depuis des milliers d'années. Au Canada, les peuples autochtones ont été et sont parfois encore réduits au rôle de spectateur par une pratique scientifique coloniale qui invisibilise leurs connaissances traditionnelles. Le Inuit Nunangat est à l'intersection des impacts des changements climatiques, du développement industriel et de transformations sociales. À Kangiqsujuaq, l'englacement est plus tard qu'avant et la débâcle est plus tôt. Il y a moins de neige au sol, tout comme à Salluit, et il est nécessaire de modifier les sentiers. À la baie Déception, située entre les communautés voisines de Salluit et de Kangiqsujuaq, le transport maritime des compagnies minières fait l'objet de mesures d'atténuation pour minimiser son impact sur le couvert de glace et le phoque.

En analysant des séries temporelles sur trois années, j'ai démontré que les traits saisonniers de la rétrodiffusion en bande C observés sur de la glace de mer de première année le sont aussi en bande X, et que la photographie automatique demeure la meilleure méthode d'observation à distance pour la caractérisation des processus d'englacement et de débâcle (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). J'ai mis en évidence l'absence de corrélation entre l'épaisseur de la neige et la rétrodiffusion en bandes C ou X au moyen d'une analyse bayésienne, et montré grâce à la polarimétrie radar qu'une légère corrélation entre la rétrodiffusion et l'épaisseur de la glace ne peut être observée que si celle-ci est au moins légèrement rugueuse et que la neige est mince (Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). Néanmoins, l'imagerie satellitaire radar et la photographie automatique ne permettent pas d'observer certains des aléas les plus importants du transport sur la glace comme les trous où les zones de glace mince.

À la baie Déception, j'ai établi que l'englacement typique débute à partir de plaques de glace pré-existantes qui donnent un couvert légèrement rugueux, qu'il était hâtif en 2015 et que la glace est plus mince de 50 centimètres par rapport aux mesures de 1991 (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b; Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). J'ai montré qu'à la baie Déception et à Kangiqsujuaq, des gradients d'épaisseur de neige se forment parfois sous l'effet de vents transverses, alors que l'alignement des vents dominants en direction du fjord de Salluit n'entraîne aucune accumulation préférentielle entre ses rives (Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). L'année 2018 fait figure d'exception avec un printemps tardif de trois à quatre semaines par rapport aux autres années et une débâcle à la baie Déception qui pourrait avoir été précipitée par le trafic maritime (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b).

J'ai présenté les résultats de ma recherche aux communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq dans des classes du secondaire et dans des soirées communautaires (Dufour-Beauséjour & Plante Lévesque, 2020). J'ai aussi animé une page Facebook sur le projet, ainsi qu'une table d'information à la Co-op de Kangiqsujuaq. Ces activités ont été favorisées par les liens déjà entretenus par l'équipe de recherche et par les forums environnementaux de Mine Raglan. J'ai pu constater à mon tour que la structure du système de recherche académique complique la communication avec les communautés.

Mots-clés Glace de mer, Radar à synthèse d'ouverture, Photographie automatique, Nunavik

Abstract

Sea ice plays an important role in the lives of Inuit, whose ancestors have lived in the Arctic for thousands of years. In Canada, colonial research practices have disregarded Indigenous peoples' rights and knowledge about their land. Inuit Nunangat is at the confluence of the impacts of climate change, industrial development and social transformations. In Kangiqsujuaq, freeze-up is now later than before and breakup is earlier. There is less snow on the ground, just as in Salluit, and travel routes have to be adapted. In Deception Bay, which is located between the two neighboring communities of Salluit and Kangiqsujauq, marine transportation by mining companies is the object of mitigation measures to reduce its impact on the sea ice cover and the seal population.

By analyzing time-series over three years, I demonstrated that the seasonal features which may be observed in C-band backscattering from first-year sea ice are also present in the X-band, and that time-lapse photography remains the best remote observation method to characterize freezeup and breakup processes (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). I reported on the lack of correlation between snow depth and C- or X-band backscattering based on a Bayesian analysis and used radar polarimetry to show that a small correlation between ice thickness and backscattering may only be observed if the ice is at least slightly rough and the snow thin enough (Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). However, SAR remote sensing and time-lapse photography do not allow us to observe some of the most important hazards to ice transportation such as holes or thin ice areas.

In Deception Bay, I described freeze-up as being most often based on pre-existing nilas patches which lead to a slightly rough surface, showed freeze-up 2015 to be earlier and sea ice to be 50 centimeters thinner than reprots from 1991 (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b; Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). Snow depth sometimes exhibited a gradient in Deception Bay and Kangiqsujuaq, in contrast with Salluit where the dominant winds are aligned with the fjord (Dufour-Beausejour *et al.*, 2020). Breakup 2018 stands out with a belated spring three to four weeks later than the other years and a breakup in Deception Bay which may have been precipitated by ice-breaking traffic (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b).

I presented my results to the communities of Salluit and Kangiqsujuaq in science classes at the high schools and during community evenings (Dufour-Beauséjour & Plante Lévesque, 2020). I also hosted a Facebook page about the project and an information table at the Co-op in Kangiqsujuaq. These activities were made possible in part by pre-existing links between the research team and the communities as well as Raglan Mine's Environmental Forums. I was a witness to the way the structure of academic research complicates communication with communities.

Keywords Sea ice, Synthetic aperture radar, Time-lapse photography, Nunavik

Table des matières

R	lemer	ciements		\mathbf{v}
R	lésum	é		$\mathbf{i}\mathbf{x}$
A	bstra	\mathbf{ct}		xi
Т	able	les matières		xiii
\mathbf{L}	iste d	es figures		xvii
\mathbf{L}	iste d	es tableaux		xix
\mathbf{L}	iste d	es abréviations		xxi
1	Intr 1.1 1.2	oduction Mise en contexte 1.1.1 La pratique des activités traditionnelles de chasse et pêche des Inuit 1.1.2 Des communautés nordiques englacées 1.1.3 L'incertitude liée aux impacts des changements climatiques 1.1.3 L'incertitude liée aux impacts des changements climatiques 1.1.4 Le cas de la baie Déception au Nunavik 1.1.5 Problématique et objectifs de la recherche 1.1.5 Problématique et objectifs de la recherche 1.2.1 Éthique de la recherche en contexte autochtone 1.2.2 Processus de formation et caractéristiques de la glace de mer 1.2.3 L'imagerie satellitaire appliquée au suivi de la glace de mer 1.2.3.1 Capteurs passifs et altimétrie 1.2.3.2 Apport de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture 1.2.4 Suivi in situ de la glace de mer	 	$ \begin{array}{c} 1\\2\\2\\3\\3\\4\\4\\5\\5\\8\\12\\12\\12\\17\\28\\22\end{array} $
	1.3	1.2.4.1 Mesure de l'épaisseur de neige et de glace	· · · · · ·	$ \begin{array}{r} 29 \\ 34 \\ 38 \end{array} $
2	Cor sais 2.1	abiner l'imagerie TerraSAR-X et la photographie pour suivre la glace onnière : le cas de la baie Déception au Nunavik Introduction	• de me	er 41 44 44 44 46
	2.2	Study area		46

	2.3	Data o	lescription $\ldots \ldots 4'$	7
		2.3.1	TerraSAR-X 48	8
		2.3.2	Time-lapse photography	8
	2.4	Metho	ds	9
		2.4.1	TerraSAR-X image processing and temporal interpretation	0
		2.4.2	Photograph interpretation	2
		2.4.3	TerraSAR-X spatial interpretation using photography	4
	2.5	Result	s	5
		251	Freeze-up	5
		2.5.1	Wintering 5'	7
		2.5.2 2.5.3	Spring 5	2
	26	Discus	sion) 1
	2.0	261	Dete sources as stand along manitoring tools	т Э
		2.0.1	2.6.1.1 Towns CAD V	2 0
			$2.0.1.1 \text{Terradart-A} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	2
		0.00	2.0.1.2 Time-tapse photography	2
		2.6.2	Complementarity of the data sources	3 0
		2.6.3	Sea ice processes observed in Deception Bay	3
			2.6.3.1 Freeze-up	3
			$2.6.3.2 \text{Wintering} \dots \dots$	4
			2.6.3.3 Melting and ponding 60	6
			2.6.3.4 Break-up	7
			2.6.3.5 Seasonal timeline and caveats	3
	2.7	Concl	ision	9
•	2.7	Conclu		9
3	2.7 Cor	Conclu rélatio	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré-	9
3	2.7 Cor troc	Conch rélatio liffusio	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73	9
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélatic liffusic Introd	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 7; uction	9 3 7
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélatio diffusio Introd 3.1.1	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction	9 3 7 7
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2	nsion	9 3 7 7 7
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu- rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction	9 3 7 7 3
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 74 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 74 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74	9 3 7 7 3 9
3	2.7 Cor troc 3.1	Conche rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater	Instant of the entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- In ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- In en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 Intervention 74 Context 75 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 76 77 Relationship with C- and X-band backscattering 76 77 78 78 74 75 76 77 78 78 79 79 71 71 72 74 75 76 77 78 78 79 79 79 79 79 79 71 74 75 76 77 78 79	9 3 7 7 8 9 9
3	2.7 Cor troc 3.1	Concluent rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1	nsion 69 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 Study areas 74	9 37778999
3	 2.7 Cortroc 3.1 3.2 	Concluent rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 74 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 74 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 74	9 377789991
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Concluent rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	nision 69 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 74 Context 75 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 76 Objectives 77 Study areas 78 Snow and sea ice thickness measurements 79 Study areas 80 Satellite SAR data	9 3777899313
3	 2.7 Cortroc 3.1 3.2 	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	nision 69 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 69 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 74 Context 74 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 74 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 84 Satellite SAR data 83 3.2.3.1 RADARSAT-2	9 377789991 33
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Concluent rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	In ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 74 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 74 Study areas 74 Satellite SAR data 83 3.2.3.1 RADARSAT-2	9 377789991 334
3	2.7 Cor troc 3.1	Concluent rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Isolo Statistic under the lage of t	9 3777899913344
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Ision 63 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 64 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 75 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 Study areas 79 Snow and sea ice thickness measurements 81 3.2.3.1 RADARSAT-2 Satellite SAR data 83 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 84 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements 84	9 3777899913344
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Ision 63 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 64 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 75 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 Study areas 79 Snow and sea ice thickness measurements 88 3.2.3.1 RADARSAT-2 Study SAR backscattering time-series 84 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 84 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements 84	9 3 7 7 7 8 9 9 1 3 3 4 4 5
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu- rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Ision 64 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 64 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 Study areas 79 Snow and sea ice thickness measurements 79 Study areas 79 Satellite SAR data 83 32.3.1 RADARSAT-2 32.3.3 Computing SAR backscattering time-series 32.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements statistical tools 84	9 3 7 7 7 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5
3	2.7 Cor troc 3.1	Conclu rélatic liffusic Introd 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 Study areas 79 Snow and sea ice thickness measurements 79 Study areas 79 Study areas 79 Statellite SAR data 83 3.2.3.1 RADARSAT-2 83 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements statistical tools 84 3.2.4.1 Gearv's C for spatial autocorrelation	9 3 7 7 7 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3	In terms and caready in the intervention of the interve	9 3 7 7 7 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 Besult	Ision 61 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 61 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 74 Study areas 84 3.2.3.1 RADARSAT-2 84 <t< td=""><td>9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 5 5 5 3 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 5 5 5 5 3 8 3 4 5 5 5 5 3 8 3 4 5</td></t<>	9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 5 5 5 3 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 5 5 5 5 3 8 3 4 5 5 5 5 3 8 3 4 5
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélatic liffusic Introd 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 Result	Ision 61 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 61 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 74 Study areas 74 Study areas 74 Satellite SAR data 74 3.2.3.1 RADARSAT-2 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements statistical tools 84 3.2.4.1 Geary's C for spatial autocorrelation 84 3.2.4.2 Bayesian linear regression 84 Statistical tools 84 S. 84 S. 84 S. 84 S. 84 S. 84 S. 84	9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 3 4 4 3 4 4 5 5 5 3 3 4 4 5 5 5 5 3 3 4
3	 2.7 Cortroc 3.1 3.2 3.3 	Conclu rélatic liffusic Introd 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 Result 3.3.1	ision 61 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 61 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 74 Objectives 74 Study areas 74 Snow and sea ice thickness measurements 76 Snow and sea ice thickness measurements 76 Sudy areas 76 Satellite SAR data 76 3.2.3.1 RADARSAT-2 3.2.3.2 TerraSAR-X 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements statistical tools 84 3.2.4.1 Geary's C for spatial autocorrelation 84 Statistical tools 84 3.2.4.2 Bayesian linear regression 84 Snow depth and ice thickness 84 Snow depth and ice thickness 84 Snow depth and ice thickness 84	9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 5 5 3 8 8 8 8 8 1 <th1< th=""> <th1< th=""> <th1< th=""> <th1< th=""></th1<></th1<></th1<></th1<>
3	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 Result 3.3.1	Ision 61 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 61 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 ials and methods 79 Study areas 79 Snow and sea ice thickness measurements 80 Satellite SAR data 81 3.2.3.1 RADARSAT-2 Satellite SAR data 81 3.2.3.2 TerraSAR-X Scalas 81 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements statistical tools 81 3.2.4.1 Geary's C for spatial autocorrelation 81 3.2.4.2 Bayesian linear regression 81 s. 81 81 3.3.1.1 Interannual comparisons 81 3.3.1.1 Interannual comparisons 81 3.3.1.1 Interannual comparisons 81	9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 5 5 3 8 3 4 4 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 4 4 5 5 5 3 8 3 3 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4 4 5 5 5 3 3 3 4 4
33	2.7 Cor troc 3.1 3.2	Conclu rélation liffusion 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 Mater 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 Result 3.3.1	Ision 61 n ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la ré- 61 n en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik 73 uction 77 Context 77 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale 77 Relationship with C- and X-band backscattering 78 Objectives 79 ials and methods 79 Snow and sea ice thickness measurements 80 Satellite SAR data 81 3.2.3.1 RADARSAT-2 82 3.2.3.2 TerraSAR-X 84 3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series 84 3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements 84 3.2.4.1 Geary's C for spatial autocorrelation 84 3.2.4.2 Bayesian linear regression 86 Snow depth and ice thickness 84 3.3.1.1 Interannual comparisons 84 3.3.1.2 Spatial distribution 84	9 3 7 7 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 3 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 3 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 3 8 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 3 8 9 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 3 8 9 9 9 9 1 3 3 4 4 5 5 5 3 8 9 9 9 9 9 1 3 3 4 4 5 5 3 3 3 4 4 5 5 3 3 3 4 4 5 5 5 3

		3.3.2.1 Interannual comparisons
		3.3.2.2 Relationship between backscattering and end-of-winter snow depth
		or ice thickness
	3.4	Discussion
	0.1	3.4.1 Factors driving snow depth and ice thickness distributions
		3411 Thicker snow in Kangiosuiyaq
		3 4 1 2 Thicker ice in winter 2015-2016
		3.4.1.3 Spatial structure in snow depth 0.4
		3.4.1.4 Spatial structure in ice thickness 05
		3.4.2 Lee thickness vs C or X band backscattering 06
		2.4.2.1 Case A. Thin grow cover
		2.4.2.2. Case R: Third snow cover
		$3.4.2.2$ Case D: Thick show cover $\ldots \ldots 00$
		$3.4.2.3$ Case C: very smooth ice $\ldots \ldots $
		3.4.2.4 Relationship with other SAR parameters
		3.4.3 Snow depth vs C- or X-band backscattering
	~ ~	3.4.4 Interpreting results from a Bayesian linear regression
	3.5	Conclusions
4	C	
4	Cor	nmunication et relations communautaires dans le cadre du projet de suivi
	des	glaces au Nunavik : la perspective de jeunes chercheuses
	4.1	
	4.2	Author presentation
	4.3	To publish or not to publish?
	4.4	Context
		4.4.1 Ice monitoring in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq 109
		4.4.2 Governmental and industrial partners
		4.4.3 History of the research project 110
		4.4.4 The importance of mentorship 111
	4.5	Part I. Periodic outreach program 111
		4.5.1 Facebook page for the research project
		4.5.2 Table at the Co-op store \ldots
		4.5.3 Ice Mission school activities
		4.5.4 Participation in the Environmental Forum
	4.6	Part II. Lessons learned during outreach efforts
		4.6.1 Adopting the right attitudes
		4.6.2 Being mindful of a community's diversity
		4.6.3 Addressing the perception of our integrity as researchers
		4.6.4 Deconstructing our ideas and practices
	4.7	Part III. Moving forward
	4.8	Conclusion
5	Dis	cussion 123
	5.1	Objectif 1 : Évaluation d'outils de suivi de la glace de mer
		5.1.1 Utilisation de séries temporelles
		5.1.2 Combinaison d'outils
		5.1.3 Choix statistiques
		5.1.4 Adoption d'un cadre d'analyse saisonnier

	5.2	Objectif 2 : Description des processus saisonniers de glace de mer aux fjords de Salluit,		
	de la baie Déception et de Kangiqsujuaq de 2015 à 2018		138	
		5.2.1	Englacement	138
		5.2.2	Hivernage	140
		5.2.3	Fonte et débâcle	143
		5.2.4	Co-interprétation avec des membres des communautés	144
	5.3	Object	if 3 : Communication des résultats aux communautés	146
		5.3.1	Tension entre communication et lassitude à l'égard de la recherche	146
		5.3.2	Adaptation du niveau d'information	149
6	Con	clusio	1	153
Ré	éfére	nces		159
Ι	Doc	ument	s complémentaires - Chapitre 2	181
Π	Doc	ument	s complémentaires - Chapitre 3	193
II	IIIDocuments complémentaires - Chapitre 4 213			

Liste des figures

1.1	Carte du Inuit Nunangat	2
1.2	Photos illustrant l'épaississement de la glace	10
1.3	Photos illustrant l'accumulation d'eau sur la glace au printemps	11
1.4	Fonctionnement de l'imagerie par micro-ondes passives et de l'altimétrie	13
1.5	Étendue de la glace dans l'océan Arctique en octobre 2020	14
1.6	Modes d'acquisition de RADARSAT-2	17
1.7	Mécanismes de rétrodiffusion pour de la glace de mer de première année et son couvert	
	de neige	18
1.8	Diffuseurs et surfaces dans la glace de mer de première année	20
1.9	Exemple de carte du Service canadien des glaces	23
1.10	Exemple de classification de la glace de mer par RSO	24
1.11	Corrélation entre l'épaisseur de la glace et les bandes C et X	25
1.12	Corrélation entre l'épaisseur de la neige et la bande C	26
1.13	Détection de la fonte dans des séries temporelles en bande C $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	27
1.14	Climatologie de l'épaisseur de la neige dans l'Arctique	31
1.15	Épaisseur de glace mesurée par le <i>SmartQAMUTIK</i>	33
1.16	Carte du réseau CAIMAN	36
0.1	Elevation and bothumature in Departion Par	47
2.1	Elevation and bathymetry in Deception Bay	47
2.2	Inage subset and camera location	49 51
2.3 9.4	Change detection in X hand hadragettering	51
2.4	Time lange photography of breakup and frage up 2016	52
2.0 9.6	Coincident Terme SAP X and photography in fragge up 2017 and breakup 2018	- 00 54
2.0	Confident TerrasAR-A and photography in neeze-up 2017 and breakup 2018	54
2.1	Zones relevent for the neeze-up process	57
$\frac{2.0}{2.0}$	X band VV backscattering time series for the freeze up period	58
$\frac{2.9}{2.10}$	Characterization of X hand VV backscattering	50
2.10 2.11	Zones for describing the spatial aspects of breakup	60
2.11 2.12	X-band VV backscattering time-series for the breakup period	61
2.12	A-band V V backscattering time-series for the breakup period	01
3.1	Map of Nunavik in Inuit Nunangat	80
3.2	Bathymetry and dominant winds for Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq	81
3.3	January 2018 sampling locations for Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq	82
3.4	Standardized end-of-winter snow depth	90
3.5	Standardized end-of-winter ice thickness	91
3.6	Seasonal median SAR parameters	92

3.7	Most likely hypothesis in the Bayesian linear regression analysis	93
4.1	Map of Nunavik showing the locations of Salluit, Deception Bay, Raglan Mine, and	
	Капдіqsujuaq	110

Liste des tableaux

2.1	Characteristics of TerraSAR-X acquisitions for the study
2.2	Seasonal timeline for snow-covered sea ice for three years
3.1	Fieldwork measurement campaign dates
3.2	RADARSAT-2 acquisition parameters
3.3	January-February snow depth and ice thickness
3.4	April-May snow depth and ice thickness
4.1	Inventory of community outreach activities
5.1	Sommaire des résultats pour l'objectif 1
5.2	Sommaire des résultats pour l'objectif 2
5.3	Sommaire des résultats pour l'objectif 3

Liste des abréviations

AOI	Area of interest
ARK	Administration régionale Kativik
DLR	German Aerospace Center
ICC	Inuit Circumpolar Council
INQ	Institut nordique du Québec
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ITK	Inuit Tapiriit Kanatami
KRG	Kativik Regional Governement
NSERC	$Natural\ Sciences\ and\ Engineering\ Research\ Council\ of\ Canada$
RCM	RADARSAT Constellation Mission
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
SAR	Synthetic aperture radar
SHEBA	Surface Heat Budget of the Arctic Ocean
WMO	World Meteorological Organization

Chapitre 1

Introduction



Kangiqsujuaq, mai 2018

1.1 Mise en contexte

1.1.1 La pratique des activités traditionnelles de chasse et pêche des Inuit

Inuit Nunangat est le terme désigné par Inuit Tapiriit Kanatami pour désigner le territoire des Inuit canadiens; il inclut à la fois la terre, l'eau, et la glace. Ce territoire englobe les quatre régions Inuit du Canada, soit le Inuvialuit, le Nunavut, le Nunavik et le Nunatsiavut, incluant 51 communautés (ITK, 2020). Le Nunavik est le territoire délimité par la province du Québec au nord du 55e parallèle (voir la figure 1.1).



Figure 1.1 – Carte du Inuit Nunangat, reproduite de ITK (2020).

Les ancêtres des Inuit ont pu habiter l'Arctique depuis des milliers d'années grâce aux ressources accessibles par la chasse et la pêche : *«The sea, for Inuit, is their highway. In the wintertime, their highway is sea ice»* (ICC Canada, 2008). Les Inuit du Nunavik ont par exemple toujours voyagé de longues distances pour chasser notamment le phoque, le béluga, le morse et le caribou. La sécurité des Inuit sur leur territoire dépend de connaissances acquises au fil des générations et des expériences personnelles (Laidler, 2006). La glace de mer est à la fois une source de nourriture et une plateforme pour le transport; elle est liée au bien-être des populations (Huntington *et al.*, 2016). Par

exemple, lorsque la baie est couverte de glace, les membres de la communauté de Salluit au Nunavik fréquentent la baie Déception et la traverse pour chasser le phoque et le caribou (Greydanus *et al.*, 2018).

1.1.2 Des communautés nordiques englacées

Selon le Service canadien des glaces, la région du détroit d'Hudson était englacée en moyenne de début décembre à début juillet pour la période climatique 1981-2010 (Fequet *et al.*, 2011). Le transport maritime, ou *sea lift*, est essentiel pour le réapprovisionnement des communautés ainsi que pour leurs projets de développement, par exemple ceux de construction (Andrews *et al.*, 2018; Pelletier & Guy, 2015). Ce service est interrompu par l'englacement de la voie maritime, et ne peut généralement donc être effectué que de juillet à octobre (Turmel *et al.*, 2013). Malgré les obstacles inhérents au transport maritime dans l'Arctique canadien (ex. conditions de glace), il s'agit d'un secteur en pleine expansion : le trafic maritime dans la région a presque triplé entre 1990 et 2015 (Dawson *et al.*, 2018). Aucune route ou voie ferrée ne relie les 14 communautés du Nunavik entre elles ou au reste de la province; elles ne peuvent être approvisionnées que par voie maritime ou par avion (Andrews *et al.*, 2018).

1.1.3 L'incertitude liée aux impacts des changements climatiques

La glace de mer est un environnement complexe dont les particularités peuvent changer d'un endroit à un autre (Gearheard *et al.*, 2006). Les communautés nordiques sont au coeur de changements environnementaux et sociaux qui menacent leurs systèmes de connaissances traditionnelles (Nickels *et al.*, 2005). Ceux-ci ne sont déjà pas suffisants pour éliminer complètement le danger : « *Every hunter and traveller on the ice, even the most experienced, has a story about a close call* [...]» (Huntington *et al.*, 2016). Dans ce contexte, les Inuit valorisent avant tout des connaissances leur permettant d'améliorer leurs chances de succès à la chasse, de prédire adéquatement la météo, et de rendre leurs déplacements plus sécuritaires (Laidler, 2006). Des membres de la communauté de Kangiqsujuaq ont rapporté que l'englacement automnal se fait plus tardivement qu'avant (Nickels *et al.*, 2005). Il y a moins de neige, la débâcle printanière est plus hâtive et les conditions de vent sont plus variables (Cuerrier *et al.*, 2015). Le portrait climatique de la région devrait continuer à évoluer : pour la région de la baie Déception, les projections à l'horizon 2040-2064 du consortium Ouranos montrent une température moyenne annuelle plus élevée et un couvert nival de plus courte durée (Mailhot & Chaumont, 2017).

1.1.4 Le cas de la baie Déception au Nunavik

La baie Déception est située dans le détroit d'Hudson, à environ 50 kilomètres à l'est et 200 kilomètres au nord-ouest des communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq respectivement. Certains aînés de Salluit ont vécu et même grandi à cet endroit prisé pour la chasse; on l'appelle Salluit aippanga en Inuktitut, soit « l'autre ou le deuxième Salluit » (Ruffin & Alaku, 2011). Deux compagnies minières exploitent présentement des gisements de nickel dans la région : Glencore, avec Mine Raglan, et Canadian Royalties, avec la mine Nunavik Nickel (Blais, 2015). Chacune opère un port sur la baie Déception, d'où elles exportent le concentré par voie maritime à l'aide de vraquiers (bulk *carriers*) brise-glace. Le navire desservant Mine Raglan effectue en moyenne deux allers-retours par année dans des conditions englacées (Mussells et al., 2017). Le transport maritime dans la baie est interrompu pendant que les phoques mettent bat et élèvent leurs petits (GENIVAR, 2012); la période actuelle de cette black-out window est du 15 mars au 1er juin. En dehors de cette période, les brise-glace suivent toujours le même tracé dans la baie afin de minimiser leur impact sur l'habitat du phoque et sur les déplacements en motoneige des membres de la communauté de Salluit (GENIVAR, 2012; Blais, 2015; Greydanus et al., 2018). Les mesures d'atténuation incluent aussi le ralentissement des navires au sein du fjord et l'aménagement de ponts de glace où il est plus facile de traverser la trace du navire (GENIVAR, 2012). Cette thèse s'inscrit dans un projet de recherche indépendant financé en partie par Mine Raglan et par l'Administration régionale Kativik.

1.1.5 Problématique et objectifs de la recherche

Dans un contexte où la glace de mer présente une importance culturelle et logistique pour les communautés riveraines de Salluit et de Kangiqsujuaq, y compris à la baie Déception d'où Mine Raglan exporte son concentré de nickel, et où la cryosphère poursuivra son évolution des dernières décennies suite aux impacts des changements climatiques, la question de recherche suivante se pose

:

Quel est l'état actuel de la glace saisonnière et de son couvert nival dans ces fjords du détroit d'Hudson et quelles méthodes permettent d'en décrire les processus?

Pour répondre à cette problématique, les objectifs de ma recherche doctorale sont les suivants :

- 1. Évaluer différentes technologies (outils) de suivi de la glace de mer : échantillonnage *in situ*, caméras de surveillance, et imagerie satellitaire radar;
- Décrire l'état de la glace de mer saisonnière et de son couvert nival dans les fjords de Salluit, Déception, et Kangiqsujuaq au Nunavik pour la période 2015-2018;
- 3. Communiquer les résultats de la recherche aux communautés concernées.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Éthique de la recherche en contexte autochtone

«Arctic research continues to operate in a colonial framework and with an academic mindset that largely privileges the interests of southern institutions and fails to address Northern societal needs and issues, in particular those experienced in Inuit communities.» (Pfeifer, 2018)

Les racines coloniales de la recherche nordique

Selon Inuit Tapiriit Kanatami, les premiers travaux de « recherche nordique » ont servi de précurseurs à l'expansion de la souveraineté canadienne et à la déshumanisation des Inuit (ITK, 2018). La recherche nordique est en effet née en support aux activités commerciales et militaires dans l'Arctique, celles-ci ayant comme objectif d'en exploiter les ressources naturelles et d'y affirmer la souvereineté canadienne. Certaines descriptions actuelles du Nord font encore écho aux représentations forgées pendant un siècle de colonialisme : une *terra incognita* isolée et inhospitalière, un territoire vierge à défricher (Stuhl, 2016). Quant aux habitants de ce territoire, les scientifiques les ont réduit au rôle soit de sujet, soit de spectateur (ITK, 2018). Au Canada, les peoples autochtones ont été déplacés, assimilés, et invisibilisés par le colonialisme; ces pratiques de domination et d'objectification des autochtones et de leurs territoires se poursuivent encore aujourd'hui (Coulthard, 2014; Loomba, 2015). La recherche a contribué à cette oppression des peuples autochtones en reproduisant des pratiques coloniales (Smith, 2012; Ball & Janyst, 2008). Le système de recherche sous sa forme actuelle ne permet pas de reconnaître les connaissances autochtones sur leur propre environnement comme étant fiables ou crédibles (Pfeifer, 2018). La majorité de la recherche effectuée sur les autochtones l'est donc par des chercheurs non-autochtones (Ball & Janyst, 2008). Les connaissances accumulées par les Inuit sont basées sur leurs relations avec l'environnement (Laidler, 2006) : ceux-ci habitent le territoire et le vivent quotidiennement. Ces modes de connaissance (*ways of knowing*) sont différents de ceux qui prédominent dans la sphère scientifique, qui sont plutôt de nature réductionniste : ils visent à isoler l'objet d'étude, par exemple la glace de mer, pour en élucider les processus physiques à partir d'une posture externe à l'objet. Le savoir Inuit est aujourd'hui mis de l'avant comme une science en soi, qui intègre à la fois les connaissances et les relations entre les humains et la nature (Martin, 2013; Pfeifer, 2018).

Le financement de la recherche dans le Inuit Nunangat présente un biais en faveur des sciences bio-physiques, au mépris de d'autres priorités Inuit telles que la santé et les sciences sociales (ITK, 2018). C'est sans compter que dans certains projets en sciences naturelles, les communautés locales sont exclues de la recherche au point de ne même pas savoir que le projet est terminé (Brunet *et al.*, 2014). « *Knowledge and power are intimately intertwined* [...] » : la production de connaissances, incluant leur circulation et leur adoption comme norme, a des implications sociales (Leeuw *et al.*, 2012), et les représentations scientifiques de l'Arctique et l'intervention humaine dans la région s'entremêlent (Stuhl, 2016, p.3).

Recommandations autochtones et lignes directrices

Les enjeux actuels liés à la recherche au Inuit Nunangat vont du financement au contrôle des produits de la recherche (ITK, 2018). Trop de projets de recherche ne correspondent pas aux priorités des communautés autochtones (Asselin & Basile, 2012). Selon les *Lignes directrices pour la recherche* de l'Institut nordique du Québec, les projets de recherche émanant de chercheurs devraient être conçus et réalisés de façon conjointe avec les peuples autochtones (INQ, 2017a), pour assurer leur pertinence et parce qu'ils risquent d'avoir un impact, même indirect, sur les communautés (Tondu *et al.*, 2014). Cette collaboration devrait être établie dès le début du projet, être entretenue jusqu'à la dissémination des résultats de la recherche, et impliquer la construction d'une relation de confiance entre les partenaires (INQ, 2017a; Riddell *et al.*, 2017).

Même en suivant les recommandations sur la recherche en contexte autochtone, on court le risque de reproduire des pratiques coloniales (Leeuw *et al.*, 2012). Encore aujourd'hui, les produits

de la recherche profitent longtemps aux carrières des chercheurs et à leurs institutions, mais de façon limitée et éphémère aux communautés autochtones (Pfeifer, 2018). En ce qui a trait à l'impératif de collaboration avec les communautés, par exemple, celles-ci peuvent être tellement sollicitées que la collaboration en devient un fardeau qui nuit à leurs efforts d'auto-détermination en matière de recherche (Brunger & Wall, 2016; INQ, 2017a).

Dans une étude menée auprès de jeunes chercheurs (étudiants et stagiaires post-doctoraux) dont les travaux portent sur l'Arctique, la moitié des répondants ont dit manquer d'information sur la pratique de la recherche en contexte autochtone (Sjöberg *et al.*, 2019). Plusieurs stratégies individuelles ont été mises de l'avant pour pallier à cette situation : s'éduquer à partir de la littérature sur le sujet, échanger avec des collègues, avoir recours à du mentorat, etc. (Tondu *et al.*, 2014; MacMillan *et al.*, 2019). L'Institut nordique du Québec recommande que « tout étudiant [...] soit accompagné de son directeur de recherche lors de la ou des premières rencontres avec les instances autochtones concernées », tout en reconnaissant que les fonds de recherche ne le permettent pas toujours (INQ, 2017a). Les étudiants peuvent aussi tenter d'obtenir du financement pour passer plus de temps dans les communautés et documenter leur expérience via des publications scientifiques ou dans leur thèse (Tondu *et al.*, 2014).

Conclusion sur l'éthique

Ma recherche doctorale souscrit à la poursuite de meilleures pratiques de recherche en contexte autochtone. Elle est donc guidée par les impératifs suivants : pertinence de la recherche pour les communautés concernées, implication des communautés dans le projet et reconnaissance des savoirs autochtones.

Le choix du sujet d'étude émane de préoccupations locales : les impacts du trafic maritime lié à l'exploitation minière sur le couvert de glace saisonnière à la baie Déception. Les deux premiers objectifs de recherche ont été formulés en fonction des retombées potentielles du projet pour les organismes locaux : l'évaluation de méthodes de suivi qui pourront ensuite être adoptées ou non selon les besoins et l'élaboration d'un portrait de la situation qui pourra servir dans la prise de décision et l'évaluation d'impacts futurs. La planification des campagnes de terrain et l'organisation du travail au sein des équipes se sont appuyées sur l'expertise locale. Des liens ont été entretenus avec les communautés concernées au fil du projet par le biais d'activités de communication, ce qui constitue le troisième objectif de ma recherche. Enfin, le contexte socio-culturel entourant le sujet d'étude est systématiquement inclus lors de la communication des résultats à la communauté scientifique, ce qui s'inscrit dans le recadrage de la recherche nordique vers les priorités locales.

1.2.2 Processus de formation et caractéristiques de la glace de mer

«Inuit expertise has the potential to inform scientific studies of locally important sea ice features/processes often lamented as lacking due to inadequate sensor resolution or inability to conduct frequent and extensive ground verification» (Laidler & Elee, 2008)

Dans sa série de trois publications Human geographies of sea ice: freeze/thaw processes (Laidler & Elee, 2008; Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler et al., 2008), Laidler présente les processus d'englacement et de fonte tels que décrits par des Inuit de Pangnirtung, Igloolik, et Cape Dorset, trois communautés du Nunavut. Cette dernière est située dans le détroit d'Hudson, à environ 250 km au nord de Salluit. La revue des processus liés à la glace de mer et au couvert nival, en particulier lors de l'englacement et du printemps, se base en grande partie sur leurs descriptions. L'ouvrage WMO Sea Ice Nomenclature (WMO, 2014) et d'autres publications scientifiques sont utilisées comme complément d'information.

Englacement

Après que le sol ait gelé, l'englacement débute sur l'estran (*intertidal zone*). La glace formée à marée basse sur des roches peu profondes restera ancrée au fond de l'eau ou sera délogée par la marée montante pour continuer à croître à la surface de l'eau (Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler & Elee, 2008). La zone de marnage sera éventuellement recouverte de glace, laquelle sera typiquement rugueuse à cause de l'effet des marées. Cette glace de rive rencontrera d'autres types de glace formée dans l'eau libre (Laidler *et al.*, 2008; Laidler & Elee, 2008). Au Nunavik, des experts de Umiujaq rapportent que quelques jours de temps froid permettent à la glace de mer de s'épaissir, tandis que la présence de vent et la chute de neige peuvent retarder la formation de glace (Tremblay *et al.*, 2006).

Dans l'eau libre, avant l'englacement, on peut d'abord observer de la glace qui ressemble à du sorbet ou à du frasil. De consistance liquide et épaisse, ce type de glace flexible se forme dans l'eau libre (Laidler & Ikummaq, 2008). Sous l'effet du vent, particulièrement dans des baies ou des fjords où le vent souffle à partir de la terre ferme, des morceaux de glace rugueuse se créent à la surface de l'eau. Ce type de glace qui ressemble à de la glace en crêpes peut accélérer l'englacement d'une région en la recouvrant rapidement (Laidler & Elee, 2008; Laidler *et al.*, 2008; WMO, 2014). Il est associé à des conditions d'eau turbulente (Petrich & Eicken, 2016). L'englacement peut aussi être favorisé par l'absence de vent (Laidler *et al.*, 2008).

La première sorte de glace à recouvrir entièrement une région est mince, cassante, mobile et flexible, apparentée à de la glace vitrée ou à du nilas (Laidler & Elee, 2008; Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler *et al.*, 2008). La figure 1.2 illustre différents types de jeune glace. L'accumulation de neige sur de la jeune glace mince ralentit sa croissance et peut même l'amincir. Ce dangereux amincissement est causé par l'immersion de la glace sous le poids de la neige imbibée d'eau, ou par l'effet isolant de la neige (Laidler & Ikummaq, 2008). En l'absence de neige, des cristaux de glace peuvent croître sur la jeune glace dans ses premiers jours, assimilés à des fleurs de givre. Ressemblant à des cristaux de neige, ils rendent la glace moins glissante, peuvent ralentir sa croissance en l'isolant (Laidler *et al.*, 2008), et peuvent absorber de l'eau de mer (WMO, 2014).

Lors de l'englacement, il est possible que certaines zones demeurent ouvertes sous l'effet du vent et ne gèlent que plus tard. Un courant fort, comme dans des zones marquées par une faible profondeur, un rétrécissement, ou une pointe, ralentit la formation de la glace. De la glace formée dans des conditions venteuses sera plus rugueuse. Lorsque la glace est lisse, formée sans qu'il tombe de neige et en l'absence de vent, elle peut être très glissante (Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler *et al.*, 2008).

Hivernage

Après avoir atteint une épaisseur de 30 à 60 centimètres, la glace reste en place pour toute la saison et l'accumulation de neige ne cause plus son amincissement (Laidler *et al.*, 2008; Laidler & Elee, 2008). À ce stade, la majorité de la saumure emprisonnée dans la glace au moment de sa formation se sera écoulée hors de la glace, laissant derrière elle un réseau vertical de canaux de drainage (Cox & Weeks, 1974, 1988; Zhang *et al.*, 2013). La neige en contact avec la glace peut absorber une partie de la saumure (Barber & Nghiem, 1999; Nandan *et al.*, 2016).

Sur de la glace de première année relativement lisse, la neige a tendance à s'accumuler en congères périodiques. La neige est plus épaisse sur de la glace s'étant formée plus tôt et sur de la glace rugueuse, voir brisée (Iacozza & Barber, 1999, 2010). De plus, un vent suffisamment fort peut



Figure 1.2 – Photos illustrant l'épaississement de la glace, reproduite de Laidler & Elee (2008). a) sikuaq, de la glace mince nouvellement formée; b) nigajutaq, une zone dans la glace qui gèle plus tard que d'autres; c) les qanguti se forment sur de la glace lisse à cause de la différence de température entre l'air et l'océan; d) vue rapprochée de qanguti qui montre leur structure cristalline; e) sikujuq, la glace épaissit et sera bientôt de la siku (glace); f) tuvaq, de la glace solide attachée à la terre.

redistribuer de la neige déjà accumulée sur la glace. Lorsqu'il fait très froid, la glace peut se fissurer plus facilement sous l'effet du vent ou du courant (Laidler & Ikummaq, 2008).

Fonte et débâcle

La glace commence à fondre par en-dessous sous l'effet des courants avant même que la neige se mette à fondre, un processus qui peut être accentué par la présence d'un couvert nival (Laidler *et al.*, 2008; Laidler & Ikummaq, 2008). La glace située à proximité d'une polynie (une étendue d'eau qui demeure libre au sein d'un couvert de glace, causée par une combinaison de phénomènes comme les marées, les vents, les courants ou les remontées d'eau profonde (Gouvernement du Canada, 2009b)), dans une zone de fort courant, ou à proximité de la limite de la banquise peut se dégrader avant le reste du couvert (Laidler & Elee, 2008).

La fonte commence avec une transformation de la neige : elle devient d'abord lisse et brillante à certains endroits, puis molle et spongieuse au point de nuire au transport. À ce stade, il est possible de faire des boules de neige. En ramollissant, la neige s'égalise. De l'eau s'accumule éventuellement sous la neige, à la surface de la glace (Laidler & Elee, 2008; Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler *et al.*, 2008).

L'accumulation d'eau causée par la fonte de la neige peut entraîner la présence de gadoue et de mares de fonte sur la glace, tel qu'illustré à la figure 1.3. Si la fonte de la neige est assez rapide, la glace peut être entièrement recouverte d'eau. La dégradation de la glace mène éventuellement à une phase de drainage où l'eau peut s'écouler au travers de la glace par des trous de fonte. À ce stade, la glace commence à être dangereuse. La glace asséchée suite au drainage peut avoir une couleur blanche. Il est ensuite possible qu'une deuxième phase de mares de fonte se déroule, associée cette fois à la fonte de la glace (Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler *et al.*, 2008; WMO, 2014).



Figure 1.3 – Photos illustrant l'accumulation d'eau sur la glace au printemps, reproduite de Laidler et al. (2008). a) ikiartirtuq, de la glace recouverte de mares formées par la fonte de la neige (la glace est alors appelée *immatinniit*) et dont la surface a gelé pendant la nuit; b) puttailiq, quand la glace devient complètement recouverte d'eau de fonte.

« Break-up does not occur randomly [...] » (Laidler & Ikummaq, 2008). La débâcle commence d'abord le long des rives, ou encore là où la glace est déjà brisée par des trous ou des fissures. Avant que la débâcle ne soit complétée, la glace se brise d'abord en gros morceaux. Le vent accélère la débâcle, et la glace aura tendance à s'amincir et se briser plus vite à proximité d'une rivière, sous l'effet de la faible salinité de son eau (l'eau douce gèle à 0°C, et l'eau de mer à -1.8°C), de son mouvement, et de sa température (Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler & Elee, 2008; Laidler *et al.*, 2008).

Conclusion sur la nature du suivi de la glace de mer

J'ai choisi de décrire le sujet d'étude principalement à partir des connaissances traditionnelles Inuit relayées par Laidler plutôt qu'en me basant sur des études comme celles de Isleifson *et al.* (2014), Iacozza & Barber (1999) Perovich & Gow (1996), Cox & Weeks (1988), Weeks & Ackley (1982), etc. Ce choix vise à recadrer la glace de mer comme étant un milieu habité et dynamique. À cet effet, mon suivi vise une description à l'échelle locale et précise plutôt que régionale et grossière ainsi que la caractérisation de cas spéciaux plutôt que la recherche d'une tendance (Laidler, 2006). Les objectifs de la thèse sont d'ailleurs centrés sur le milieu à l'étude plutôt que sur les techniques utilisées. Les résultats et leur interprétation sont structurés comme dans les descriptions relayées ci-haut, c'est-à-dire en fonction des cycles de formation et de fonte de la glace de mer.

1.2.3 L'imagerie satellitaire appliquée au suivi de la glace de mer

«Summer sea ice cover has decreased significantly across nearly all Canadian marine regions, and the rate of multi-year ice loss in the Beaufort Sea and Canadian Arctic Archipelago has nearly doubled over the last 8 years.» (Mudryk et al., 2018)

1.2.3.1 Capteurs passifs et altimétrie

Fonctionnement

Un capteur à micro-ondes passives capte le rayonnement micro-onde émis par la surface de la Terre pour en créer une image où l'intensité de chaque pixel dépend de la quantité de rayonnement reçue. L'émissivité micro-onde des objets dépend de leurs propriétés physiques; la structure cristalline de la glace de mer émet généralement plus de micro-ondes que celle de l'eau libre, ce qui permet de les distinguer facilement (NSIDC, 2020d). Les nuages émettent peu de micro-ondes et sont donc invisibles aux yeux des capteurs. La figure 1.4a illustre le processus d'acquisition de l'imagerie satellitaire par micro-ondes passives.

Un altimètre envoie des pulses de rayonnement soit micro-ondes (radar) ou visible (laser) vers la surface et mesure le temps de retour de leurs échos pour en déduire la distance qui sépare l'appareil de la surface (ESA & CNES, 2020a), tel qu'illustré à la figure 1.4b. Pour mesurer l'épaisseur de la glace, son franc-bord est d'abord calculé en comparant la hauteur de la glace à celle de l'eau libre. L'épaisseur totale de l'objet flottant constité de glace et de neige est estimée à partir de l'hypothèse hydrostatique (ESA & CNES, 2020b). Les altimètres radar détectent la surface de la glace (en passant au travers de son couvert de neige), tandis que les altimètres laser détectent la surface de la neige.



Figure 1.4 – Fonctionnement de l'imagerie par micro-ondes passives et de l'altimétrie. À gauche (a), reproduite de NRCAN (2008), un capteur passif détecte le rayonnement émis ou réfléchi par la surface. L'illumination provient du Soleil. À droite (b), reproduite de ESA & CNES (2020a), un altimètre envoie des pulses électromagnétiques vers la surface et mesure leurs temps de retour pour déduire la hauteur de la cible.

Étendue de la glace de mer

Grâce à l'imagerie satellitaire par micro-ondes passives, la communauté scientifique a pu assembler une base de données sur l'étendue de la glace de mer en Arctique qui remonte à l'année 1978 (Meier *et al.*, 2014). La concentration de glace est calculée à une résolution temporelle quotidienne et à une résolution spatiale de 25 kilomètres à partir des températures de brillance à 18 et 37 GHz (Cavalieri *et al.*, 1996) mesurées par les capteurs SMMR (1978-1987), SSM/I (1987-2007), et SSMIS (2007aujourd'hui, à bord du satellite Nimbus-7) (NSIDC, 2020b). Ces archives montrent que l'étendue mensuelle de la glace de mer dans l'Arctique diminue depuis 1979, que cette tendance accélère, et qu'elle est partagée par toutes les régions arctiques à l'exception de la mer de Bering de décembre à mai (Meier *et al.*, 2014). En plus de cette tendance négative, l'étendue de la glace de mer en Arctique présente une forte variabilité interannuelle, laquelle est due en majeure partie aux variations de la température atmosphérique (Olonscheck *et al.*, 2019). À titre d'exemple, la figure 1.5 montre l'étendue de la glace dans l'océan Arctique en octobre 2020, remarquablement réduite par rapport à la médianne 1981-2010. Octobre 2020 est le mois pour lequel l'étendue de glace s'est la plus éloignée des conditions moyennes de l'histoire des archives micro-ondes passives (NSIDC, 2020c).



Figure 1.5 – Étendue de la glace dans l'océan Arctique en octobre 2020, reproduite du NSIDC (2020c).

À partir de la base de données d'images micro-ondes passives SSM/I, Gignac *et al.* (2019) ont tracé un portrait spatiotemporel probabiliste du couvert de glace dans la baie d'Hudson. Ce modèle, appelé IcePAC, repose sur la modélisation fréquentielle d'une base de données de 1978 à 2015. L'outil IcePAC peut notamment donner une estimation de la date probable d'englacement ou de débâcle pour toute la région de la baie d'Hudson. Pour Salluit, par exemple, l'englacement a
50% de chances de se produire à la 49e semaine de l'année, et la débâcle à sa 26e semaine. La région de la baie d'Hudson, qui inclue le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, est toutefois située dans la zone de glace marginale : elle peut être libre de glace l'été. Cette particularité peut entraîner des erreurs dans l'estimation du couvert de glace de mer à l'aide de l'imagerie par micro-ondes passives, particulièrement lors de l'englacement et de la fonte, tel que démontré par une comparaison avec la base de données du Service canadien des glaces (Agnew & Howell, 2003).

Les archives du Service canadien des glaces contiennent des rapports hebdomadaires de conditions de glace de mer au Canada depuis 1960, lesquels reposent sur l'observation satellite, par avion ou sur un navire, les résultats de modèles et l'expertise des prévisionnistes. La résolution spatiale des images satellites utilisées pour produire les rapports peut varier de 50 mètres à 25 kilomètres (Tivy *et al.*, 2011). Une analyse de cette base de données révèle que la concentration de glace moyenne pendant l'été (18 juin au 19 novembre) dans le détroit d'Hudson a diminué de 20% entre 1968 et 2016 (Mudryk *et al.*, 2018). Dès 2003, Houser & Gough avaient utilisé la base de données du Service canadien des glaces pour étudier les dates d'englacement et de débâcle dans le détroit d'Hudson. Cette étude identifiait le début d'une tendance à un englacement plus tardif et à une débâcle hâtive à partir de 1990 (Houser & Gough, 2003).

En l'absence de nuages, les capteurs dans l'infrarouge ou le visible peuvent eux aussi permettre de détecter la présence de glace de mer et d'en estimer l'étendue. Gignac *et al.* (2017) ont par exemple développé un produit de concentration de glace pour la baie d'Hudson basé sur la bande procheinfrarouge des capteurs MODIS à bord des satellites Terra (1999-aujourd'hui) et Aqua (2002-2011). L'avantage de MODIS sur les capteurs à micro-ondes passives est sa meilleure résolution spatiale : 250 mètres pour le produit IceMAP250. Cette approche est toutefois limitée par la présence de nuage, particulièrement lors de l'englacement à l'automne. Selon l'analyse du produit IceMAP250, le ciel était dégagé au-dessus du détroit d'Hudson au maximum de 20 à 30% du temps en 2003 (Bernier *et al.*, 2016). Bernier *et al.* (2015) ont aussi travaillé à une méthode de classification de la glace de mer à partir des capteurs ETM+ (LANDSAT-7, 1999-aujourd'hui) et OLI (LANDSAT-8, 2013-aujourd'hui).

Épaisseur de la glace de mer

L'avènement de l'altimétrie satellitaire dédiée à l'observation de la glace, avec les missions ICESat (2003-2009), ICESat-2 (2018-aujourd'hui), et CryoSat-2 (2010-aujourd'hui), a permis de cartographier la hauteur de la glace de mer par rapport au niveau de l'eau jusqu'à une latitude de 88° N et à l'échelle du bassin (Meier *et al.*, 2014; Laxon *et al.*, 2013). L'altimètre laser ATLAS à bord de ICESat-2 échantillonne avec des empreintes de 10 mètres et une distance de 25 kilomètres entre les segments (ESA, 2020d), tandis que l'altimètre SAR en bande Ku SIRAL à bord de CryoSat-2 présente une résolution de 250 mètres le long de sa trajectoire (ESA, 2020b) et une distance de 7.5 kilomètres entre les segments (Mémin *et al.*, 2014). Des variations dans la densité de la glace et la présence de neige sur celle-ci compliquent toutefois l'estimation de l'épaisseur de la glace à partir de son franc-bord (*freeboard*) (Meier *et al.*, 2014). En l'absence de zones d'eau libre, le calcul intermédiaire de la hauteur de l'eau peut introduire une erreur au sein même du calcul du francbord (Ricker *et al.*, 2016). En combinant les estimations tirées des satellites ICESat et CryoSat-2 aux observations par sous-marin qui couvrent la période 1958 à 2000, Kwok (2018) rapporte que la glace de mer dans l'Arctique s'est amincie en moyenne de deux mètres depuis la période 1958-1976, en grande partie parce que la glace vieille de plusieurs années se fait remplacer par de la glace de première année.

L'épaisseur de la glace de mer peut aussi être estimée à partir de sa température de brillance en bande L, soit 1.4 GHz, comme celle mesurée quotidiennement par le capteur MIRAS du satellite SMOS (ESA, 2020g). Cette méthode fonctionne pour de la glace mince de moins d'un mètre, un régime d'épaisseur où l'altimétrie perd de sa précision (Ricker *et al.*, 2017). Ces deux produits ont d'ailleurs été combinés par Ricker *et al.* (2017) pour obtenir un produit hebdomadaire d'épaisseur de glace couvrant l'ensemble de l'Arctique à une résolution spatiale de 25 kilomètres.

Épaisseur de la neige

Il est pour l'instant encore difficile de mesurer l'épaisseur de la neige sur de la glace de mer de façon fiable à l'échelle de l'Arctique. Elle peut être estimée à l'aide des températures de brillance dans les micro-ondes à condition que la neige soit sèche et d'une épaisseur inférieure à 50 centimètres (Meier *et al.*, 2018). Le produit d'épaisseur de neige sur glace de mer calculé à partir des données de 18.7 à 89.0 GHz des capteurs nouvelle génération AMSR-E (2002-2011) et AMSR2 (2012-aujourd'hui) est fourni à une résolution spatiale de 12.5 kilomètres et moyenné sur cinq jours (NSIDC, 2020a). Dans des conditions optimales de glace de première année lisse recouvrant l'ensemble des pixels (sans eau libre) et couverte de moins de 20 centimètres de neige, l'estimation de l'épaisseur de neige présenterait une erreur moyenne de sept centimètres, selon les travaux de validation effectués par Brucker & Markus (2013) à l'aide des données aéroportées de *Operation Ice Bridge*. En combinant les données de l'altimètre SIRAL (CryoSat-2) en bande Ku à celles de l'altimètre AltiKa en bande Ka (à bord du satellite SARAL, 2013-aujourd'hui), Guerreiro *et al.* (2016) arrivent à estimer l'épaisseur de la neige sur de la glace de mer de première année ou plus vieille avec une erreur moyenne de cinq centimètres, à condition qu'elle soit inférieure à 30 centimètres.

1.2.3.2 Apport de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture

Fonctionnement

Les capteurs radar à synthèse d'ouverture sont des capteurs actifs : ils émettent un rayonnement micro-ondes vers la surface de la Terre et en captent le retour au satellite pour en faire une image. L'intensité des pixels dépend de la quantité de rayonnement renvoyé par la surface. Les radars actifs émettent de biais (*side-looking*) plutôt que vers le nadir, soit la surface directement sous le capteur. Cette géométrie d'acquisition est nécessaire pour identifier correctement la provenance du rayonnement reçu de la surface. Elle entraîne certaines distorsions qui sont corrigées lors du traitement des images radar. La visée de la plupart des capteurs en orbite est orientée vers la droite (*right-looking*), tel qu'illustrée dans la figure 1.6. L'intensité d'une image radar est donc une fonction de la rétrodiffusion de la cible, soit sa capacité à retourner le signal vers le capteur plutôt que de le réfléchir.



Figure 1.6 – Modes d'acquisition de RADARSAT-2, reproduite de MDA (2018).

Une étendue d'eau calme, perçue comme un miroir dans les fréquences radar, présentera une intensité très faible sur une image radar. Des structures verticales comme des bâtiments renverront quand eux beaucoup de signal vers le capteur par le phénomène de double rebond, et présenteront donc une forte rétrodiffusion. Entre ces deux extrêmes, des surfaces de plus en plus rugueuses entraîneront une rétrodiffusion grandissante. Ces mécanismes sont tous des formes de rétrodiffusion de surface. Certaines cibles sont invisibles aux fréquences radar, comme les nuages ou la neige sèche. D'autres permettent une certaine pénétration du signal, comme la glace d'eau douce. Un deuxième mécanisme de rétrodiffusion intervienet alors, soit la diffusion de volume. Lors de son chemin dans la cible, le signal peut être diffusé par des obstacles comme des bulles d'air, jusqu'à ressortir de la cible et retourner au capteur. La rétrodiffusion captée pour chaque pixel est une combinaison de ces mécanismes et de leurs interactions : son interprétation est parfois complexe (Ulaby *et al.*, 1986).

Mécanismes de rétrodiffusion

La figure 1.7 présente les mécanismes de rétrodiffusion à l'oeuvre dans un contexte de glace de mer. De la rétrodiffusion de surface est possible sur l'eau libre ou accumulée sur la glace, à l'interface entre l'air et la glace ou entre l'air et la neige si celle-ci est humide, à l'interface entre de la neige sèche et humide et enfin à l'interface entre la neige et la glace. La rétrodiffusion de volume est possible tant dans la neige imbibée de saumure que dans la glace, où les diffuseurs potentiels sont les inclusions de saumure ou d'eau. La figure 1.8 illustre les diffuseurs et surfaces qui jouent un rôle dans la rétrodiffusion de la glace de mer après l'englacement, en hiver et au printemps. Cette section est adaptée de Dufour-Beauséjour *et al.* (2019c), une version préliminaire de mon chapitre 2.



Figure 1.7 – Mécanismes de rétrodiffusion pour de la glace de mer de première année et son couvert de neige, reproduite de Gill *et al.* (2015).

La glace de mer de première année est un matériau où il y a beaucoup de pertes électromagnétiques et pour lequel c'est la rétrodiffusion de surface qui domine. De la glace formée en eaux calmes peut présenter un retour semblable à un miroir, tandis que le chevauchement (rafting) ou la présence de neige ou de fleurs de givres sur la glace augmentent la rugosité de la surface et donc la rétrodiffusion (Onstott, 1992). La rétrodiffusion en bande C augmente en présence de fleurs de givre, quoique qu'elle puisse être diminuée par l'expulsion de saumure à la surface de la glace dans les heures qui suivent le gel (Isleifson *et al.*, 2014). Même en l'absence de fleurs de givre il est possible que la rétrodiffusion présente un pic à la suite de l'englacement, lequel est alors associé au diamètre des canaux de drainage qui augmente avec le temps sous l'effet de la désalinisation (Nghiem *et al.*, 1997). Quand la glace aura atteint 40 centimètres d'épaisseur, la majorité de sa saumure aura été expulsée par ces canaux verticaux (Cox & Weeks, 1974; Zhang *et al.*, 2013). Si fleurs de givres il y avait, elles auront été infiltrée par la neige ou détruites, entraînant une chute de la rétrodiffusion (Onstott, 1992). Notons que même sous un couvert de neige, les fleurs de givre peuvent contribuer à la surface que la bande C (Eriksson *et al.*, 2010). La bande X est plus sensible à la rugosité de la surface que la bande C (Eriksson *et al.*, 2017).

Pendant l'hiver, c'est la neige imbibée de saumure (*brine-wetted snow*) qui contribue le plus à la rétrodiffusion. La rétrodiffusion est presque nulle sur et dans la neige sèche (Kim *et al.*, 1984). La différence de constante diélectrique entre la neige sèche et la neige imbibée de saumure peut toutefois entraîner de la diffusion de surface (Nandan *et al.*, 2016). Les inclusions de saumure dans la neige peuvent aussi causer de la diffusion de volume (Gill *et al.*, 2015). L'isolation thermique offerte par le couvert de glace permet à la neige et aux couches supérieures de la glace de refroidir. La rétrodiffusion devient alors stable ou légèrement décroissante alors que les inclusions de saumure rapetissent sous l'effet du froid (Yackel *et al.*, 2007; Nghiem *et al.*, 1997). Un couvert de neige plus épais peut présenter une rétrodiffusion plus grande puisque la grosseur des inclusions de saumure augmente avec la température (Barber & Nghiem, 1999; Gill *et al.*, 2015). La diffusion peut alors dépendre de sa rugosité et de la diffusion de volume sur ses inclusions de saumure (Barber & Nghiem, 1999). La pénétration du signal dans la neige imbibée de saumure est d'environ quatre ou trois centimètres pour les bandes C et X respectivement (Nandan *et al.*, 2016).

Au printemps, le début de la fonte (*melt onset*)est caractérisé par une augmentation de la rétrodiffusion. Elle est causée par le grossissement des inclusions de saumure sous l'effet de températures plus chaudes (Barber & Nghiem, 1999). Le soleil et des températures en haut de zéro peuvent rendre la neige humide sur le dessus (Gogineni *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 1984), ce qui cause de la rétrodiffusion de surface et peut masquer les couches inférieures (Gill *et al.*, 2015; Yackel *et al.*, 2007). La bande X est plus sensible au début de la fonte printannière que la bande C (Eriksson *et al.*, 2010). Lorsque le contenu en haut de la neige dépasse 7%, l'eau s'écoule jusqu'à la surface de glace (Scharien *et al.*, 2012). Cette transition où les mares de fonte commencent à se former (*pond onset*) se manifeste par une diminution de la rétrodiffusion (Yackel *et al.*, 2007). La rétrodiffusion sur de la glace recouverte de mares de fonte dépend du vent (Scharien *et al.*, 2012).



Figure 1.8 – Diffuseurs et surfaces dans la glace de mer de première année, reproduite de Dufour-Beauséjour *et al.* (2019c).

Historique et survol des capteurs

Le radar à synthèse d'ouverture (RSO), ou *Synthetic Aperture Radar* (SAR) en anglais, est une forme d'imagerie particulièrement adaptée aux applications polaires. Alors que les radiomètres qui opèrent dans les micro-ondes passives sont utilisés pour cartographier l'étendue de la glace de mer à grande échelle, le RSO est l'outil de prédilection pour les applications qui nécessitent une haute résolution spatiale, par exemple le suivi des conditions de glace pour la navigation (Eriksson *et al.*, 2010). Les capteurs actifs présentent une résolution spatiale beaucoup plus élevée que les capteurs passifs : 5.2×7.6 mètres pour RADARSAT-2 en mode *Fine Quad-Pol* (MDA, 2018) et 1.2×1.1 mètres pour TerraSAR-X en mode *High Resolution Spotlight* (Eineder *et al.*, 2008) comparativement à AMSR2 dont la résolution va de 3×5 kilomètres à 35×62 kilomètres selon la fréquence (OSPO, 2015).

La première génération de satellites radar en bande C remonte aux années 1990 avec ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (1995-2011) et RADARSAT-1 (1995-2013) (Eriksson *et al.*, 2010). Ces capteurs

ont été suivis de ENVISAT (2002-2012) et RADARSAT-2 (2007). L'agence spatiale européenne (ESA) a ensuite lancé Sentinel-1A (2014) et Sentinel-1B (2016), premiers satellites de la flotte Copernicus, un programme européen visant la mise en orbite d'une constellation de presque 20 satellites d'ici 2030 (Copernicus, 2020). Ce programme s'inscrit dans la continuité des politiques de libre accès européennes : la majorité des données et produits dérivés des images Sentinel sont disponibles gratuitement et faciles d'accès (ESA, 2020c), tout comme leurs logiciels de traitement d'image open source de la série Scientific Toolbox Exploitation Platform (ESA, 2020h).

Successeurs de RADARSAT-2, les trois satellites de la constellation canadienne RCM, pour *RADARSAT Constellation Mission*, ont d'ailleurs été lancés en juin 2019. RCM présente des résolutions temporelle et spatiale de 1 jour et 50 mètres en contexte de suivi de la glace, contre 2 à 3 jours et 100 mètres pour son prédécesseur (ESA, 2020f). La constellation RCM sert avant tout les besoins du gouvernement du Canada. Les autres utilisateurs, par exemple du milieu universitaire ou privé, devront réussir une enquête de sécurité pour avoir accès à la majorité des images, qui seront toutefois gratuites (CSA, 2018). C'est en misant sur des constellations de satellites que les nouvelles générations de missions d'observation de la terre améliorent leur taux de revisite : 6 jours pour la constellation Sentinel-1 (ESA, 2020i) et 4 jours pour RCM (ESA, 2020f), comparé à 24 jours pour RADARSAT-2 (MDA, 2018).

En bande L, on retrouve actuellement le satellite japonais ALOS-2 et son capteur PALSAR-2 (2014), qui succède à ALOS (2006-2011). On compte aussi la constellation argentine SAOCOM, dont le premier satellite a été lancé en 2018. Ce projet de l'agence spatiale argentine est une collaboration avec l'agence spatiale italienne. Cette dernière opère la constellation Cosmo-Skymed dont les quatre capteurs en bande X ont été lancés de 2007 à 2010 (ESA, 2020a). Le premier satellite de sa successeure, la constellation Cosmo-SkyMed SG, a été lancé en 2019. Toujours en bande X, on retrouve également les satellites allemands TerraSAR-X (2007) et TanDEM-X (2010). Les données de toutes ces missions sont distribuées de façon commerciale, à moins d'ententes particulières.

La bande C (4 à 8 GHz) est en général réputée comme étant la plus appropriée pour des applications sur de la glace de mer (Onstott, 1992; Eriksson *et al.*, 2010). La bande L (1 à 2 GHz) offre un meilleur contraste entre la glace couverte de neige mouillée et l'eau libre en été, tandis qu'en hiver le contraste entre la glace de première année et la glace plus vieille augmente avec la fréquence. La bande X (8 à 12.5 GHz) offrirait un contraste similaire à celui dans la bande C, mais le contraste

serait meilleur aux fréquences plus élevées telles que la bande Ku (12.5 à 18 GHz) (Onstott, 1992). L'utilisation de la bande C fait office de compromis (Eriksson *et al.*, 2010).

Classification de la glace de mer

La pertinence de l'imagerie par radar à synthèse d'ouverture pour la cartographie et la surveillance de la glace de mer et l'importance de ce secteur pour le Canada ont contribué à justifier la mise en orbite du capteur RADARSAT-1 (Gouvernement du Canada, 2007; Ramsay *et al.*, 1998). Celui-ci a longtemps été la source de données la plus importante pour la production de cartes au sein du Service canadien des glaces, avant l'avènement de RADARSAT-2 (Flett, 2004). Le développement de RADARSAT-2 visait à assurer a pérénité du programme RADARSAT, notamment en ce qui a trait à la surveillance côtière (ESA, 2020e). Les résolutions spatiale et temporelle accrues de la constellation RCM assureront une couverture quotidienne des eaux canadiennes, répondant ainsi aux besoins opérationnels liés à la navigation en présence de glace (ESA, 2020f). La figure 1.9 montre un exemple de carte de concentration de glace à la mi-juillet 2018. La baie d'Ungava et l'embouchure est du détroit d'Hudson sont encore englacées, tout comme l'entrée de la baie d'Hudson. Les fjords de Salluit et de la baie Déception sont libres de glace, contrairement à celui de Kangiqsujuaq.

Les avancées en ce qui a trait au suivi de la glace de mer à l'aide d'images RSO sont encore largement motivées par l'appui aux opérations maritimes ; en effet, les services nationaux se basent principalement sur les images RSO haute-résolution pour leur suivi des conditions de glace dans les eaux arctiques (Zakhvatkina *et al.*, 2019). En plus du service canadien des glaces, par exemple, son homologue finlandais (*Finnish Ice Service*) produit des cartes de glace pour la mer Baltique qui incluent le degré de formation de crêtes (*ridging*); Gegiuc *et al.* (2018) tentent d'automatiser l'attribution d'une cote pour cet indice à l'aide de la segmentation d'images en bande C et d'une base de données d'entraînement. En prévision de l'entrée en fonction de la constellation RADARSAT (RCM), Ghanbari *et al.* (2019) ont montré que l'utilisation d'images RCM de polarimétrie compacte, par opposition aux images *dual-pol*, améliore la précision de la classification de la glace de mer telle que pratiquée par le Service canadien des glaces.

Les images RSO complètement polarimétriques (quad-pol) sont riches en informations, et donc potentiellement susceptibles d'offrir une meilleure performance dans la classification de la glace de mer. Ressel & Singha (2016) ont évalué plus d'une dizaine de paramètres polarimétriques en bandes C et X, à la fois pour des images quad-pol et des images dual-pol, sur la base de leur potentiel pour



Figure 1.9 – Carte du Service canadien des glaces du 8 juillet 2018, reproduite de Government of Canada (2020).

la classification de glace de mer au nord de Svalbard. Leur analyse, étendue pour inclure la bande L (Singha *et al.*, 2018), révèle que les bandes HH et VV contiennent suffisamment d'information pour distinguer entre eau libre, jeune glace de mer, glace lisse de première année, et glace rugueuse ou vieille (Ressel & Singha, 2016; Johansson *et al.*, 2018). Des trois bandes, c'est la bande X qui est la plus sensible aux types de jeune glace, de par sa fréquence plus élevée (Johansson *et al.*, 2018). La figure 1.10 montre différents types de glace tels que vus par les polarisations HV et VV de la bande C et les polarisations HH, HV et VV de la bande L.

Estimation de l'épaisseur de la glace de mer

La communauté scientifique a de longue date espéré pouvoir estimer l'épaisseur de la glace de mer à l'aide de l'imagerie RSO satellitaire : « the Holy Grail is the ability to estimate the distribution of ice thickness accurately », comme écrivait Onstott (1992). Toutefois, la pénétration du radar jusqu'à la glace de mer est avant tout limitée par la salinité élevée des couches inférieures de son couvert nival. Dans une étude de cas effectuée à la fin de l'hiver, Nandan et al. (2016) ont observé



Figure 1.10 – Exemple de classification de la glace de mer par RSO, reproduite de (Lohse *et al.*, 2019). À gauche (a), les données ICESAR soit la polarisation HV en bande C, la polarisation VV en bande C, un composé RGB (R:HV, G:HH, B:VV) en bande L et une image optique. À droite (b), le résultat de classification pour les données ICESAR.

une pénétration maximale du signal de quatre centimètres en bande C dans un couvert nival sur de la glace de mer de première année. Une éventuelle corrélation entre l'épaisseur des couverts de glace ou de neige et la rétrodiffusion ne peut donc être qu'indirecte. Une corrélation négative est observée entre le rapport des canaux co-polarisés en bandes X et L et l'épaisseur de la glace (Nakamura *et al.*, 2005). Elle est attribuée au processus de désalinisation de la glace de mer, elle-même corrélée avec sa croissance (Zhang *et al.*, 2016). En prévision de la mission constellation de RADARSAT, (Zhang *et al.*, 2016) ont défini un paramètre analogue au rapport des canaux co-polarisés, mais adapté aux images RCM. Leur « rapport CP » (*CP ratio*) en bande C est corrélé négativement avec l'épaisseur de la glace de première année, et sa sensibilité est maximale pour de la glace mince jusqu'à 50 centimètres. Dans la bande C, des résultats de 0.4 et 0.3 pour les polarisations HH et VV ont été améliorés par le rapport des canaux co-polarisés (VV/HH), lequel affichait un coefficient de corrélation de 0.6 avec l'épaisseur de glace (Nakamura *et al.*, 2009) (voir figure 1.11a). Dans la bande X, Nakamura *et al.* (2005) ont rapporté un r^2 de 0.5 entre l'épaisseur de la glace de mer sur une plage d'environ 30 à 120 centimètres et la rétrodiffusion dans la polarisation HH (voir figure 1.11b).



Figure 1.11 – Corrélation entre l'épaisseur de la glace et les bandes C et X. À gauche (a), reproduite de (Nakamura *et al.*, 2009), le ratio des canaux co-polarisés (VV/HH) en bande C en fonction de l'épaisseur de la glace. Le coefficient de corrélation linéaire est de 0.6 pour les épaisseurs entre 0 et 120 centimètres, 0.8 pour les épaisseurs supérieures à 120 centimètres et 0.9 pour l'ensemble des données. À droite (b), reproduite de (Nakamura *et al.*, 2005), le coefficient de rétrodiffusion en bande X pour les polarisations HH, HV et VV en fonction de l'épaisseur de la glace. Les coefficients de corrélation linéaire sont respectivement de 0.5, 0.2 et 0.2.

Estimation de l'épaisseur du couvert nival sur de la glace de mer

Dans des conditions froides, Gill et al. (2015) ont observé que la rétrodiffusion en bande C augmente avec l'épaisseur de neige pour tous les canaux. Les auteurs attribuent ce phénomène à une augmentation du contenu en saumure des couches inférieures du couvert nival. Ils ont rapporté des coefficients de corrélation linéaire allant de 0.3 à 0.8 entre l'épaisseur de la neige et la rétrodiffusion HH en bande C pour des angles d'incidences entre 27° et 36°. Ces résultats sont reproduits à la figure 1.12. Aucune corrélation entre la rétrodiffusion et l'épaisseur de neige n'a toutefois été observée quand la température était proche du point de congélation et que l'humidité dans la neige agit comme écran. Dans leurs travaux portant sur la prédiction de l'étendue des mares de fonte, Ramjan et al. (2018) ont montré que les indices de texture, calculés pour les canaux co-polarisés d'images en bande C acquises vers la fin de l'hiver, ont le potentiel d'améliorer l'estimation de l'épaisseur du couvert nival sur de la glace de mer. Yackel et al. (2019), enfin, ont observé que des variations de température de l'air (par exemple au fil des jours) vont entraîner des variations plus importantes dans la rétrodiffusion d'un couvert nival mince que dans celle d'un couvert nival épais. Puisque le réchauffement des couches inférieures de neige entraîne une augmentation de leur volume de saumure et donc de leur permittivité, il entraîne aussi une augmentation de leur rétrodiffusion. La variation de la température au sein d'un couvert nival dépend de son épaisseur. L'augmentation

du signal de rétrodiffusion avec la température de l'air, observée en bandes C et Ku, pourrait donc être exploitée pour estimer l'épaisseur de la neige sur de la glace de mer.



Figure 1.12 – Corrélation entre l'épaisseur de la neige et la bande C dans les polarisations HH, HV et VV, reproduite de Gill *et al.* (2015).

Caractérisation de processus dynamiques

La formation de mares de fonte au printemps peut être détectée dans une série temporelle d'images en bande C, en surveillent le rapport des canaux co-polarisés (Scharien *et al.*, 2014). En combinant des images radar acquises dans l'archipel arctique canadien par les capteurs en bande C ERS-1 et RADARSAT-1, Yackel *et al.* (2007) avaient d'ailleurs identifié le début de la fonte du couvert nival et le début de la formation de mares de fonte, à tous les printemps de 1992 à 2002. La figure 1.13, reproduite de leur article, montre le signal en bande C en fonction du temps à l'hiver et au printemps 1998 pour quatre sites dans l'arctique canadien. On peut y identifier le début de la fonte (*melt onset*) et le début de la formation de mares de fonte (*pond onset*). Des images en bande C acquises vers la fin de l'hiver, donc avant que la fonte ne commence, ont récemment été utilisées pour prédire la distribution spatiale de la fraction de mares de fonte (Ramjan *et al.*, 2018).

La vitesse de déplacement de la glace peut varier brusquement au sein d'un champ de glace consolidée, ce qui complexifie son estimation à partir d'informations régionales (Korosov & Rampal, 2017). En combinant le suivi de zones d'intérêt (*feature tracking*) et le filtrage par motif (*pattern matching*) sur des paires d'images Sentinel-1 (bande C), Korosov & Rampal (2017) ont produit des cartes de vitesse de déplacement pour de la glace de mer consolidée à l'échelle locale, régionale, et de l'Arctique. La glace de mer n'est pas toujours flottante; en effectuant des calculs d'interférométrie radar sur des paires d'images Sentinel-1, Dammann *et al.* (2019) ont cartographié les endroits où la glace de mer était ancrée au fond marin, à l'échelle de l'Arctique au complet. Leur méthode permet



Figure 1.13 – Détection de la fonte dans des séries temporelles en bande C, reproduite de Yackel *et al.* (2007). La ligne rouge est un *cubic spline fit* sur les données de signal radar (exprimées en *digital number*) en fonction de l'épaisseur de la neige. Les dates de début de la fonte (*melt onset*) et de la formation de mares (*pond onset*) déduites des données sont identifiées avec des lignes verticales.

en plus de détecter si la glace flottante est stabilisée ou non; la stabilité de la glace est typiquement associée à des îles, des hauts-fonds, ou les rives d'une baie ou d'un fjord. L'interférométrie a aussi été utilisée sur des images TanDEM-X pour cartographier la hauteur des crêtes dans de la glace déformée (Yitayew *et al.*, 2018).

Grâce à une base de données d'images RADARSAT-1 de 1997 à 2008, Herdes *et al.* (2012) ont fait l'inventaire d'évènements de panache d'icebergs (*iceberg plume*), décrite comme résultant de la production en vrac de plusieurs icebergs, pour deux glaciers de la calotte glaciaire de Devon au Nunavut. Dalton *et al.* (2019) ont ensuite combiné plus de 8000 images satellites dans le radar et dans l'optique pour effectuer l'inventaire spatiotemporel des dates d'englacement, de débâcle, et de panaches d'icebergs pour l'ensemble des baies où aboutissent un ou des glaciers côtiers du champ de glace Prince of Wales de 1997 à 2015. Leur analyse spatiotemporelle montre que la production de panaches d'iceberg est largement influencée par la présence ou l'absence de glace de mer. Dans le même ordre d'idée, Cassotto *et al.* (2015) s'étaient appuyés sur une série d'images de température de surface acquises quotidiennement par le capteur MODIS entre 2000 et 2012 pour documenter l'évolution temporelle de l'étendue du mélange de glace au glacier Jakobshavn.

Conclusion sur l'imagerie satellitaire

C'est l'imagerie satellitaire radar qui a été choisie comme outil d'observation de la terre puisqu'elle est la plus appropriée à un suivi local de la glace de mer, étant indépendante des conditions d'ensoleillement ou de nuage et présentant une résolution spatiale de quelques dizaines de mètres. Deux capteurs ont été sélectionnés pour leur complémentarité : RADARSAT-2 en bande C, la fréquence la plus souvent utilisée pour le suivi de la glace de mer, et le duo TerraSAR-X et TanDEM-X en bande X qui offrent un taux de revisite du double de RADARSAT-2. Leur comparaison s'inscrit dans l'objectif 1, qui vise à évaluer différents outils de suivi. Le recours à des images polarimétriques permet en plus de comparer différents paramètres.

Afin d'atteindre l'objectif 2 visant à décrire l'état de la glace au sein des trois fjords, des images haute résolution ont été acquises pour chacun et avec des paramètres d'acquisitions constants au fil des hivers. Ce choix a permis d'assembler des séries temporelles et de faciliter les comparaisons interannuelles, puisque toutes les images étaient acquises avec le même angle d'incidence. D'ailleurs, le fait de combiner deux capteurs a permis d'accroître la résolution temporelle du suivi et de récolter plus d'information sur la nature des couverts de glace et de neige. Dans l'analyse, j'ai choisi de mettre l'accent sur l'évolution saisonnière et de laisser une grande place à l'interprétation visuelle pour travailler à la même échelle que celle des processus de fonte, d'hivernage et d'englacement décrits plus haut.

1.2.4 Suivi *in situ* de la glace de mer

«Capability to map the thickness of pack ice has lagged far behind that to map its extent, concentration and drift. [...] In 1990, there were only two well-established techniques, direct measurement of distance following drilling and remote measurement of draft by sonar mounted on a sub-sea platform.» (Lemke & Jacobi, 2012)

1.2.4.1 Mesure de l'épaisseur de neige et de glace

Campagnes d'échantillonnage

La mesure directe de l'épaisseur de glace consiste à percer un trou dans le couvert de glace et de mesurer la distance entre la surface de la glace et l'eau. L'épaisseur de neige peut être mesurée au même moment. Au Canada, des mesures hebdomadaires de l'épaisseur de la glace côtière étaient effectuées dès les années 1950 au voisinage des stations météorologiques dans le haut-arctique (Lemke & Jacobi, 2012). En 1992, une étude de ces données pour quatre sites dans l'archipel arctique canadien, incluant Alert et Resolute Bay, montrait que la variation interannuelle de l'épaisseur maximale de la glace était déterminée avant tout par celle de l'épaisseur de la neige (Brown & Cote, 1992). Les auteurs y soulignaient aussi que malgré la concentration des précipitations au début de l'hiver, la neige était continuellement redistribuée ce qui entraînait une augmentation de l'épaisseur de neige tout au long de l'hiver.

L'épaisseur de la glace consolidée varie trop pour que des mesures à point unique puissent l'échantillonner adéquatement. Cette technique d'échantillonnage n'est donc appropriée que quand l'épaisseur de la glace est relativement uniforme, par exemple dans un contexte de glace lisse qui se forme annuellement dans les environnements côtiers abrités (Lemke & Jacobi, 2012, 34). La mesure directe d'épaisseur de glace demeure toutefois nécessaire pour calibrer les mesures indirectes faites par exemple à l'aide de l'induction électromagnétique (Haas *et al.*, 2017).

Pour un suivi de l'épaisseur de la glace à un endroit donné au fil du temps, il est possible d'installer un système de mesure à fil chauffant. Un câble de mesure est passé par un trou dans la glace; la mesure est prise en le dégelant grâce à une génératrice (Perovich, 2003; Mahoney & Gearheard, 2008).Ces systèmes ont par exemple été utilisés durant la campagne *Surface Heat Budget of the Arctic Ocean* (SHEBA) en 1997-1998, dispersés environ aux cinq mètres (Perovich, 2003). Dans le projet basé sur la communauté Siku-Inuit-Hila, des membres des communautés de Barrow (Alaska), Clyde River (Nunavut), et Qaanaaq (Groenland) ont relevé des épaisseurs de neige et de glace à toutes les semaines à l'hiver 2007 à des stations de glace de ce type, où quatre systèmes de mesure étaient installés en carré d'une largeur de huit mètres (Mahoney *et al.*, 2009). Au Nunavik, un système de mesure à l'aide de fils chauffants avait aussi été installé dans les communautés de Umiujaq, Akulivik et Kangiqsualujjuaq, en février 2009 (Tremblay, 2020).

La mesure directe d'épaisseur de neige est encore plus simple que celle de la glace : il suffit de mesurer la hauteur de neige à partir de la surface de la glace. Aux stations *North Pole* de l'union soviétique, l'épaisseur de neige était mesurée soit à trois points situés à 25 kilomètres de distance autour de la station météorologique, soit aux 10 mètres le long de transects de 500 ou 1000 mètres (Warren *et al.*, 1999). Pour étudier la variabilité spatiale de la neige à petite échelle, lacozza & Barber (2010) ont effectué des mesures dans huit directions distribuées en étoile sur les points cardinaux, le long de transects de 50 à 70 mètres échantillonnés à chaque mètre. Leur étude a montré que la distribution de la neige sur de la glace lisse de première année est dictée par les évènements de précipitation solide et par la redistribution de la neige par le vent.

La plupart des études basées sur un échantillonnage ou des observations in situ ont de facto une portée locale. Certains programmes d'échantillonnage, de par leur étendue ou leur longévité, ont toutefois permis une généralisation à un portrait régional ou climatologique. L'exemple le plus connu est certainement celui de la climatologie de Warren qui décrit l'épaisseur de la neige sur la glace de mer en Arctique (Warren et al., 1999). Basée sur des mesures effectuées de 1954 à 1991 aux stations soviétiques North Pole dérivant sur de la glace vieille de plusieurs années, cette climatologie décrit la distribution spatiale de la neige dans la région arctique centrale à chaque mois. Encore largement utilisée lors du calcul d'épaisseur de glace à partir de relevés altimétriques comme ceux décrits en 1.2.3.1, cette climatologie présente un excellent accord avec des mesures récentes (avril 2017) sur de la glace veille de plusieurs années au nord de l'île d'Ellesmere (Haas et al., 2017). Néanmoins, l'épaisseur de la neige sur la glace de mer présente dans les faits une grande variabilité régionale et interannuelle (Meier et al., 2014), en plus de varier avec l'âge de la glace (Shalina & Sandven, 2018). La figure 1.14 présente une climatologie améliorée pour l'épaisseur de la neige dans l'Arctique pendant les mois de mars, avril et mai, obtenue en combinant les données North Pole (climatologie de Warren) à celles des expéditions soviétiques Sever qui ont été effectuées pendant 28 ans de 1959 à 1986 (Shalina & Sandven, 2018).

Stations de mesure automatique

Plusieurs réseaux de stations de mesure automatique de l'épaisseur de glace sont à l'oeuvre dans l'océan Arctique (Smith *et al.*, 2019). Équipées de sonars au-dessus et sous la glace, ces *Ice Mass Balance Buoys* en mesurent l'épaisseur et transmettent leurs données en temps réel, en plus de leur position GPS et d'autres données météorologiques (ERDC, 2014). Ces stations de mesure se



Figure 1.14 – Climatologie de l'épaisseur de la neige dans l'Arctique, reproduite de Shalina & Sandven (2018). À gauche, distribution des points de mesure d'épaisseur de neige pendant les expéditions Sever en mars-avril-mai de 1959 à 1988. Au milieu, nombre de points de mesure par cellule de 100 kilomètres carrés. À droite, l'épaisseur de neige moyenne pour chaque cellule calculée à partir des données présentées à gauche, avec des lignes de contour.

déplacent avec la glace où elles sont installées (Smith *et al.*, 2019). En réponse aux changements dans l'océan Arctique, où la glace de première année occupe une place de plus en plus importante, des bouées capables de survivre à des conditions de glace saisonnière ont dû être développées (Planck *et al.*, 2019). Les données d'épaisseur de neige et de glace acquises par le réseau de bouées du *Cold Regions Research and Engineering Laboratory* ont permis à Ricker *et al.* (2016) d'étudier l'impact d'une accumulation hâtive de neige sur l'estimation d'épaisseur de glace à partir de l'altimètre radar CryoSat-2. En général, les données des bouées sont avant tout nécessaires aux efforts de modélisation météorologique (Smith *et al.*, 2019).

Le tirant d'eau de la glace peut aussi être mesuré par un sonar ancré dans le fond de l'eau, plutôt qu'attaché à une bouée. Les *upward looking sonars* ou *ice-profiling sonars* peuvent atteindre une précision de 10 centimètres sur la mesure, avec une autonomie de deux à trois ans (Fissel *et al.*, 2013). Dans les régions où la glace est en mouvement, ils peuvent permettre de cartographier le dessous de la glace et d'en identifier les types : glace lisse, déformée, présence de chenaux, icebergs, etc. Des projets d'observatoires câblés, dans lesquels les sonars et autres instruments peuvent transmettre leurs données en temps réel, font maintenant leur apparition : Richards *et al.* (2017) s'affairent par exemple à prédire l'englacement dans le détroit de Barrow, et le *Cambridge Bay Community Observatory* opéré par *Oceans Network Canada* à Cambridge Bay au Nunavut depuis 2012 héberge un sonar sous-marin pour l'estimation de l'épaisseur de glace dont l'ensemble des données sont disponibles en ligne (Ocean Networks Canada, 2020).

Sur les surfaces terrestres, la mesure de l'accumulation de neige au sol peut notamment être automatisée par la lecture d'une règle installée dans le couvert nival et photographiée quotidiennement (Bongio *et al.*, 2019; Kopp *et al.*, 2019). L'application d'une telle méthode à un contexte de glace de mer présenterait des défis liés à la résolution nécessaire pour effectuer la lecture d'une règle sur la glace à partir d'une caméra installée sur la rive. Quand aux stations météorologiques, elles peuvent mesurer la précipitation solide sur la côte, mais cette donnée n'est pas équivalente à une mesure de l'épaisseur de la neige sur la glace, particulièrement dans des régions venteuses (Iacozza & Barber, 2010).

Mesures indirectes de l'épaisseur de neige et de glace

De façon analogue aux altimètres satellitaires décrits en 1.2.3.1, les altimètres aéroportés peuvent être utilisés pour estimer l'épaisseur de la neige et de la glace de mer. La NASA effectue des survols altimétriques annuels depuis 2009 au Groenland et en Antarctique dans le cadre de la mission *IceBridge*, dont l'objectif est de faire le pont entre les satellites ICESat et ICESat-2 (Zell, 2017). Les appareils utilisés incluent notamment un altimètre radar à neige qui opère dans l'intervalle de fréquences 2-8 GHz et un altimètre laser à 532 nanomètres (Farrell *et al.*, 2012). Les données aéroportées présentent une excellente correspondance avec les mesures *in situ*. Les altimètres ont une empreinte au sol d'environ 15 mètres de largeur pour le radar à neige et 1 mètre pour l'altimètre laser, et échantillonnent respectivement à 1 et 5 mètres (Farrell *et al.*, 2012).

L'utilisation du géoradar repose sur le principe que l'interface entre la neige et la glace laisse une trace dans le signal de retour, ce qui permet d'en estimer la distance par rapport à l'appareil. Galley *et al.* (2009) ont pu estimer des épaisseurs de neige et de glace de mer en combinant des mesures à 1 GHz et 250 MHz; la première fréquence permettait de résoudre l'interface neige-glace, et la deuxième l'interface glace-eau. La résolution sur la mesure d'épaisseur dépend de la fréquence. La limite inférieure de détection est d'environ 16 centimètres à 1 GHz pour de la neige sur de la glace de mer, et sera plus élevée pour une fréquence plus basse (Galley *et al.*, 2009; Jol, 2008).

Le contexte de la glace de mer se prête enfin particulièrement bien à l'utilisation de l'induction électromagnétique. Les appareils qui reposent sur ce principe sont utilisés pour estimer l'épaisseur totale de la glace couverte de neige, en mesurant la distance entre l'appareil et la couche d'eau salée située sous la glace (Haas *et al.*, 2017). Ils peuvent être opérés sur le sol ou dans les airs, par exemple en hélicoptère, et présentent une résolution de 10 centimètres sur la mesure lorsque la glace n'est pas déformée (Haas *et al.*, 2009). Des appareils de ce genre ont notamment été utilisés pour valider les estimations des altimètres ICESat-2 (Farrell *et al.*, 2012) et CryoSat2 (Haas *et al.*, 2017). L'appareil présente une empreinte de jusqu'à 3.8 fois sa hauteur par rapport à l'eau de mer (Haas *et al.*, 2010; Kovacs *et al.*, 1995). Lorsqu'il est hélicoporté, l'appareil est à environ 20 mètres de la surface de la glace (Haas *et al.*, 2010). Considérant que l'épaisseur de la glace peut varier de zéro à plusieurs mètres, on en déduit donc que l'empreinte de l'appareil peut se situer entre 75 et 100 mètres quand il est hélicoporté, et entre 2 et 20 mètres sur un traineau.

Les appareils SmartQAMUTIK du programme nordique SmartICE utilisent l'induction électromagnétique pour mesurer l'épaisseur de glace à partir d'un traineau tiré par une motoneige (SmartICE, 2019). Les données récoltées par le SmartQAMUTIK sont ensuite transférées à la communauté, offrant une source d'information supplémentaire pour pallier aux aléas du transport sur la glace de mer (CBC, 2020). Le système d'information SmartICE, qui inclut des données d'épaisseur ainsi que des images satellitaires converties en cartes de glaces selon les besoins des utilisateurs, a d'abord été testé à Nain (Nunatsiavut), St. John's (Terre-Neuve) et Pond Inlet (Nunavut) (Bell et al., 2014). Le programme est en pleine expansion : il compte actuellement des partenariats avec 18 communautés supplémentaires au Inuvialuit, Nunavut et Nunatsiavut (SmartICE, 2019). La figure 1.15 montre une image utilisée pour la formation au programme, reproduite à partir d'un rapport soumis à Transport Canada (Harding, 2018), où on voit l'épaisseur de la glace mesurée par le SmartQAMUTIK.



Figure 1.15 – Épaisseur de glace mesurée par le *SmartQAMUTIK*, reproduite de Harding (2018). Dans cette image utilisée pour la formation, l'épaisseur de glace mesurée à l'aide de l'appareil est superposée à une image radar.

1.2.4.2 Observation des processus liés à la glace de mer

Programmes de suivi communautaire

En Arctique, le nombre de programmes de suivi communautaire est en augmentation : des 81 programmes répertoriés dans la plateforme en ligne *Atlas of Community-Based Monitoring and Indigenous Knowledge in a Changing Arctic* en septembre 2015, les trois quarts avaient été lancés après 2005 (Johnson *et al.*, 2016). En mars 2020, l'atlas comportait 19 entrées associées à des projets traitant de la glace (ELOKA, 2015).

En Alaska, le programme Sea Ice for Walrus Outlook fourni des informations hebdomadaires sur les conditions de glace pertinentes en lien avec son utilisation par les morses. Il intègre des observations de chasseurs, de l'imagerie satellitaire et des données météorologiques (ARCUS, 2019). Ce programme découle des projets Seasonal Ice Zone Observing Network et Alaska Arctic Observatory and Knowledge Hub, eux-mêmes la continuité du projet Sea Ice Knowledge and Use (AAOKH & ELOKA, 2019). Les rapports traitent entre autres de débâcle, de la formation de nouvelle glace et de polynies, comme dans cet extrait du rapport de Robert Tokeinn, Jr. le 14 mars 2019 : «As you can see in the photos, lots of open water with very young ice forming on the shore, but lots of icebergs and floe ice both near and offshore.» (ARCUS, 2019).

Basée à Sanikiluaq au Nunavut, la *Arctic Eider Society* mène plusieurs projets en lien avec l'écosystème de la glace de mer. Elle lançait l'an dernier la plateforme SIKU, disponible en ligne et sous forme d'application, dont l'objectif est de centraliser les observations effectuées par les membres des communautés et de faciliter leur partage (Cecco, 2019). Le contenu est accessible à tous et à toutes, mais ne peut être reproduit sans la permission des gens l'ayant publié.

Dans la région de l'île de Baffin au Nunavut, des projets comme le *Inuit Sea Ice Use and Occupancy Project* ont contribué à documenter et partager l'expertise des Inuit de Cape Dorset, Pangnirtung, Clyde River, et Igloolik sur la glace de mer. Disponibles en ligne sur l'atlas *Inuit Siku Atlas* et dans diverses publications scientifiques (Laidler & Ikummaq, 2008; Laidler *et al.*, 2008; Laidler & Elee, 2008; Gearheard *et al.*, 2011), les informations incluent des enregistrements audios de participants au projet, des cartes interactives et des schémas de terminologie en inuktitut (C-SIKU, 2008). La description des processus saisonniers de la glace de mer, présentée en 1.2.2, est basée en grande partie sur ces travaux.

Séries temporelles de photos

L'utilisation de la photographie pour décrire des processus cryosphériques ne date pas d'hier : la débâcle de 1957 à Nuvuk (Point Barrow) en Alaska avait été documentée par des photos prises de la mi-juin à la mi-août à partir de la rive (Gerson, 1958). Plus récemment, l'englacement de Port Foster, au coeur de Deception Island en Antarctique, a été documenté de la rive à l'aide de photos quotidiennes (Smith *et al.*, 2003). Des photos ont aussi permis de décrire l'effet de la glace de mer et des marées sur le quai de la mine de charbon *Store Norske Spitsbergen Kullkompani*, lequel est situé dans un fjord de l'archipel de Svalbard en Norvège (Marchenko, 2018). En laboratoire, la photographie a été utilisée pour étudier le processus de formation des fleurs de givre sur de la glace de mer dans un environnement contrôlé (Roscoe *et al.*, 2011).

Pour étudier la vitesse de déplacement du mélange de glace (*ice mélange*) lors d'évènements de vêlage (*calving*) dans le fjord du glacier Jakobshavn au Groenland, Peters *et al.* (2015) ont utilisé une série de photos prises automatiquement aux dix secondes. Dans le fjord LeConte en Alaska, Kienholz *et al.* (2019) ont estimé la vitesse des courants de surface à proximité du glacier en évaluant celle de ses icebergs à partir de séries de photos prises à chaque minute. La dynamique de la glace dans le sillage du brise-glace Otko lors de ses déplacements dans la mer Baltique a été étudiée grâce des photos acquises à chaque minute par une caméra installée sur le pont du navire (Leisti *et al.*, 2009).

Au Nunavik, le réseau CAIMAN (Caméras aux infrastructures maritimes au Nunavik) documente les conditions de glace depuis 2009 à Umiujuaq, Quartaq et Kuujjuaq (Clerc *et al.*, 2012). Les régimes d'englacement et de débâcle à proximité des communautés ont été décrits en combinant l'analyse de photographies prises de la rive, d'imagerie satellitaire et des produits du Service canadien des glaces. Leurs travaux ont montré l'influence stabilisatrice des îles sur le couvert de glace de mer ainsi que l'apparition de trous de fonte en premier aux embouchures des rivières, ainsi que le long de la côte, des îles, et en face des pointes. Le réseau a pris de l'expansion avec les années et inclus actuellement des caméras à Kuujjuarapik, Umiujuaq, Ivujivik, Aupaluk, Quaqtaq et Baie Déception (Bernier *et al.*, 2019). Les résultats du projet ont été communiqués aux communautés via un calendrier distribué au Nunavik en 2018 et 2019. Depuis 2018, l'ensemble des archives photographiques du projet CAIMAN sont disponibles gratuitement en ligne au caiman.ete.inrs.ca. Les photographies du projet *Trail monitoring in Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq* sont aussi hébergées sur ce site web, où elles sont transmises quelques minutes après leur acquisition via satellite. La figure 1.16 montre une carte du réseau CAIMAN.



Figure 1.16 – Carte du réseau CAIMAN, reproduite de CAIMAN et al. (2018).

Conclusion sur le suivi in situ

C'est la mesure directe qui a été choisie pour caractériser l'épaisseur de la neige et de la glace. La méthode est facile à appliquer et peu coûteuse. L'échantillonnage a été conçu de façon à ce que les objectifs d'évaluation d'outils (1) et de description des couverts saisonniers (2) puissent s'articuler à l'échelle souhaitée, c'est-à-dire celle du fjord. Les mesures ont été distribuées de façon à couvrir chaque site en une journée, afin de pouvoir tracer le portrait de la distribution spatiale des épaisseurs de neige et de glace et d'en estimer la valeur moyenne. Deux campagnes d'échantillonnage ont été planifiées par saison pour chaque site : en début de saison alors que les couverts sont encore influencés par les conditions d'englacement et en fin de saison suite à leur hivernage et avant la fonte.

Un deuxième outil de suivi *in situ* a été sélectionné pour sa facilité d'interprétration et sa fréquence d'acquisition horaire ou quotidienne : la photographie automatique. Sans être équivalente à des observations en personne, encore moins par des experts locaux, la photographie présente l'avantage d'imiter le point de vue humain. C'est dans cette optique que l'interprétration de séries temporelles de photographies est comparée à celle de séries temporelles d'imagerie satellitaire radar

et de données d'épaisseur (objectif 1), et qu'elle permet de décrire les aspects dynamique et spatial des processus saisonniers (objectif 2).

1.3 Structure de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, j'ai combiné différents outils de suivi afin de décrire les processus de glace de mer saisonnière aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq au Nunavik, trois fjords du détroit d'Hudson où la glace revêt une importante culturelle et logistique pour les membres des communautés locales. Le projet s'inscrit dans un contexte d'imprévisibilité accrue des conditions de glace sous l'effet des impacts des changements climatiques, en plus d'une pression industrielle sous la forme de trafic maritime à la baie Déception où deux compagnies minières opèrent des infrastructures maritimes. Les objectifs de ma thèse sont 1) d'évaluer différentes technologies (outils) de suivi de la glace de mer, 2) de décrire l'état de la glace de mer et de son couvert nival et 3) de communiquer les résultats de la recherche aux communautés concernées.

Le chapitre 2 s'intitule « Combiner l'imagerie TerraSAR-X et la photographie pour suivre la glace de mer saisonnière : le cas de la baie Déception au Nunavik ». Il présente une étude de cas à la baie Déception pour le suivi des processus de glace de mer saisonnière via l'utilisation combinée de séries temporelles d'images satellitaires radar du capteur TerraSAR-X et de photographies automatiques prises de la rive. Cet article, publié en 2020 dans la revue *The Cryosphere*, explore le potentiel des photographies comme donnée complémentaire pour l'interprétration des images radar (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). Il présente aussi une description des processus dans le fjord via une comparaison interannuelle pour trois hivers sur la période 2015 à 2018.

Ce chapitre contribue à l'objectif 1 en comparant deux méthodes de suivi de la glace de mer, soit l'imagerie satellitaire radar et la photographie automatique. Bien que chaque outil ait déjà été utilisé auparavant pour le suivi de la glace de mer, mes travaux présentent plusieurs aspects originaux. La bande X a été beaucoup moins étudiée que la bande C pour des applications sur la glace de mer. Les capteurs TerraSAR-X et TanDEM-X offrent toutefois des avantages comparitivement à RADARSAT-2 : leur revisite est deux fois plus fréquente et leurs acquisitions sont rarement en conflit avec les besoins des services nationaux qui surveillent la glace en appui au transport. Mes travaux sont les premiers à tirer profit de séries temporelles exaustives en bande X pour documenter les processus d'englacement, d'hivernage et de débâcle de la glace de mer. Par une utilisation novatrice combinée de séries temporelles d'imagerie satellitaire radar et de photographie, je trace un portrait de ces processus. Cet article contribue donc aussi à l'objectif 2 via une description des processus liés à la glace de mer saisonnière à la Baie Déception, ainsi que par une illustration de leur variabilité interannuelle.

Dans le chapitre 3, je décris la distribution spatiale des épaisseurs de neige et de glace saisonnière mesurées aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq de 2015 à 2018 et j'explore les liens ténus qui unissent ces épaisseurs à la rétrodiffusion radar en bandes C et X. Cet article, prêt à soumettre, s'intitule «Corrélation ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la rétrodiffusion en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik ».

Cet article répond à l'objectif 2 en présentant un portrait de l'épaisseur moyenne de la glace et de la neige à chaque site à la fin de trois hivers consécutifs. Il fait notamment état d'un écart de 50 centimètres en moyenne entre les données d'épaisseur de glace citées pour la baie Déception par GENIVAR (2012) (datant de 1991) et celles mesurées pendant l'étude. Les particularités de chaque site sont mises en relation avec des conditions locales comme l'orientation relative des fjords par rapport aux vents dominants et les précipitations accrues à Kangiqsujuaq. Les différences interanuelles sont aussi mises de l'avant, comme l'englacement plus hâtif de 2015 comparé aux années suivantes. Ce chapitre contribue aussi à l'objectif 1 par une exploration de la corrélation entre la rétrodiffusion et l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival. J'y contribue des résultats négatifs importants qui montrent la difficulté d'observer ces corrélations. En adoptant une posture novatrice qui tient compte des conditions d'englacement, j'apporte des pistes de réponse sur les conditions qui favorisent ou non cette observation.

Dans le chapitre 4, intitulé « Communication et relations communautaires dans le cadre du projet de suivi des glaces au Nunavik : la perspective de jeunes chercheuses », je partage les efforts de diffusion des résultats aux communautés que j'ai effectués dans le cadre de ma recherche doctorale. Il y est question des leçons apprises au fil des activités et de la façon dont ma pratique de la recherche et de la communication a évoluée. Cet article a été publié dans la revue *FACETS* en 2020 (Dufour-Beauséjour & Plante Lévesque, 2020).

Ce chapitre illustre la façon dont j'ai répondu à l'objectif 3 de ma thèse : par un programme d'activités périodiques de communications. Développé avec comme contrainte un temps limité au sein de chaque communauté – un ou deux jours, deux fois par année – il inclut la création et l'animation d'une page Facebook pour le projet de recherche et l'animation d'une table d'information à la Co-op d'une des communautés. Des activités avec des classes du secondaire ont aussi été réalisées dans les deux communautés, que ce soit une présentation sur le suivi de la glace de mer, un laboratoire sur les types de glace ou encore une sortie sur la banquise. Dans le cadre des forums environnementaux de Mine Raglan, j'ai aussi tenu des kiosques d'information sur le projet, participé à des séances de question et réponse à la radio et présenté le projet lors de soirées communautaires. Chapitre 2

Combiner l'imagerie TerraSAR-X et la photographie pour suivre la glace de mer saisonnière : le cas de la baie Déception au Nunavik



Baie Déception, mai 2018

Titre de l'article

Combining TerraSAR-X and time-lapse photography for seasonal sea ice monitoring: the case of Deception Bay, Nunavik

Auteurs

Sophie Dufour-Beauséjour^{1,2}, Anna Wendleder³, Yves Gauthier^{1,2}, Monique Bernier^{1,2}, Jimmy Poulin^{1,2}, Véronique Gilbert⁴, Juupi Tuniq⁵, Amélie Rouleau⁶, Achim Roth³

- 1 Institut national de la recherche scientifique
- 2 Centre d'études nordiques
- ³ German Aerospace Center
- ⁴ Kativik Regional Government
- 5 Salluit, Nunavik
- ⁶ Raglan Mine, a Glencore company

Titre de la revue

The Cryosphere, un journal de la European Geosciences Union, publié par Copernicus Publications 24 mars 2020

DOI: 10.5194/tc-2019-199

Contribution des auteurs

J'ai contribué à la conception et à la planification de cette étude de cas et j'ai participé à la réalisation des travaux tout au long du projet. J'ai contribué à l'ensemble des analyses et j'ai effectué l'interprétation des résultats. C'est moi qui ai rédigé l'article.

AW a contribué au traitement, à l'analyse et à l'interprétation des séries temporelles d'imagerie TerraSAR-X ainsi qu'à la rédaction de l'article. YG a contribué à la conception de l'analyse des processus de glace de mer ainsi qu'à la logistique des travaux; il a aussi contribué à l'interprétration des photographies et a révisé l'article. MB a contribué à la conception de l'étude, à la réalisation des travaux, ainsi qu'à l'interprétration des résultats, en plus de réviser l'article. JP a réalisé les travaux liés à l'acquisition de photographies automatiques. VG a contribué à la planification de l'étude ainsi qu'à l'organisation et la réalisation des travaux de terrain. JT a contribué à l'organisation et à la réalisation des travaux de terrain. A. Rouleau a contribué à la logistique des travaux. A. Roth a planifié l'acquisition des données TerraSAR-X.

Note

Dans le manuscrit publié dans *The Cryosphere*, Mine Raglan est parfois appelée *Raglan* au lieu de *Raglan Mine*. L'appelation a été uniformisée dans la thèse et ce chapitre diffère donc légèrement de la version publiée.

Résumé

Cet article présente une étude de cas pour le suivi de processus saisonniers de glace de mer à la baie Déception au Nunavik grâce à l'utilisation combinée de séries temporelles d'images TerraSAR-X et de photographies automatiques. L'utilisation du territoire par les Inuit et le transport par briseglace des compagnies minières se chevauchent dans ce fjord où la glace de mer répond aux impacts des changements climatiques. En effet, les Inuit y ont observé des conditions de glace saisonnière plus variables d'année en année, un englacement tardif et une débâcle hâtive. Des séries temporelles ont été acquises sur la période 2015 à 2018 pour chaque source de données : les images TerraSAR-X aux 11 jours et les photographies à chaque heure. Nous avons décrit les aspects spatiotemporels de l'englacement et de la débâcle en combinant ces deux séries temporelles. Nous présentons aussi de nouvelles valeurs de rétrodiffusion en bande X sur des types de jeune glace de mer. Les séries temporelles d'images TerraSAR-X permettent de suivre le début de la fonte et celui de la formation de mares.

Abstract

This article presents a case study for the combined use of TerraSAR-X and time-lapse photography time series in order to monitor seasonal sea ice processes in Nunavik's Deception Bay. This area is at the confluence of land use by local Inuit, ice-breaking transport by the mining industry, and climate change. Indeed, Inuit have reported greater interannual variability in seasonal sea ice conditions, including later freeze-up and earlier breakup. Time series covering 2015 to 2018 were acquired for each data source: TerraSAR-X images were acquired every 11 d, and photographs were acquired hourly during the day. We used the combination of the two time series to document spatiotemporal aspects of freeze-up and breakup processes. We also report new X-band backscattering values over newly formed sea ice types. The TerraSAR-X time series further show potential for melt and pond onset.

2.1 Introduction

2.1.1 Context

Salluiniut (people of Salluit, Nunavik, in Canada) have reported changes in their environment, including less snow in the winter, which affects their activities on the land in Deception Bay (Tuniq et al., 2017). This area is prized by local Inuit for fishing as well as seal and caribou hunting (Petit et al., 2011). People from neighboring community Kangiqsujuaq have reported warmer and longer fall seasons, later freeze-up (Nickels et al., 2005), as well as less snow and earlier sea ice breakup in spring (Cuerrier et al., 2015). Seasonal sea ice conditions in Deception Bay will continue to evolve: climate projections for the region include shorter snow cover periods and warmer annual average temperature in 2040-2064 (Mailhot & Chaumont, 2017). Further, two nickel mines have marine infrastructure in Deception Bay. Their ice-breakers transit in the bay from June 1st to mid-March, avoiding the seal reproduction period (GENIVAR, 2012). From January to March, Raglan Mine's MV Arctic performs on average two round-trips (Mussells et al., 2017).

Raglan Mine initiated this project in response to local concerns about sea ice conditions in Deception Bay. The Northern Villages of Salluit and Kangiqsujuaq and both communities' Land Holding Corporations gave their approval for this project, including associated activities and instrumentation in Deception Bay. The Avataq Cultural Institute was consulted to ensure the project did not encroach on archaeological sites important to Inuit. Finally, the Nunavik Marine Region Impact Review Board gave permission for the deployment of underwater sonars in Deception Bay (sonar data not presented in this article). Local sea ice monitoring is relevant in light of local community members' reliance on the fjord's rich ecosystem for subsistence, as well as for shipping-related operations by the mines. More generally, this case study stands out due to the length of the time-series reported, and may be useful to those wishing to monitor seasonal processes in remote areas or interested in sea ice processes.

2.1.2 Monitoring sea ice seasonal processes

First-year sea ice processes include, among others, formation through freeze-up, transformation of the snow and ice covers over the winter and spring, and eventual breakup. These processes may unfold differently from year to year due to meteorological conditions, over a period of time which may vary from a single day to weeks. They may be driven by environmental factors such as air temperature, wind, currents, and precipitation, to name several. The sequence of events may vary from one area to another, influenced by geomorphological features like shallows or deep water pockets, islands, and rivers. To capture the spatio-temporal nature of these processes, their observation should therefore integrate both spatial coverage and frequent observations. The combined use of radar remote sensing and time-lapse photography meets these requirements.

Synthetic aperture radar (SAR) sensors are uniquely qualified for winter applications in the polar regions: they can acquire images in the dark and through clouds. Modern options combine wide coverage and high spatial resolution with a revisit period as short as 11 days, in the case of TerraSAR-X (X-band, 9.65 GHz). X-band SAR has been shown to be a useful complement to the conventional C-band when it comes to first year sea ice: it was used to identify types of new ice (Johansson et al., 2017), particularly thin ice like nilas and grey ice (Matsuoka et al., 2002). The X-band is also reputed to be more sensitive to the snow cover and freeze/thaw processes than the C-band (Eriksson et al., 2010). Although the literature on X-band backscattering from first-year sea ice is sparse when compared to the C-band—two notable exceptions being Onstott (1992) and Nakamura et al. (2005)—several recent publications are bridging this gap. They include observations over new ice and nilas (Johansson et al., 2017, 2018) and white ice (Fors et al., 2016), as well as over first-year sea ice during the spring (Nandan et al., 2017, 2016; Paul et al., 2015). Recent studies have taken advantage of TerraSAR-X's frequent revisits to successfully document spatially extensive processes such as seasonal snow cover extent and snowmelt (Sobiech et al., 2012; Stettner et al., 2018), as well as glacier calving front monitoring (Zhang et al., 2019). In the C-band, a substantial ERS-1 and RADARSAT-1 (C-band, 5.405 GHz) time-series spanning 8 years was aggregated to study the springtime backscattering signature of snowmelt processes on first-year sea ice (Yackel et al., 2007).

Time-lapse photography is well suited for long-term monitoring applications related to the cryosphere: the systems can be installed in remote locations and record data as often as hourly, for prolonged periods of time. Such time-series have been used to track daily-to-seasonal variations in the extent of the sea ice and ice melange in front of a retreating glacier (Cassotto *et al.*, 2015), to document glacier mass loss (Chauché *et al.*, 2014) and albedo (Dumont *et al.*, 2011), and to observe sea ice concentration in the Beaufort Sea (Wobus *et al.*, 2011). Time-lapse photography has also been used to document snow accumulation and accretion processes on mountain slopes (Vogel et al., 2012), snow cover extent in the tundra (Kępski et al., 2017) and in forests (Arslan et al., 2017), as well as snow melt (Farinotti et al., 2010; Ide & Oguma, 2013; Peltoniemi et al., 2018; Revuelto et al., 2016). Bongio et al. (2019) successfully automated snow thickness measurements using time-lapse photography and measurement stakes in forestrial and alpine regions. Meteorological information may be derived from the photographs, for instance precipitation type or wind conditions (Christiansen, 2001; Liu et al., 2015; Smith et al., 2003). Finally, Herdes et al. (2012) used sub-daily time-lapse photography time-series to validate and complement the visual interpretation of weekly RADARSAT-1 (C-band) time-series in the context of iceberg plumes and coincident sea ice conditions.

2.1.3 Objectives

This article explores the use of combined TerraSAR-X and time-lapse photography time-series to monitor seasonal sea ice processes and the potential of time-lapse photography to support TerraSAR-X interpretation. We performed this case study over three years in Nunavik's Deception Bay. A complementary objective is to describe the processes through an interannual comparison.

2.2 Study area

Deception Bay (62° 09' N, 74° 40' W) is located on the northern edge of Nunavik, the Inuit Nunangat territory overlapping the Canadian province of Quebec north of the 55th parallel. This fjord of the Ungava Plateau is roughly 20 km long and nested in hills peaking at 580 m in altitude (GENIVAR, 2012). Water depth in the bay (Figure 2.1) reaches 80 m in the deepest section located between the marine infrastructure and Moosehead Island. Deception Bay is accessible from Hudson Strait by boat during the ice-free season, or by icebreaker. It is also accessible in winter and spring by snowmobile from overland trails. The closest communities are Salluit (50 km west) and Kangiqsujuaq (200 km south-east). The study area corresponds to a 9 km long section of the bay, centered on the marine infrastructures (see Figure 2.2).

The Canadian Ice Service, in its "Climatic Ice Atlas 1981-2010", estimates freeze-up and breakup in the bay to occur around the first week of December and the first week of July, respectively (Fequet *et al.*, 2011). Landfast sea ice typically extends to the mouth of the bay, where it is stabilized by



Figure 2.1 – Elevation and bathymetry map of Deception Bay. Inset: Inuit Nunangat, with Nunavik in green. Marine infrastructures are identified with anchor markers.

Neptune Island. Point thickness measurements performed in Deception Bay for the Ice Monitoring project in January-February and April-May 2016, 2017, and 2018 (Gauthier *et al.*, 2018) ranged from 0 to 55 cm for the snow cover, and 52 to 165 cm for the ice cover. Deception River is the largest river flowing into the bay, and its flow is greatest at the end of spring in June and July because of snowmelt; its flow is almost zero during the winter (GENIVAR, 2012). Water salinity in the bay ranges from 29 to 33 psu (GENIVAR, 2012).

2.3 Data description

In addition to TerraSAR-X and time-lapse photography data, which is described in this section, air temperature data was also considered. The nearest meterological station is located 50 km west of the study area, at Salluit airport, and partial air temperature measurements are acquired in the bay

Orbit	Local acquisition	Incidence	Polarizations	Acquisition period	Total number of
	time	angle			images
13	17:32 (ascending)	38	$\rm HH/VV$	23 December 2015 to	75
				26 July 2018	
21	6:25 (descending)	40	VV/VH	24 December 2015 to	70
				27 July 2018	
89	17:32 (ascending)	46	VV/VH	28 December 2015 to	76
				31 July 2018	

Table 2.1 – Characteristics of TerraSAR-X acquisitions for the study.

by time-lapse cameras. These two data sources are presented and compared in the supplementary materials, under "Air temperature in Deception Bay". Data from Salluit airport is presented in the Results section as either monthly mean air temperature and or monthly cumulative freezing and thawing degree-days (see S9 and S10 in the supplementary materials).

2.3.1 TerraSAR-X

TerraSAR-X acquired StripMap dual co- and cross-polarization single look complex (SLC) images over Deception Bay from December 2015 to July 2018, spanning three winter seasons. This X-band satellite—and its counterpart TanDEM-X—operate at a central frequency of 9.65 GHz (3.11 cm wavelength), with a repeat period of 11 days. Three orbits overpass the study area (13, 21, 89); orbits 21 and 89 are respectively one and five days later than orbit 13. Each orbit yields a time-series of images with identical acquisition parameters (see Table 2.1). Their incidence angles range from 38° to 46°, in either ascending or descending passes, and they all include a VV polarization. The scene size before subsetting to the study area was 15 by 50 km, with a spatial resolution of 0.9 and 2.5 m, respectively, for range and azimuth directions (Eineder *et al.*, 2008). Figure 2.2 shows the extent of the subimages, which cover a 9 km long section of the bay.

2.3.2 Time-lapse photography

A pan-tilt-zoom Panasonic WV-SW598 camera was installed on the south-west shore of Deception Bay (Figure 2.2) on 11 September 2015. Operating in time-lapse mode, the camera takes a photograph every 15 minutes during the day (from 6:00 to 18:00 local time), rotating through four preset



Figure 2.2 – Map of TerraSAR-X image subset, time-lapse camera locations, and Panasonic fields of view.

views (Figure 2.2). The photographs have an effective pixel count of 2.4 megapixels and a 90x zoom is available when setting the views or taking remote control of the camera. The camera can operate at temperatures between -50°C and 55°C and is installed at a height of 1.8 m. The selected site is accessible by foot from Raglan Mine's marine infrastructure, located on a high-point which offers a good view of the study area. Photographs are automatically transferred through Raglan Mine's network to a database hosted by Institut national de la recherche scientifique (INRS). There are roughly 1 400 photographs per month, for a total of almost 17 thousand per year, all available to the general public on http://caiman.ete.inrs.ca (Bernier *et al.*, 2017b).

2.4 Methods

We chose three general sea ice processes for spatio-temporal monitoring: freeze-up, wintering, and breakup. The wintering process is defined as a general term which may include winter sea ice processes such as ice desalination, snow reorganisation, etc. Specific elements characterizing each process were identified and observed through TerraSAR-X or time-lapse photography indicators. For example, the dates on which freeze-up begins and ends are respectively indicated by the first day where sections of the wintering ice cover are observed on the water and the first day where the wintering ice cover is complete and stable. Sub-sections 2.4.1 and 2.4.2 describe the process element indicators and how they are observed or measured from each data source. Sub-section 2.4.3 details how we compared the photographs with coincident satellite images and identified their features, which serves to evaluate the potential of time-lapse photography to enhance TerraSAR-X image interpretation.

2.4.1 TerraSAR-X image processing and temporal interpretation

The TerraSAR-X images were used to document both the spatial and temporal aspects of the freezeup, wintering, and breakup processes. Before being interpreted, the images were first processed at the DLR (German Aerospace Center), using the Multi-SAR System. This workflow starts with a conversion from the digital number to radar brightness (sigma-naught), followed by multi-looking to produce square pixels and increase the radiometric quality (number of looks), orthorectification so all the images from all orbits could be overlaid, and image enhancement to reduce the speckle inherent to SAR images (Schmitt *et al.*, 2015). The Multi-SAR System is described in detail in Bertram *et al.* (2016). The output images have a geometric resolution of 2.5 m pixels with a radiometric resolution of 1.6 looks. The TerraSAR-X noise floor for the three orbits ranges between -23 and -24.5 dB, the difference between maximum and minimum incidence angle within an image ranges from 1.4° to 1.0° , and the radiometric accuracy is 0.6 dB (Eineder *et al.*, 2008).

Median backscattering was computed for each subimage and plotted as a function of time for a given year. 32 areas of interest (AOIs) were distributed over the study area, roughly 120 m by 100 m and containing between 2016 and 2064 pixels each. Their locations were chosen to avoid the shore, man-made structures like docks, as well as broken ice left in the wake of ice-breakers (Figure 2.3). The median backscattering was computed over each AOI, and then over all AOIs for a given subimage, yielding a single median value per subimage. This step was performed using Python (Dufour-Beauséjour, 2019b).

Recurring seasonal features in all X-band VV median backscattering time-series acquired during this study include two peaks separated by a monotone period. From this, four indicators were derived:


Figure 2.3 – TerraSAR-X VV subimage of Deception Bay on 24 December 2015 in orbit 21 and AOIs used to compute statistics (yellow). The image is grey-scaled from -19 to -5 dB.

the post-freeze-up peak (I), the beginning (II) and end (III) of the monotone period, and the spring peak (IV). Figure 2.4 shows examples for two different years and orbits, chosen for their clarity. Speaking in terms of the data time-series, peak location is defined as the location of its maximum and estimated as sitting between the left and right-hand neighbors of the highest data point. The beginning (end) of the monotone period is estimated as sitting between the first (last) monotone data point and its left-hand (right-hand) neighbor. Figure 2.4 shows an example of estimated ranges for each indicator, using two orbits and years chosen for their clarity. These ranges were identified manually and are presented for all orbits and years in the supplementary materials (Fig. S1-S3, Annexe I). The estimated range for a given indicator and year was further reduced by combining all available orbits (Fig. S1-S3, Annexe I). Finally, the winter trend was computed from a linear regression fit on the data in the monotone period, as shown in the supplementary materials (Fig. S4, Annexe I).



Figure 2.4 – Examples of change detection in TerraSAR-X VV median backscattering. Peak detection for orbit 21 in 2016-2017 (top), and inflexion detection for orbit 13 in 2017-2018 (bottom).

2.4.2 Photograph interpretation

The photographs were interpreted to document both the temporal and spatial aspects of freeze-up and breakup processes. The freeze-up process includes the formation of various ice types in the study area up to their eventual consolidation into a continuous ice cover which stays in place for the whole winter. The breakup process includes the degradation and dislocation of the ice cover up to the total absence of ice.

During the freeze-up process, ice types were identified following WMO nomenclature as either grease ice (a soupy and matte layer of coagulated crystals), shuga (an accumulation of spongy white lumps a few centimeters across), nilas (a thin crust of matte ice which may raft in interlocking fingers), ice rind (a brittle and shiny crust of ice formed on a quiet surface, easily breaking into pieces), and pancake ice (pieces of ice up to 3 meters in diameter which may be formed from the preceding types of ice and rapidly cover large expanses) (descriptions from WMO, 2014).

Consolidation of the ice cover was documented based on the persistence of features over time and their lateral movement. The date on which the freeze-up process was completed, called "the freeze-up date", was also used as an indicator. For the breakup process, ice cover dislocation was documented based on the occurrence of open water. Ice cover degradation was documented based on its color and texture, as well as the occurrence of flooding. The date on which the breakup process was completed, called "the breakup date", was also used as an indicator. Photograph sequences showing





Figure 2.5 – Time-lapse photography during the 2016 breakup process (top) and the 2016 freeze-up process (bottom).

the freeze-up and breakup processes for each season are presented in the supplementary (Movies S1-S6).

Figure 2.5 shows two examples of photograph interpretation. At the top, the 2016 breakup process unfolds: snow and ice covers degradation can be seen through changes in color and texture. At the bottom, the 2016 freeze-up process comes to an end on 29 November, where nilas patches on the water consolidate into a continuous ice cover whose features are immobile.



Figure 2.6 – Coincident time-lapse photography and TerraSAR-X images during the 2017 freeze-up process (top) and the 2018 breakup process (bottom). On the images, camera location and fields of view are identified in blue. Top: TerraSAR-X VV image from orbit 13. AOIs are color-coded according to the identified ice type, prior to backscattering signature extraction. Bottom: TerraSAR-X VV image from orbit 89. Both images are grey-scaled from -19 to -5 dB.

2.4.3 TerraSAR-X spatial interpretation using photography

TerraSAR-X images were interpreted using coincident photographs taken from the shore. Observed features include open water areas or leads and different ice types. Figure 2.6 shows two examples. At the top, nilas, pancake ice and grease ice are observed on the photographs during the 2017 freeze-up process, and then identified on a coincident TerraSAR-X image acquired on 26 November. At the bottom, ice cover dislocation is observed on photographs during the 2018 break-up process; leads and open areas are identified on the coincident 28 June image.



Figure 2.7 - Zones relevant for describing the spatial aspects of the freeze-up process in Deception Bay, and ship routes for the MV Arctic and MV Nunavik (dashed line). Camera location is indicated with a star.

2.5 Results

Results from the methods described above are spatio-temporal descriptions of sea ice seasonal processes, organized here following the seasons (freeze-up, wintering, and spring). Results from different sources and methods are presented together to facilitate interpretation.

2.5.1 Freeze-up

In the following description of processes for each year, we refer to zones represented in Figure 2.7. No ice-breaker transits occurred during the freeze-up process for the three years of this study. The freeze-up date is the first day featuring a consolidated ice cover which remains in place for the whole winter.

In 2015, freeze-up was preceded by days featuring fog and open water, as well as grease ice and shuga. On 10 November, landfast ice appeared along the north-eastern shore (zone B) and grew thermally, progressively extending to cover the whole study area (zone A) by 11 November 2015.

In 2016, the days before freeze-up featured grease ice and open water, and the accumulation of pancake ice over the shallows near Moosehead Island (zone C). After the formation of nilas and various new ice types on 27 November, zone A was covered by mirror-like patches of nilas and ice rind on 28 November. Their lateral movement is illustrated in Figure 2.5. The next morning, overlapping patches of nilas covered the study area. No lateral movement of the ice was observed on 29 November. Freeze-up was therefore completed on 29 November 2016. In 2017, a similar series of events was observed. Freeze-up was alternatively preceded by days of open water and days where the water was covered in grease ice or nilas, and pancake ice accumulated in zone C. On 27 November, zone A was covered with mirror-like nilas or ice rind. This ice was rearranged during the night into an ice cover which showed no further substantial lateral movement. Observed features shifted slightly south-east in the night between 29 and 30 November. Despite these minor tidal movements, we identify freeze-up as having occurred on 28 November 2017.

Following ice type identification from photographs, the X-band backscattering signature of newly formed ice types was extracted during the 2016 and 2017 freeze-up processes. An example of TerraSAR-X image interpretation from coincident photographs is shown in Figure 2.6, where grease ice was observed as well as a mix of nilas and pancake ice. Figure 2.8 shows median VV backscattering values for AOIs over grease ice, nilas, pancake ice, and a mixture of the two. In the days following the 2016 and 2017 freeze-up dates, the young ice cover presented systematically higher backscattering than during the rest of the winter. Identification of a specific ice type was impossible from time-lapse photography however, since young ice is characterized by its thickness (WMO, 2014). Figure 2.8 also shows median VV backscattering for AOIs over this unidentified young ice. Results are presented for different acquisition geometries and incidence angles (details in figure caption). The images associated with each box in Figure 2.8 are reproduced in the supplementary materials (Fig. S5-S6, Annexe I) along with the color-coded AOIs used for each ice type.

Figure 2.9 shows the temporal evolution of the median VV backscattering during the freeze-up processes, as well as indicators derived from time-lapse photography and TerraSAR-X: the freeze-up date, the freeze-up peak (I), and the beginning of monotone backscattering (II). No TerraSAR-X data is available during freeze-up 2015. The daily event sequence (Tables S1-S3, Annexe I), as well as videos assembled from time-lapse photography (Movies S1-S3) and TerraSAR-X (Movies S7-S9), are available as supplementary materials. 2015 saw an earlier freeze-up than the other years by 18 and 17 days (2017 and 2018). Mean temperatures measured over the years at Salluit airport for



Figure 2.8 – TerraSAR-X median VV backscattering values observed over AOIs of ice types identified from time-lapse photography in 2016 and 2017. The number of median values used (n) is written above each box. Outliers are plotted as empty white circles. Left: Grease ice (pink) was observed on the orbit 13 image from 26 November 2017. Nilas (dark purple) was observed on 28 and 29 November 2016 in orbits 13 and 21, respectively. A mix of nilas and pancake ice (white) was observed on 26 November 2017 in orbit 13. Pancake ice (yellow) was observed on 28 and 29 November 2016 in orbits 13 and 21. Right: Unidentified young ice (grey) was observed on 9 and 10 December 2016 in orbits 13 and 21, as well as on 1, 7 and 8 December 2017 in orbits 89, 13, and 21. The number of days since the freeze-up date (t) is written below each box.

October ranged from -3°C in 2017 to -5°C in 2015, and from -8°C in 2016 to -11°C in 2015 for November (see Fig. S9, Annexe I).

2.5.2 Wintering

The coldest months were observed in 2017-2018, with mean January and February temperatures measured at Salluit airport sitting at -27 and -30°C, respectively (see Fig. S9, Annexe I). For the purpose of characterizing the winter backscattering signature of snow-covered sea ice, winter is defined from the TerraSAR-X time-series as the monotone period between the post-freeze-up peak and the spring peak. Derivation of these limits is presented in the supplementary materials (Fig. S3, Annexe I).

Figure 2.10 shows the X-band winter backscattering signature of snow-covered sea ice in Deception Bay, or "white ice" in WMO terminology. Median backscattering observed for white ice ranged from -14 to -20 dB over the three years. In winter 2015-2016, the median was consistently lower



Figure 2.9 – TerraSAR-X median VV backscattering is plotted versus time for each year (color-coded). Three orbits are shown for: orbits 13 (empty square), 21 (circle), and 89 (black diamond). The freezeup date (FU, from time-lapse photography), the post-freeze-up peak (I, from TerraSAR-X), and the beginning of monotone X-band (II, from TerraSAR-X) are identified with vertical bars. Estimates for each indicator are indicated by shaded grey areas.

than for the other two years, across orbits. Winter values were systematically higher for the descending/morning orbit than for the ascending/evening ones. In 2016-2017, all orbits show a negative winter trend (Figure 2.10). This trend is most pronounced in the descending/morning data, which also shows a larger spread than in the other orbits (Figure 2.10). Meanwhile, the 2015-2016 and 2017-2018 backscattering time-series exhibit little to no winter trend.

2.5.3 Spring

In the following description of each year's breakup, we refer to zones represented in Figure 2.11. The breakup date is the first day when the study area is ice-free.



Figure 2.10 – Characterization of TerraSAR-X VV winter backscattering. Top: Winter median by year (color-coded) for orbits 13 (dashed, ascending, 5:32 PM, 38°), 21 (solid, descending, 6:25 AM, 40°), and 89 (black, ascending, 5:40 PM, 46°). The seasonal median is computed from image medians, which were computed from AOI medians. Empty circle markers represent outliers. Bottom: Winter trend by year (color-coded), for orbits 13 (empty square), 21 (circle), and 89 (black diamond). A horizontal black line indicates the point of zero trend. The trend is defined as the slope of the linear fit to the winter image medians (see Fig. S6, Annexe I). Error bars are the standard error associated with the fit.

In 2016, patches of bare ice could be observed throughout the winter, particularly along the southwest shore (zone D). This bare ice started to appear rougher on 20 May. Despite ice-breaking manoeuvers performed by the MV Nunavik in zone B upon its arrival in the bay on 16 June, no open water could be seen along its tracks either on the photographs or on the TerraSAR-X image from the same day. Deception River thawed by 16 June. Zone D was seen to be covered in meltwater on 18 June, and open water was first observed on 19 June, in front of the river (zone A). Open water progressed steadily throughout zone B over the course of five days, until Moosehead Island (zone C) was also ice-free and breakup was completed on 24 June 2016.

In 2017, snow rapidly melted off following the end of the monotone backscattering period. By 13 May, more than two thirds of zone B was snow-free, before a snowfall event on the 14 May. On 31 May, the ice featured meltwater ponds. Deception River had thawed by 3 June (zone A), and on 4



Figure 2.11 – Zones relevant for describing the spatial aspects of breakup in Deception Bay and ship routes for the MV Arctic and MV Nunavik (dashed line). Camera location is indicated with a star.

June some open water could be seen along the ship tracks near zone D. Breakup took eight days and followed the same spatial pattern as the year before. Breakup was completed with the freeing of zone C on 12 June 2017. In 2018, the snow cover appeared largely melted on the south-eastern part of zone B by 28 May, and meltwater was seen on the ice on several occasions mid-June (zones E). The MV Nunavik and MV Arctic entered the bay on 17 June. Six days later, open water could be seen along most of the ship tracks and the river had thawed. The ships' departure coincided with the first day where meltwater ponds covered the ice. New cracks perpendicular to the shore appeared in the ice that day. These features can be seen on photographs (Figure 2.6). Open water was first observed near the south-east shore in zone B on 26 June. The TerraSAR-X image acquired that day (Figure 2.6) shows large ice pieces separated along the ship tracks and floating freely in zone B. The breakup was completed on 3 July 2018, seven days after the first observation of open water.

Figure 2.12 shows the temporal evolution of the median VV backscattering during the breakup process, as well as indicators derived from time-lapse photography and TerraSAR-X: the end of monotone backscattering (III), the spring peak (IV), and the breakup date. The daily event sequence (Tables S4-S6, Annexe I)—including ice-breaker transits—as well as videos assembled from time-



Figure 2.12 – TerraSAR-X median VV backscattering is plotted versus time for each year (color-coded). Three orbits are shown: orbits 13 (empty square), 21 (circle), and 89 (black diamond). The end of monotone X-band (III, from TerraSAR-X), spring peak (IV, from TerraSAR-X), and the breakup date (BU, from time-lapse photography), are identified with vertical bars. Estimates for each indicator are indicated by shaded grey areas.

lapse photography (Movies S3-S6) and TerraSAR-X (Movies S7-S9), are available as supplementary materials. 2016 saw both the earliest end of monotone backscattering and the longest period between this and breakup—59 days compared to 35 both in 2017 and 2018. May 2017 stands out with 57 thawing degree-days compared to 4 and 0 in May 2016 and 2018 respectively (see Fig. S10, Annexe I).

2.6 Discussion

The use of TerraSAR-X and time-lapse photography time-series for seasonal monitoring of sea ice processes is first discussed for each data source as a stand-alone monitoring tool (sub-section 2.6.1),

and then for their combination (sub-section 2.6.2). Processes observed in Deception Bay using these tools (freeze-up, wintering, melting and ponding, and breakup) are then discussed in sub-section 2.6.3.

2.6.1 Data sources as stand-alone monitoring tools

2.6.1.1 TerraSAR-X

With a revisit period of 11 days, each TerraSAR-X time-series provided access to the seasonal scale of processes. For example, spring features consistently present in all nine datasets for this study (Figure 2.12) were associated with springtime melt/thaw processes, as discussed in 2.6.3.3. Faster processes could not be resolved, such as freeze-up which unfolded over one to three days (see subsection 2.5.1). Spatially, TerraSAR-X offered the advantage of uniform coverage for the whole study area. This allowed us to document the 2018 breakup spatial pattern (Figure 2.6). Success on this front is however dependent on lucky timing. Interpretation of the spectral aspect of sea ice processes was hindered by the relative lack of literature specific to X-band backscattering. Indeed, despite their spectral proximity, the C-band and X-band have been shown to behave differently when it comes to interaction with brine-wetted snow for instance (Nandan *et al.*, 2016, 2017). A study of X-band scattering mechanisms and the associated physiochemical properties of snow and sea ice, although needed, is outside the scope of this paper.

2.6.1.2 Time-lapse photography

Hourly photographs allowed for the detailed observation of daily or weekly processes, for instance freeze-up. Observations were limited by the absence of photographs during the night and by low visibility periods caused by fog or blowing snow. Spatially, interpretation was limited to the camera's field of view. Details too small (e.g. frost flowers) or too far away (melting of Deception River) could not be resolved. Distances were hard to evaluate on the photographs, which limited the interpretation of feature size or of their extent on the bay (e.g. melt ponds). As for the spectral manifestation of processes, interpretation was straightforward because the photographs were in the visible spectrum. This also allowed for the observation of some meteorological conditions like snowfall (see Tables S1-S6, Annexe I).

2.6.2 Complementarity of the data sources

The combination of TerraSAR-X and time-lapse photography allowed us to use the strengths of one data source to mitigate weaknesses from another. For example, the TerraSAR-X images acquired during the break-up processes filled in some gaps regarding the state of Deception River (frozen or thawed), which was too far to be resolved on the photographs. Conversely, photography allowed us to compile a daily event sequence of breakup-related events (Tables S3-S6, Annexe I). Overlap of the data sources (e.g. Figure 2.6) allowed for co-interpretation, which was used to document the X-band backscattering signature of several newly formed ice types (see Figure 2.8), as discussed in 2.6.3.1.

2.6.3 Sea ice processes observed in Deception Bay

2.6.3.1 Freeze-up

Two different freeze-up processes were documented over the course of the study, as presented in subsection 2.5.1. In 2015, calm waters allowed for a quick thermal freeze-up. Below-zero temperatures were earliest in 2015, with the coldest months of October, November, and December of the three years (see Fig. S3-3, Annexe I). In 2016 and 2017, freeze-up rather proceeded iteratively, from patches of nilas and ice rind. We speculate that the first process produced smoother ice than the second process. For a given incidence angle, winter backscattering was systematically lower in 2015-2016 than in the other two years (Figure 2.10), which we attribute to a smaller surface scattering component that year.

We presented values of -16 ± 2 dB for grease ice and -19 ± 2 dB for nilas in VV at 38° to 46° (Figure 2.8), which is higher than the -22.0 ± 0.5 dB value reported by Nakamura *et al.* (2005) for new ice (defined as including frazil, grease ice, and nilas), observed in the same polarization and similar incidence angles of 39° to 44°. Our values are also higher than the -21 dB value reported by Matsuoka *et al.* (2002) for snow-free thin ice (defined as including nilas and grey ice) observed in HH at lower incidence angles of 22° to 25°. The backscattering signature of grease ice, which may form waves in the presence of wind, may depend on environmental conditions (Isleifson *et al.*, 2010), which limits comparison. Several factors may be intervening in backscattering from nilas. In cold

and dry snow conditions, the X-band is not expected to penetrate significantly in the ice cover, with backscattering dominated by the presence of brine at the snow-ice interface (Nandan *et al.*, 2016). Frost flowers are known to increase the backscattering from newly formed sea ice in the C-band, an effect which may be more pronounced over thin ice; an increase of 5 dB was reported over ice 2 to 15 cm thick (Nghiem *et al.*, 1997), and of 13 dB over 5 cm thick ice (Isleifson *et al.*, 2014). Snow may also lead to an increase in backscattering through warming of the snow-ice interface and an associated increase in brine scatterer size (Gill *et al.*, 2015). In the case of our nilas observations, snow itself might be enough to explain the 3 dB difference; frost flowers may also have played a role, but could not be observed on the photographs.

Despite a difference of almost 20° in the incidence angle, our observation of -12 ± 1 dB over unidentified ice one to nine days after freeze-up (Figure 2.8) is close to reports by Johansson *et al.* (2017) of -11.9 dB over new ice (defined as including nilas, grey ice, and white ice up to 50 cm thick) observed in the X-band VV at 25°, as well as to reports by Onstott (1992) of -14.4 dB over thin first year ice (30 to 70 cm thick) in the X-band HH at 23°. The post-freeze-up peak and monotone backscattering onset are also observed in C-band time-series over sea ice (Yackel *et al.*, 2007), but these seasonal features have been less studied than their spring counterparts (end of monotone backscattering and spring peak). Moreover, similar features observed in X and C-band time-series could well be related to different scattering mechanisms, and even to different physical processes. We limit ourselves to speculating, for the X-band data presented in this manuscript, that the increasing portion of the backscattering peak may be associated with the domination of surface scattering related to a brine-rich ice surface, potentially covered in frost flower, and that the decreasing portion may be associated with a transition to an absorption regime, in which the signal suffers loss in the brine-wetted and increasingly colder snow.

2.6.3.2 Wintering

Although specific winter sea ice processes exist, for instance sea ice desalination, snow accumulation and reorganization, time-lapse photography did not allow us to document them. TerraSAR-X timeseries may however have potential for such monitoring, although another source of data is needed to support interpretation. In general, our backscattering time-series fall within the -10 and -20 dB range reported by Onstott (1992) for first-year ice observed with X-band HH or VV at 40° between January and June.

Before moving on to the spring processes, we first discuss the influence of an 8° difference between ascending orbits 13 and 89. For 2016-2017 and 2017-2018, a small incidence angle effect was seen during the post-freeze-up and spring peaks, where backscattering was 1 to 3 dB smaller at the higher incidence angle (see Figure 2.9 and Figure 2.12), while none was seen during the monotone winter period (see Figure 2.10). A backscattering signal which decreases with incidence angle is expected for situations dominated by surface scattering on a relatively rough surface (Ulaby et al., 1986). In the C-band, surface scattering at the interfaces between dry snow, brine-wetted snow, and ice is indeed expected to dominate for cold snow-covered sea ice, with a transition to mixed scattering for thicker snow covers (Gill et al., 2015). We speculate that surface scattering explains the small incidence angle effect observed in our X-band data. Mahmud et al. (2018) recently modeled the linear decrease with incidence angle of L- and C-band HH backscattering (in dB) from first-vear ice; their results show a dependence of $-0.22 \text{ dB}/1^{\circ}$. This would yield 1.8 dB for an 8° difference in the C-band and HH polarization, which is similar to what we observe in the X-band and VV polarization for two out of the three years. 2015-2016 however presents a very different case. Backscattering at the higher incidence angle is consistently 2 dB higher than at the lower incidence angle, throughout winter and during the spring peak (see Figure 2.12). The freeze-up process was different that year compared to 2016 and 2017 and we have already suggested that the ice cover was much smoother for the 2015-2016 season. We speculate that surface scattering was comparatively low that year, and that volume scattering, which Ulaby et al. (1986) have shown can slightly increase with incidence angle, dominated instead.

An acquisition time effect can be seen in the winter data (Figure 2.10): the descending/morning winter median was systematically higher than in either ascending/evening orbits. Temperatures in the snow and ice covers are expected to be higher following daytime than in the morning. Dielectric loss in the C-band is known to increase with temperature for snow on sea ice (Gill *et al.*, 2015). We speculate that backscattering might be lower in general in the evening than in the morning due to increased dispersion in the warmer medium.

2.6.3.3 Melting and ponding

Monotone X-band backscattering was observed every winter of the study, for all incidence angles and acquisition times, before a systematic springtime increase in backscattering. In the C-band, winter is also characterized by monotone backscattering, ending with melt onset brought on by warmer air temperatures (Yackel *et al.*, 2007). Mechanisms which may increase C-band backscattering from snow-covered sea ice include surface scattering from the brine-wetted layer at the bottom of the snowpack (Nandan *et al.*, 2016), volume scattering on brine inclusions enlarged by an increase in temperature (Barber & Nghiem, 1999), and surface scattering on wet snow (Gill *et al.*, 2015; Yackel *et al.*, 2007) accumulated at the top of the snowpack due to above-zero temperatures and solar radiation (Gogineni *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 1984). We speculate that the X-band is susceptible to all of these C-band mechanisms, with an emphasis on surface scattering due to its lower penetration depth (Nandan *et al.*, 2016), and attribute the end of X-band monotone backscattering to melt onset.

Springtime backscattering was seen to eventually peak in all TerraSAR-X datasets (Figure 2.12), although one series featured more than one maximum (orbit 13, 2015-2016), another none (orbit 13, 2017-2018), and an apparent mismatch between maximum location in the 2015-2016 data. In the C-band, springtime peaking of the backscattering is attributed to the transition from the pendular regime (Yackel *et al.*, 2007; Barber *et al.*, 1995), where water is held in the snowpack (Scharien *et al.*, 2012) and backscattering increases as described in the last paragraph, to the funicular regime where meltwater drains downward (Scharien *et al.*, 2012), flushing out brine (Barber *et al.*, 1995), and potentially refreezing (Gogineni *et al.*, 1992). The decrease in C-band backscattering, which forces its peaking, is attributed to a decrease in the dielectric constant of the snowpack following the transition to the funicular regime (Yackel *et al.*, 2007). We speculate that the decrease in the X-band springtime backscattering is also caused by pond onset, and associated with increased penetration in the drained snowpack.

Neither melt or pond onset could be resolved using time-lapse photography, although signs of ice cover degradation were eventually observed and used to document break-up (see example in Figure 2.5). Table 2.2 shows melt and pond onset timing estimated by combining the three TerraSAR-X time-series. 2016 showed the earliest melt onset, and the longest period separating it from pond onset (33 days). 2017 showed the shortest time separating melt onset from pond onset (16 days), and the earliest pond onset of the three years. 2018 showed the latest melt and pond onsets, separated

by 22 days. This is consistent with air temperature data from Salluit airport; 2018 had the coldest months of May and June (see Fig. S3-3, Annexe I). Meltwater was observed on the ice surface 27 and 11 days after pond onset in 2016 and 2017 respectively, and the day before in 2018, as shown in the supplementary (Tables S4-S6, Annexe I).

2.6.3.4 Break-up

Two different breakup processes were observed over the course of the study, as presented in subsection 2.5.3. In 2016 and 2017, open water was first observed near Deception River and its extent progressed towards the rest of the bay until the whole study area was ice-free. This contrasts with 2018 where, although open water was also first observed near Deception River, breakup was rather characterized by the presence of large ice floes which floated in the bay for a week before disappearing overnight, signalling breakup completion. In 2016, breakup began three days after the MV Nunavik first entered the bay in the spring. The first ice-breaking transit of the season occured respectively three days before and one day after the beginning of breakup 2016 and 2017. The 2016 breakup started 28 days after pond onset, compared to the 16 days period observed in 2017. We speculate that the ice cover was in a more advanced state of degradation when breakup started in 2016 than in 2017. This is supported by time-lapse photography which show that the ice cover was partly mobile (under the effect of wind or current) during breakup 2016, but mostly landfast during breakup 2017 (Movies S4-S5). In 2018's comparatively late spring, both the MV Nunavik and MV Arctic entered the bay during pond onset (on June 17th). Open water was observed along their tracks in the following days and new cracks perpendicular to the shore appeared when the ships left the bay eight days later. In 2016 and 2017, the last area to be cleared of ice was Moosehead Island and its shallows.

With the data available, it is hard to evaluate the impact of shipping on the breakup process in Deception Bay, be it on its pattern, timing, or length. What we can say is that 1) the breakup spatial pattern followed shipping tracks in 2018, but did not in 2016 and 2017; 2) breakup lasted 5, 7, and 7 days in 2016, 2017, and 2018, respectively, and 3) it was completed respectively 33, 23, and 15 days after pond onset. Future work on this front would do well to consider the melting of the ice from underneath due to currents, an important aspect of breakup Laidler & Ikummaq (2008) which is hard to access using TerraSAR-X and time-lapse photography.

Table 2.2 – Seasonal timeline for snow-covered sea ice for three years. Process elements derived from time-lapse photography (Photo.), and TerraSAR-X (TSX) indicators.

Indicator	2015 2016	2016-2017	2017-2018	Photo.	TCY				
Process element	2010-2010				15A				
First day where sections of the wintering ice cover are observed on the water:									
Beginning of freeze-up	Nov. 10th	Nov. 27 th	Nov. 26 th	х					
First day where the wintering ice cover is complete and stable:									
Freeze-up	Nov. 11th	Nov. 29 th	Nov. 28 th	х					
Day where, following freeze-up, backscattering is at its highest:									
Unidentified	-	Dec. 10th	Dec. 5th		Х				
Day where, following the post-freeze-up peak, backscattering becomes monotonous:									
Unidentified	-	Dec. 15th	Dec. 21st		X				
Day where the backscattering stops being monotonous after winter:									
Melt onset	Apr. 19th	May 4th	May 27 th		Х				
Day where, following winter, backscattering is at its highest:									
Pond onset	May 22nd	May 20 th	Jun. 18th		Х				
First day where open water is observed in place of a previously undisturbed winter ice cover:									
Beginning of breakup	Jun. 19th	Jun. 5th	Jun. 26 th	х					
First day where the water is completely ice-free:									
Breakup	Jun. 24th	Jun. 12th	Jul. 3rd	х					

2.6.3.5 Seasonal timeline and caveats

Table 2.2 presents a timeline for the elements relating to sea ice processes which were studied using TerraSAR-X and time-lapse photography indicators. Two indicators derived from backscattering time-series could not be associated with specific elements of sea ice processes: these are the post-freeze-up peak and the beginning of monotone X-band.

This seasonal timeline relies on the assumptions that 1) freeze-up, wintering, and breakup processes occur each year, that 2) despite interannual differences in timing and spatial extent, the process elements listed in Table 2.2 always occur, and that 3) the TerraSAR-X and time-lapse photography time-series indicators are always a manifestation of these process elements. This may not always be the case; for instance, melting and ponding is known to be hard to resolve in the C-band for thin ice covers (Yackel *et al.*, 2007), and two of the X-band-derived indicators could not be reliably associated to process elements.

2.7 Conclusion

This article presented a case study for the seasonal monitoring of sea ice processes using a combination of TerraSAR-X and time-lapse photography time-series. The two data sources proved complementary, their combination enabling spatio-temporal coverage of the processes. It also led to the reporting of new X-band backscattering values over newly formed sea ice types. TerraSAR-X time-series showed potential for tracking melt and pond onset. Finally, we documented two types of freeze-up and breakup processes for Nunavik's Deception Bay, an area at the confluence of climate change, land use by local Inuit, and ice-breaking transport by the mining industry. These processes were seen to depend on geomorphological features such as Moosehead Island and Deception River. Future work in the Ice Monitoring project will build on this characterization of seasonal processes and focus on spatial variations within the bay and comparison with similar fjords, namely Salluit and Kangiqsujuaq. It will also involve comparison of the TerraSAR-X time-series data with RADARSAT-2 time-series acquired over the same period and area.

Code and data availability

The complete time-lapse photography database can be accessed at http://caiman.ete.inrs.ca (Bernier *et al.*, 2017b). Quicklooks for the TerraSAR-X images are available on https://doi.pangaea. de/10.1594/PANGAEA.905246 (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2019b). The code used to compute pixel statistics from the TerraSAR-X images on areas of interest is available at https://github.com/ sdufourbeausejour/tiffstats (Dufour-Beauséjour, 2019b).

Video supplement

Movies S1, S2, and S3 respectively show the freeze-up sequence for 2015, 2016, and 2017. Movies S4, S5, and S6 respectively show the breakup sequence for 2016, 2017, and 2018. They are available online at https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904956 (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2019a). Movies S7, S8, and S9 respectively show the TerraSAR-X image time-series (all orbits combined) for the 2015-2016, 2016-2017, and 2017-2018 ice seasons. They are available online at https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.911042 (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020a).

Author contribution

SDB participated in study design, data acquisition, analysis, and interpretation, and wrote the article. AW participated in study design, data analysis and interpretation, and wrote the article. YG participated in study design and data interpretation, and revised the article. MB participated in study design and revised the article. JP and VG participated in study design and data acquisition. JT and A. Roth participated in data acquisition. A. Rouleau participated in study design.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Inuit guides from Salluit who participated in data acquisition in Deception Bay (in alphabetical order): Chris Alaku, Johnny Ashevak, Michael Camera, Putulik Cameron, Charlie Ikey, Luuku Isaac, Markusi Jaaka, Adamie Raly Kadjulik, Joannasie Kakayuk, Jani Kenuajuak, Pierre Lebreux, Casey Mark, Denis Napartuk, Eyetsiaq Papigatuk, and Kululak Tayara. Thanks also to INRS students who also participated in data acquisition: Pierre-Olivier Carreau, Étienne Lauzier-Hudon. Thanks to Jasmin Gill-Fortin (INRS) for his help with the timelapse photography data. We further thank Valérie Plante Lévesque (INRS), Charles Gignac (INRS), Randy Scharien (University of Victoria), Torsten Geldsetzer (Natural Resources Canada), and Derek Mueller (Carleton University) for their advice and suggestions on this manuscript, and Guillaume Légaré (INRS) for his advice on time-series analysis. Thanks also to the anonymous reviewers whose comments greatly improved this article, and to the editorial team. Thanks to the German Space Agency (DLR) for providing the TerraSAR-X images, and for data processing with the MultiSAR-System. The authors acknowledge the use of TerraSAR-X (©DLR 2017-18). This study was done within the Ice Monitoring project, a research collaboration between the Kativik Regional Government (KRG), Raglan Mine, a Glencore company, Institut national de la recherche scientifique (INRS) and the Northern Villages of Salluit and Kangiqsujuaq.

Financial support

This INRS research was supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage, project number PKC-NST-1617-0003), Raglan Mine, the Kativik Regional Government, the NSERC Discovery Grant and the Northern Research Supplements Program (attributed to Pr. Monique Bernier), the Ministère des Transports du Québec, and the Northern Scientific Training Program (attributed to Sophie Dufour-Beauséjour). Ph.D. scholarships were provided to the first author by NSERC (Alexander Graham Bell Canada Graduate Scholarship – Doctoral) and the W. Garfield Weston Foundation (The W. Garfield Weston Awards for Northern Research).

Chapitre 3

Corrélation ténue entre l'épaisseur de la glace ou de son couvert nival et la rétrodiffusion en bandes C ou X dans trois fjords du détroit d'Hudson au Nunavik



Salluit, mai 2018

Titre de l'article

Tenuous correlation between snow depth or sea ice thickness and C- or X-band backscattering in Nunavik fjords of the Hudson Strait

Auteurs

Sophie Dufour-Beauséjour^{1,2}, Monique Bernier^{1,2}, Jérome Simon¹, Saeid Homayouni¹, 2, Véronique Gilbert³, Yves Gauthier^{1,2}, Juupi Tuniq⁴, Anna Wendleder⁵, Achim Roth⁵

- 1 Institut national de la recherche scientifique
- 2 Centre d'études nordiques
- ³ Kativik Regional Government
- ⁴ Salluit, Nunavik
- ⁵ German Aerospace Center

Titre de la revue

Remote Sensing, un journal publié par *MDPI* Soumis 21 décembre 2020

Contribution des auteurs

J'ai contribué à la conception et à la réalisation des travaux. J'ai effectué l'analyse et l'interprétation des résultats et rédigé l'article. MB a conçu l'étude, interprété les résultats et révisé l'article. JS a effectué l'analyse bayésienne. SH a interprété les résultats et révisé l'article. VG a participé à la conception, la planification et la réalisation des travaux de terrain. YG a participé à la recherche de financement et à la supervision du projet. JT a participé aux travaux de terrain. AW a révisé l'article et effectué l'analyse des images TerraSAR-X; AR a planifié leur acquisition.

Lien avec les articles précédents

Mon premier article a jeté les bases de mon cadre d'analyse en décrivant les processus saisonniers de la glace de mer d'une fjord du Nunavik, soit l'englacement, l'hivernage, la fonte et la débâcle. Cette étude de cas sur la baie Déception portait sur l'information pouvant être extraite de la photographie automatique et de l'imagerie satellitaire RSO en bande X. Dans mon deuxième article, j'étend mon analyse aux fjords voisins de Salluit et de Kangiqsujuaq et j'explore en plus la mesure directe des épaisseurs de neige et de glace et les données polarimétriques de RADARSAT-2.

Résumé

(1) Contexte : La pénétration du radar dans la neige imbibée de saumure sur de la glace de mer est presque nulle, et pourtant certaines publications font état d'une corrélation entre la profondeur de la neige ou l'épaisseur de la glace et des paramètres RSO. Cet article présente une description des distributions spatiales de profondeur de neige et d'épaisseur de glace dans trois fjords du détroit d'Hudson et de leur corrélation ténue avec la rétrodiffusion en bandes C et x. (2) Méthodologie : Des mesures directes d'épaisseur de neige et de glace ont été effectuées dans trois fjords du détroit d'Hudson de 2015 à 2018. La régression linéaire bayésienne a été utilisée pour examiner la relation entre ces épaisseurs et la rétrodiffusion polarisée HH mesurée par les capteurs RADARSAT-2 (bande C) et TerraSAR-X (bande X). (3) Résultats : À la baie Déception, la glace était plus mince qu'il y a 25 ans de 50 cm en moyenne. Aucune corrélation linéaire de plus de 0.3 n'a été observée sauf dans un unique cas où l'épaisseur de la glace était et la rétrodiffusion HH en bande X présentaient un coefficient de corrélation linéaire de 0.6. Le ratio des canaux co-polarisés ne présentait pas une meilleure corrélation avec les variables d'épaisseurs que les coefficients de rétrodiffusion eux-mêmes. (4) Conclusion : La profondeur de la neige et l'épaisseur de la glace ne sont en général pas corrélées avec la rétrodiffusion.

Abstract

(1) Background: Radar penetration in brine-wetted snow-covered sea ice is almost nil, yet reports exist of a correlation between snow depth or ice thickness and SAR parameters. This article presents a description of snow depth and first-year sea ice thickness distributions in three fjords of the Hudson Strait and of their tenuous correlation with SAR backscattering in the C- and X-band. (2) Methods: Thicknesses were directly measured in three fjords of the Hudson Strait from 2015 to 2018. Bayesian linear regression analysis was used to investigate their relationship with RADARSAT-2 (C-band) or TerraSAR-X (X-band) HH backscattering. (3) Results: The ice was 50 cm thinner on average in Deception Bay than 25 years ago. No linear correlations above an r-squared of 0.3 were observed except in a single case where the ice thickness and the X-band HH backscattering presented an r-squared of 0.6. The co-polarization ratio did not perform better than the backscattering coefficients. (4) Conclusion: Snow depth or ice thickness is generally not correlated with HH backscattering.

3.1 Introduction

3.1.1 Context

Seasonal snow and ice covers in Nunavik are affected by the impacts of climate change: Kangiqsujuammiut (people of Kangiqsujuaq, Nunavik, in Canada) have reported later sea ice freeze-up in the fall (Nickels & Knotsch, 2011), as well as less snow on the ground, earlier sea ice breakup in spring, changes in travel routes and more variable winds (Cuerrier *et al.*, 2015). Inuit lives are embedded in the climate change context, and its impacts on sea ice have practical and immediate consequences on personal safety and access to travel and marine wildlife (Laidler, 2006). With shipping traffic in the Canadian Arctic having markedly increased over the last decade (Dawson *et al.*, 2018) and 2040-2064 climate projections for the region showing shorter snow cover periods (Mailhot & Chaumont, 2017), sea ice conditions and their impact on land-use and marine transport will continue to evolve. Yet, historically, the scientific community has undertaken monitoring efforts at scales too coarse to account for regional or local variations in ice conditions (Laidler, 2006).

In this study, we investigate the factors determining snow depth and ice thickness distributions in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq, all Nunavik fjords of the Hudson Strait, as well as their tenuous correlation with HH backscattering in the C- and X-band. This work is relevant due to land use and shipping-related operations by communities and industries in the area and for the sea ice remote sensing community. It is part of the Ice Monitoring project, a collaboration between the Kativik Regional Government, Raglan Mine (a Glencore company), the Northern Villages of Salluit and Kangiqsujuaq, and Institut national de la recherche scientifique (INRS). Both communities' Land Holding Corporations gave their approval for this project. The Avataq Cultural Institute was consulted to ensure the project did not encroach on archaeological sites important to Inuit.

3.1.2 Snow depth and sea ice thickness monitoring at the local scale

Using direct measurements, Iacozza and Barber observed that the periodic distribution of snow depth on smooth first-year sea ice is governed by snowfall and drifting events (Iacozza & Barber, 2010). In Nunavik, Tremblay et al. have characterized snow depth and ice thicknesses on local trails near Kangiqsujuaq, Umiujaq, Kangiqsujalujjuaq, and Kawawachikamach, in the context of increased travel risk due to ice instability and weather unpredictability (Tremblay *et al.*, 2006). Similarly, snow depth and ice thickness were monitored as part of a community-based observation network in Barrow, Alaska, Clyde River, Nunavut, and Qaanaaq, Greenland (Mahoney *et al.*, 2009). More recently, the SmartICE program developed a sled-mounted electromagnetic induction sensor to document ice thickness along travel routes in Nunavut communities (Tremblay *et al.*, 2018; Bell *et al.*, 2014).

3.1.3 Relationship with C- and X-band backscattering

SAR sensors are widely used for sea ice monitoring, both by governments and in scientific communities, due to their ability to operate in the presence of clouds and at night-time (Zakhvatkina *et al.*, 2019). Current applications of this technology include characterizing melt pond fraction (Ramjan *et al.*, 2018; Scharien *et al.*, 2014) and community-relevant sea ice surface roughness (Segal, 2019; Bell *et al.*, 2014), as well as estimating ice stability (Dammann *et al.*, 2019). Recent work by Yackel et al. showed that, prior to melting onset, the daily variance in C- and Ku-band backscattering is correlated with relative snow thickness (Yackel *et al.*, 2019). While the majority of these sea ice applications rely on the C-band (Zakhvatkina *et al.*, 2019), other SAR frequencies like the Ku-, X-, and L-bands have also been investigated (Johansson *et al.*, 2018; Singha *et al.*, 2018; Nandan *et al.*, 2017; Fors *et al.*, 2016). The X-band can adequately discriminate between newly formed ice and its surroundings (Johansson *et al.*, 2018) and is more sensitive to melt onset and surface roughness than the C-band (Eriksson *et al.*, 2010), as well as changes in top-layer snow salinity (Nandan *et al.*, 2017).

Nandan et al. have recently demonstrated the extent to which SAR penetration in a first-year sea ice snow cover is limited by brine (Nandan *et al.*, 2016). They reported a maximum penetration of four cm into the brine-wetted snow for the C- and X-bands. Paul et al. observed that the X-band HH backscattering coefficient was more sensitive to grain size and snow-ice interface temperature than to snow depth or snow water equivalent (Paul *et al.*, 2015). These results raise questions about the nature of the correlations which have sometimes been observed between undeformed sea ice thickness or snow depth and SAR parameters. In the X-band, a linear correlation coefficient of 0.5 between ice thicknesses ranging from 15 to 130 cm and the HH backscattering coefficient was reported over undeformed first-year sea ice (Nakamura *et al.*, 2005). In the C-band, ice thicknesses between 50 and 200 cm presented an r-squared of 0.4 and 0.3 with HH and VV, respectively, which improved to 0.6 with the co-polarization VV/HH ratio (Nakamura *et al.*, 2009). Recent reports describe a strong exponential relationship between ice thickness in the same range and the C-band CP ratio, a parameter developed for compact polarimetry (Zhang *et al.*, 2016). As for the snow cover, Gill et al. noted that a positive correlation between C-band HH backscattering and snow depth is best observed in cold (-7.9°C) than warm conditions (-0.4°C) (Gill *et al.*, 2015). The associated *r*-squared values ranged from 0.3 to 0.8 for incidence angles of 27° to 36°. In contrast, Nandan et al. rather observed that the HH backscattering was greater from a thin snow cover of 4 cm than from snow 8 or 14 cm deep, which they attributed to steeper salinity gradients in thin snow causing enhanced surface scattering (Nandan *et al.*, 2017). They also reported that the HH polarization was more sensitive to snow depth variations than its VV counterpart.

3.1.4 Objectives

This article combines field measurements and remote sensing data in order to characterize seasonal snow-covered sea ice from 2015 to 2018 in three Nunavik fjords of the Hudson Strait. The objectives of this article are to 1) characterize and explain snow depth and ice thickness distributions in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq over three winters (2015-2018) and 2) investigate the empirical relationship between the C- and X-band backscattering coefficients and snow depth and ice thickness. We conclude that snow depth or ice thickness is generally not correlated with HH backscattering.

3.2 Materials and methods

3.2.1 Study areas

The study sites are three neighbouring fjords located along the coast of Nunavik in the Hudson Strait (Figure 3.1). Two of them are home to Inuit communities: Salluit and Kangiqsujuaq. The third, Deception Bay, is located between the two communities, 50 km west of Salluit. Two mining companies have the marine infrastructure in Deception Bay, where their icebreakers transit year-round except from the mid-March to June 1 black-out window (GENIVAR, 2012).



Figure 3.1 – Map of Nunavik in Inuit Nunangat. Inset: Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq.

Freeze-up occurs in November or December and breakup in June or July (Nickels *et al.*, 2005; Gauthier *et al.*, 2018; Greydanus *et al.*, 2018; Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). Monthly total precipitation data from Salluit airport is presented in the supplementary materials (Figure S1). No weather station was operating in Deception Bay during the study and no precipitation data was available from the Kangiqsujuaq airport weather station. The bathymetry maps (Figure 3.2) show maximum water depths greater than 100 m in Salluit, 80 m in Deception Bay, and 200 m in Kangiqsujuaq. Dominant winds and their frequency-weighted combination are also represented in (Figure 3.2) for each site, as reported from observations made by pilots and local experts to NAV CANADA (Hudson *et al.*, 2001) or from Environment Canada measurements between 1963 and 1973 in Deception Bay (GENIVAR, 2012). The difference between high and low tide ranges from 1.5 to 5 m in Salluit, from 2 to 5.5 m in Deception Bay, and from 4 to 8.5 m in Kangiqsujuaq (DFO & Canadian Hydrological Service, 2019). In Deception Bay, GENIVAR measured water salinity between 29 and 33 ppt (GENIVAR, 2012).



Figure 3.2 – Bathymetry (top) and dominant winds (bottom) for Salluit (left), Deception Bay (center), and Kangiqsujuaq (left). Water depth colormaps are based on a different range for each site. Dominant winds are represented as frequency-proportional black arrows. Blue arrows represent the downwind direction of their frequency-weighted combination (scaled to 70% of its length for visualization). Data source: Canadian Hydrographic Service, Fisheries and Oceans Canada, Hudson et al. Hudson *et al.* (2001) and GENIVAR GENIVAR (2012). Basemaps: ESRI, RADARSAT-2 HH images respectively from 2015 on December 19, 26 and 23 (©MDA)

3.2.2 Snow and sea ice thickness measurements

Fieldwork was performed in January-February and April-May of 2016, 2017 and 2018, for each site, except for April 2016 where bad weather prevailed in Salluit (Table 3.1). Snow depth was measured using a meter-rule and ice thickness using a 2.5 cm diameter Kovacs ice auger and measuring tape. Measurements were performed at 20 to 30 target locations arranged in a grid-like pattern over each fjord (Figure 3.3). January 2016 measurements performed before the choice was made to cover the

fjords with a grid-like sampling pattern were rather clustered along the shore. This limits comparison with the following years.

Year	Salluit	Deception Bay	Kangiqsujuaq	
2016	January 25	January 22	January 21	
	-	April 23	April 19 and 20	
2017	January 18 and 19	January 13 and 14	January 10	
	April 27	April 28 and 29	April 25	
2018	January 30	February 1 and 2	January 27 and 28	
	May 9	May 11	May 8 and 15	

Table 3.1 - Fieldwork measurement campaign dates.



Figure 3.3 - January 2018 sampling locations for Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq. Also shown for Deception Bay: the ship track (blue) and wharves (anchor markers). For Salluit and Kangiqsujuaq, community location is indicated with a white star.

3.2.3 Satellite SAR data

3.2.3.1 RADARSAT-2

The Canadian Ice Service secured RADARSAT-2 Wide-Fine Quad-Pol single look complex images for each site from 2015 to 2018 (Table 3.2). The C-band satellite operates at 5.405 GHz (5.55 cm wavelength), with a repeat period of 24 days. Six images were acquired per winter except in 2016, where a Deception Bay acquisition was cancelled. Scene size was 50 by 25 km before subsetting, with a spatial resolution of 5.2 and 7.6 m (range and azimuth, respectively) (MDA, 2018).

Site	Orbit	Acquisition time (LT)	Incidence angle	Acquisition period	Number of images
Salluit	FQW16	6:30	35.4° - 37°	2015-12-19 2018-05-01	18
Deception Bay	FQW16	6:25	35.4° - 37°	2015-12-26 2018-05-08	17
Kangiqsujuaq	FQW17	6:13	36.4° - 38°	2015-12-23 2018-05-05	18

Table 3.2 – RADARSAT-2 acquisition parameters. Local time (LT) is UTC -5 hours.

The RADARSAT-2 images were processed with SNAP's Sentinel-1 Toolbox (version 6.0.0), a European Space Agency (ESA) open-access software. The toolbox was used through java-snap, a Java application made available on Gitlab (Dufour-Beausejour, 2019). After subsetting to the study areas, the data was converted from digital number to sigma-naught radar brightness (Veci, 2015). Speckle filtering was performed over a 7x7 window using the Refined Lee or Polarimetric Refined Lee filter depending on the desired output (backscattering coefficient or covariance matrix). Lee filters preserve image details and contours (Foucher & Lopez-Martinez, 2014). We computed the Cloude-Pottier decomposition to extract the entropy (H), anisotropy (A) and alpha angle (alpha) (Pottier, 2007). Data position in the H-alpha plane provides information on the nature of dominant scattering mechanisms, for instance, surface or volume scattering (Pottier, 2007). The geometric correction was then performed using the Range-Doppler Terrain Correction algorithm using the freely accessible Canadian Digital Elevation Model (Canada, 2015) and nearest neighbour resampling for both the image and the DEM. Pixel spacing after this step was 8 m. After geometric correction, linear sigma

naught was converted to decibels. The co-polarization VV/HH and the cross-polarization VH/VV and HV/HH ratios were computed from linear sigma naught.

3.2.3.2 TerraSAR-X

The DLR secured TerraSAR-X or TanDEM-X acquisitions of StripMap dual-pol single look complex images over Deception Bay from 2015 to 2018. Acquired in ascending orbit 13 at 17:30 local time (UTC -5 hours) with polarizations HH and VV, the images have an incidence angle of 38°. A total of 75 images were acquired between 2015-12-23 and 2018-07-26. The X-band satellites operate at 9.65 GHz (3.11 cm wavelength) with a repeat period of 11 days. Images were acquired in a dual-pol orbit with polarizations HH and VV. The scene size before subsetting to the study area was 15 by 50 km, with a spatial resolution of 0.9 and 2.5 m for range and azimuth, respectively (Eineder *et al.*, 2008).

The DLR data was processed by using their in-house Multi-SAR System (Bertram *et al.*, 2016). This processing includes converting from digital number to sigma-naught radar brightness, multilooking to produce square pixels and increase radiometric quality, geometric correction using bilinear interpolation for the DEM and cubic convolution resampling for the image, and image enhancement to reduce speckle (Schmitt *et al.*, 2015). The output images have a pixel spacing of 2.5 m pixels with a radiometric resolution of 1.6 looks. Linear sigma naught was converted to decibels.

3.2.3.3 Computing SAR backscattering time-series

Backscattering time-series were computed for each case. Areas of interest (AOIs) roughly 120 by 100 m and each containing between 600 and 650 pixels were distributed over the study areas in a grid-like pattern with 0.7 to 1 km separation, avoiding special features like the shore or a ship's track. The Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq study areas counted 35, 43, and 78 AOIs, respectively. Median backscattering was computed over each AOI and then over all AOIs for a given image, yielding a single median value per image. This step was performed using Python (Dufour-Beauséjour, 2019b). For the comparison with the X-band, this step was also performed on the processed TerraSAR-X images as described in Dufour-Beauséjour et al (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b); 32 of the 43 AOIs were covered by the TerraSAR-X images, with a higher spatial resolution.

3.2.3.4 Extracting SAR parameter values coincident with thickness measurements

For every field campaign except those in January 2016, thickness measurements were paired with the image acquired in closest temporal proximity. The relative timing of fieldwork and image acquisitions is presented in the supplementary materials (Tables S1 and S2). We used Python to identify pixels coinciding with sampling locations and to extract the backscattering coefficient value over that location (Dufour-Beauséjour, 2019a). For the comparison between the C-band and the X-band, mean TerraSAR-X values were extracted over a 3x3 pixel window. This corresponds to an area of 56 m^2 , close to the pixel dimension of the processed RADARSAT-2 data.

3.2.4 Statistical tools

3.2.4.1 Geary's C for spatial autocorrelation

We used Geary's C to investigate the presence of autocorrelation in our snow depth and ice thickness measurements. Real environments are structured by physical processes, such as currents and winds, which create gradients and patches (Legendre & Legendre, 2003). In a variable such as snow depth or ice thickness, these features manifest as spatial autocorrelation - nearby measurements take values that are most or less similar than expected for a randomly assigned pair. This dependence violates the independence assumption central to many statistical tests such as Pearson's correlation coefficient. Autocorrelation will generally exaggerate the significance of such a test, for instance lowering its *p*-value (Saas & Gosselin, 2014). Geary's C is a statistic developed to quantify spatial autocorrelation and for which a *p*-value may be evaluated for significance. Positive autocorrelation translates to a C value between 0 and 1, and negative autocorrelation produces values greater than 1; the no-correlation value is C = 1 (Legendre & Legendre, 2003).

3.2.4.2 Bayesian linear regression

We used Bayesian linear regression to investigate a potential linear relationship between snow depth or ice thickness and SAR backscattering in the HH polarization. The advantage of the Bayesian framework, compared to the frequentist approach (e.g. Pearson's correlation coefficient) is that it provides a quantitative evaluation of the evidence against the null hypothesis (Wetzels & Wagenmakers, 2012). It is susceptible to the same caveats as the frequentist approach in cases of spatial autocorrelation: an illusion of more independent data points than there really are, which may for instance exaggerate the relationship between two variables if their spatial structures are aligned (Donegan, 2020). In a Bayesian analysis, different hypotheses are compared to identify which is most likely, and what values its parameters most likely to take on.

Bayesian linear regression is performed in two steps: model fitting and model comparison. During model fitting, Bayes' theorem is used to infer the probability distributions of a given model's parameters based on the observed data (D). This is done for each hypothesis being considered (e.g. H_i and H_j), typically the null H_0 and and a non-trivial hypothesis H_1 . During model comparison, hypotheses are compared by dividing their posterior probabilities $p(H_i|D)$, yielding a Bayes factor K which quantifies the evidence in favor of one of the hypotheses:

$$K = \frac{p(D|H_i)}{p(D|H_j)} = \frac{p(H_i|D)}{p(H_j|D)}$$
(3.1)

where

 $p(D|H_i)$ = the likelihood of the data given model H_i ,

 $p(H_i|D)$ = the posterior probability of model H_i .

If K = 1, the data offers no evidence against H_0 . A value of $K = 10^{0.5}$ is deemed sufficient to give substantial evidence against H_0 , while K = 10 and K > 100 respectively denote strong and decisive evidence (Jeffreys, 1998). We used the Bayes factor to compare a linear-dependence hypothesis H_i with a null hypothesis H_0 , where the parameter associated with the linear dependency is set to zero. Our approach to investigating the linear correlation between variables under a Bayesian framework is similar to the one proposed by Wetzels & Wagenmakers (2012). We assumed a uniform prior
distribution on the parameters and computed the Bayes factor using each hypothesis' maximum probability:

$$K \simeq \frac{p_{max}(H_i|D)}{p_{max}(H_j|D)} \tag{3.2}$$

Further details on Bayesian linear regression and model comparison are provided in the supplementary materials and the source code is available on Github (Simon & Dufour-Beauséjour, 2020).

We explored the dependence of the C- and X-band SAR HH log-scale backscattering coefficient on snow depth and ice thickness by assuming a linear relationship with either snow depth h_s via parameter γ (H_{snow}), ice thickness h_i via parameter δ (H_{ice}), or with both snow depth and ice thickness (H_{both}). From previous studies, we expect $\gamma < 0$ and $\delta > 0$. The dual-linear-dependence hypothesis H_{both} is therefore a function of an offset parameter σ_{HH_0} , linear terms γh_s and δh_i , and a noise parameter η_{σ} , as shown in Eq. 3.3. The null hypothesis H_0 is Eq. 3.3 with both the γ and δ parameters set to zero; the snow-only hypothesis H_{snow} is the same equation with only δ set to zero; the ice-only hypothesis H_{ice} is Eq. 3.3 with only γ set to zero. The most likely hypothesis out of the four (H_0 , H_{snow} , H_{ice} , H_{both}) is the one which surpasses all the others based on the pair-wise Bayes factor K.

$$\sigma_{HH} = \sigma_{HH_0} + \gamma h_s + \delta h_i + \eta_\sigma \tag{3.3}$$

where

 $\sigma_{HH} = \text{backscattering coefficient},$ $\sigma_{HH_0} = \text{offset},$ $\gamma = \text{snow slope},$ $h_s = \text{snow depth},$ $\delta = \text{ice slope},$ $h_i = \text{ice thickness},$

 η_{σ} = backscattering coefficient variability.

3.3 Results

3.3.1 Snow depth and ice thickness

3.3.1.1 Interannual comparisons

Tables 3.3 and 3.4 show mean snow depth and ice thickness for January-February and April-May measurements, respectively. Kangiqsujuaq always presented the deepest snow and thinnest ice (except in January 2017). Snow was deeper in January 2016 than in 2018 (Table 3.3), despite earlier measurements by one week (Table 3.1). Ice thickness at the end of the winter (Table 3.4) was greater in 2016 than in the other two years for both Deception Bay and Kangiqsujuaq; no data is available for Salluit in April-May 2016. Deception Bay presented its thinnest ice cover in 2017, whereas both 2017 and 2018 were similar for Salluit and Kangiqsujuaq.

Table 3.3 – Mean January-February snow depth and ice thickness with standard deviations in parentheses.

	Snow (cm)			Ice (cm)		
Site	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Salluit	15(4)	4(3)	6(2)	78~(6)	74(5)	81 (3)
Deception Bay	11 (6)	8(3)	8(5)	89(5)	62(3)	83 (9)
Kangiqsujuaq	20(7)	10(4)	9(4)	73~(7)	64 (11)	69~(6)

Table 3.4 – Mean April-May snow depth and ice thickness with standard deviations in parentheses.

	Snow (cm)			Ice (cm)		
Site	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Salluit	-	14 (10)	11(7)	-	132 (9)	133(3)
Deception Bay	16(12)	15(12)	8 (6)	143(16)	121 (8)	133(10)
Kangiqsujuaq	24(13)	25(11)	22(11)	117(10)	101 (7)	101 (8)

3.3.1.2 Spatial distribution

Figure 3.4 highlights the spatial distribution of snow depth by showing end-of-winter standardized thickness measurements, color-coded according to their deviation from the mean, and the associated Geary's C value when its *p*-value was above 0.05. In Salluit, snow accumulation is concentrated in the center of the study area in 2017, with a C value of 0.1 indicating strong positive autocorrelation, while being rather heterogeneous in 2018. In Deception Bay, the 2016 distribution is also heterogeneous. In 2017, snow accumulated to the north-west of the study area, around Moosehead Island, as reflected by a C value of 0.2. In 2018, accumulation appears to follow a gradient aligned to the north-east, with the deepest snow along the north-eastern shore and in front of the fjord's transverse arm. In Kangiqsujuaq, snow depth seems to increase along a south-east gradient for the three years, with higher accumulation in front of the community and along the south-eastern shore. Snow depth measurements appear to have a normal distribution truncated at zero (see Figure S2 in the supplementary materials).

Figure 3.5 shows the spatial distribution of ice thickness for the same cases. Geary's C could not be reliably determined for any of the cases. Notable spatial structures in Salluit include thicker ice to the south-west of the study area both in 2017 and 2018. In Deception Bay, the ice was generally thicker along the south-western shore for all years, and thinner around Moosehead Island in 2017. In Kangiqsujuaq, features vary from year to year: thinner ice along the fjord's deepest area in 2016, a south-eastern gradient in 2017, and thicker ice in the north of the broader 2018 study area. Ice thickness measurements are normally distributed (see Figure S2 in the supplementary materials).

3.3.2 C- and X-band SAR backscattering

3.3.2.1 Interannual comparisons

Figure 3.6 shows seasonal median entropy (H) and alpha angle in the C-band, as well as HH backscattering coefficients in the C-band and the X-band when available, for each site and each season. All cases fall in the region of the H-alpha plane associated with surface scattering, i.e. alpha $< 40^{\circ}$ (Pottier, 2007). For Salluit, 2015-2016 stands out with a higher alpha angle than the other seasons, suggesting a bigger volume contribution, and a lower C-band HH backscattering of -21



Figure 3.4 – Standardized end-of-winter snow depth for Salluit (left), Deception Bay (center), and Kangiqsujuaq (right), for 2016 (top), 2017 (middle) and 2018 (bottom). Markers are color-coded according to the measurement's deviation from their dataset's mean: thinner than the mean by one standard deviation (SD) or more (blue), equal to the mean depth (white) or greater than the mean by one standard deviation or more (red). Geary's C is annotated in each case, with either the statistic's value or n/d if its *p*-value was above 0.05. In the background for terrain are 2015 RADARSAT-2 HH images from December 19, 26, and 23, respectively, with the sea ice masked out in gray. White stars indicate Salluit, wharves in Deception Bay, and Kangiqsujuaq. Moosehead Island is marked by a gray ellipse.

dB. Of all the sites and cases put together, Deception Bay 2015-2016 is the closest to the region of volume scattering. Its C-band backscattering is also the lowest with -25 dB compared to -17 dB in the next two years. In the X-band, the backscattering is also lowest that year with -20 dB. The difference in backscattering intensity between the C- and X-band is -5 dB for 2015-2016, zero in 2016-2017, and -1 dB in 2017-2018. For Kangiqsujuaq, the alpha angle was generally higher than for the other sites except in 2017-2018. That year, the C-band HH backscattering was lowest with -20 dB, despite a similar alpha angle than for the two previous seasons.



Figure 3.5 – Same as Figure 3.4 but for ice thickness.

3.3.2.2 Relationship between backscattering and end-of-winter snow depth or ice thickness

The linear correlation coefficient (r-squared) between the C-band HH backscattering coefficient and either snow depth or ice thickness at the end of the winter is between zero and 0.2 for all cases in Salluit. In Deception Bay, it ranged from zero to 0.3 for the C-band and zero to 0.6 for the X-band, and was always zero in Kangiqsujuaq (Figure S3 to S5 in the supplementary materials). We also investigated the following parameters: VV and HV backscattering coefficients, the VV/HH co-polarization ratio, the HV/HH and VH/VV cross-polarization ratios, and the entropy, anisotropy and alpha angle. They did not perform any better than the HH band, as shown in the supplementary materials (Tables S3-S4), except for the HV backscattering coefficient which presented an r-squared of 0.5 with ice thickness in the January 2017 case for Kangiqsujuaq and the alpha angle with both snow and ice thickness in the January 2017 case for Deception Bay, at 0.5 also.



(b)

Figure 3.6 – Seasonal median SAR parameters for Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq in 2015-2016, 2016-2017, and 2017-2018. Top: Alpha angle versus entropy in the C-band, plotted in the Cloude-Pottier H-alpha plane (Pottier, 2007). Bottom: HH backscattering coefficients in the C-band (full markers) and X-band (empty markers).

We focused the Bayesian analysis on the HH polarization, which is most frequently used in the literature. Figure 3.7 shows the most likely hypothesis from the Bayesian linear regression analysis of the relationship between the C- or X-band HH backscattering coefficient and either snow depth, ice thickness, or both. The associated pair-wise Bayes factor K is shown in the supplementary materials (Figures S7 and S8). In the Salluit cases, the most likely hypotheses for 2017 and 2018 were the

null and a negative relationship between C-band backscattering and snow depth, respectively. In Deception Bay, the most likely hypothesis for the C-band in 2016 was a negative relationship with ice thickness, while the null was most likely for the X-band. In 2017, it was a negative relationship with snow depth for both the C- and X-band. In 2018, the most likely relationship was a positive one with ice thickness for both bands. In Kangiqsujuaq, no hypothesis was more likely than the null for the three C-band cases. The mean and standard deviation for each parameter of the hypotheses are provided in the supplementary materials (Figures S9-S12).

C-band	2016	2017	2018	
Salluit		H null	H snow (-)	
Deception Bay	H ice (-)	H snow (-)	H ice (+)	
Kangiqsujuaq	H null	H null	H null	

X-band	2016	2017	2018
Deception Bay	H null	H snow (-)	H ice (+)

Figure 3.7 – Most likely hypothesis in the Bayesian linear regression analysis for HH backscattering vs snow depth and ice thickness, out of the null (H_0 , in white), snow (H_{snow} , in gray), and ice (H_{ice} , in blue). The sign of the linear relationship is identified with a plus or minus sign.

3.4 Discussion

3.4.1 Factors driving snow depth and ice thickness distributions

3.4.1.1 Thicker snow in Kangiqsujuaq

Kangiqsujuaq systematically exhibited greater mean snow depth than the other two sites (Tables 3.3 and 3.4), which is consistent with climate simulation data over the historical 1980-2004 period (Mailhot & Chaumont, 2017). Kangiqsujuaq also consistently presented a thinner ice cover at the end of the winter than the other two sites by at least 20 cm (Table 3.4), which we attribute to the greater thermal insulation caused by its deeper snow cover.

3.4.1.2 Thicker ice in winter 2015-2016

January-February snow depth was greatest in 2016 for all the sites (Table 3.3), despite measurements being one week later in the year than in 2018 (Table 3.1). This may be partly due to precipitation: snowfall measured at Salluit airport was greatest in 2016, particularly in January (Figure S1 in the supplementary materials). In addition, freeze-up in Deception Bay is known to have been two weeks earlier in 2015 than in the next two years (Dufour-Beauséjour et al., 2020b), and snow is expected to be deeper over ice that has formed earlier (Iacozza & Barber, 2010). By April-May, however, the mean snow depth was comparable between 2016 and 2017 for Deception Bay and Kangiqsujuaq (Table 3.4); no data is available for Salluit in 2016. This could indicate that greater 2016 snowfall was exclusive to Salluit or that end-of-winter snow depth does not only depend on cumulative snowfall. For both Deception Bay and Kangiqsujuaq, the ice was thickest at the end of winter 2015-2016 (Table 3.4), which we attribute to a possibly earlier freeze-up in 2015. Indeed, ice formed earlier in the winter can reach greater thicknesses by the end of the growth season (Petrich & Eicken, 2016). Even in 2016 with an average thickness of 1.43 m, the ice in Deception Bay fell short of the historical range. Indeed, the latest measurements probably dating from 1991 gave a thickness of 1.7 to 2 m (GENIVAR, 2007), compared to this study's range of 1.10 to 1.65 for extreme values, and 1.20 to 1.43 on average. The ice in Deception Bay was therefore generally 50 cm thinner during our study than 25 years prior.

3.4.1.3 Spatial structure in snow depth

According to Geary's C, half of the cases presented spatial autocorrelation, while the test was inconclusive for the other half (Figure 3.4). A total of 30 measurement points was sometimes insufficient to get a conclusive statistic. This precluded the use of more advanced spatial structure analysis tools such as correlograms. We therefore conservatively assume all cases presented spatial autocorrelation.

Wind action is known to cause preferential snow accumulation patterns, such as in Van Mijenfjorden, a Norwegian fjord of the Svalbard archipelago (Høyland, 2009). In Salluit, the dominant wind combination leads out to the Hudson Strait (Figure 3.2). We expect snow to be generally transported in and out of the fjord without broad-scale preferential accumulation, which is consistent with the 2018 heterogeneous snow depth distribution (Figure 3.4). Smaller scale spatial structure would then be caused by another factor than wind alone, such as ice surface roughness (Iacozza & Barber, 2010). In 2017 however, snow accumulated in the middle of the study area. C-band backscattering was similar in both seasons, suggesting comparable ice roughness (Figure 3.6). We speculate that dominant winds that year might have been more oriented to the north during depositionnal and drifting events.

In Deception Bay, we suggest that heterogeneous snow depth in 2016 (Figure 3.4) might be associated with the remarkable smoothness of the ice that year, as illustrated by a C-band HH backscattering coefficient of -25 dB (Figure 3.6) and documented in a previous study (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). Snow accumulation around Moosehead Island in 2017 suggests a predominance of the along-fjord dominant winds, both north-western and south-eastern (Figure 3.2). In contrast, greater snow depth along the north-eastern shore and at the outset of the fjord's transverse valley in 2018 is rather consistent with the effect of across-fjord dominant winds. Indeed, transverse winds may be funnelled by valleys leading into the fjord (Kimble & Collaborators, 1946). In Kangiqsujuaq, snow depth consistently exhibited a south-eastern gradient (Figure 3.4), in line with the frequency-weighted combination of dominant winds in the area (Figure 3.2).

3.4.1.4 Spatial structure in ice thickness

None of the cases included enough data to detect spatial autocorrelation using Geary's C. Yet, visual interpretation of the ice thickness distributions (Figure 3.5) shows that the ice was generally thicker towards the south-western end of the study area in Salluit, where the water is more shallow. This is somewhat surprising because shallows accelerate currents, limiting ice growth (Laidler & Ikummaq, 2008). The ice was also thicker along the south-western shore in Deception Bay, where the snow is usually thin. In 2017 and 2018, ice thickness patterns in Deception Bay seemed to mirror those in snow depth, with thicker snow leading to thin ice and vice versa, similarly to observations made in Van Mijenfjorden (Svalbard, Norway) (Høyland, 2009). In Kangiqsujuaq, the ice in 2015 was thinner along the middle of the fjord's length, i.e. in the deepest part. It was thicker in the northern part of the broader study area in 2018, despite deep waters. We speculate that ice formation is more dynamic near the Hudson Strait and potentially included greater ice rafting and other accumulation processes. Near Pangnirtung in Nunavut, fjord outlets are known to present strong currents, even preventing solid ice formation (Laidler *et al.*, 2008). Considering the impact spatial autocorrelation

may have on the relationship between two variables, i.e. inflating confidence in the detection of such a relationship (Saas & Gosselin, 2014; Donegan, 2020), we conservatively assume that ice thickness was autocorrelated in all cases. In future studies, a sampling strategy could be co-developed with land users to capture the spatial structure of ice thickness.

3.4.2 Ice thickness vs C- or X-band backscattering

3.4.2.1 Case A: Thin snow cover

Deception Bay 2018 is one of only two cases where the ice thickness hypothesis was most likely to explain C- or X-band HH backscattering, here through a positive relationship (Figure 3.7). It also presented the strongest Bayes factor supporting a non-trivial hypothesis and a linear correlation coefficient of 0.6 between ice thickness and the X-band (Figures S7-S8 and S4 in the supplementary materials). This case is similar to other Salluit and Deception Bay cases in 2017 and 2018 in that it featured smaller alpha angles and higher backscattering (Figure 3.6) than the smooth ice 2016 case in Deception Bay. Both indicators suggest surface scattering, which we attribute to slightly rougher ice due to freeze-up from nilas patches in dynamic conditions, as confirmed for one of the sites in a previous study (Dufour-Beauséjour et al., 2020b). It stands out from the other slightly rough ice cases with its thinner snow cover of eight cm on average (Table 3.4). We speculate that this shallow snow allowed for interaction between the incident SAR waves and the top layer of the sea ice, contributing to a positive correlation with ice thickness. This correlation may have been mediated by either sea ice surface roughness or top-layer salinity. It might also have been enhanced by north-east snow depth and south-west ice thickness gradients (Figures 3.4 and 3.5). Note that the Deception Bay 2017 case also presented opposite snow depth and ice thickness gradients (Figures 3.4 and 3.5) but with thicker snow of 15 cm on average, and no correlation between backscattering and ice thickness was detected in that case.

3.4.2.2 Case B: Thick snow cover

The three end-of-winter cases from Kangiqsujuaq stand out by their total lack of correlation between either snow depth or ice thickness and the HH backscattering coefficient (Figure S5 in the supplementary materials). Similarly, none of the tested hypotheses was more likely than the null in the Bayesian linear regression analysis (Figure 3.7). We attribute this behavior to the deeper snow found in Kangiqsujuaq compared to the other two sites: 22 to 25 cm on average during the study (Table 3.4). We speculate that no interaction is possible between the SAR waves and the sea ice surface or top layers in the presence of a thick saline snowpack, and therefore no correlation is detected between backscattering and ice thickness.

3.4.2.3 Case C: Very smooth ice

Deception Bay 2016 is the second of only two cases where the ice thickness hypothesis was most likely in the Bayesian analysis, and only for the C-band (Figure 3.7). The relationship is negative, contrary to case A for a thin snow cover. This case stands out due to a lower backscattering coefficient and a higher alpha angle than all others (Figure 3.6). The ice cover was particularly smooth ice due to a thermal freeze-up (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b) and its alpha angle (Figure 3.6) indicates that volume scattering played a more prominent role that year for the C-band than in the other cases (Pottier, 2007). We made the same conclusion for the X-band data in a previous publication (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b). Our observed difference of 5 dB between the two bands (Figure 3.6) is identical to reports by Nandan et al. in a similar case where volume scattering was deemed to be important (Nandan *et al.*, 2016).

In the C-band, the hypothesis for a negative linear relationship with ice thickness was most likely (Figure 3.7). In the X-band, however, the null was most likely and the linear correlation coefficient between snow depth or ice thickness and either frequency's HH backscattering coefficient was zero (Figure S4 in the supplementary materials). The relationship is therefore almost imperceptible and in the opposite direction than in case A for a thin snow cover over slightly rougher ice. We conclude that surface roughness plays an essential role in mediating a positive correlation between ice thickness and surface backscattering even over undeformed first-year sea ice.

3.4.2.4 Relationship with other SAR parameters

The C-band co-polarization and cross-polarization ratios did not perform significantly better than the HH band. The strongest linear correlation coefficient we observed was 0.3 between the crosspolarization ratios and the ice thickness in the Salluit 2017 and 2018 cases (Table S4 in the supplementary materials). This is different from results by Nakamura et al. at a comparable incidence angle of 37° (Nakamura *et al.*, 2009). They reported an improved correlation with ice thicknesses up to 120 cm for the co-polarization ratio (r-squared = 0.6) compared to the correlation with the HH and VV backscattering coefficients themselves (r-squared = 0.4 and 0.3). We were unable to reproduce these results.

3.4.3 Snow depth vs C- or X-band backscattering

There are only two cases where the snow thickness hypothesis was most likely to explain the HH backscattering, both for the C- and X-band: Deception Bay in 2017 and Salluit in 2018 (Figure 3.7). However, the associated linear correlation coefficients are very low, either 0.1 or 0.2 depending on the frequency (Figures S3-S4 in the supplementary materials). These cases are similar to a third, Salluit 2017, in terms of average snow thickness (Table 3.4), position in the H-alpha plane and median HH C-band backscattering (Figure 3.6), and near-zero linear correlation coefficient between the two variables (Figure S3 in the supplementary materials). We were therefore unable to reproduce observations by Gill et al. of a moderate positive correlation (r-squared > 0.5) between snow depths ranging from 5 to 35 cm and C-band HH backscattering at comparable incidence angles of 32° to 36° (Gill *et al.*, 2015).

3.4.4 Interpreting results from a Bayesian linear regression

Despite very low linear correlation coefficients of zero to 0.3 between either thickness variable and the C-band HH backscattering coefficient (Figures S3-S5 in the supplementary materials), the Bayesian linear regression analysis gave a non-trivial hypothesis as more likely than the null for half of the eight cases (Figure 3.7). While these four cases all presented at least substantial evidence (Jeffreys, 1998) against the null hypothesis ($K > 10^{0.5}$), the evidence in the Deception Bay 2018 case was decisive (K > 100) both with the C- and X-band (Figures S7-S8 in the supplementary materials). In that case, the linear correlation coefficients with ice thickness were 0.3 and 0.6 (Figure S4 in the supplementary materials). This illustrates the need to contextualize results from a Bayesian model comparison analysis with a familiar indicator such as Pearson's linear correlation coefficient. The apparent disparity between the Bayesian and frequentist approaches, for example in case A, can be traced back to the fact that the Bayesian linear regression model evaluates the probability that a

linear relationship exists considering the data provided. In contrast, the linear correlation coefficient provides a quantitative assessment of the degree to which the variables are correlated. The Bayesian hypothesis testing allowed us to identify the cases where the null hypothesis was more likely than a linear relationship with either thickness variable. For the other cases, we used it to identify which variable carried the most information about the backscattering coefficient.

3.5 Conclusions

In this article, we combined field measurements and satellite SAR data in order to characterize seasonal snow-covered sea ice from 2015 to 2018 in three Nunavik fjords of the Hudson Strait.

The factors driving snow depth and ice thickness distribution in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq include: (i) greater precipitation in the latter which consistently leads to deeper snow and thinner ice than in the other sites, (ii) freeze-up timing which was earlier in 2015 and led to thicker ice, and (iii) the orientation of dominant winds relative to fjord length which occasionally leads to downwind snow depth gradients. The ice in Deception Bay was 50 cm thinner on average than 25 years ago.

In cases of landfast and undeformed first-year sea ice, we conclude that the necessary conditions for detecting a correlation between sea ice thicknesses above 30 cm and SAR HH backscattering in the C- or X-band are a snow cover thinner than 10 cm and slightly rough ice formed from dynamic processes. In terms of usability for predictions, the correlations we observed in these conditions were poor at best for the C- or X-band, respectively, with r-squared values of 0.2 and 0.6. In cases with snow thicker than 20 cm on average or with very smooth ice, no correlation could be detected with ice thickness. No correlation above 0.3 was observed between snow depth and backscattering. The Bayesian linear regression analysis proved to be useful in categorizing each case according to their most likely hypothesis out of the ones we tested. We were unable to reproduce results showing a correlation either between ice thickness and the co-polarization ratio in the C-band or between snow depth and the HH backscattering coefficient in either frequency.

Backscattering in the C- and X-bands was either different or similar depending on the type of ice. Over smooth ice formed from thermal freeze-up, backscattering from both bands is dominated by volume scattering and their HH backscattering coefficients present a 5 dB difference. Over slightly rougher ice formed from consolidated nilas patches, surface scattering dominates at both frequencies. Their HH backscattering coefficients differ by 1 dB or less.

Code and data availability

The data presented in this study will be available in the public repository PANGAEA in January 2021. They include : (i) SAR parameter statistics at AOIs for every RADARSAT-2 and TerraSAR-X image, (ii) SAR parameter values at snow or ice thickness measurement locations for each case, and (iii) shapefiles of snow depth and ice thickness measurements for each case (Bernier *et al.*, 2017a).

The code used to process the RADARSAT-2 images using ESA's SNAP is available at https: //gitlab.com/sdufourbeausejour/java-snap (Dufour-Beausejour, 2019). The code used to compute SAR parameter median from AOIs is available at https://github.com/sdufourbeausejour/tiffstats (Dufour-Beauséjour, 2019b). The code used to extract SAR parameter values at shapefile feature locations is available at https://github.com/sdufourbeausejour/tiff_at_shp (Dufour-Beauséjour, 2019a).

Supplement

The supplementary materials to this article are available online at REF.

Funding

This INRS research was supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage, project number PKC-NST-1617-0003), Raglan Mine, the Kativik Regional Government, the NSERC Discovery Grant and the Northern Research Supplements Program (attributed to Prof. Monique Bernier), the Ministère des Transports du Québec, and the Northern Scientific Training Program (attributed to Sophie Dufour-Beauséjour). Ph.D. scholarships were provided to the first author by NSERC (Alexander Graham Bell Canada Graduate Scholarship – Doctoral) and the W. Garfield Weston Foundation (The W. Garfield Weston Awards for Northern Research).

Acknowledgments

This work was done within the Ice Monitoring project, a research collaboration between the Kativik Regional Government (KRG), Raglan Mine, Institut national de la recherche scientifique (INRS), and the Northern Villages of Salluit and Kangigsujuaq. The authors would like to thank the Inuit guides who participated in data acquisition: (from Salluit, in alphabetical order) Chris Alaku, Johnny Ashevak, Michael Cameron, Putulik Cameron, Charlie Ikey, Luuku Isaac, Markusi Jaaka, Adamie Raly Kadjulik, Joannasie Kakayuk, Jani Kenuajuak, Pierre Lebreux, Casey Mark, Denis Napartuk, Evetsiaq Papigatuk, and Kululak Tayara; (from Kangiqsujuaq, in alphabetical order): Charlie Alaku, Dany Alaku, Noah Annahatak, Maasiu Arngak, Peter Arngak, Jamie Jaaka, Elijah Ningiuruvik, Joe Pilurtuut, Elijah Qisiiq, Peter Qisiiq, and Adamie Jr. Sakiagak. Thanks also to INRS students who also participated in data acquisition: Pierre-Olivier Carreau, Étienne Lauzier-Hudon, and Valérie Plante Lévesque. Thanks to Claudie Ratté-Fortin (INRS), Erwan Gloaguen (INRS) and Jean-Gabriel Young (University of Michigan) for their advice on statistical analyses. Thanks also to Jasmin Gill-Fortin (INRS) for his help with additional remote sensing products. Finally, thanks to Amélie Rouleau and Charles Levac (Raglan Mine) for their support. The javasnap algorithm used to process RADARSAT-2 data was developed in part during the Polar High Performance Computing Workshop and Hackathon organized by the Polar Research Coordination Network in 2017. Thank you to Adrienne Tivy (Canadian Ice Service), Derek Mueller (Carleton University) and Normand Bergeron (INRS) for reviewing an earlier version of this manuscript.

This study was made possible by Raglan Mine, who financed the Ice Monitoring research project (2016-2019) and provided in-kind support through airplane travelling and logistical support and accommodation in Deception Bay. Thanks to the Canadian Ice Service for securing the RADARSAT-2 images. Thanks also to the German Space Agency (DLR) for providing the TerraSAR-X images and data processing with the Multi-SAR-System. The authors acknowledge the use of RADARSAT-2 (©MDA) and TerraSAR-X (©DLR 2017-18). Jérome Simon received scholarships from the FRQNT and the Vanier Canada Graduate Scholarships program.

Author contributions

Conceptualization, S.D.B., M.B., V.G.; Methodology, S.D.B. and J.S.; Software, S.D.B., J.S., A.W.; Validation, S.D.B., M.B., S.H.; Formal Analysis, S.D.B., J.S., A.W.; Investigation, S.D.B., M.B., J.S.; Resources, V.G., A.R., J.T.; Data Curation, A.R., V.G., J.T.; Writing – Original Draft Preparation, S.D.B.; Writing – Review & Editing, S.D.B., M.B., J.S., S.H.; A.W.; Visualization, S.D.B.; Supervision, M.B., S.H.; Project Administration, M.G., V.G., Y.G.; Funding Acquisition, M.B., V.G., Y.G.

Competing interests

The authors declare no conflict of interest.

Chapitre 4

Communication et relations communautaires dans le cadre du projet de suivi des glaces au Nunavik : la perspective de jeunes chercheuses



Kangiqsujuaq, octobre 2017

Titre de l'article

Our practice of outreach during the Ice Monitoring project in Nunavik: an early-career researcher perspective

Autrices

Sophie Dufour-Beauséjour 1,2 et Valérie Plante Lévesque 1

 1 Institut national de la recherche scientifique

 2 Centre d'études nordiques

Titre de la revue

FACETS, un journal publié par *Canadian Science Publishing* 12 mars 2020 DOI : 10.1139/facets-2019-0021

Contribution des autrices

VPL et moi-même avons conçu cet article de perspective ensemble. J'en ai effectué la planification. J'ai contribué à l'ensemble des activités qui y sont présentées. VPL a contribué à plusieurs de ces activités, dont notamment l'animation d'une table à la Co-op et celles avec les classes de secondaire. Nous avons effectué l'interprétation et la rédaction ensemble.

Lien avec les articles précédents

Les articles précédents présentent les résultats de ma recherche doctorale sur le suivi de la glace de mer. Dans le cadre de mes travaux, j'ai participé à plusieurs activités communautaires visant à informer la population locale des travaux en cours. Ce troisième article décrit les activités auxquelles j'ai contribué et qui remplissent mon troisième objectif de thèse, soit la communication des résultats aux communautés concernées. Il contient également une réflexion sur la pratique des activités de communication communautaire en lien avec la recherche en contexte autochtone. Certains des documents d'information aux communautés discutés dans cet article sont présentés en annexe de la thèse (Annexe III).

Note

Dans le manuscrit publié dans *FACETS*, Mine Raglan est parfois appelée *Raglan* au lieu de *Raglan Mine*. L'appelation a été uniformisée dans la thèse et ce chapitre diffère donc légèrement de la version publiée.

Résumé

Le Inuit Nunangat, incluant le Nunavik, fait l'objet d'une quantité toujours croissante de projets de recherche. Quoique les tendances dominantes en recherche soient de nature coloniale et aient contribué par le passé à l'oppression des peuples autochtones, un nouveau paradigme émerge des recommendations autochtones. Les chercheurs sont encouragés à collaborer avec les communautés, organisations et gouvernements Inuit ou nordiques, et à développer des stratégies de communication pour informer les populations locales. Cet article porte sur des activités de communication et d'engagement communautaire organisées à quelques reprises pendant le projet de suivi des glaces (*Ice Monitoring project*), et auxquelles nous avons participé à titre d'étudiantes au doctorat. Nous partageons des détails sur ce programme d'activités ponctuelles qui inclut une page Facebook, une table d'information à la Co-op, des activités avec les classes du secondaire, et la participation aux forums environnementaux de Mine Raglan. Nous discutons aussi de nos apprentissages et de la transformation de notre pratique au fil de notre implication dans ces activités.

Abstract

Inuit Nunangat, including Nunavik, is seeing an ever-increasing number of research projects. While mainstream approaches to research are colonial in nature and have historically contributed to the oppression of Indigenous peoples, a new paradigm is now emerging from Indigenous recommendations. Researchers are encouraged to collaborate with Inuit or Northern communities, organizations, and governments and to develop communication strategies to keep local populations informed. This paper focuses on outreach activities organized on several occasions throughout the Ice Monitoring project, in which we participated as PhD students. We share details on this periodic outreach program, which included a Facebook page, hosting an information table at the Co-op store, activities with high school classes, and participation in Raglan Mine's Environmental Forums. We also discuss lessons learned and the transformation of our practice.

4.1 Introduction

Inuit Nunangat which includes the Nunatsiavut, Nunavik, Nunavut, and Inuvialuit is seeing an ever-increasing number of research projects; between 1996 and 2011, the number of publications concerning this region increased by 200% (ITK, 2018). Mainstream approaches—the dominant trend—to scientific research are colonial in nature and have historically contributed to the oppression of Indigenous peoples (Smith, 2012; ITK, 2018), including Inuit (Pfeifer, 2018). Today, the research community recognizes the partnership role Inuit must play in research involving people, wildlife, and environment (ITK, 2018). The International Polar Year 2007–2008 hoped to "strengthen the dialogue and links between Arctic residents and the research community", for instance through community outreach activities (International Council for Science, 2004). One of three committees guiding research priorities within ArcticNet, a Network of Centres of Excellence of Canada operating since 2003, is the Inuit Advisory Committee (ArcticNet, 2019), and the network's annual conference showcases many northern speakers and talks relating to Inuit priorities. A new research paradigm is taking form, outlined through principles like ownership, control, access and possession (OCAP; a registered trademark of the First Nations Information Governance Centre, see FNIGC (2019)) of research processes and data, as well as a commitment to the values of respect, equity, reciprocity, equality, and transparency (INQ, 2017a).

The community-researcher relationships are increasingly placed as the heart of the research process (ACUNS, 1998; Nickels & Knotsch, 2011). Yet, "the idea of trusting relationships as a foundation for ethical engagement in research is easy to endorse but difficult to enact" (Ball & Janyst, 2008, p.52). Building relationships based on trust requires researchers to spend time in the community, and it also involves a commitment to the relationship and to community interests, for instance youth training and empowerment (Castleden *et al.*, 2012; Provencher *et al.*, 2013; Tondu *et al.*, 2014; Gérin-Lajoie *et al.*, 2018). Inspiring examples of this include artistic and cinematographic projects (Heath, 2010; Baird *et al.*, 2018), online data diffusion and cartography (Laidler, 2006; Ljubicic *et al.*, 2014; Carter *et al.*, 2018), youth and (or) elder camps (Gearheard *et al.*, 2013; Hirsch *et al.*, 2016; Gérin-Lajoie *et al.*, 2018; Gibson *et al.*, 2018), and community-driven monitoring (Knopp, 2010; Loseto *et al.*, 2018). Outreach or community engagement can be undertaken with scientific activities like announcements on the radio, posters, and school lectures (Castleden *et al.*, 2012) and also with nonscientific activities like playing games and drinking tea (Castleden *et al.*, 2012; Tondu

et al., 2014), as well as spending time with youth, feasting together, and witnessing cultural events (Adams *et al.*, 2014).

Certain projects require that researchers visit a community frequently, or even spend months or years living there, providing an opportunity to build relationships. For others, however, presence in the community can be limited to a few days per year. This is the case for the Ice Monitoring project (Gauthier *et al.*, 2018), a collaboration between local public and private partners as well as university researchers. Data collection for this sea-ice research project in Nunavik's Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq was limited to a day's work, twice per year. In this context, team members could hardly hope to meet more than a dozen or so people in each community, let alone build meaningful relationships.

In this paper, we share details about the Ice Monitoring project's periodic outreach program (Part I), discuss lessons learned (Part II), and explore the transformation of our practice moving forward (Part III). We address the complexity of our position as non-Indigenous early-career researchers participating in a project that includes private partners through a discussion on the perception of our integrity. Before delving into these questions, we first present ourselves, share our hesitation to write this paper, and provide some context on the Ice Monitoring project.

4.2 Author presentation

We are two PhD students (a physicist and a geographer) at the Institut national de la recherche scientifique in Quebec City and share first authorship of this paper. We have a strong background in social justice organization and identify as female euro-descendents. While the outreach activities described in this paper were organized by a large and diverse group of collaborators including northerners as well as academics, the following perspective is that of the two authors, writing here in the first person ("we").

Throughout our involvement in students' rights activism and feminist struggles, we gained an understanding of how certain groups are marginalized and excluded, as is the case for Indigenous peoples in Canada. We learned about Indigenous organizations' and individuals' recommendations for doing research in their communities at the ArcticNet annual meeting, workshops aimed at training early-career researchers to work with northern Indigenous communities, and university courses in feminist studies. During the research project, we continued to educate ourselves through workshops, news outlets—Nunatsiaq News, CBC North, and CBC Indigenous, etc.—and Inuktitut classes, becoming increasingly aware of Inuit calls for self-determination and research decolonization. Finally, we learned by working with Salluimiut and Kangiqsujuammiut (people of Salluit and Kangiqsujuaq), and northerners such as the Kativik Regional Government environmental specialist.

4.3 To publish or not to publish?

Because we dedicated a significant part of our PhDs to participating in the Ice Monitoring project's outreach program, we eventually had to face the question of "making it count" professionally by publishing a paper on the subject. The lack of recognition for time spent on outreach has deterred researchers from engaging in such activities in the past (Provencher *et al.*, 2013). Yet, funding agencies increasingly value outreach as part of a northern research program (Ball & Janyst, 2008; Provencher *et al.*, 2013), and early-career researchers have been encouraged to share their outreach efforts through peer-reviewed publications (Tondu *et al.*, 2014).

Even so, we reflected on what it meant to gain professional recognition from our participation in the project's outreach, worrying that it would cheapen our efforts. For instance, authors have condemned the practice of using community-based research for career building (Mitchell & Baker, 2005; Tuck & Yang, 2012). Ultimately, we decided to write this paper for the following reasons. First, researchers—particularly students—often have a limited number of opportunities to do outreach and cannot rely solely on improving through iteration; consulting the scientific literature on outreach is a good way to improve. Second, sharing our experience with our peers allows us to process our feelings and reflect on our practice and to continue educating ourselves by situating our story relative to what others are doing (Tondu *et al.*, 2014). Third, if outreach is to be understood as integral to the research process, it should involve thoughtful planning, decisions informed by the literature, and the attention to detail shown in other aspects of research.

4.4 Context

4.4.1 Ice monitoring in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq

Sea ice is behaving in an increasingly unpredictable way due to the impacts of climate change in Nunavik (Nickels *et al.*, 2005; Cuerrier *et al.*, 2015). This raises a safety issue for Inuit who travel on the ice to practice traditional activities like hunting and fishing (Tremblay *et al.*, 2008). Ice monitoring in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq—the Ice Monitoring project—is a research project that documents seasonal sea ice in three bays located in northern Nunavik using satellite images, time-lapse cameras, underwater sonars, and fieldwork (Gauthier *et al.*, 2018). The neighbouring Deception Bay is also monitored. Two mining companies have marine infrastructure in this bay; therefore, it sees ice-breaker maritime traffic from 1 June to 15 March—no ice-breaking is allowed during seal calving season (GENIVAR, 2012, p. 228).

The project is a collaboration among the Kativik Regional Government (KRG); Raglan Mine, a Glencore company (Raglan Mine); Institut national de la recherche scientifique (INRS); and the northern Villages of Salluit and Kangiqsujuaq. It was supported by a Polar Knowledge Canada grant called Safe Passage from 2015 to 2018. The academic partner in the project—the Centre Eau Terre Environnement at INRS—is a public university located in Québec City and specialized in interdisciplinary research.

4.4.2 Governmental and industrial partners

KRG is responsible for delivering public services, including in the environment and climate change research sector, as well as technical assistance—regarding management, land use planning, etc.—to the 14 communities of the Kativik region (KRG, 2017). This region includes all of Nunavik except the Cree community and reserved land both designated by the name Whapmagoostui, which are part of the Grand Council of the Crees (Eeyou Istchee)/Cree Nation Government (Whapmagoostui First Nation, 2019). Raglan Mine is a nickel-ore mining company operating in Nunavik. A road network connects their mining complex to Donaldson Airport and to their deep-water harbour infrastructure in Deception Bay. Deception Bay is part of the traditional territory of Salluimiut and is also called Salluit Aippanga—the "second Salluit" (Ruffin & Alaku, 2011). Snowmobile trails



Figure 4.1 – Map of Nunavik showing the locations of Salluit, Deception Bay, Raglan Mine, and Kangiqsujuaq. Inset: Map of Nunavik in Canada. Data source: Boundary Files, 2011 Census (Statistics Canada, 2011).

connect Salluit and Deception Bay, some of them using the frozen bays. Salluit and Kangiqsujuaq are the two communities closest to Raglan Mine infrastructure, and both receive royalties from the mine (Rodon *et al.*, 2013). This geographical proximity (Figure 4.1) leads to many ties between Salluit, Kangiqsujuaq, and Raglan Mine.

4.4.3 History of the research project

KRG identified sea-ice monitoring in Deception Bay as an environmental priority for the area, and Raglan Mine was interested in supporting a climate change research project relevant for the communities of Salluit and Kangiqsujuaq. The research group from INRS, based in Quebec City and with a longstanding history of doing research with northern communities, was recruited as a research partner to conduct data collection and scientific analysis. This laid the groundwork for a locally motivated research project co-designed with the regional government. The northern villages of Salluit and Kangiqsujuaq and their Land Holding Corporations were contacted and gave their approval for the project, including associated activities and instrumentation in Salluit, Deception Bay, and Kangiqsujuaq. The Avataq Cultural Institute was consulted to ensure the project did not encroach on archeological sites important to Inuit. Finally, the Nunavik Marine Region Impact Review Board was contacted to get permission for the deployment of underwater sonars in Deception Bay.

Data collection was performed by a team including local guides from the community, the KRG environmental specialist, and scientists from INRS. The guides were very involved in the work, for instance using the monitoring equipment, brainstorming about fieldwork strategy, helping to recruit other guides, and training youth guides. KRG organized community meetings before and during the Ice Monitoring project, which is the standard procedure for its research collaborations. The organization also coordinated calls on the radio in Salluit and Kangiqsujuaq to inform community members of meetings or fieldwork relating to the project.

4.4.4 The importance of mentorship

As graduate students working in the Ice Monitoring project, we were offered a chance to get involved in science communication activities developed by other members of the research team and their collaborators, specifically the Ice Mission activities described in Part I.

Many of the research collaborators played a significant role in our learning process: a university professor in northern studies and remote sensing, a university research professional involved in outreach, the Kativik Regional Government environmental specialist with a background as a high school science teacher in Kuujjuaq, an Inuit guide living in Salluit, and the Community Outreach Director at Raglan Mine. These individuals also greatly contributed to the outreach program we describe in this paper either in person or through logistical and financial support. Mentorship by northerners was essential to our outreach practice.

4.5 Part I. Periodic outreach program

For the Ice Monitoring project, presence in each community was extremely short: one to several days, twice a year. Outreach activities typically lasted only a couple of hours. Despite their scarcity, the activities were planned in advance and over the course of the project. Table 3.1 shows an inventory of the activities in the project's periodic outreach program, their length, and the number of activities organized in each community. It is important to note that in-community work in the north can be affected by unforeseen circumstances. For example, planned outdoor activities with the Salluit high school were cancelled in 2016 and 2017 due to bad weather or school closures.

Funding was required to pay for time in the communities, where the biggest expense was for accommodations. Research funds (NSERC Discovery Grant—Northern Research Supplements Program,

	Number of times each activity happened:		
	in Salluit	in Kangiqsujuaq	
Facebook page (online in April 2016)			
Table at the Co-op store $(1600-1800)$	0	1	
Ice Mission school activities (1–2 class periods)			
In-class presentation	1	1	
In-class lab	1	5	
Outdoor lab	1	3	
Participation in the Environmental Forum (2–4 d)			
Project booth	1	1	
Question and answer session on the radio	1	1	
Community presentation	1	1	

Table 4.1 - Inventory of the community outreach activities organized during the Ice Monitoring project from 2016 to 2018, with their length and the number of times each activity was organized.

Northern Scientific Training Program) and fieldwork were optimized to plan for a little more time (a half or full day) in each community than what was required for the fieldwork (a day and a half). In the third year of the project, a personal grant from the W. Garfield Weston Foundation paid for three additional days of in-community time in Kangiqsujuaq before fieldwork, coordinated by the graduate student who received the grant. Funding and logistics for in-community time (several days) associated with the Environmental Forums were supplied by Raglan Mine.

4.5.1 Facebook page for the research project

In April 2016, a Facebook page was created for the Ice Monitoring project. The page is called "Ice Monitoring in Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq". Every subsequent team visit to communities was announced on the page and itinerary updates were shared when relevant. The page was promoted on all project posters and communication material and presented as a way to communicate with the researchers and ask them questions. When a community outreach activity was scheduled, it was announced on the page. The choice to focus our online efforts on a Facebook page instead of a website was motivated by the importance of Facebook in Inuit communities (Dunn, 2016; Jérôme *et al.*, 2018) and the challenges associated with internet quality and access in Nunavik (McMahon & Mangiok, 2014). All posts were in English, and the page was managed by one of the two authors.

4.5.2 Table at the Co-op store

An information table was held at the Kangiqsujuaq Co-op store (one of only two stores in the community) for two afternoons in January 2018. This event was coordinated with the Co-op manager two weeks before visiting the community. Following his advice, the table was set-up beside the tills at the entrance during periods of high traffic at the store, i.e., from 1630 to closing time at 1800 on Thursday and Friday. The table featured posters, maps, and fact sheets with snow and ice thicknesses measured over the years. All the material was in English. Many community members stopped at the table, including women and children and Arctic College students from out of town. The table was held by the two authors.

4.5.3 Ice Mission school activities

During the period described in this paper (2015–2018), the Kativik Ilisarniliriniq high school curriculum included a learning and evaluation situation on sea ice called Avativut—the impact of this activity on learner experience is evaluated in Hébert-Houle (2017). Fieldwork in the communities provided a good opportunity to create links between what students were learning on sea ice in science class and research carried out in the community. This included three different activities: (i) an in-class presentation, (ii) an in-class laboratory called the Ice Mission, and (iii) an outdoor activity on ice monitoring. Each activity involved one or both authors, took one or two class periods, and was organized at least once in each community (see Table 3.1). Each community was visited six times for fieldwork from 2016 to 2018. One or more Ice Mission activities were organized during two of these visits in Salluit and five in Kangiqsujuaq.

In-class presentations on the Ice Monitoring project were organized for secondary levels one through five in English and French. These presentations included posters and multimedia, for instance videos of Inuit guides using the ice monitoring equipment during fieldwork. The in-class laboratory involved testing mystery ice samples prepared to mimic lake ice, sea ice, and river ice. Opacity was tested using a flashlight, salinity using a portable refractometer, and porosity by putting several drops of food colouring on the ice surface. Students were guided through the steps and wrote the results on the board, either taking turns around the experiment table or coming up to the front of the class one by one. The outdoor activity was organized during the spring fieldwork. Students, teachers, researchers, and local guides assembled on the sea ice in front of the village. In general, students were separated into groups and shown how to use the ice monitoring equipment. The type of fieldwork changed from year to year, which led to different versions of the activity.

4.5.4 Participation in the Environmental Forum

Raglan Mine has been holding a yearly Environmental Forum in each community since 2016 to present the results of their environmental monitoring to the population. The forum evolved from evening-only community presentations to a 4-day-long event. Scientists from research projects supported by Raglan Mine are invited to participate and communicate news, current results, and plans for the future. In this paper, we focus on the October 2017 and March 2018 editions—both several days long—where the Ice Monitoring project was represented by the KRG environmental specialist and one of the authors.

Information booths were open to the public for 2 or 3 d in the community gym (Kangiqsujuaq) or the community centre (Salluit), with coffee and snacks. The Ice Monitoring booth featured posters and maps, pictures of all the community members involved as guides, a slideshow of fieldwork pictures and videos, some ice monitoring equipment, and fact sheets with results. All documents were in English. Some material was translated to Inuktitut for the October 2018 Environmental Forum, which is outside the scope of this paper. For the question and answer period on the local FM radio, each project was briefly presented, and listeners were invited to call in with questions or comments. A translator relayed the presentations and answers in Inuktitut. During the community presentation evening dedicated to research, each project had roughly 15 minutes. The presentations were given with two speakers, slowly and with simple sentences to facilitate the simultaneous translation from English to Inuktitut. Other forum activities included meetings with local elected officials, activities with the schools, and meetings with land users. Also represented at the Environmental Forum were two research projects in Deception Bay by the Nunavik Research Centre and Caribou Ungava.

4.6 Part II. Lessons learned during outreach efforts

Early-career researchers—including graduate students, post-doctoral fellows, and early-career faculty—in the natural sciences typically feel less equipped to conduct research with northern communities than their colleagues in the social sciences (Sjöberg *et al.*, 2019), and we were no exception. To improve our research practice, we relied on mentorship (as described earlier) and on Indigenous recommendations (Asselin & Basile, 2012; NCAI, 2012; Smith, 2012; INQ, 2017a; ITK, 2018). In the predetermined context of very limited in-community time, only a few of these recommendations felt within our reach: those relative to individual attitudes and communication with community members. On the individual level, we tried to be mindful of our participation in a colonial system and often reflected on how our actions were either reinforcing it or not. In terms of communications, we tried to make the research easy to understand and interesting and to provide opportunities for community members to react to it.

While we did not perform a formal evaluation of our outreach efforts in the scientific sense, for instance through a survey, the activities were designed based on advice from northerners or Indigenous literature on the subject. Furthermore, any comments received on an activity were noted for the next time—for example, having translated material.

4.6.1 Adopting the right attitudes

When presenting to community members or interacting with high school classes, we tried to demonstrate respect for the communities and humility about our work, and put our personality forward to be approachable. We made it our responsibility to find meaningful ways to engage community members and to make our research interesting.

Adopting these attitudes was enriching. It gave us a lot of joy as well as challenges. For instance, putting our "whole selves" out there—as prescribed in NCAI (2012)—and striving to connect with people brought up feelings of vulnerability. Moments before being joined by Kangiqsujuaq's high schoolers on the frozen bay in April 2016, we were excited to meet the teachers and the students, but also nervous. We hoped the activity would be interesting and relevant, and we felt inadequate when we feared that we hadn't fully engaged with the students. It was important to keep in mind that different cultures have different codes, and successful engagement with students from another culture than ours might look different than success at home. In general, the act of caring about our activities was accompanied by intense feelings. These needed to be processed quickly for us to focus on fieldwork—a demanding process requiring emotional resilience. The intensity of this experience

speaks both to the degree of our investment in outreach and to the emotional workload required for us to deconstruct ideas and practices. This work is both necessary and rewarding.

4.6.2 Being mindful of a community's diversity

Researchers have often been warned that their understanding of a community can only be partial and dependent on the people with whom they interacted: "[...] no individual or body represents all the interests or points of view within a community" (Ball & Janyst, 2008, p. 41). Moreover, the colonial relations of power in which research is embedded have universalized the experience of adult males as representative of the whole community (Kermoal & Altamirano-Jiménez, 2016). For example, Indigenous women's traditional knowledge of the land wasn't recognized by settlers, who also excluded them from decision-making (QNW, 2012; Kermoal & Altamirano-Jiménez, 2016; Basile, 2017). This led to Indigenous women being excluded from research, particularly in the case of natural sciences projects (Basile, 2017).

During our visits to Salluit and Kangiqsujuaq, the bulk of our interactions were with the community members who worked on the project as guides. All the people who were suggested as potential guides were men, which led to an all-male guiding team every time. Even so, some women participated in KRG land user meetings about the project. In general, however, interactions with women happened only in outreach activities, which again shows the importance of these initiatives. For example, we particularly enjoyed hosting a table at the Co-op because several women stopped to discuss the project despite being clearly busy. Outreach also served the additional purpose of making ourselves visible and available to community members who didn't work closely with us and who might disagree with the project or have criticisms to voice.

4.6.3 Addressing the perception of our integrity as researchers

In a historical context where research has been used to perpetuate unequal relations of power (Mitchell & Baker, 2005), trust in our integrity as researchers has to be earned. Research is often conducted in partnership with institutions that may have a history of their own with the community, like in the case of mining companies. Many issues are associated with mining on Indigenous territory: its environmental impact and social costs as well as population displacement and the land claims system (O'Faircheallaigh, 2013; Hoogeveen, 2015). With this in mind, it is expected that the communities of Salluit and Kangiqsujuaq may have a multifaceted relationship with Raglan Mine (Rodon *et al.*, 2013).

A significant portion of the Ice Monitoring project outreach program was performed in the context of Raglan Mine's Environmental Forums, which played a major and positive role in improving communications between the project and the communities. The scale of this event offered communication opportunities that went beyond what could have been done without Raglan Mine's logistical and financial support, exemplifying how research partnerships with the industry can foster novel science communication and outreach activities.

This is not to downplay some of the issues we faced during the forums regarding the perception of our integrity. Some people expressed doubt in any result that would come out of the project, thinking that we worked for Raglan Mine. In an event like the Environmental Forum, where the partnership between the researchers and the mine is put front and center, it is not surprising that these questions came up. More generally, it is crucial that they be addressed for researchers to earn and keep communities' trust.

4.6.4 Deconstructing our ideas and practices

A second aspect of our integrity lies in the degree to which our ideas and practices are embedded in colonialism. The ongoingness of colonialism in contemporary research is embodied by the ideas and practices of institutions and individuals alike (Snelgrove *et al.*, 2014; Bird-Naytowhow *et al.*, 2017), including researchers. Transformative learning is being put forward as key to deconstructing colonial ideas and overcoming ignorance (Castleden *et al.*, 2013). In this type of learning, individuals move beyond registering intellectual facts and instead experience a range of emotions, positive and negative. Throughout Part II of this paper we have highlighted ways in which we made ourselves vulnerable by being authentic and caring, and the emotions we experienced as a result of this. Even if the scale of our actions is small, the experience had a profound impact on us. It is not an exaggeration to say that our spirits soared when we successfully engaged community members or that we were crushed when we didn't. Looking back, we identify this experience as a form of transformative learning that helped us in our efforts to disentangle our ideas and practices from their colonial roots.

4.7 Part III. Moving forward

We don't mean to imply that the outreach described in this paper was sufficient. As PhD students stepping into an on-going project, we were overwhelmed by Indigenous recommendations on research, very limited in-community time, funding limitations, and project deadlines. Today, it would be easier for us to navigate these restrictions and find areas in a project where outreach could be included. We would also feel more confident in our instincts of which activities may work best and of the general importance of doing them. Even so, limited in-community time would likely remain a significant hurdle to building outreach programs such as those referenced in the introduction, and as early-career researchers we would still lack influence on the level required for such action.

In the context of "research fatigue", we sometimes wondered if outreach activities could become invasive. Community members may understandably be tired of hearing about research projects and of being solicited time and time again to engage with researchers (Brunger & Wall, 2016). Without having an answer to this question, we feel that certain forms of outreach may put less pressure on people than others. An example of this is the Environmental Forum, where people could hear about three research projects in one sitting. With this in mind, we would focus on communication networks and relationships already existing in the community—for instance collaborating with Youth Fusion employees living in the community and organizing activities with the youth to foster school perseverance (Fusion, 2018).

We would also try to provide more space for local perspectives on the project. The outdoor activity on the ice could include parts in Inuktitut by the guides on the cultural importance of sea ice, including short family stories, and on the work being carried out. Encouraging our Inuit collaborators to participate in presentations about the project would help improve communications: some information could be given in Inuktitut directly and by someone aware of the local reality, instead of by a stranger through translation. This would serve to deformalize the flow of information. A small example of this is the principle local guide for the project now co-administrates the Facebook page and sometimes posts updates on sea-ice conditions.

While no ethics certification was required for the Ice Monitoring project, consulting with the university ethics specialist proved very helpful with regards to the transformation of our practice. We would organize such a discussion early on in a future project. We would for instance like to reflect on how equal weight could be given to opinions about the project whether they be voiced informally at the Co-op or in formal meetings, which would be a way to include more opinions from women. To work with women on the land, one strategy could be to ask guides we've already worked with if their wife, female relatives, or female friends would be interested to guide us as well.

Towards the end of the project, we developed a radio outreach activity about the land that went beyond the scope of the research and originated from the on-going transformation of our practice. This oral expression activity was organized in 2018 with an English class at Kangiqsujuaq high school. It included brainstorming, recording, and listening. Students first came up with open questions like "What type of food do you get from the bay?" and "Where do you like to go on the land?" They then recorded themselves discussing climate change, hunting, mining, and their relationship to the land. With parental consent, the result was aired on CBC Radio One and CKIA 88,3 FM (Quebec City). The class listened to the podcasts (CBC, 2018; CKIA, 2018), which were also shared with the community via the school's Facebook page (http://facebook.com/arsaniqschool/).

4.8 Conclusion

In this paper, we shared details on the periodic outreach activities in which we were involved, hoping to help our peers in their own efforts. We reflected on our experience and outlined lessons learned as well as how we would like to continue moving forward in the transformation of our practice. We refrained from talking about the "decolonization" of research, a process unachievable without the active and conscious involvement of Indigenous peoples themselves. Instead, we focused on actions aligned with this process but still within our reach as euro-descendent researchers.

Many questions remain unanswered. Who is doing outreach? Twelve out of 15 researchers interviewed by (Castleden *et al.*, 2012) about their community-based participatory research were women, as were seven out of nine speakers at a 2018 ArcticNet session on outreach by early-career researchers. This could be linked to the emotional work associated with the deconstruction of power relations, which we feel is inherent to researchers doing outreach in an Indigenous context. The pressure to "engage" with researchers piling on to a community's research fatigue is another point on which we hope more work will be undertaken, particularly since researchers are increasingly asked to engage communities. We wonder, can there be too much outreach? Finally, we've discussed how outreach program in which we participated was led in part by the project's private partner, and the challenges associated with this situation. This begs the question: who should pay for outreach? We leave these questions to the growing community of individuals committed to a better research system.

Acknowledgements

We express gratitude to the communities of Salluit and Kangiqsujuaq for their welcome. In particular, we are grateful to all the community members who worked as guides on the Ice Monitoring project, helped the project along the way, or participated in the outreach activities we presented in this paper. A special thanks to Juupi Tuniq and Pierre Lebreux from Salluit as well as Maasiu Arngak and Peter Qisiiq from Kangiqsujuaq, for their help during outdoor activities with high school students. We also express gratitude to the Kativik School Board for the authorization to do outreach activities with the students as well as the staff at Arsaniq and Ikusik high schools for their warm welcome and support. We extend a heartfelt thank you to Véronique Gilbert, the environmental specialist at the Kativik Regional Environment, for her role in fieldwork coordination, liaison with the communities and other project partners and, on a personal level, for her sustained mentorship. Thank you also to Amélie Rouleau—Public Affairs, Communications and Community Engagement Director—at Raglan Mine, for her enthusiasm regarding outreach. Thank you to colleagues at INRS, particularly to Pr. Monique Bernier, principal investigator on the Ice Monitoring project, as well as Yves Gauthier and Jimmy Poulin, research professionals, for their commitment to community engagement. Thanks also to the interns who collaborated in outreach activities: Pierre-Olivier Carreau and Étienne Lauzier-Hudon. Thank you Catherine Girard, postdoctoral fellow at Université Laval (Sentinel North) and Guillaume Proulx, master student at Université du Québec à Montréal, for their insight on this manuscript. Thanks also to the two anonymous reviewers who provided insightful comments on this manuscript. Thanks to NSERC Discovery Grants—Northern Research Supplements Program and Polar Knowledge Canada (Safe Passage) for funding the fieldwork during which outreach was performed. Thanks also to Raglan Mine for supporting fieldwork and our participation in the Environmental Forum. Thanks to the W. Garfield Weston Foundation for funding an extended stay in Kangiquijuaq. Scholarships were provided to the authors by NSERC, the W. Garfield Weston Foundation, and the Northern Scientific Training Program.

Author contributions

SD-B and VPL conceived and designed the study. SD-B and VPL drafted or revised the manuscript.

Competing interests

The authors have declared that no competing interests exist.

Data availability statement

All relevant data are within the paper.
Chapitre 5

Discussion



Baie Déception, février 2018

5.1 Objectif 1 : Évaluation d'outils de suivi de la glace de mer

Pour répondre au premier objectif de ma thèse, j'ai évalué trois outils de suivi de la glace de mer et de son couvert nival : la mesure directe de leur épaisseur, l'imagerie satellitaire et la photographie automatique. Mes résultats sont présentés dans le Tableau 5.1. Leur originalité réside dans l'utilisation de séries temporelles, la combinaison des outils, les choix statistiques et l'adoption d'un cadre d'analyse saisonnier.

5.1.1 Utilisation de séries temporelles

Imagerie satellitaire RSO

J'ai montré que la rétrodiffusion en bande X de la glace de mer et de son couvert nival présente la même évolution saisonnière que celle en bande C. L'analyse de séries temporelles en télédétection est une technique de suivi éprouvée. La base de données d'imagerie par micro-ondes passives a permis de constater que l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique diminue depuis 30 ans et varie considérablement d'une année à l'autre (Meier *et al.*, 2014; Olonscheck *et al.*, 2019). Les archives du Service canadien des glaces révèlent un englacement plus tardif et une débâcle plus hâtive du détroit d'Hudson (Houser & Gough, 2003), ainsi qu'une baisse de la concentration estivale de glace dans la baie d'Hudson (Mudryk *et al.*, 2018). Enfin, Yackel *et al.* (2007) ont démontré le potentiel de séries temporelles d'images satellites RSO en bande C pour le suivi du *melt onset* et du *pond onset*, soit le début de la fonte et le début de la formation de mares de fonte.

Mon premier article (chapitre 2) présente une application de ce cadre d'analyse à des séries temporelles en bande X. J'y démontre que les traits saisonniers observés en bande C – un signal monotone légèrement décroissant en hiver suivi d'une brusque augmentation de la rétrodiffusion au printemps qui culmine à un maximum avant de redescendre – sont aussi présents en bande X (Tableau 5.1 - h). Cette démonstration est importante parce ce que des indicateurs de fonte comme ceux détectés avec le RSO ont le potentiel d'être corrélés avec le moment où le couvert devient dangereux au transport par motoneige. Mes travaux soulèvent aussi une lacune dans la littérature : deux indicateurs observables dans les séries temporelles en bande X, soit le pic post-englacement (*post-freeze-up peak*) et le début de la période monotone hivernale (*beginning of monotone X-band*), demeurent moins bien compris que les indicateurs printanniers, malgré la piste de réponse des fleurs de givre. Il serait

Résultats pour l'objectif 1 : Évaluation d'outils de suivi de la glace de mer	Englacement	Hivernage	Débâcle
a) La photographie permet de décrire les processus spatiotemporels d'englace- ment et de débâcle à proximité de la caméra ainsi que d'en identifier les dates de début et de fin (chapitre 2).	x		х
b) La co-interprétation de photographie et d'imagerie satellitaire RSO en bande X permet de préciser la description spatiotemporelle des processus de glace de mer saisonnière (chapitre 2).	x		х
c) La rétrodiffusion en bandes C et X augmente avec la rugosité de la glace associée aux conditions d'englacement (chapitre 3).	x		
d) L'écart entre la rétrodiffusion des bandes C et X est petit pour de la glace légèrement rugueuse et grand pour de la glace lisse (chapitre 3).	x		
e) La rétrodiffusion en bande C n'est pas corrélée avec l'épaisseur de la neige ou celle de la glace (chapitre 3).		x	
f) Sur de la glace lisse où elle est dominée par la diffusion de volume, la rétrodiffusion en bande X n'est pas corrélée avec l'épaisseur de la glace ou de la neige (chapitre 3).		x	
g) Sur de la glace légèrement rugueuse et recouverte de neige peu profonde, la rétrodiffusion en bande X, dominée par la diffusion de surface, présente une légère corrélation avec l'épaisseur de la glace (chapitre 3).		x	
j) L'analyse de série temporelle d'imagerie satellitaire RSO en bande X permet d'identifier le début de la fonte printannière et la transition vers la formation de mares (chapitre 2).			x

Table 5.1 – Somm	naire des :	résultats	pour	l'objectif	1.
------------------	-------------	-----------	------	------------	----

pertinent de clarifier si un pic d'englacement est attendu même sans leur formation – à mon avis, oui – et d'en documenter des exemples.

Quoique j'aie d'abord eu l'intention d'étudier la variabilité spatiale de la rétrodiffusion, le signal tempore présentait lui-même une telle complexité que j'ai dû me concentrer sur ce seul aspect. Dans un deuxième temps, il serait pertinent de comprendre pourquoi certaines zones d'intérêt (AOIs)

présentaient des pics d'englacement ou de fonte printannière avec une amplitude plus grande ou plus faible que la médianne sur toute la baie. Les résultats du chapitre 3 montrent par exemple que la rétrodiffusion en bande X et polarisation VV était beaucoup plus variable en 2016-2017 que dans les deux autres saisons à la Baie Déception. C'est d'ailleurs la seule année où le test de Geary confirme la présence d'autocorrélation spatiale, avec une valeur de C = 0.2 (chapitre 4).

L'avènement de capteurs RSO avec des temps de revisite de plus en plus courts, notamment grâce à la mise en orbite de constellations, facilite ce genre d'étude et le rend plus accessible. Le temps de reviste des capteurs TerraSAR-X et TanDEM-X est de 11 jours, déjà deux fois plus court que les 24 jours de RADARSAT-2, mais encore le double des constellations Sentinel-1 et RCM avec des revisites de 6 et 4 jours respectivement. Malgré une tendance à la gratuité des images, avec Sentinel-1 et la constellation RCM par exemple, l'accès aux données RSO demeure limité. Les images RADARSAT-2 et TerraSAR-X sont dispendieuses pour les usagers commerciaux, mais peuvent être obtenues gratuitement à des fins de recherche par le biais de partenariats – avec le Service canadien des glaces et DLR, dans notre cas. Dans mes travaux, j'ai eu accès à des séries uniformes tirées d'une seule orbite à la fois. L'acquisition d'images à des fins de sécurité maritime demeure toutefois une priorité, ce qui peut mener à des trous dans les séries temporelles comme en 2016 dans la série RADARSAT-2 à la baie Déception.

L'accessibilité des différents capteurs dépend aussi de la facilité de traiter leurs données. Chaque capteur présente ses propres défis de traitement et l'ajout d'une nouvelle source de données à un projet implique un gros coût initial en terme de temps. C'est pourquoi je n'ai pas inclus d'images gratuites Sentinel-1 dans mes analyses, par exemple.

Polarimétrie radar

L'analyse des images RADARSAT-2 complètement polarimétriques m'a permis de confirmer l'hypothèse que les processus d'englacement à la baie Déception ont entraîné une rugosité différente entre 2015 et les deux années suivantes, laquelle était perceptible par le RSO. L'acquisition d'images multi-polarisées a constitué une avancée technologique importante pour la classification de la glace de mer et son application dans le suivi des conditions de glace (Zakhvatkina *et al.*, 2019). La comparaison d'une bande co-polarisée avec sa polarisation croisée, par exemple HH et HV, améliore la détection d'eau libre (Zakhvatkina *et al.*, 2019; Canadian Coast Guard & Icebreaking Program,

127

2012). Le ratio des canaux co-polarisés (VV/HH) permet lui aussi de distinguer l'eau libre des autres types de glace, que ce soit en bande C ou en bande X (Ressel & Singha, 2016).

Lors des analyses pour le chapitre 3, j'ai cherché une corrélation entre les épaisseurs de neige ou de glace et un ou des paramètres polarimétriques (voir *Mesures directes et RSO* dans soussection 5.1.2). Bien que l'article porte principalement sur la rétrodiffusion dans la polarisation HH, j'ai aussi testé les ratios polarimétriques (par exemple VV/VH), les paramètres $H/A/\alpha$ de la décomposition de Cloude-Pottier, et des paramètres de texture *Grey Level Co-occurence Matrix* (GLCM) pour chaque bande incluant un paramètre de contraste (HOM), un d'ordre (ASM), et trois de description (MEAN, VAR, CORR) (Hall-Beyer, 2017). Ces résultats ne sont pas présentés dans l'article car les résultats n'étaient pas meilleurs que pour la bande HH. J'aurais aimé étudier aussi les paramètres de la décomposition de Freeman-Durden, mais cet outil n'est pas disponible dans la distribution de SNAP (ESA, 2020h) sur laquelle j'ai basé mon algorithme *java-snap* (Dufour-Beausejour, 2019). Dans le chapitre 3 je mentionne tout de même que j'ai été incapable de reproduire les résultats de Nakamura *et al.* (2009) à l'effet que le rapport des canaux co-polarisés présentait une meilleure corrélation avec l'épaisseur de la glace que les canaux eux-mêmes.

Mon analyse polarimétrique avec la décomposition de Cloude-Pottier a permis de confirmer la différence de rugosité de la glace entre l'année 2015-2016 et les deux années suivantes à la Baie Déception. Peut-être que la position des pixels RADARSAT-2 dans le graphique H-alpha (Pottier, 2007) pourrait être utilisée comme proxy pour cartographier la rugosité de la glace sur toute la zone d'étude. Une analyse similaire par Dammann *et al.* (2018) avec des images ALOS-PALSAR complètement polarimétriques (en bande L, à 1.27 GHz) a toutefois montré que la correspondance entre la décomposition de Cloude-Pottier et la rugosité de la glace n'est pas directe (Dammann *et al.*, 2018). L'article ne précise toutefois pas l'angle d'incidence des données étudiées, lequel peut influencer le résultat puisque les angles d'incidence plus faible sont plus sensibles à la rugosité que ceux plus élevés.

Photographie automatique

Mon analyse de photographies automatiques à la baie Déception se distingue par l'ampleur de la base de données et le niveau de détail des résultats, en intégrant l'information horaire dans une description spatiotemporelle des processus d'englacement et de débâcle. Déjà en 1957, la photographie automatique avait été utilisée pour documenter la débâcle à Nunuk (Point Barrow), Alaska (Gerson, 1958). L'interprétation visuelle de photographies était jugée imprécise et fastidieuse (Gerson & Rosenfeld, 1975). Les techniques modernes permettent toutefois de prendre des photographies couleur, haute résolution et aussi fréquemment qu'à chaque heure sur des périodes de plusieurs mois.

Mes travaux succèdent à ceux de Clerc *et al.* (2012), qui ont documenté les régimes d'englacement et de débâcle à Umiujuaq, Quartaq et Kuujjuaq en analysant des séries temporelles de photographies et des cartes du Service canadien des glaces. Le défi de ce genre d'analyse réside dans l'intégration, soit la «fusion logique de plusieurs éléments d'information sous une forme utilisable et selon un niveau de précision suffisant pour constituer une seule information représentative» (Gouvernement du Canada, 2009a), soit par exemple un processus d'englacement décrit en une ou deux phrases. Mes résultats montrent que la photographie automatique demeure la meilleure méthode d'observation à distance pour la caractérisation des processus d'englacement et de débâcle (Tableau 5.1 - a).

L'acquisition de photographies automatiques demeure sujette à des aléas tels que des bris, et leur utilité pour la surveillance de la glace peut être limitée lorsque la visibilité est nulle à cause de tempêtes. En présence de vent très forts, les images de la caméra Panasonic (chapitre 3) étaient dégradées jusqu'à en être inutilisables, mais seulement pour quelques jours sur trois années. Il n'y a jamais eu de problème de buée avec cette caméra. Lors de certaines tempêtes avec de la neige collante, la lentille était parfois recouverte de neige. La visibilité était aussi parfois limitée par des gouttes de pluie. Ces évènements ne duraient jamais plus que quelques jours, et l'évolution globale du couvert de glace pouvait quand même être documentée. Pour ce qui est de documenter les processus d'englacement et de débâcle, c'était plutôt un avantage qu'un inconvénient de pouvoir déduire les conditions météorologiques dans le fjord.

Avec les outils modernes, il est attendu que les processus d'inspection d'une grande base de données soient automatisés. Toutefois, l'automatisation implique un investissement initial de temps qui peut parfois être trop élevé, voir consistuer un projet de recherche en soi. Pour l'analyse de ma base de données de photographies automatiques, j'ai automatisé le processus d'affichage et de prise de notes sur les photos. J'ai aussi tenté d'automatiser la détection d'un indice de visibilité ou du pourcentage de neige au sol, en utilisant la vision par ordinateur dans Python. Ces résultats ne sont pas présentés dans un article parce que l'indice de visibilité ne m'était pas utile dans mes analyses, et que le pourcentage de neige au sol n'était pas corrélé avec les précipitations solides à la station météorologie que de Salluit. Certaines limites à l'interprétation visuelle des photographies demeurent donc malgré les avancées technologiques : il s'agit d'un processus fastidieux qui ne peut pas être automatisé, et la résolution spatiale des photos est limitée et dépend de la distance des objets par rapport à la caméra. Impossible de distinguer des fleurs de givre (*frost flowers*) sur la glace par exemple, et difficile de résoudre des fractures dans la glace près de la rive opposée à la caméra. La photographie automatique dans un territoire habité pose en plus des enjeux d'éthique et d'acceptabilité sociale. L'installation de caméras peut être perçue comme une opération de surveillance, ou à tout le moins comme présentant un risque pour la vie privée des communautés. Dans un contexte historique où la récolte de données scientifiques sur les territoires nordiques et leurs populations a souvent servi des intérêts privés ou étatiques ayant à l'encontre des communautés autochtones (Stuhl, 2016), ces enjeux éthiques sont incontournables. Sur les photographies que j'ai analysées, il est parfois possible de voir passer des motoneiges : ces données doivent être traitées de façon à protéger le caractère privé des habitudes de fréquentation du territoire par les populations locales.

Les recommandations autochtones favorisent aussi de rendre les données accessibles aux communautés, voir de leur en transmettre le contrôle et la propriété. L'ensemble des photographies acquises par le réseau CAIMAN Bernier *et al.* (2019), incluant celles que j'ai utilisées dans ma recherche doctorale, sont accessibles en ligne pour consultation et téléchargement (http://caiman.ete.inrs.ca). Avant la diffusion des photographies, certaines informations permettant d'identifier des gens (comme des plaques d'immatriculation) ont été brouillées. À la demande des communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq, des caméras à transmission automatique ont été installées sur des sentiers traditionnels; leurs photographies sont disponibles presque en temps réel sur le site web. L'INRS et l'Administration régionale Kativik sont actuellement à la recherche de financement pour transférer la propriété du réseau de caméras et de ses données aux institutions ou communautés du Nunavik.

Mesures indirectes

Sonars

Dans le cadre de ma thèse j'ai supervisé deux stagiaires embauchés pour traiter les données mesurées par deux sonars ancrés dans le fond de la baie Déception depuis l'automne 2015. Un SWIP (Shallow Water Ice Profiler) était ancré proche de l'île Moosehead et un IPS (Ice Profiling Sonar) était quant à lui installé au milieu de la baie, sous le point du trajet des navires de FEDNAV où le MV Arctic doit tourner pour rejoindre le port de Mine Raglan. L'objectif était que le SWIP mesure l'épaisseur de la glace en fonction du temps et que le IPS mesure les variations dans l'épaisseur de glace sous l'effet du passage des navires. Le traitement des données s'est avéré compliqué et ne donner qu'une mesure imprécise de l'épaisseur de la glace. Ces sonars performent mieux dans des situations où la glace est en mouvement et où l'appareil peut parfois mesurer la distance jusqu'à la surface de l'eau libre pour calibrer son détecteur. Sous une banquise gelée tout l'hiver, la précision est moins bonne. Pour mes articles, je me suis donc concentrée sur d'autres sources de données.

Géoradar

Au début de ma thèse, il était prévu que j'utilise un géoradar pour mesurer l'épaisseur de la glace. Le géoradar (ground-penetrating radar) est un appareil portatif qui envoie des impulsions radar vers le sol et capte les échos renvoyés par différentes cibles dans le sol, comme des couches d'eau souterraine ou des tuyaux. Sur de la glace de rivière, l'appareil peut détecter l'interface entre la glace et l'eau et donc déduire l'épaisseur combinée de la glace et de son couvert nival. Avec une fréquence assez élevée, et donc une longueur d'onde assez courte, l'appareil peut aussi détecter l'interface entre la neige et la glace. Sur de la glace d'eau salée, cette technologie souffre toutefois des mêmes enjeux de dispersion que l'imagerie satellite radar. Pendant les deux campagnes de terrain de l'hiver 2016, j'ai effectué des mesures de géoradar à 400 et 900 MHz sur des transects dans chaque baie et en prenant des mesures directes d'épaisseur comme référence. L'analyse avec le logiciel Radan a révélé qu'à 900 MHz, on voyait à peine l'interface neige-glace et seulement quand la neige était peu profonde. L'incertitude sur la mesure était alors de l'ordre de l'épaisseur mesurée. A 400 MHz, l'interface glace-eau n'était que rarement visible et seulement pour de la glace mince. Selon la littérature, des fréquences de 250 MGz et 1 GHz permettent d'améliorer un peu les mesures (Galley et al., 2009). Même avec ces fréquences, le géoradar demeure mésadapté au contexte de la glace de mer et j'ai abandonné cet outil après une discussion avec Ryan Galley.

5.1.2 Combinaison d'outils

RSO et photographie

Mes travaux sont les premiers dans le domaine de la glace de mer à combiner des séries temporelles d'imagerie satellitaire RSO et de photographie automatique de façon systématique. Chacun de ces outils a déjà été utilisé individuellement pour le suivi de l'étendue de la glace (Meier *et al.*, 2014; Cassotto *et al.*, 2015), de la neige (Sobiech *et al.*, 2012; Kępski *et al.*, 2017) ou de glaciers (Zhang *et al.*, 2019; Chauché *et al.*, 2014), et parfois en appui l'un à l'autre (Herdes *et al.*, 2012). En effectuant une analye systématique de chaque source de données puis en les combinant dans une co-interprétation, j'ai pu construire une description spatiotemporelle plus complète des processus d'englacement et de débâcle (Tableau 5.1 - b). Ces descriptions m'ont par la suite permis de confirmer la dépendance de la rétrodiffusion en bandes C et X sur la rugosité de la glace (Tableau 5.1 - c) et de comprendre son influence sur les différences observées entre les deux bandes (Tableau 5.1 - d).

L'utilisation combinée de l'imagerie satellitaire radar et de la photographie automatique est limitée par le fait que certains phénomènes ne se manifestent que dans une techniques : la formation de fleurs de givre et la désalinisation, probablement importants dans le comportement post-englacement du signal en bande X, sont impossibles à voir sur des photographies prises de la rive. De plus, certains processus dynamiques comme l'englacement échappent à la détection satellite à cause de leur rapidité par rapport au cycle de revisite du capteur.

J'aurais aussi pu faire du traitement d'images sur les photographies, pour les orthorectifier par exemple et les projeter dans la même géométrie que les images satellites, ou pour estimer la taille minimale à laquelle un objet peut être résolu sur la photographie selon sa distance. De telles procédures ont par exemple été appliquées au suivi de la glace de rivière (Daigle *et al.*, 2013; Dubé *et al.*, 2015). J'ai manqué de temps pour le faire, mais il serait intéressant d'étudier la signature optique des photographies orthorectifiées et tenter d'établir une classification automatique du type de glace, par exemple en les comparant avec les images satellites. Ce genre de travaux consisterait en une combinaison plus avancée que la co-interprétation que j'ai faite dans le chapitre 3.

Photographie et cartes de glace

Dans une analyse que je n'ai finalement pas inclue dans le chapitre 3, comparé les dates d'englacement déduites de photographie aux séries temporelles de concentration de glace tirées des cartes du Service canadien des glaces. J'ai montré que le plafonnement de la concentration de glace à des valeurs de 9/10 ou plus est un bon indicateur de l'englacement (Tableau 5.1 - d), et que l'analyse du Service canadien des glaces est parfois interrompue avant l'englacement des fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq (Tableau 5.1 - c). L'estimation de l'englacement ne fait pas partie des objectifs du Service canadien des glaces. Par contre, leurs cartes de glace sont une source de données incontournable dans le suivi de la glace de mer au Canada. Il est donc toujours pertinent de chercher de nouvelles applications potentielles de ces produits. C'est d'autant plus vrai aujourd'hui, alors que les réalités autochtones sont de plus en plus mises de l'avant quand il est question d'enjeux nordiques.

Historiquement, les services nationaux de glace ont été créés pour offrir du support logistique aux opérations maritimes industrielles et militaires (Beaton & Markham, 2009). Des projets pilotes ont récemment eu lieu pour que les intérêts des utilisateurs de la glace soient eux aussi servis par l'analyse du Service canadien des glaces. Le projet *Ice Information for Northern Emergency Management* en particulier a montré que le système de classification utilisé par les services nationaux, soit le *EGG code*, n'est pas approprié aux besoins des communutés et que les périodes les plus importantes sont l'englacement et la débâcle, où le risque est maximal (Wilson & Zagon, 2017).

Mesures directes et RSO

Malgré des succès mitigés, restreints à la glace mince (Zhang et al., 2016, 2013; Shih et al., 1998; Nghiem et al., 1997) et à la glace déformée (Casey et al., 2014; Kim et al., 2012), la communauté scientifique cherche encore à établir une corrélation entre le signal radar et l'épaisseur de la glace de mer ou de son couvert de glace. Certaines publications font d'ailleurs état d'une telle corrélation, comme ceux de Nakamura et al. (2009) et Zhang et al. (2016) pour la glace et Gill et al. (2015) pour la neige. La pénétration du signal radar dans ces cibles est pourtant presque nulle (Nandan et al., 2017). J'ai donc tenté de reproduire l'observation de ces corrélations, sur huit cas répartis entre trois sites et trois années. Mes travaux montrent une corrélation faible ou nulle entre l'épaisseur de la glace ou de la neige et la rétrodiffusion en bandes C (Tableau 5.1 - e) et X (Tableau 5.1 - f,i). Les données sont peut-être affectées par la différence d'échelle entre le pixel d'une image radar et la mesure directe d'épaisseur; cette dernière ne représente pas nécessairement l'épaisseur moyenne sur la surface du pixel. Mes résultats sont néanmoins cohérents avec ceux de Nandan et al. (2016) à l'effet que le signal radar ne pénètre pas jusque dans la glace de mer lorsque celle-ci présente un couvert nival. Ils montrent surtout la difficulté de reproduire les quelques études qui font état d'une corrélation entre les épaisseurs de glace ou de neige et la rétrodiffusion.

En plus de ce qui est montré dans le chapitre 3, j'ai aussi tenté de contrôler pour différents paramètres supplémentaires pouvant masquer une éventuelle corrélation. Le fait de tenir compte de la température de l'air au moment de l'acquisition de l'image radar ou de la rugosité de la neige ou de celle de la glace n'ont pas non plus permis d'améliorer le coefficient de corrélation linéaire entre les variables. Le fait de combiner plusieurs campagnes de mesures ensemble n'a pas non plus donné de meilleure corrélation, ce qui soutient l'hypothèse que la relation entre la rétrodiffusion et le couvert de glace et de neige dépend de leur historique (processus d'englacement, précipitations et redistribution de la neige, désalinisation, etc.).

Des paramètres comme la densité de la neige ou la grosseur des grains de neige sont intimement liés à la rétrodiffusion. Ils sont essentiels pour modéliser le signal radar : des cristaux plus gros dans les couches inférieures de la neige peuvent entraîner une plus grande diffusion de volume par exemple. Lors des deux campagnes de 2018, j'ai mesuré ces paramètres dans des fosses à neige avec comme objectif de comparer un modèle de rétrodiffusion aux observations faites par capteur. Une simulation préliminaire effectuée avec le modèle de Geldsetzer *et al.* (2009) pour des paramètres génériques de grosseur de grain, de salinité et de température de la neige avait donné des résultats très éloignés des observations. Le modèle donnait une rétrodiffusion de l'ordre de -10 dB en bande C et X et pour les polarisations HH et VV, tandis que la rétrodiffusion mesurée par les capteurs était plutôt de l'ordre de -20 dB au maximum. Le lien entre la modélisation et les images aquises par les capteur demeure difficile à établir et consiste en un champ de recherche en soi.

5.1.3 Choix statistiques

Analyse bayésienne

Dans le chapitre 3, j'ai exploré les liens qui unissent la profondeur de la neige et l'épaisseur de la glace à la rétrodiffusion radar. Pour ce faire, j'ai choisi d'explorer l'approche bayésienne plutôt que l'approche fréquentielle.

L'approche fréquentielle estime la probabilité d'avoir observé les données expérimentales étant donnée une certaine hypothèse (Ellison, 2004). Une formulation typique issue de cette méthode serait par exemple que «l'hypothèse nulle est rejetée puisque la *p*-value est inférieure au seuil de 0.05». L'approche bayésienne estime plutôt la probabilité qu'une certaine hypothèse soit vraie étant donnée les résultats de l'expérience (Ellison, 2004). Dans l'approche bayésienne, il est nécessaire de fixer arbitrairement la probabilité *a priori* de chaque hypothèse. Cet élément de subjectivité est souvent au coeur des critiques du cadre bayésien. Les critiques de l'approche fréquentielle lui reprochent que ses résultats soient quasi-systématiquement mal interprétés, à un point tel que la *American* Statistical Association a publié en 2016 des lignes directrices sur l'utilisation de la *p*-value (Baker, 2016). Les conclusions de l'approche bayésienne répondent plutôt à une question simple : «quelle est la probabilité que cette hypothèse soit vraie?» (Orloff & Bloom, 2014a). Cette approche connait un regain d'intérêt avec l'avènement d'ordinateurs assez puissants pour en effectuer les calculs. Elle est de nouveau appliquée dans des domaines allant de la psychologie (Wetzels & Wagenmakers, 2012) à l'écologie (Ellison, 2004), particulièrement dans des problèmes d'apprentissage machine (machine learning) (Orloff & Bloom, 2014a). Je l'ai choisie pour sa facilité d'interprétation et ses fondements épistémiques.

Les hypothèses que j'ai testées pour chacune de mes variables, toutes des relations linéaires, auraient aussi pu être testées dans l'approche fréquentielle avec un test de Pearson, où leur coefficient de corrélation linéaire (accompagné d'une *p*-value indiquant si le test est fiable) aurait été comparé à celui attendu pour une relation linéaire parfaite. Pour le cas de la rétrodiffusion, il aurait fallu étudier la corrélation linéaire partielle pour chacune des deux variables (épaisseur de la neige et de la glace). D'autres tests comme ceux de Spearman ou Kendall (corrélation entre les rangs des données) auraient aussi pu être utilisés. Je fournis d'ailleurs les coefficients de Pearson pour chaque problème dans mon article, puisqu'il s'agit d'une statistique descriptive dont l'interprétation est directe et avec laquelle la communauté scientifique est en général familière. Dans des travaux préliminaires, j'avais aussi testé les coefficients de Spearman et de Kendall : ils ne permettaient pas de détecter un lien monotone non-linéaire plus fort que la relation linéaire détectée par le coefficient de corrélation linéaire.

Structure spatiale

«[Data] that are close together in space are often more alike than those that are far apart» – les échantillons rapprochés dans l'espace se ressemblent plus que ceux qui sont éloignés, selon la première loi de la géographie de Tobler citée par Saas & Gosselin (2014). La structure spatiale, monnaie courante dans les environnements réels, se présente généralement sous forme de gradients ou de parcelles (*patches*) (Legendre & Legendre, 2003). L'échantillonnage d'une variable qui présente de l'autocorrélation spatiale donne des résultats semblables à ceux d'un échantillonnage répété du même endroit : une variance plus grande qu'elle ne devrait l'être et une plus grande incertitude sur les paramètres estimés, causées par un déficit d'information (Donegan *et al.*, 2020). Lors de la comparaison entre deux variables qui présentent par exemple des gradients, leur covariance sera soit exagérée si les gradients sont alignés soit minimisée s'ils sont orthogonaux (Donegan, 2020). Puisqu'elle enfreint la condition d'indépendance des tests statistiques (Legendre & Legendre, 2003), l'autocorrélation spatiale peut exagérer la corrélation entre deux variables via un p-value plus petite (Saas & Gosselin, 2014). En général, que ce soit dans les analyses statistiques fréquentielles ou bayésiennes, il est donc déconseillé de tester des hypothèses qui ne tiennent par compte de la structure spatiale (Donegan, 2020).

L'autocorrélation spatiale est omniprésente dans les études sur la neige et la glace : la topographie des rives et la bathymétrie influencent par exemple l'accumulation de la neige et la vitesse du courant, donc l'épaisseur de la glace, et la neige a tendance à s'auto-organiser en dunes (Iacozza & Barber, 2010). L'analyse bayésienne que j'ai présentée dans le chapitre 3 ne tient pas compte de la structure spatiale. J'ai tenté de quantifier quantifier l'autocorrélation spatiale dans les données d'épaisseur de glace et de neige à l'aide du C de Geary. Dans les quelques cas où il était concluant, le test indiquait en effet la présence d'autocorrélation spatiale. Dans l'interprétaiton des résultats du chapitre 3 (Tableau 5.1 - e, h, i), je considère donc que tous les cas sont susceptibles de présenter de la structure spatiale. Il est impossible de strictement prouver l'absence de corrélation (Orloff & Bloom, 2014b). Dans les cas où j'ai observé une légère corrélation entre les valeurs d'épaisseur et la rétrodiffusion, elle était peut-être causée par la structure spatiale dans les variables d'épaisseur, particulièrement à la baie Déception.

Si les variables que j'ai étudiées avaient présenté une corrélation suffisamment forte pour tenter d'en extraire des prédictions, j'aurais pu tenir compte de la structure spatiale en la modélisant à l'aide de variogrammes (Legendre & Legendre, 2003). Des travaux visant à cartographier la variation spatiale des couverts de neige et de glace pourraient se baser par exemple sur le krigeage avec tendance qui permet d'interpoler des données qui présentent un gradient, voir le krigeage avec dérive externe où la moyenne de la variable d'intérêt est modélisée comme étant une fonction d'une variable secondaire (St-Hilaire & Gloaguen, 2018). Dans le cas présent, les corrélations observées étaient si faibles que ça ne valait pas la peine.

5.1.4 Adoption d'un cadre d'analyse saisonnier

Par « adoption d'un cadre d'analyse saisonnier » je veux dire que j'ai mis de l'avant l'évolution temporelle de mon sujet d'étude, plutôt que de travailler image par image ou de les comprimer en une moyenne annuelle. J'ai choisi les saisons de la glace pour structurer mon analyse parce qu'elles sont intrinsèquement liées au sujet d'étude, en plus de correspondre au rythme de l'utilisation de la glace par les communautés locales – l'englacement et la débâcle étant les périodes les plus risquées, comparativement à l'hivernage. Ce faisant, j'emprunte notamment aux travaux de Laidler sur la géographie humaine de la glace de mer (Laidler & Elee, 2008; Laidler *et al.*, 2008; Laidler & Ikummaq, 2008), à ceux de Barber, Yackel et d'autres sur l'évolution saisonnière de la rétrodiffusion issue de la glace de mer (Geldsetzer *et al.*, 2015; Scharien *et al.*, 2014; Yackel *et al.*, 2007; Barber *et al.*, 1992) et à ceux de l'INRS sur la description des processus d'englacement et de débâcle au Nunavik à l'aide de la photographie automatique (Clerc *et al.*, 2012). J'ajouterais que l'englacement, l'hiver et le printemps sont trois des cinq saisons identifiées par des membres de la communauté de Salluit dans le cadre d'une étude sur le transport maritime (Greydanus *et al.*, 2018).

L'importance que j'ai accordée au contexte saisonnier du sujet d'étude m'a permis de mieux interpréter mes résultats. Sans cette analyse, je n'aurais pas pu montrer que la bande X présente une légère corrélation avec l'épaisseur de la glace quand celle-ci est légèrement rugueuse et que la neige qui la recouvre est peu profonde (Tableau 5.1 - g), mais aucune quand elle est lisse (Tableau 5.1 - f). Pareillement, grâce au contexte d'englacement j'ai pu montrer que les rétrodiffusions en bandes C et X sont toutes deux sensibles à des différences de rugosité entre deux couverts non déformés (Tableau 5.1 - c), et que l'écart entre elles augmente avec cette rugosité (Tableau 5.1 - d).

Dans mes recherches, j'ai essayé de classifier les images satellite à l'aide d'une classification non supervisée K-means. Toute la glace des fjords est à toute fin pratique de la glace lisse de première année (par opposition à de la glace déformée ou de la vieille glace), et l'identification des classes était difficile. J'ai aussi développé un algorithme de classification multi-temporelle pour tenter de segmenter le couvert de glace en zones présentant un comportement saisonnier différent. Les variables du K-means étaient alors la rétrodiffusion VV, HV et HH de chaque image dans la série temporelle. Après une segmentation sur la base de l'historique saisonnier de la banquise, certaines classes de glace présentaient une certaine corrélation entre l'épaisseur de la glace et la rétrodiffusion et d'autres aucune. Il est toutefois possible que ces classes aient présenté plus de structure spatiale que les autres. Néanmoins, la classification multi-temporelle demeure une avenue intéressante pour comprendre quelle information sur l'historique saisonnier de la glace de mer est emmagasinée et transmise dans sa rétrodiffusion. Le cadre d'analyse saisonnier m'a aussi permis d'identifier des zones d'ombre dans les types de suivi de la glace de mer qu'il nous est permis de faire avec les outils technologiques actuels : l'arrêt de l'analyse du Service canadien des glaces avant l'englacement de certains fjords du détroit d'Hudson (Tableau 5.1 - c), mais aussi l'invisibilité de la fonte de la glace par en-dessous sous l'effet des courants, un processus déterminant dans l'analyse des risques liés au transport (Laidler & Ikummaq, 2008), et la difficulté d'observer certains obstacles au transport par motoneige tels que des trous, craques ou petites zones de glace mince. Aucune des techniques évaluées ou leur combinaison ne permet de suivre ces derniers aléas, pourtant au coeur des enjeux de sécurité sur le territoire (Wilson & Zagon, 2017).

5.2 Objectif 2 : Description des processus saisonniers de glace de mer aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq de 2015 à 2018

Afin d'atteindre le deuxième objectif de ma thèse, j'ai produit une description des processus saisonniers de glace de mer aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq sur trois hivers entre 2015 et 2018. Mes résultats, présentés dans le Tableau 5.2, sont rassemblés sous les thèmes de l'englacement, de l'hivernage et de la débâcle. Une dernière section porte sur le potentiel de co-interprétation des résultats avec des membres des communautés.

5.2.1 Englacement

Mes travaux ajoutent à la littérature scientifique une première description de l'englacement à la baie Déception depuis 1991. Sur le plan historique, des observations faites par le gérant du poste de traite de la Compagnie de la baie d'Hudson entre les années 1914 et 1939 à Kangiqsujuaq faisaient état d'un englacement à la deuxième semaine du mois de novembre de 1914 à 1925, puis dans sa troisième semaine de 1930 à 1939 (Philie, 2016). Actuellement dans le détroit d'Hudson, la tendance est à un englacement plus tardif au début décembre, ce qui correspond aux informations contenues dans le *Sea Ice Climatic Atlas: Northern Canadian Waters 1981–2010* du Service canadien des glaces (Fequet *et al.*, 2011), et à un épaississement plus lent de la glace (GENIVAR, 2007). À la baie Déception, l'englacement débute typiquement au milieu de la baie, se propage au sud-est jusqu'à la rivière Déception, puis se poursuit au nord-ouest vers le détroit d'Hudson (ROCHE & CANARCTIC (1993) dans GENIVAR (2007)).

Mes résultats établissent des dates d'englacement précises pour Baie Déception de 2015 à 2017 (Tableau 5.2 - a), ainsi qu'une description détaillée de deux processus d'englacement dans ce fjord (Tableau 5.2 - b). En 2015, la glace s'est formée plus tôt et dans des conditions calmes, recouvrant la baie par croissance thermique. En 2016 et 2017, la glace s'est plutôt formée par une consolidation de plaques de nilas. Ces processus ont respectivement mené à de la glace soit très lisse en 2015 soit légèrement rugueuse en 2016 et 2017 (Tableau 5.2 - d), tel qu'attendu (Laidler & Ikummaq, 2008). J'ai aussi observé un englacement légèrement plus hâtif – d'une ou deux semaines – en 2015 que

Résultats pour l'objectif 2 : Description des processus saisonniers de glace de mer	Englacement	Hivernage	Débâcle
a) Base de données des dates d'englacement et de débâcle à la baie Déception (chapitre 2).	x		x
b) Deux processus d'englacement ont été observés à la baie Déception pendant l'étude : croissance thermique de la glace à partir de la rive nord-est dans des conditions calmes en 2015 et consolidation de plaques de nilas en 2016 et 2017 (chapitre 2).	x		
c) Un englacement plus tôt en 2015 pour les trois sites a mené à un couvert de glace plus épais (chapitre 3).	x		
d) La glace formée par croissance thermique était plus lisse que celle formée par la consolidation de plaques de nilas (chapitre 2).	x		
e) Base de données d'épaisseurs de neige et de glace aux trois sites (chapitre 3).		x	
f) Des vents dominants contraires au sens du fjord à la baie Déception et Kan- giqsujuaq favorisent parfois l'accumulation de la neige sous forme de gradient (chapitre 3).		х	
g) La distribution spatiale de la neige à Salluit ne présente pas de gradient d'une rive à l'autre puisque les vents dominants y sont alignés avec le fjord.		х	
h) La neige est plus épaisse et la glace plus mince à Kangiqsujuaq (chapitre 3).		x	
i) Deux processus de débâcle ont été observés à la baie Déception pendant l'étude : fonte à partir du fond de la baie jusqu'à son embouchure en 2016 et 2017 et fonte le long de fractures laissées dans la glace par les brise-glaces en 2018 (chapitre 2).			х
j) Le printemps était de trois à quatre semaines plus tard en 2018 qu'en 2016 et 2017 (chapitre 2).			х

Table 5.2 – Sommaire des résultats pour l'objectif 2.

les deux prochaines années pour Salluit et Kangiqsujuaq, en me basant sur les cartes du Service canadien des glaces (Tableau 5.2 - c). Les dates d'englacement observées pendant l'étude sont en accord avec la littérature (Fequet *et al.*, 2011; ROCHE & CANARCTIC, 1993; Gignac *et al.*, 2019).

Selon un rapport publié par Gauthier *et al.* (2019), l'englacement 2018 à la baie Déception s'est déroulé comme en 2016 et 2017, c'est-à-dire par consolidation de plaques de nilas; l'englacement thermique de 2015 fait donc figure d'exception.

Aucun transport par brise-glace n'a eu lieu à la baie Déception pendant les trois périodes d'englacement que j'ai étudiées, malgré qu'il soit permis. Il est donc difficile de spéculer sur ses impacts potentiels. En l'absence de caméras à Salluit et à Kangiqsujuaq, je n'ai pas pu effectuer une description détaillée de leurs processus d'englacement. L'assemblage d'une base de données d'images satellitaires de sources différentes est fastidieux, et ne donne qu'un résultat approximatif. À titre d'exemple, Gauthier *et al.* (2018) sont parvenus à réduire l'estimation de la date d'englacement en 2015 beaucoup plus que moi, présumément en trouvant plus d'images satellitaires (optiques et RSO), ce qui démontre les défis de cette analyse. Un autre enjeu est que l'englacement d'une baie se déroule sur plusieurs jours; par exemple, la zone d'étude de mon article publié dans *The Cryosphere* est couverte de glace en moyenne de une à deux semaines avant le reste de la baie Déception (Gauthier *et al.*, 2018).

Finalement, la date à laquelle la baie est recouverte de glace pour de bon n'est peut-être pas l'indicateur d'englacement le plus pertinent pour la sécurité sur le territoire, même si c'est celui que j'ai réussi à observer. Pareillement, bien qu'un certain degré de rugosité de la glace puisse en effet nuire au transport en motoneige (Wilson & Zagon, 2017), ce ne sont pas toutes les échelles de rugosité qui auront un impact sur celui-ci. Les études sur ce front sont prometteuses, incluant une cartographie de la rugosité de la glace déformée à l'aide d'interférométrie en bande X et de photogrammétrie aérienne dans une zone de sentier traditionnels à Utqiagvik en Alaska (Dammann *et al.*, 2018) et l'interprétation d'images RSO à haute résolution par des membres des communautés de Kugluktuk et Cambridge Bay au Nunavut (Segal, 2019).

5.2.2 Hivernage

Ma recherche doctorale contribue à la littérature scientifique une première cartographie quantitative de l'épaisseur de la glace et de son couvert nival aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq. En effet, peu d'études sur la glace de mer ont été documentées dans la littérature pour les communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq et leurs environs. Dans le rapport GENIVAR (2007), la glace à la baie Déception était réputée atteindre une épaisseur maximale de 1.7 à 2 mètres, vers la fin mai. Elle est de plus en plus mince depuis l'année 2000, selon des chasseurs de Salluit (GENIVAR, 2007). Le projet *Unikkaaqatigiit: Putting the human face on climate change* - *Perspectives from Inuit in Canada* inclut des rapports d'Inuit de Kangiqsujuaq à l'effet que les hivers sont plus tempérés, qu'il y a moins de neige sur le territoire et qu'elle est différente, que la glace est plus mince, se forme plus tard et que la débâcle est plus tôt qu'avant (Nickels *et al.*, 2005). L'interaction entre ces changements est complexe, comme l'illustre une observation contraire d'un Inuit de Kangiqsujuaq à l'effet que la glace était plus épaisse depuis cinq ans, un effet qu'il attribuait à un couvert de neige plus mince qu'avant (Cuerrier *et al.*, 2015).

Récemment, les membres de la communauté de Salluit ont été invités à participer au projet Arctic Corridors, une vaste étude sur les impacts du traffic maritime sur les Inuit de l'arctique canadien (Greydanus et al., 2018). Il en ressort que la communauté de Salluit négocie les impacts du transport maritime à la baie Déception depuis les années 1960, quand l'exploitation minière a commencé (Greydanus et al., 2018). Le voisinage de cette communauté a vue une des hausses du traffic maritime les plus marquées de l'arctique canadien entre la période de référence 1990-2000 et la période récente 2011-2015 (Greydanus et al., 2018). Le transport par brise-glace des deux compagnies minières installées dans la région, soit Mine Raglan et Canadian Royalties, est restreint par une interruption de la mi-mars au 1er juin (GENIVAR, 2012). Cette période d'arrêt dans le traffic maritime fait partie des mesures d'atténuation pour réduire les impacts de l'opération maritime sur le phoque, dont la période de mise bat est de la mi-mars à la mi-avril (GENIVAR, 2012). Elle s'accompagne aussi d'une limite de vitesse pour les navires au sein de la baie, de l'obligation de toujours emprunter la même route pour minimiser leur impact sur la stabilité du couvert de glace, de l'aménagement de ponts de glace permettant aux motoneiges de traverser la trace de glace brisée laissée par les navires, et d'un système d'avertissement aux communautés pour en annoncer les transits (GENIVAR, 2012).

Mes travaux m'ont permis d'établir un point de repère quantitatif dans le régime de changements actuel, par le biais d'une base de données d'épaisseurs de neige et de glace mesurées de façon systématique pendant trois hivers pour chaque site (Tableau 5.2 - e). Les épaisseurs de glace que j'ai mesurées à la baie Déception pendant l'étude variaient entre 1.10 et 1.65 mètres, et leurs moyennes annuelles entre 1.20 et 1.45 mètres. Quoique le rapport GENIVAR (2007) manque de clarté à cet effet, il est probable que leurs données sur l'épaisseur de la glace soient tirées du rapport ROCHE & CANARCTIC (1993). La glace de la baie Déception dans les années 2015-2018 était donc plus mince de 50 centimètres en moyenne que les valeurs rapportées dans les études d'impact de 2007

et 2012, et probablement mesurées en 1991. Même l'englacement hâtif du 11 novembre 2015, qui a mené aux épaisseurs les plus grandes mesurées pendant l'étude (Tableau 5.2 - c), n'a pas permis à la glace d'atteindre le régime d'épaisseur historique.

J'ai documenté deux régimes d'accumulation de neige différents. Dans le premier, à la baie Déception et au fjord de Kangiqsujuaq, des vents dominants contraires à l'orientation du fjord entraînent parfois une accumulation de neige sous forme de gradient (Tableau 5.2 - f). Dans le deuxième, au fjord de Salluit, aucun gradient n'est observé puisque les vents dominants sont alignés avec le fjord (Tableau 5.2 - g). Ces différences, incluant le fait que des précipitations plus grandes à Kangiqsujuaq mènent à un couvert de glace plus mince qu'aux autres sites (Tableau 5.2 - h), seraient importantes dans une analyse locale des impacts des changements climatiques. Ceux-ci sont en effet modulés par les particularités de chaque fjord.

Pendant les campagnes d'échantillonnage, j'ai pu constater à mon tour l'obstacle au transport que constitue la route des brise-glaces à la baie Déception. Malgré les mesures d'atténuation, cette route a pour effet de couper la baie en deux sur sa longueur par plusieurs mètres de glace déformée, souvent impraticables en motoneige. Des «ponts de glace» balisés (*ice bridge*) sont aménagés à quelques endroits sur la baie par des employés Inuit, notamment près des quais et à Pointe Noire (GENIVAR, 2012), en cassant les morceaux de glace qui dépassent du couvert pour le rendre plus lisse et permettre de traverser la trace du bateau. Lors de la campagne d'échantillonnage de février 2018, nous avons été surpris par le dédoublement de la trace sur un segment d'environ 500 mètres. Il suffit d'un écart d'une vingtaine de mètres entre deux transits pour dédoubler l'obstacle, ce qui entraîne des risques supplémentaires liés au fait que les utilisateurs de la glace ne s'attendent qu'à une seule ligne de glace brisée et peuvent donc être surpis par la deuxième, particulièrement si la visibilité est restreinte.

Lors de la première campagne d'échantillonnage de mon projet, en janvier 2016, les mesures d'épaisseurs ont été faites le long des rives plutôt qu'en quadrillage. Elles correspondaient aux zones qui seraient normalement utilisées pour le transport sur la glace. Les mesures subséquentes ont été fait de façon plus conformes à un schéma d'échantillonnage typique en recherche, soit quadrillant la baie. Ce choix apparaissait le meilleur à l'époque pour tracer un portrait représentatif de chaque site. Pourtant, des mesures systématiques le long des sentiers et à d'autres endroits identifiés par les guides auraient probablement pu capturer la variabilité interannuelle et entre les sites de la même façon que l'échantillonnage par quadrillage l'a fait, et aurait été plus proche de la réalité des utilisateurs de la glace. Une des limites des mesures directes d'épaisseurs que j'ai effectuées est donc le choix de l'échantillonnage qui s'est éloigné du cadre de référence local.

5.2.3 Fonte et débâcle

J'ajoute à la littérature une première description de deux processus de débâcles d'un fjord en contexte de transport par brise-glace, soit celui de la baie Déception. Selon le *Sea Ice Climatic Atlas*, la débâcle du détroit d'Hudson à proximité des fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq est attendue fin juin ou début juillet (Fequet *et al.*, 2011). Dans leur analyse d'imagerie optique de 1984 à 2016, Gauthier *et al.* (2018) montrent que la débâcle a typiquement lieu dans la deuxième moitié du mois de juin à la baie Déception et jusqu'à une semaine plus tard à Salluit et à Kangiqsujuaq. Selon une description de ROCHE & CANARCTIC (1993) rapportée par GENIVAR (2007), la débâcle de la baie Déception en 1991 avait commencé à la mi-juin par la formation de zones d'eau libre aux embouchures de la rivière Déception et d'autres tributaires; à ce moment, le couvert de glace arrêtait à l'embouchure de la rivière le long de la ligne tracée par les rives et passant par les îles Arctic et Neptune. Le 22 juin, le fond de la baie était libre de glace jusqu'aux quais. La débâcle s'est terminée quand le couvert s'est brisé à l'embouchure de la baie le 27 juin 1991.

Cette description de la débâcle correspond à un des deux processus que j'ai observés pendant l'étude, soit en 2016 et 2017 (Tableau 5.2 - i). La débâcle de 2018 fait donc figure d'exception, avec sa fonte le long de fractures laissées dans la glace par les brise-glaces. Mes observations des dates de début de la fonte (*melt onset*) et de formation de mares (*pond onset*), basées sur l'analyse des séries temporelles d'imagerie satellitaire en bande X, montrent que le printemps 2018 était de trois à quatre semaines plus tard que les deux années précédentes (Tableau 5.2 - j). Est-ce que la saison de transport sur la glace aurait pu se prolonger sans le transit des brise-glaces, qui a repris le 17 juin 2018? Des échanges avec les utilisateurs de la glace permettraient peut-être d'élucider la question.

Une des limites de mes travaux consiste en l'absence de description de la débâcle aux fjords de Salluit et de Kangiqsujuaq, notamment vue l'absence de caméras – le réseau CAIMAN n'incluait aucune caméra dans ces communautés pendant mon étude et celles qui y ont été installées depuis ne prennent pas de photos des fjords. Pourtant, le ciel est beaucoup moins nuageux à cette période de l'année que pendant l'englacement, ce qui facilite son observation de l'espace. Une vidéo que j'ai créée à partir d'images optiques Planet, publiée sur la page Facebook du projet de suivi des glaces de l'INRS (https://www.facebook.com/IceMonitoringNunavik/), montre par exemple que la débâcle 2017 à Kangiqsujuaq a commencé dans le fond de la baie à proximité de la rivière autour du 15 juin. Le 19 juin, de l'eau libre était présente jusqu'à la portion de la baie face à la communauté, et aussi au point de rétrécissement du fjord près de son embouchure vers le détroit d'Hudson. Les derniers morceaux de glace visibles le 21 juin sont disparus avant le 29 juin 2017.

Un autre enjeu vient de la pertinence des indicateurs de fonte et de débâcle pour la sécurité sur le territoire. Tout comme pour la date englacement, la date de débâcle n'est pas très utile aux déplacements : la glace devient dangereuse avant sa débâcle. Il pourrait être intéressant de discuter avec des utilisateurs de la glace pour voir si les indicateurs de fonte et de formation de mares, accessibles avec les séries temporelles d'imagerie satellitaire RSO en bande X ou C (Dufour-Beauséjour *et al.*, 2020b; Scharien *et al.*, 2012; Yackel *et al.*, 2007), peuvent être reliées à leurs propres indicateurs de dégradation du couvert.

5.2.4 Co-interprétation avec des membres des communautés

Les processus que j'ai étudiés sont assurément connus des utilisateurs de la glace au sein des communautés de Salluit et Kangiqsujuaq. Une co-interprétation des résultats avec des experts locaux m'aurait menée à une compréhension plus approfondie des phénomènes que j'ai décris. L'incorporation de connaissances autochtones dans des produits de la recherche comme des articles ou des conférences présente toutefois plusieurs enjeux éthiques. Ces connaissances sont encore souvent conceptualisées comme une source d'information qu'on peut extraire et utiliser.

C'est dans cette optique que les politiques universitaires et gouvernementales sur la recherche éthique avec les personnes dictent que les chercheurs doivent obtenir une certification éthique pour pouvoir mener des entrevues avec des membres des communautés et utiliser l'information qui y est acquise. Les projets de télédétection environnementale ne comportent généralement pas de volet d'entrevue, et le mien n'en prévoyait pas non plus. À mi-chemin de ma recherche, j'ai vu la pertinence d'inclure plus de connaissances autochtones dans ma recherche. J'ai cependant jugé qu'il était trop tard pour ajouter un volet supplémentaire à mon projet, qui aurait nécessité d'obtenir une certification éthique et de mener des entrevues, un type de recherche auquel je n'ai jamais été formée. J'avais d'ailleurs consulté une agente de recherche membre du Comité d'éthique de la recherche de l'INRS pour discuter des enjeux éthiques liés à nos activités. L'expertise locale a toutefois informée ma compréhension des phénomènes de la banquise lors de discussions informelles, que ce soit avec les guides sur le terrain ou avec d'autres membres de la communauté, par exemple lors de consultations organisées par l'Administration régionale Kativik. Publier de l'information tirée de ces discussions irait à l'encontre des politiques d'éthique de la recherche en contexte autochtone.

Le contexte de partenariat avec le privé ajoute une couche de complexité de plus. On m'a déjà dit que s'il y avait un impact négatif de Mine Raglan, je ne le dirais pas parce que je travaillais pour elle. Que ce soit au Nord ou au Sud, les gens sont méfiants lorsqu'un projet qui traite de l'impact d'une industrie est faite en partenariat avec celle-ci. Il est difficile de se débarrasser de cette apparence de conflit d'intérêt. Une implication d'un membre d'une des communautés dans l'interprétation des résultats et leur communication aurait peut-être donné plus de crédibilité aux résultats du projet.

En somme, une co-interprétation de mes données avec des utilisateurs de la glace aurait permis d'ajouter du sens aux résultats et de les ancrer dans la réalité locale. Mais ces travaux auraient aussi été chronophage pour mes interlocuteurs, avec le risque d'une instrumentalisation de leurs propos. À terme, les autochtones qui souhaitent l'être pourront peut-être être reconnus comme des chercheurs au même titre que les étudiants-chercheurs du Sud. À ce jour, l'expertise autochtone sur leur propre réalité demeure assujettie à l'interprétation et au contrôle des chercheurs, lesquels sont majoritairement non-autochtones. Les obstacles à une plus grande inclusivité demeurent légion jusque dans les racoins du système de recherche : au moment de soumettre mon chapitre 3, j'ai dû justifier la présence d'un co-auteur (Inuk) sans adresse courriel institutionnelle en lui écrivant un CV et une biographie. Les autochtones se sont battus pour que leurs connaissances soient considérées comme valables et crédibles. Le risque court toutefois qu'elles soient réduites à un nouveau filon à exploiter, dans une reconduite des pratiques coloniales de dépossession (Coulthard, 2014)

5.3 Objectif 3 : Communication des résultats aux communautés

Dans le cadre du troisième objectif de ma thèse, j'ai communiqué mes résultats de recherche aux communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq en naviguant la tension entre communication et lassitude à l'égard de la recherche (*research fatigue*), et en adaptant le niveau d'information transmise au public cible. Les résultats en lien avec cet objectif sont présentés dans le tableau Tableau 5.3.

Résultats pour l'objectif 3 : Communication des résultats aux communautés	Salluit	Kangiqsujuaq
a) Présentation de résultats intermédiaires dans une soirée communautaire (chapitre 4).	x	x
b) Présentation du projet aux jeunes des communautés via des activités avec les écoles (chapitre 4).	x	x
c) Présentation du projet à la radio (chapitre 4).	x	
d) Présentation du projet à la Co-op (chapitre 4).		x
e) Distribution de matériel d'information sur le projet et ses résultats (cha- pitre 4).	x	x
f) Diffusion d'annonces et de remerciements sur Facebook (chapitre 4).	x	x

5.3.1 Tension entre communication et lassitude à l'égard de la recherche

J'ai présenté mon projet de recherche doctorale aux communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq, mais sans mettre suffisamment l'accent sur les résultats. Les partenariats avec les communautés sont une composante de plus en plus fréquente des projets de recherche nordiques; les organismes subventionnaires et les conseils d'éthique des universités ont commencé à les exiger en réponse aux recommendations autochtones (Brunger & Wall, 2016; Tondu *et al.*, 2014). Ils incluent la communication des résultats, qui devrait se faire régulièrement dès le début du projet et couvrir à la fois les résultats intermédiaires et les conclusions finales (Tondu *et al.*, 2014). L'objectif de cette diffusion des résultats est de permettre leur validation par la communauté et d'assurer que les produits de la recherche leur soit utiles (INQ, 2017b).

Il est essentiel de garder cet objectif en tête lors de la conception d'une stratégie de communication et de son implémentation. [...] the process of engaging-if done uncritically and in service to ethics guidelines rather than in service to ethical research-can itself cause harm [...] (Brunger & Wall, 2016) : les activités de participation des collectivités effectuées dans le seul but de répondre à des lignes directrices sur l'éthique risquent de causer du tort aux communautés autochtones. La pression de recherche que subissent certaines communautés mène à une fatigue (research fatigue) qui limite leur capacité à s'impliquer dans la recherche, à la surveiller et à la contrôler (Brunger & Wall, 2016). Quoique les travaux de Brunger & Wall (2016) portent spécifiquement sur les membres des communautés qui doivent approuver ou non les projets de recherche, cette lassitude s'étend aux individus souvent consultés dans le cadre de certains projets (Morton Ninomiya & Pollock, 2017).

Dans mon projet de recherche, j'ai bénéficié d'un accès à des structures pré-existantes, incluant des liens entre des membres de l'équipe et certains professeurs des écoles et l'organisation par notre partenaire industrielle d'un évènement de communication scientifique. C'est ce qui m'a permis de présenter ma recherche à plusieurs cohortes d'élèves du secondaire à Kangiqsujuaq et Salluit allant du niveau secondaire 1 à 5, en français et en anglais (Tableau 5.3 - b). Dans le cadre des forum environnementaux, organisé par Mine Raglan, j'ai pu présenter le projet et certains résultats intermédiaires à des soirées communautaires (Tableau 5.3 - a) et me rendre disponible à la radio pour répondre à des questions sur le projet (Tableau 5.3 - c). Notez que le projet a aussi été présenté à la radio de Kangiqsujuaq, mais par une autre membre de l'équipe que moi. Quelques initiatives personnelles se sont ajoutées, notamment la création d'une page Facebook pour le projet (Tableau 5.3 - f) et l'animation d'une table d'information à la Co-op de Kangiqsujuaq (Tableau 5.3 - d). Pour l'ensemble de mes activités de communication, j'ai développé des présentations audiovisuelles, des affiches, des feuilles et des cartons d'information, dont les plus récents étaient traduits en Inuktitut (Tableau 5.3 - e).

En général, les communautés nordiques sont aussi aux prises avec les incursions fréquentes de chercheurs dans les écoles, parfois non sollicités. L'encadrement de la présence de chercheurs dans les écoles est lié au contrôle des professionnels de l'enseignement sur le contenu, ainsi qu'à la protection des élèves d'éventuels manquements à l'éthique de la recherche. En tant qu'étudiante, je me suis déjà fait conseiller par des paires de simplement «me présenter» à une école et leur offrir de faire une présentation – j'ai d'ailleurs moi-même répété ce conseil dans le cadre d'une présentation orale à ArcticNet en 2017. Au Nunavik, les recommendations actuelles sont plutôt à l'effet de demander la permission aux institutions, par exemple à la commission scolaire Kativik Ilisarniliriniq. Un autre de mes défis était de renouveler le contenu de mes présentations au fil des campagnes de terrain. Sans formation en pédagogie, je pouvais difficilement créer de nouvelles activités.

La portion «recherche» du Forum environnemental est née à la suite de récriminations transmises par des membres de communautés autochtones à Mine Raglan contre les projets de recherche qui sont effectués sans implication des communautés et sans que les résultats leur soient communiqués. Durant mon doctorat, les projets de recherche dont Mine Raglan était partenaire se devaient donc de participer au Forum environnemental et d'y présenter leurs résultats (Tableau 5.3 - a,c,e). Ce faisant, Mine Raglan s'est positionnée en alliée d'une recherche plus éthique en consacrant des ressources à la mise en relation des communautés et des rechercheurs. Il serait intéressant d'évaluer si des soirées communautaires où plusieurs projets de recherche sont présentés ensemble permettent de réduire la pression sur les communautés, en réduisant le nombre de fois où les gens sont sollicités pour une présentation. Dernièrement, Mine Raglan a modifié le format de son Forum environnemental pour produire des vidéos d'information sur les projets de recherche, au lieu que les chercheurs effectuent des présentations. Peut-être que la production de contenu audio-visuel (traduit en inuktitut) et sa diffusion sur les médias sociaux permettrait aux chercheurs d'améliorer la communication de leurs résultats aux communautés.

Cette idée illustre un des enjeux liés à l'utilisation de la page Facebook du projet (Tableau 5.3 f). La communication en continu entre en conflit avec la méthode traditionnelle de communication scientifique où les méthodologies, résultats et interprétations sont présentées ensemble et uniquement une fois que des conclusions satisfaisantes ont été obtenues. Dans le cas de la page Facebook que j'administrais, je l'ai au final surtout utilisée pour annoncer notre présence dans les communautés et remercier les guides avec qui nous travaillons. Pour communiquer des résultats intermédiaires, il faut accepter un degré de perte de contrôle sur les données et leur interprétation; cette diffusion s'accompagne d'une perte d'exclusivité par rapport aux autres chercheurs, mais permet de redonner du pouvoir aux communautés. Mon animation d'une table d'information à la Co-op de Kangiqsujauq (Tableau 5.3 - d) pendant deux fins d'après-midi a mis en évidence la tension entre efforts de communication et lassitude des communautés face à la recherche. D'un côté, il s'agit d'une activité d'information qui est souvent recommandée, dans laquelle les chercheurs se déplacent à la rencontre des gens plutôt que l'inverse. D'un autre côté, j'étais «dans les jambes», ma présence créant un obstacle à la circulation et sollicitant que les gens prennent du temps de leur journée pour s'informer sur mon projet.

5.3.2 Adaptation du niveau d'information

J'ai souvent réussi à vulgariser mon projet pour l'auditoire, mais c'était beaucoup plus difficile d'en simplifier les résultats. Dans les recommandations sur la communication de résultats aux communautés autochtones, on retrouve notamment la traduction vers l'Inuktitut (dans le cas du Nunavik), l'utilisation d'un langage approprié au grand public et la transmission rapide des résultats. (INQ, 2017b; Tondu *et al.*, 2014; ITK, 2007).

Aux activités du Forum environnemental, un traducteur était présent pour réduire la barrière de la langue (Tableau 5.3 - a,c). La traduction simultanée nécessite d'adapter notre façon de parler pour faciliter la tâche au traducteur : parler lentement, avec des phrases courtes et simples. Dans les deux présentations à la communauté que j'ai faites, je présentais en équipe avec une deuxième personne, ce qui rendait la présentation plus dynamique et aidait à ralentir le rythme. En écoutant la traduction simultanée d'une oreille, je pouvais attendre la fin de la traduction de ma dernière phrase avant d'enchaîner, m'assurant ainsi qu'aucune information n'était perdue. Le support visuel de ma dernière présentation était aussi traduit en Inuktitut, ce qui apporte un défi lié aux variations régionales de la langue et de son écriture. Puisque la traduction peut comporter des erreurs, à l'avenir j'incluerais à la fois l'anglais et l'inuktitut sur les diapositives.

Dans la majorité du matériel d'information que j'ai préparé au fil de ma recherche, les données étaient présentées dans le système métrique. Puisque c'est plutôt le système impérial qui prévaut dans la région, les membres des communautés devaient donc convertir l'information ou tout simplement l'ignorer. La façon dont les données sont présentées est importante dans l'adoption d'un niveau de langage approprié. À ma dernière participation au Forum environnemental, j'avais préparé des cartons d'information avec un résumé des épaisseurs de glace et de neige mesurées pendant le projet dans chaque communauté. L'information était présentée en anglais et en inuktitut, et les données en pouces (Tableau 5.3 - e).

Lors de mes présentations à des soirées communautaires, dans les écoles ou à la radio (Tableau 5.3 - a,b,c), j'ai trouvé difficile de vulgariser suffisamment le projet tout en donnant de l'information sur les données et les résultats. Mes résultats intermédiaires étaient difficiles à simplifier, notamment parce que je les comprenais mal, alors j'ai souvent plutôt présenté le projet dans son ensemble. Plusieurs de mes publications sur la page Facebook du projet étaient d'ailleurs trop compliquées (Tableau 5.3 - f).

L'utilisation de Facebook par les chercheuses est indispensable, pour se familiariser avec la culture Inuit d'une part, et de l'autre comme outil de communication et d'engagement communautaire (Lyonnais, 2017). Il est toutefois recommandé qu'une page Facebook de projet de recherche soit créée en collaboration avec les partenaires Inuit, animée par des membres des communautés concernées, et que ces derniers soient présentés sur la page Facebook avec des vidéos pour démontrer que «des Inuit sont au coeur du projet» (Lyonnais, 2017). Si c'était à refaire, j'aimerais trouver du financement pour embaucher un agent de liaison pour le projet dans chaque communauté, qui pourrait communiquer de façon plus efficace sur Facebook et par la radio. Faire une présentation conjointe avec cette personne permettrait aussi de mieux traduire le contenu scientifique d'une façon culturellement appropriée.

Transmettre l'information par quelqu'un de la communauté permettrait peut-être aussi de diminuer le poids du projet sur celle-ci et donc de limiter notre contribution à la lassitude de la recherche. Je n'ai pas fait d'évaluation formelle de nos activités d'engagement communautaire et de leur éventuelle contribution à la *research fatigue*. Ici encore, on se retrouve entre l'arbre et l'écorce : sans évaluation, il est possible qu'on reproduise des activités qui ne sont lourdes pour les communautés, mais le processus d'évaluation lui-même est un poids supplémentaire. J'ai choisi l'observation et l'introspection comme outils pour évaluer mes activités, ce qui me semblait approprié considérant le petit nombre d'activités concernées et mes ressources limitées.

Ces enjeux rejoignent ceux de la transmission des informations aux communautés dans des délais acceptables. Au final, je n'ai jamais pu communiquer les conclusions de mes travaux directement aux communautés. Mes articles ont été rédigés après ma dernière année de terrain, donc après la fin prévue de mes prévus au Nunavik. Les articles et rapports ont toutefois toujours été envoyés aux partenaires locaux, que ce soit l'Administration régionale Kativik ou Mine Raglan.

Chapitre 6

Conclusion



Kangiqsujuaq, octobre 2017

Dans ma recherche doctorale, j'ai combiné différents outils de suivi afin de décrire les processus de glace de mer saisonnière aux fjords de Salluit, de la baie Déception et de Kangiqsujuaq au Nunavik, trois baies du détroit d'Hudson où la glace revêt une importante culturelle et logistique pour les membres des communautés locales. Cette recherche s'inscrit dans un contexte d'imprévisibilité accrue des conditions de glace sous l'effet des impacts des changements climatiques, en plus d'une pression industrielle à la baie Déception où deux compagnies minières opèrent des infrastructures maritimes. Mes travaux se sont articulés selon trois objectifs : 1) évaluer différentes technologies (outils) de suivi de la glace de mer, 2) décrire l'état de la glace de mer et de son couvert nival et 3) communiquer les résultats de la recherche aux communautés concernées.

Premièrement, j'ai évalué trois outils de suivi, soit la mesure directe de l'épaisseur de la neige et de la glace, l'imagerie satellitaire RSO et la photographie automatique (Objectif 1, section 5.1). Par mon application de l'analyse de séries temporelles au domaine de la glace de mer, j'ai démontré que les traits saisonniers observés dans l'imagerie RSO en bande C sur de la glace de mer de première année le sont aussi en bande X, et que la photographie automatique demeure la meilleure méthode d'observation à distance pour la caractérisation des processus d'englacement et de débâcle (soussection 5.1.1). J'ai combiné différents outils de façon novatrice, améliorant la description spatiotemporelle des processus d'englacement et de débâcle et mettant en évidence l'absence de corrélation entre les épaisseurs de neige ou de glace et la rétrodiffusion en bandes C ou X (sous-section 5.1.2).

Pour ce faire, j'ai notamment analysé des images complètement polarimétriques. L'utilité de la polarimétrie radar dans les opérations de surveillance maritime est pour l'instant limitée par la petite couverture des images (Zakhvatkina *et al.*, 2019), soit 25 km par 50 km pour la plus grande image polarimétrique de RADARSAT-2. À titre de comparatif, son mode « Surveillance des océans » (*Ocean Surveillance*) est de 500 km par 500 km (MDA, 2018). L'avènement de la constellation RCM, lancée en juin 2019 et pour laquelle le mode de polarimétrie compacte est disponible pour toutes les tailles d'image (CSA, 2011), facilitera l'intégration d'information polarimétrique dans l'analyse du Service canadien des glaces (Geldsetzer *et al.*, 2015). Des travaux préparatoires prévoient une amélioration à la fois de l'interprétation visuelle et de la classification automatique (Geldsetzer *et al.*, 2015). Il sera pertinent d'évaluer le potentiel de la polarimétrie compacte pour la cartographie de la rugosité de la glace. Dammann *et al.* (2018) a en effet soulevé que peu d'études portent sur la surveillance de la rugosité, un paramètre important pour le transport sur la glace. Même si le rapport des canaux co-polarisés peut dépendre de la rugosité de la glace de mer (Geldsetzer & Yackel, 2009),

mes propres travaux sur ce front n'étaient pas concluants et ne sont donc pas présentés dans ma thèse.

Pour les prochaines études sur le suivi de la glace de mer saisonnière dans des fjords de l'Arctique, je recommande que l'élaboration des protocoles d'échantillonnage tienne compte des enjeux suivants : présence d'autocorrélation spatiale dans les variables environnementales, disparité d'échelle entre les mesures directes et le pixel, et adéquation entre le protocole de recherche et les intérêts locaux. Pour une étude de suivi spatiotemporel, le taux de revisite et la disponibilité des données devraient guider le choix du capteur plus que sa fréquence radar. La résolution spatiale devrait faire l'objet d'un compromis entre la grosseur des cibles, par exemple des fractures ou des trous dans la glace, et l'étendue de la zone d'étude. Des angles d'incidence inférieurs à 30° favorisent la rétrodiffusion de surface, tandis que des angles plus prononcés favorisent celle de volume (Tjuatja *et al.* (1992) dans Nandan *et al.* (2016)). La polarimétrie décuple la quantité d'information à traiter, déjà grande dans un suivi spatiotemporel. Jagdhuber *et al.* (2014) ont toutefois obtenu des résultats intéressants dans ce genre d'étude en détectant le gel et le dégel du sol dans une série temporelle de graphiques H-alpha. Quant aux choix statistiques, l'analyse bayésienne est une avenue intéressante notamment pour la simplicité d'interprétation de ses résultats. Puisqu'elle est moins connue que son pendant fréquentiel, elle doit toutefois être expliquée en détail.

Le cas particulier du suivi de la glace de mer est un exemple des liens entre la recherche nordique, les intérêts commerciaux et les opérations militaires liées à la souveraineté canadienne, une interdépendance historique démontrée par Stuhl (2016) pour la recherche sur le pergélisol. L'ancêtre du Service canadien des glaces, *Sea Ice Central*, a vu le jour en 1958 en appui aux activités commerciales croissantes dans la route de la Baie d'Hudson et à la suite du déploiement de la *Distant-Early-Warning Line* (Beaton & Markham, 2009). Le développement de l'imagerie satellitaire RSO a été motivé en grande partie par ces besoins de surveillance de la glace (Zakhvatkina *et al.*, 2019). Les outils que j'ai évalués dans le cadre de ma recherche doctorale ont le potentiel d'être utiles aussi aux utilisateurs du territoire, à condition que le développement soit fait en ce sens. Par exemple, un projet de suivi des sentiers traditionnels à l'aide de photographies automatiques transmises en temps réel par satellite a été lancé à Salluit et à Kangiqsujuaq par ces communautés, l'Administration régionale Kativik et l'INRS. L'analyse de séries temporelles d'imagerie satellitaire RSO (TerraSAR-X ou encore de la nouvelle constellation RCM ou des capteurs Sentinel-1) ou optiques (par exemple des capteurs Planet ou Sentinel-2), appuyée par ces caméras, permettrait peut-être de documenter les conditions de neige et ou de glace sur le sentier. Le fait que certains sentiers passent à la fois par la terre et par la glace illustre bien la nécessité de décloisonner les disciplines nordiques, qui sont l'héritage d'un développement historique colonial (Stuhl, 2016). Une avenue future consisterait donc à développer un suivi interdisciplinaire des sentiers traditionnels, conjointement avec la communauté et au service de ses besoins.

Par mon choix d'un cadre d'analyse saisonnier, j'ai montré que nos méthodes de suivi de la glace de mer ne permettent pas d'observer certains des aléas les plus importants au transport sur la glace, comme la fonte du couvert de glace par en-dessous et la présence de trous ou de zones de glace mince (sous-section 5.1.4). Quelles technologies d'observation pourraient permettre de suivre ces aléas? La mécanique des drones est vulnérable au gel, et les risques de perdre l'appareil sont beaucoup plus grands sur la glace que sur la terre ferme. L'observation aéroportée ou hélicoportée est couteuse; difficile d'imaginer que tous les sentiers soient surveillés de cette façon à chaque saison de risque. Quant à l'imagerie satellite, la surveillance est limitée par la couverture nuageuse ou la brume et le coût des images optiques commerciales de très haute résolution (inférieure au mètre) et, dans le cas du RSO, la résolution spatiale trop grossière et l'apprentissage nécessaire à l'interprétation. Pour toutes les mesures *in situ*, que ce soit des mesures directes d'épaisseur ou des relevés comme ceux de SmartIce avec le SmartQamutik, les zones déjà dangereuses sont hors-limite. La photographie automatique avec transmission en continu est à mon avis un bon compromis : équipement simple et facile à entretenir et opérer, acquisitions fiables, transmission directe aux communautés et facilité d'interprétation. C'est en collaborant avec les personnes les plus concernées qu'on peut identifier des technologies avec le potentiel de leur fournir des informations pertinentes. La sécurité sur la glace demeure au final le domaine des utilisateurs et utilisatrices du territoire, qui détiennent l'expertise et vivent le risque.

Deuxièmement, j'ai décrit les processus saisonniers d'englacement et de débâcle à la baie Déception, ainsi que l'hivernage aux trois fjords, pendant trois hivers entre 2015 et 2018 (Objectif 2, section 5.2). L'englacement des fjords, incluant Salluit et Kangiqsujuaq, se déroule habituellement à la fin novembre ou au début décembre, et l'année 2015 fait figure d'exception avec un englacement hâtif vers la mi-novembre. À la baie Déception, j'ai pu établir que le couvert de glace se forme généralement à partir de plaques de glace pré-existantes qui donnent un couvert légèrement rugueux, surtout comparativement à la glace très lisse formée par un englacement thermique comme celui de 2015 (sous-section 5.2.1). Mes mesures directes d'épaisseur montrent que la glace est en moyenne 50 centimètres plus mince que les valeurs citées dans la littérature, probablement mesurées en 1991. J'ai aussi montré qu'à la baie Déception et à Kangiqsujuaq, des gradients d'épaisseur de neige se forment parfois sous l'effet des vents transverses aux fjords, alors que l'alignement des vents dominants en direction du fjord de Salluit n'entraîne aucune accumulation préférentielle entre ses rives (sous-section 5.2.2). La débâcle de la baie Déception se déroule encore souvent comme en 1991, à partir de la rivière Déception en progressant vers l'île Moosehead jusqu'à atteindre le détroit. L'année 2018 fait figure d'exception, avec un printemps tardif de trois à quatre semaines par rapport aux autres années et une débâcle qui pourrait avoir été précipitée par le retour des brise-glaces le 17 juin (sous-section 5.2.3).

La représentation du territoire guide notre intervention sur celui-ci (Stuhl, 2016); l'émergence depuis quelques décennies d'une représentation du Nord comme étant une composante importante du système climatique global a orienté la science vers la documentation de tendances à long terme, la recherche de processus physiques reliant la glace de mer aux changements climatiques et leur modélisation (Laidler, 2006). Les Inuit privilégient plutôt les connaissances de la glace de mer qui favorisent leur sécurité individuelle, le succès de la chasse et la prédiction fiable de la météo (Laidler, 2006). Plusieurs programmes de recherche plus récents adoptent aussi la représentation du Nord comme étant le territoire habité par les Inuit - le Inuit Nunangat. Les projets ont avantage à être guidés par une représentation du territoire fondée dans son occupation historique par les Inuit. Les risques avec lesquels les utilisateurs du territoire doivent composer sont nombreux : quantité insuffisante de neige sur les sentiers ou glace trop fragile, visibilité réduite, etc. Les impacts des changements climatiques et la présion industrielle modulent ces risques; le retard des températures froides et les redoux compliquent la période d'englacement, le transit de brise-glaces crée des obstacles au transport, et les variations dans la quantité de neige tombée durant l'hiver compliquent la période de fonte, potentiellement de façon différente selon le site.

Troisièmement, j'ai communiqué les résultats de ma recherche aux communautés de Salluit et de Kangiqsujuaq en cherchant un compromis entre activités de communications et lassitude des communautés, et en adaptant le niveau d'information à l'auditoire (Objectif 3, section 5.3). En profitant d'un accès privilégié à des structures existantes, j'ai pu présenter ma recherche aux élèves du secondaire par le biais d'activités en classe et aux membres de la communauté en général lors des forum environnementaux de Mine Raglan. J'ai développé du matériel d'information dans plusieurs formats : présentations audiovisuelles, affiches, cartons d'information et animation d'une page Facebook sur le projet. Ce faisant, j'ai constaté la pression de recherche subie par les communautés (sous-section 5.3.1), dont les membres se font solliciter par plusieurs projets de recherche, et l'incompatibilité de la stratégie de communication habituelle du milieu de la recherche avec les recommandations autochtones (sous-section 5.3.2).

Plusieurs de ces enjeux de communication sont intrinsèques au modèle de recherche nordique actuel, où ce sont avant tout des gens de l'extérieur de la communauté qui viennent y extraire des données et qui repartent les analyser. La recherche nordique continue de progresser, mais le diable est dans les détails. Par exemple, l'idée selon laquelle les projets de recherche doivent contribuer au renforcement des capacités dans les communautés (*capacity-building*) est basée sur le fait que leurs compétences ne sont pas reconnues (Pfeifer, 2018). Pour continuer à avancer, la recherche scientifique devrait reconnaître que l'utilisation du territoire par les Inuit constitue une méthode scientifique en soi dont le produit est valide (Pfeifer, 2018). Pour citer Pitseolak Pfeifer dans son essai An Inuit Critique of Canadian Arctic Research : We have seen research principles go from research on Inuit to research with Inuit, but it is high time we witnessed research by Inuit for Inuit (Pfeifer, 2018).
Références

- AAOKH, ELOKA (2019). Seasonal Ice Zone Observing Network (SIZONet) Observation Database. https://eloka-arctic.org/sizonet/search. (5 mars 2020).
- ACUNS (1998). Ethical principles for the conduct of research in the North. Association of Canadian Universities for Northern Studies (ACUNS), Ottawa. OCLC: 41037779.
- Adams MS, Carpenter J, Housty JA, Neasloss D, Paquet PC, Service C, Walkus J, Darimont CT (2014). Toward increased engagement between academic and indigenous community partners in ecological research. *Ecology and Society*, 19(3). doi: 10.5751/ES-06569-190305.
- Agnew T, Howell S (2003). The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data. *Atmosphere-Ocean*, 41(4):317–331. doi: 10.3137/ao.410405.
- Andrews J, Babb D, Barber DG (2018). Climate change and sea ice: Shipping in Hudson Bay, Hudson Strait, and Foxe Basin (1980–2016). *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1):19. doi: http://doi.org/10.1525/elementa.281.
- ArcticNet (2019). ArcticNet Governance. http://www.arcticnet.ulaval.ca/aboutus/chart.php. 2019-03-28.
- ARCUS (2019). Sea Ice for Walrus Outlook (SIWO). https://www.arcus.org/siwo. (5 mars 2020).
- Arslan AN, Tanis CM, Metsämäki S, Aurela M, Böttcher K, Linkosalmi M, Peltoniemi M (2017). Automated Webcam Monitoring of Fractional Snow Cover in Northern Boreal Conditions. *Geosciences*, 7(3):55. doi: 10.3390/geosciences7030055.
- Asselin H, Basile S (2012). Éthique de la recherche avec les peuples autochtones: Qu'en pensent les principaux intéressés ? Éthique publique, (vol. 14, n° 1). doi: 10.4000/ethiquepublique.959.
- Baird N, Poisey D, Mauro I (2018). Visualizing changing oceans: Inuit knowledge and participatory video in Panniqtuuq, Nunavut. ArcticNet Annual Scientific Meeting 2018, Ottawa.
- Baker M (2016). Statisticians issue warning on P values. *Nature*, 531(151):1. doi: 10.1038/nature.2016.19503.
- Ball J, Janyst P (2008). Enacting Research Ethics in Partnerships with Indigenous Communities in Canada: "Do it in a Good Way". *Journal of Empirical Research on Human Research Ethics*, 3(2):33–51. doi: 10.1525/jer.2008.3.2.33.
- Barber D, LeDrew E, Flett D, Shokr M, Falkingham J (1992). Seasonal and diurnal variations in SAR signatures of landfast sea ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(3):638–642. doi: 10.1109/36.142948.

- Barber DG, Nghiem SV (1999). The role of snow on the thermal dependence of microwave backscatter over sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C11):25789–25803. doi: 10.1029/1999JC900181.
- Barber DG, Papakyriakou TN, Ledrew EF, Shokr ME (1995). An examination of the relation between the spring period evolution of the scattering coefficient (σ) and radiative fluxes over Jandfast sea-ice. *International Journal of Remote Sensing*, 16(17):3343–3363. doi: 10.1080/01431169508954634.
- Basile S (2017). Le rôle et la place des femmes atikamekw dans la gouvernance du territoire et des ressources naturelles. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Beaton A, Markham W (2009). Ice Forecasting in Canada The History of Ice Forecasting Central. CMOS Archives. 12 pages. http://cmosarchives.ca/History/IceHistory2009.pdf.
- Bell T, Briggs R, Bachmayer R, Li S (2014). Augmenting Inuit knowledge for safe sea-ice travel; The SmartICE information system. 2014 Oceans - St. John's, IEEE, 1–9 pages.
- Bernier M, Dufour-Beausejour S, Gilbert V, Rouleau A, Tuniq J, Gauthier Y (2017a). Ice Monitoring: Ice and snow thickness data from Salluit fjord, Deception Bay and Kangiqsujuaq (Nunavik, Canada).
- Bernier M, Gignac C, Chockmani K, Poulin J, Gauthier Y (2016). Rapport final: Projet ICEPAC : un atlas interactif sur la probabilité de l'aléa glace à l'échelle des infrastructures maritimes et côtières dans un contexte de changements climatiques. Numéro R1665. 62 pages. https://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/300/inrs-ete/projet_icepac/R1665_MBernier_2016.pdf.
- Bernier M, Latapie R, Poulin J, Gignac C, Thériault D, Gauthier Y, INRS-ETE (2015). Suivi des conditions de glaces de rives à proximité d'infrastructures maritimes au Nunavik dans un contexte de changements climatiques Kuujjuarapik, Umiujaq, Ivujivik, Baie Déception, Quaqtaq et Aupaluk: Projet de recherche CC09.1 : Rapport d'étape 1. Numéro R1627. 30 pages. http://espace.inrs.ca/id/eprint/2773.
- Bernier M, Poulin J, Gauthier Y, Ratsimbazafy T (2019). Entretien de caméras afin de suivre les mouvements des glaces de rive aux abords d'infrastructures maritimes du Nunavik. Numéro R1898. 52 pages.
- Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Rouleau A (2017b). *Ice Monitoring: Hourly pictures of landfast sea ice from Deception Bay (Nunavik, Canada)*. Canadian Cryospheric Information Network (CCIN).
- Bertram A, Wendleder A, Schmitt A, Huber M (2016). Long-Term Monitoring of Water Dynamics in the Sahel Region using the Multi-SAR-System. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, volume XLI-B8 de 2016 XXIII ISPRS Congress.
- Bird-Naytowhow K, Hatala AR, Pearl T, Judge A, Sjoblom E (2017). Ceremonies of Relationship: Engaging Urban Indigenous Youth in Community-Based Research. International Journal of Qualitative Methods, 16(1):1–14, 160940691770789. doi: 10.1177/1609406917707899.
- Blais J (2015). Les impacts sociaux de la mine Raglan auprès des communautés inuit de Salluit et de Kangiqsujuaq. Thèse de doctorat, Université Laval.

- Bongio M, Arslan AN, Tanis CM, De Michele C (2019). Snow depth estimation by time-lapse photography: Finnish and Italian case studies doi: 10.5194/tc-2019-193.
- Brown RD, Cote P (1992). Interannual Variability of Landfast Ice Thickness in the Canadian High Arctic, 1950-89. ARCTIC, 45(3). doi: 10.14430/arctic1402.
- Brucker L, Markus T (2013). Arctic-scale assessment of satellite passive microwave-derived snow depth on sea ice using Operation IceBridge airborne data: Assessment of Snow Depth on Sea Ice. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(6):2892–2905. doi: 10.1002/jgrc.20228.
- Brunet ND, Hickey GM, Humphries MM (2014). Understanding community-researcher partnerships in the natural sciences: A case study from the Arctic. *Journal of Rural Studies*, 36:247–261. doi: 10.1016/j.jrurstud.2014.09.001.
- Brunger F, Wall D (2016). "What do they really mean by partnerships?" Questioning the unquestionable good in ethics guidelines promoting community engagement in Indigenous health research. *Qualitative health research*, 26(13):1862–1877. doi: 10.1177/1049732316649158.
- C-SIKU (2008). Inuit Siku Atlas. https://sikuatlas.ca/index.html. (5 mars 2020).
- CAIMAN, INRS, Gauthier Y, Bernier M, Gilbert V, Deschenes M, Pilurtuut U, Poulin J, Bonin N (2018). Calendrier 2018-2019: Cycles saisonniers de la glace, de la neige et de la végétation au Nunavik. 19 pages. http://espace.inrs.ca/id/eprint/7323/1/CAIMAN_Calendrier2018_2019.pdf.
- Canada NR (2015). Canadian Digital Elevation Model, 1945-2011. https://open.canada.ca/data/en/dataset/7f245e4d-76c2-4caa-951a-45d1d2051333.
- Canadian Coast Guard, Icebreaking Program (2012). *Ice navigation in Canadian waters*. Icebreaking Program, Canadian Coast Guard. https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=Fs154-31-2012-eng&op=pdf&app=Library.
- Carter NA, Dawson J, Knopp J, Joyce J, Weber M, Kochanowicz Z, Mussells O (2018). Arctic Corridors and Northern Voices: governing marine transportation in the Canadian Arctic (Cambridge Bay, Nunavut community report) doi: 10.20381/RUOR37325.
- Casey JA, Beckers J, Busche T, Haas C (2014). Towards the retrieval of multi-year sea ice thickness and deformation state from polarimetric C-and X-band SAR observations. *Geoscience* and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International, IEEE, 1190–1193 pages.
- Cassotto R, Fahnestock M, Amundson JM, Truffer M, Joughin I (2015). Seasonal and interannual variations in ice melange and its impact on terminus stability, Jakobshavn Isbræ, Greenland. *Journal of Glaciology*, 61(225):76–88. doi: 10.3189/2015JoG13J235.
- Castleden H, Daley K, Sloan Morgan V, Sylvestre P (2013). Settlers unsettled: using field schools and digital stories to transform geographies of ignorance about Indigenous peoples in Canada. *Journal of Geography in Higher Education*, 37(4):487–499. doi: 10.1080/03098265.2013.796352.
- Castleden H, Morgan VS, Lamb C (2012). "I spent the first year drinking tea": Exploring Canadian university researchers' perspectives on community-based participatory research involving Indigenous peoples: Researchers' perspectives on CBPR. The Canadian Geographer / Le Géographe canadien, 56(2):160–179. doi: 10.1111/j.1541-0064.2012.00432.x.

- Cavalieri D, Parkinson CL, Gloersen P, Zwally HJ (1996). Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/8GQ8LZQVL0VL.
- CBC (2018). Exchanging knowledge at Kangiqsujuaq Arsaniq School. Breakaway, 28 mai 2018.
- CBC (2020). SmartICE: Supporting Inuit knowledge of the landscape with technology. https://www.cbc.ca/radio/quirks/mar-14-coronavirus-epidemiology-greenland-glaciers-meltand-more-1.5495007/smartice-supporting-inuit-knowledge-of-the-landscape-with-technology-1.5495008. Quirks & Quarks, 13 mars 2020.
- Cecco L (2019). App helps Inuit hunters navigate thinning sea ice in Canadian Arctic. The Guardian. https://www.theguardian.com/world/2019/dec/08/app-sea-ice-inuit-hunters-canada-arctic.
- Chauché N, Hubbard A, Gascard JC, Box JE, Bates R, Koppes M, Sole A, Christoffersen P, Patton H (2014). Ice–ocean interaction and calving front morphology at two west Greenland tidewater outlet glaciers. *The Cryosphere*, 8(4):1457–1468. doi: 10.5194/tc-8-1457-2014.
- Christiansen HH (2001). Snow-cover depth, distribution and duration data from northeast Greenland obtained by continuous automatic digital photography. *Annals of Glaciology*, 32:102–108. doi: 10.3189/172756401781819355.
- CKIA (2018). Students from Kangirsujjuaq talk about climate change. http: //mixcloud.com/marlene-bordeleau/students-from-kangirsujjuaq-talk-about-climate-change/. Voix autochtones, 9 avril 2018.
- Clerc C, Bernier M, Gauthier Y, Gignac C, Poulin J, Bédard JS, Bleau S, Duhamel-Beaudry É, INRS-ETE (2012). Changements climatiques et infrastructures maritimes du Nunavik: impacts et adaptations : descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik : Quaqtaq, Umiujaq et Kuujjuaq : rapport final. Numéro R1389. 204 pages.
- Copernicus (2020). Copernicus Europe's eyes on Earth Copernicus In Brief. https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/copernicus-brief.
- Coulthard G (2014). *Red skin, white masks: rejecting the colonial politics of recognition.* University of Minnesota Press, 229 pages.
- Cox GF, Weeks WF (1974). Salinity Variations in Sea Ice. *Journal of Glaciology*, 13(67):109–120. doi: 10.3189/S0022143000023418.
- Cox GF, Weeks WF (1988). Profile Properties of Undeformed First-Year Sea Ice. Numéro 88–13. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 64 pages.
- CSA (2011). RADARSAT satellites: Technical comparison. https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/technical-features/radarsat-comparison.asp. Last Modified: 2019-12-19.
- CSA (2018). Canadian Space Agency Frequently Asked Questions RADARSAT Constellation Mission (RCM). https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/faq.asp. Last Modified: 2019-12-19.

- Cuerrier A, Brunet ND, Gérin-Lajoie J, Downing A, Lévesque E (2015). The Study of Inuit Knowledge of Climate Change in Nunavik, Quebec: A Mixed Methods Approach. *Human Ecology*, 43(3):379–394. doi: 10.1007/s10745-015-9750-4.
- Daigle A, Bérubé F, Bergeron N, Matte P (2013). A methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement. *Cold Regions Science and Technology*, 89:36–47. doi: 10.1016/j.coldregions.2013.01.006.
- Dalton A, Copland L, Tivy A, Van Wychen W, Cook A (2019). Iceberg production and characteristics around the Prince of Wales Icefield, Ellesmere Island, 1997-2015. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 51(1):412–427. doi: 10.1080/15230430.2019.1634442.
- Dammann DO, Eicken H, Mahoney AR, Saiet E, Meyer FJ, Craig George JC (2018). Traversing Sea Ice—Linking Surface Roughness and Ice Trafficability Through SAR Polarimetry and Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote* Sensing, 11(2):416–433. doi: 10.1109/JSTARS.2017.2764961.
- Dammann DO, Eriksson LEB, Mahoney AR, Eicken H, Meyer FJ (2019). Mapping pan-Arctic landfast sea ice stability using Sentinel-1 interferometry. *The Cryosphere*, 13(2):557–577. doi: 10.5194/tc-13-557-2019.
- Dawson J, Pizzolato L, Howell SE, Copland L, Johnston ME (2018). Temporal and Spatial Patterns of Ship Traffic in the Canadian Arctic from 1990 to 2015 + Supplementary Appendix 1: Figs. S1–S7 (See Article Tools). ARCTIC, 71(1):15. doi: 10.14430/arctic4698.
- DFO, Canadian Hydrological Service (2019). *Tides, Currents, and Water Levels 2019 Tide Tables*. Numéro Volume 4-Arctic and Hudson Bay. http://www.tides.gc.ca/Eng/data/predictions/2019.
- Donegan C (2020). Re: Spatial autocorrelation: its consequence on Bayesian linear regression. https://discourse.mc-stan.org/t/spatial-autocorrelation-its-consequence-on-bayesian-linear-regression/17266/3.
- Donegan C, Chun Y, Hughes AE (2020). Bayesian estimation of spatial filters with Moran's eigenvectors and hierarchical shrinkage priors. *Spatial Statistics*, 38:100450. doi: 10.1016/j.spasta.2020.100450.
- Dubé J, Buffin-Bélanger T, Bergeron N (2015). Le rôle de la morphologie d'une succession seuil-mouille dans la croissance quotidienne et l'évolution d'un couvert de glace. *Géomorphologie* : relief, processus, environnement, 21(4):343–358. doi: 10.4000/geomorphologie.11178.
- Dufour-Beausejour S (2019). java-snap doi: 10.5281/zenodo.3930921.
- Dufour-Beausejour S, Bernier M, Simon J, Gilbert V, Gauthier Y, Tuniq J, Wendleder A, Roth A (2020). Tenuous Correlation Between Snow Depth or Sea Ice Thickness and C- or X-band Backscattering in Nunavik Fjords of the Hudson Strait. *In preparation*.
- Dufour-Beauséjour S (2019a). tiff-at-shp doi: 10.5281/zenodo.3930953.
- Dufour-Beauséjour S (2019b). tiffstats doi: 10.5281/zenodo.3352367.
- Dufour-Beauséjour S, Plante Lévesque V (2020). Our practice of outreach during the Ice Monitoring project in Nunavik: an early-career researcher perspective. FACETS, 5(1):123–137. doi: 10.1139/facets-2019-0021.

- Dufour-Beauséjour S, Wendleder A, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Tuniq J, Rouleau A (2019a). (Movie S1-S6) Freeze-up and break-up time-lapse movies in Nunavik's Deception Bay (2015-2018). https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904956.
- Dufour-Beauséjour S, Wendleder A, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Tuniq J, Rouleau A (2019b). TerraSAR-X quicklooks for Deception Bay, Nunavik. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905246.
- Dufour-Beauséjour S, Wendleder A, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Tuniq J, Rouleau A (2020a). (Movies S7-S9) TerraSAR-X time-series movies in Nunavik's Deception Bay (2015-2018). https://doi.org/10.1594/PANGAEA.911042.
- Dufour-Beauséjour S, Wendleder A, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Tuniq J, Rouleau A, Roth A (2019c). Seasonal timeline for snow-covered sea ice processes in Nunavik's Deception Bay from TerraSAR-X and time-lapse photography. *The Cryosphere Discussions*, 1–27 pages. doi: 10.5194/tc-2019-199.
- Dufour-Beauséjour S, Wendleder A, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J, Gilbert V, Tuniq J, Rouleau A, Roth A (2020b). Combining TerraSAR-X and time-lapse photography for seasonal sea ice monitoring: the case of Deception Bay, Nunavik. *The Cryosphere*, 14(5):1595–1609. doi: 10.5194/tc-14-1595-2020.
- Dumont M, Sirguey P, Arnaud Y, Six D (2011). Monitoring spatial and temporal variations of surface albedo on Saint Sorlin Glacier (French Alps) using terrestrial photography. *The Cryosphere*, 5(3):759–771. doi: https://doi.org/10.5194/tc-5-759-2011.
- Dunn L (2016). Networks of resilience: online sharing and visions of community in Cambridge Bay, NU. Thèse de doctorat, McGill University, Montreal.
- Eineder M, Fritz T, Mittermayer J, Roth A, Boerner E, Breit H (2008). TerraSAR-X Ground Segment, Basic Product Specification Document. Numéro TX-GS-DD-3302.
- Ellison AM (2004). Bayesian inference in ecology. *Ecology Letters*, 7(6):509–520. doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00603.x.
- ELOKA (2015). Atlas of Community-Based Monitoring and Indigenous Knowledge in a Changing Arctic. http://www.arcticcbm.org. (5 mars 2020).
- ERDC (2014). Ice Mass Balance (IMB) Buoy Program. https://www.erdc.usace.army.mil/Media/ Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/553850/ice-mass-balance-imb-buoy-program/. (6 mars 2020).
- Eriksson LEB, Pemberton P, Lindh H, Karlson B (2010). Evaluation of new spaceborne SAR sensors for sea-ice monitoring in the Baltic Sea. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(1):S56–S73. doi: 10.5589/m10-020.
- ESA (2020a). COSMO-SkyMed. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed.
- ESA (2020b). CryoSat-2 (Earth Explorer Opportunity Mission-2) Sensor complement (SIRAL, DORIS, LRR).

https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cryosat-2.

- ESA (2020c). European Space Agency How to access data. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_to_access_data.
- ESA (2020d). ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2) Sensor complement: (ATLAS). https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/icesat-2.
- ESA (2020e). RADARSAT-2. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/radarsat-2.
- ESA (2020f). RCM (RADARSAT Constellation Mission). https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/rcm.
- ESA (2020g). SMOS ESA Earth Observation Missions Earth Online ESA. https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos.
- ESA (2020h). STEP | Science Toolbox Exploitation Platform. http://step.esa.int/main/.
- ESA (2020i). User Guides Sentinel-1 SAR Sentinel Online. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar.
- ESA, CNES (2020a). 5.1 How altimetry works Radar Altimetry Tutorial and Toolbox. http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/how-altimetry-works/.
- ESA, CNES (2020b). 6.3.2 Sea ice Radar Altimetry Tutorial and Toolbox. http://www.altimetry.info/thematic-use-cases/ice-ice-sheets-and-sea-ice/sea-ice/.
- Farinotti D, Magnusson J, Huss M, Bauder A (2010). Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modelling. *Hydrological Processes*, 24(15):2087–2097. doi: 10.1002/hyp.7629.
- Farrell SL, Kurtz N, Connor LN, Elder BC, Leuschen C, Markus T, McAdoo DC, Panzer B, Richter-Menge J, Sonntag JG (2012). A First Assessment of IceBridge Snow and Ice Thickness Data Over Arctic Sea Ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(6):2098–2111. doi: 10.1109/TGRS.2011.2170843.
- Fequet D, Hache L, McCourt S, Langlois D, Dicaire C, Premont B, Jolicoeur A, Minano A (2011). Sea Ice Climatic Atlas: Northern Canadian Waters 1981–2010. 39 pages.
- Fissel DB, Chave RA, Clarke M, Johnston P, Borg K, Marko JR, Ross E, Buermans J, Stone M (2013). Advances in moored upward looking sonar systems for long term measurement of arctic ice and oceanography. 2013 OCEANS - San Diego, 1–7 pages.
- Flett DG (2004). Operational use of SAR at the Canadian Ice Service: Present operations and a look to the future. *Proceedings of the 2nd Workshop*, ESA, volume 565, 16 pages.
- FNIGC (2019). Home / FNIGC. https://fnigc.ca/. 2019-07-19.
- Fors AS, Brekke C, Doulgeris AP, Eltoft T, Renner AHH, Gerland S (2016). Late-summer sea ice segmentation with multi-polarisation SAR features in C and X band. *The Cryosphere*, 10(1):401–415. doi: https://doi.org/10.5194/tc-10-401-2016.
- Foucher S, Lopez-Martinez C (2014). Analysis, Evaluation, and Comparison of Polarimetric SAR Speckle Filtering Techniques. *IEEE Transactions on Image Processing*, 23(4):1751–1764. doi: 10.1109/TIP.2014.2307437.

- Fusion Y (2018). Social Commitment and School Perseverance Education of the Future. https://fusionjeunesse.org/en/. 2019-07-19.
- Galley R, Trachtenberg M, Langlois A, Barber D, Shafai L (2009). Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness. *Cold Regions Science and Technology*, 57(1):29–38. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.01.003.
- Gauthier Y, Dufour-Beauséjour S, Poulin J, Bernier M (2018). Ice Monitoring in Deception Bay: Progress report 2016-2018. Numéro 1792. 65 pages. http://espace.inrs.ca/id/eprint/7538/.
- Gauthier Y, Poulin J, Gill-Fortin J, Dufour-Beauséjour S, Bernier M (2019). Sea ice monitoring services at Deception Bay, Salluit and Kangiqsujuaq: Progress report 2018-2019. Numéro R1892. 27 pages. http://espace.inrs.ca/9674/.
- Gearheard S, Aporta C, Aipellee G, O'Keefe K (2011). The Igliniit project: Inuit hunters document life on the trail to map and monitor arctic change. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 55(1):42–55. doi: 10.1111/j.1541-0064.2010.00344.x.
- Gearheard S, Holm L, Huntington H, Leavitt J, Mahoney A (2013). The meaning of ice: People and sea ice in three Arctic communities. International Polar Institute, Montreal and Hanover.
- Gearheard S, Matumeak W, Angutikjuaq I, Maslanik J, Huntington HP, Leavitt J, Kagak DM, Tigullaraq G, Barry RG (2006). "It's Not that Simple": A Collaborative Comparison of Sea Ice Environments, Their Uses, Observed Changes, and Adaptations in Barrow, Alaska, USA, and Clyde River, Nunavut, Canada. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 35(4):203–211. doi: 10.1579/0044-7447(2006)35[203:INTSAC]2.0.CO;2.
- Gegiuc A, Similä M, Karvonen J, Lensu M, Mäkynen M, Vainio J (2018). Estimation of degree of sea ice ridging based on dual-polarized C-band SAR data. *The Cryosphere*, 12(1):343–364. doi: 10.5194/tc-12-343-2018.
- Geldsetzer T, Arkett M, Zagon T, Charbonneau F, Yackel JJ, Scharien RK (2015). All-Season Compact-Polarimetry C-band SAR Observations of Sea Ice. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 41(5):485–504. doi: 10.1080/07038992.2015.1120661.
- Geldsetzer T, Langlois A, Yackel J (2009). Dielectric properties of brine-wetted snow on first-year sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 58(1–2):47–56. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.03.009.
- Geldsetzer T, Yackel JJ (2009). Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(1):73–84. doi: 10.5589/m08-075.
- GENIVAR (2007). Study on Maritime Navigation in Deception Bay Impact on Marine Mammals and Traditional Inuit Activity. Report from GENIVAR for Canadian Royalties Inc. 71 pages.
- GENIVAR (2012). Environmental and Social Impact Assessment of the Deception Bay Wharf and Sediment Management. Report from GENIVAR for Canadian Royalties Inc. 281 pages.
- Gerson D, Rosenfeld A (1975). Automatic sea ice detection in satellite pictures. *Remote Sensing* of Environment, 4:187–198. doi: 10.1016/0034-4257(75)90015-2.

- Gerson DJ (1958). A technique for time-lapse photography of sea ice. Arctic Sea Ice: Proceedings of the Conference, National Academy of Sciences National Research Council, volume 598, 298 pages.
- Ghanbari M, Clausi DA, Xu L, Jiang M (2019). Contextual Classification of Sea-Ice Types Using Compact Polarimetric SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10):7476–7491. doi: 10.1109/TGRS.2019.2913796.
- Gibson C, Wallace C, Brockington M, Jasiak I, Woodworth S (2018). Science Outreach and Youth Engagement in an innovative On-the-Land Camp in the NWT. ArcticNet Annual Scientific Meeting 2018, Ottawa.
- Gignac C, Bernier M, Chokmani K (2019). IcePAC a probabilistic tool to study sea ice spatio-temporal dynamics: application to the Hudson Bay area. *The Cryosphere*, 13(2):451–468. doi: 10.5194/tc-13-451-2019.
- Gignac C, Bernier M, Chokmani K, Poulin J (2017). IceMap250—Automatic 250 m Sea Ice Extent Mapping Using MODIS Data. *Remote Sensing*, 9(1):70. doi: 10.3390/rs9010070.
- Gill JPS, Yackel JJ, Geldsetzer T, Fuller MC (2015). Sensitivity of C-band synthetic aperture radar polarimetric parameters to snow thickness over landfast smooth first-year sea ice. *Remote Sensing of Environment*, 166:34–49. doi: 10.1016/j.rse.2015.06.005.
- Gogineni SP, Moore RK, Grenfell TC, Barber D, Digby S, Drinkwater M (1992). The effects of freeze-up and melt processes on microwave signatures, volume 68, 329–341 pages. American Geophysical Union.
- Gouvernement du Canada (2007). Ressources naturelles Canada Applications à la surveillance de la glace de mer. https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitairephotos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressourceseducatives/9572?_ga=2.74311762.1340716474.1589483846-960103573.1589483846. Last Modified: 2011-12-19.
- Gouvernement du Canada T (2009a). Intégration [fiche no. 10]. https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&srchtxt=intLast Modified: 2015-09-23.
- Gouvernement du Canada T (2009b). polynie [fiche no. 1] TERMIUM Plus® Recherche TERMIUM Plus®. https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=polynie&codom2nd_wet=1#resultrecs. Last Modified: 2015-09-23.
- Government of Canada (2020). Ice forecasts and observations, Ice applications and data, Archive Search. https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml?lang=en.
- Greydanus K, Provencher J, Carter NA, Dawson J, Kochanowicz Z (2018). Arctic Corridors and Northern Voices: Governing marine transportation in the Canadian Arctic (Salluit, Quebec community report) doi: 10.20381/ruor38036.
- Guerreiro K, Fleury S, Zakharova E, Rémy F, Kouraev A (2016). Potential for estimation of snow depth on Arctic sea ice from CryoSat-2 and SARAL/AltiKa missions. *Remote Sensing of Environment*, 186:339–349. doi: 10.1016/j.rse.2016.07.013.

- Gérin-Lajoie J, Herrmann TM, MacMillan GA, Hébert-Houle É, Monfette M, Rowell JA, Anaviapik Soucie T, Snowball H, Townley E, Lévesque E, Amyot M, Franssen J, Dedieu JP (2018). IMALIRIJIIT: a community-based environmental monitoring program in the George River watershed, Nunavik, Canada. *Écoscience*, pages 1–19. doi: 10.1080/11956860.2018.1498226.
- Haas C, Beckers J, King J, Silis A, Stroeve J, Wilkinson J, Notenboom B, Schweiger A, Hendricks S (2017). Ice and Snow Thickness Variability and Change in the High Arctic Ocean Observed by In Situ Measurements: Arctic Sea Ice and Snow Thickness. *Geophysical Research Letters*, 44(20):10,462–10,469. doi: 10.1002/2017GL075434.
- Haas C, Hendricks S, Eicken H, Herber A (2010). Synoptic airborne thickness surveys reveal state of Arctic sea ice cover: THICKNESS SURVEYS OF ARCTIC SEA ICE. *Geophysical Research Letters*, 37(9):n/a–n/a. doi: 10.1029/2010GL042652.
- Haas C, Lobach J, Hendricks S, Rabenstein L, Pfaffling A (2009). Helicopter-borne measurements of sea ice thickness, using a small and lightweight, digital EM system. *Journal of Applied Geophysics*, 67(3):234–241. doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.05.005.
- Hall-Beyer M (2017). *GLCM Texture: A Tutorial v. 3.0.* 75 pages. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12424.21767.
- Harding C (2018). SmartICE Arctic Sea Ice Training. Numéro ID 15206695. 20 pages. https://tcdocs.ingeniumcanada.org/sites/default/files/2019-05/SmartICE%20-%20Arctic%20Sea%20Ice%20Training.PDF.
- Heath J (2010). People of a feather, a film about survival in a changing Canadian Arctic. http://peopleofafeather.com.
- Herdes E, Copland L, Danielson B, Sharp M (2012). Relationships between iceberg plumes and sea-ice conditions on northeast Devon Ice Cap, Nunavut, Canada. Annals of Glaciology, 53(60):1–9. doi: 10.3189/2012AoG60A163.
- Hirsch R, Furgal C, Hackett C, Sheldon T, Bell T, Angnatok D, Winters K, Pamak C (2016). Going Off, Growing Strong: A program to enhance individual youth and community resilience in the face of change in Nain, Nunatsiavut. *Études/Inuit/Studies*, 40(1):63–84. doi: https://doi.org/10.7202/1040145ar. Publisher: Association Inuksiutiit Katimajiit Inc.
- Hoogeveen D (2015). Sub-surface Property, Free-entry Mineral Staking and Settler Colonialism in Canada. Antipode, 47(1):121–138. doi: 10.1111/anti.12095.
- Houser C, Gough WA (2003). Variations in Sea Ice in the Hudson Strait: 1971-1999. *Polar Geography*, 27(1):1–14. doi: 10.1080/789610211.
- Hudson E, Aihoshi D, Gaines T, Simard G, Mullock J (2001). The Weather of Nunavut and the Arctic Graphic Area Forecast 36 and 37. 245 pages.
- Huntington HP, Gearheard S, Holm LK, Noongwook G, Opie M, Sanguya J (2016). Sea ice is our beautiful garden: indigenous perspectives on sea ice in the Arctic, 664 pages. John Wiley and Sons, Ltd.
- Hébert-Houle É (2017). Étude de cas du programme Avativut au Nunavik: Décoloniser pour mieux engager les élèves. Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières.

- Høyland KV (2009). Ice thickness, growth and salinity in Van Mijenfjorden, Svalbard, Norway. *Polar Research*, 28(3):339–352. doi: 10.1111/j.1751-8369.2009.00133.x.
- Iacozza J, Barber DG (1999). An examination of the distribution of snow on sea-ice. Atmosphere-Ocean, 37(1):21–51. doi: 10.1080/07055900.1999.9649620.
- Iacozza J, Barber DG (2010). An examination of snow redistribution over smooth land-fast sea ice. *Hydrological Processes*, 24(7):850–865. doi: 10.1002/hyp.7526.
- ICC Canada (2008). The Sea Ice is Our Highway An Inuit Perspective on Transportation in the Arctic / Inuit Circumpolar Council Canada. A Contribution to the Arctic Marine Shipping Assessment. 39 pages. Library Catalog: www.inuitcircumpolar.com. https://www.inuitcircumpolar.com/project/the-sea-ice-is-our-highway-an-inuit-perspective-ontransportation-in-the-arctic/.
- Ide R, Oguma H (2013). A cost-effective monitoring method using digital time-lapse cameras for detecting temporal and spatial variations of snowmelt and vegetation phenology in alpine ecosystems. *Ecological Informatics*, 16:25–34. doi: 10.1016/j.ecoinf.2013.04.003.
- INQ (2017a). Lignes directrices pour la recherche Groupe de travail des Premiers Peuples. Institut nordique du Québec (INQ).
- INQ (2017b). Lignes directrices pour la recherche Groupe de travail des Premiers Peuples. Institut nordique du Québec (INQ).
- International Council for Science (2004). A framework for the international polar year 2007-2008 produced by the ICSU IPY 2007-2008 Planning Group. ICSU, Paris, France. OCLC: 813291354. http://wayback.archiveit.org/2475/http://classic.ipy.org/development/framework/framework_short.pdf.
- Isleifson D, Galley RJ, Barber DG, Landy JC, Komarov AS, Shafai L (2014). A Study on the C-Band Polarimetric Scattering and Physical Characteristics of Frost Flowers on Experimental Sea Ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3):1787–1798. doi: 10.1109/TGRS.2013.2255060.
- Isleifson D, Hwang B, Barber D, Scharien R, Shafai L (2010). C-Band Polarimetric Backscattering Signatures of Newly Formed Sea Ice During Fall Freeze-Up. *IEEE Transactions on Geoscience* and Remote Sensing, 48(8):3256–3267. doi: 10.1109/TGRS.2010.2043954.
- ITK (2007). Negotiating research relationships with Inuit communities. Inuit Tapiriit Kanatami (ITK).
- ITK (2018). National Inuit Strategy on Research. Inuit Tapiriit Kanatami (ITK), Ottawa.
- ITK (2020). National Representational Organization for Inuit in Canada. https://www.itk.ca/. Library Catalog: www.itk.ca.
- Jagdhuber T, Stockamp J, Hajnsek I, Ludwig R (2014). Identification of Soil Freezing and Thawing States Using SAR Polarimetry at C-Band. *Remote Sensing*, 6(3):2008–2023. doi: 10.3390/rs6032008.
- Jeffreys H (1998). The Theory of Probability. OUP Oxford, 3rd edition. Google-Books-ID: vh9Act9rtzQC.

- Johansson AM, Brekke C, Spreen G, King JA (2018). X-, C-, and L-band SAR signatures of newly formed sea ice in Arctic leads during winter and spring. *Remote Sensing of Environment*, 204:162–180. doi: 10.1016/j.rse.2017.10.032.
- Johansson AM, King JA, Doulgeris AP, Gerland S, Singha S, Spreen G, Busche T (2017). Combined observations of Arctic sea ice with near-coincident colocated X-band, C-band, and L-band SAR satellite remote sensing and helicopter-borne measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1):669–691. doi: 10.1002/2016JC012273.
- Johnson N, Behe C, Danielsen F, Kruümmel EM, Nickels S, Pulsifer PL (2016). Community-Based Monitoring and Indigenous Knowledge in a Changing Arctic:. 76 pages.
- Jol HM (2008). Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Elsevier.
- Jérôme L, Biroté C, Coocoo J (2018). Images de la mort et ritualisation du deuil sur les réseaux socionumériques : des usages de Facebook en contexte autochtone. *Frontières*, 29(2). doi: https://doi.org/10.7202/1044165ar.
- Kermoal N, Altamirano-Jiménez I (2016). Living on the Land: Indigenous Women's Understanding of Place. Athabasca University Press. Google-Books-ID: ZNDBDAAAQBAJ.
- Kienholz C, Amundson JM, Motyka RJ, Jackson RH, Mickett JB, Sutherland DA, Nash JD, Winters DS, Dryer WP, Truffer M (2019). Tracking icebergs with time-lapse photography and sparse optical flow, LeConte Bay, Alaska, 2016–2017. *Journal of Glaciology*, 65(250):195–211. doi: 10.1017/jog.2018.105.
- Kim JW, Kim Dj, Hwang BJ (2012). Characterization of Arctic Sea Ice Thickness Using High-Resolution Spaceborne Polarimetric SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1):13–22. doi: 10.1109/TGRS.2011.2160070.
- Kim YS, Onstott R, Moore R (1984). Effect of a snow cover on microwave backscatter from sea ice. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 9(5):383–388. doi: 10.1109/JOE.1984.1145649.
- Kimble GHT, Collaborators (1946). Wind in Icelandic Fjords. Bulletin of the American Meteorological Society, 27(5):216–223. doi: 10.1175/1520-0477-27.5.216.
- Knopp JA (2010). Investigating the Effects of Environmental Change on Arctic Char (Salvelinus alpinus) Growth Using Scientific and Inuit Traditional Knowledge. ARCTIC, 63(4):493–497. doi: 10.14430/arctic3348. Number: 4.
- Kopp M, Tuo Y, Disse M (2019). Fully automated snow depth measurements from time-lapse images applying a convolutional neural network. *Science of The Total Environment*, 697:134213. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134213.
- Korosov A, Rampal P (2017). A Combination of Feature Tracking and Pattern Matching with Optimal Parametrization for Sea Ice Drift Retrieval from SAR Data. *Remote Sensing*, 9(3):258. doi: 10.3390/rs9030258.
- Kovacs A, Holladay JS, Bergeron CJ (1995). The footprint/altitude ratio for helicopter electromagnetic sounding of sea-ice thickness: Comparison of theoretical and field estimates. *Geophysics*, 60(2):374–380.

- KRG (2017). Kativik Regional Government General Information. http://www.krg.ca/kativik-regional-government/general-information. 2019-07-17.
- Kwok R (2018). Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*, 13(10):105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
- Kępski D, Luks B, Migała K, Wawrzyniak T, Westermann S, Wojtuń B (2017). Terrestrial remote sensing of snowmelt in a diverse High-Arctic tundra environment using time-lapse imagery. *Remote Sensing*, 9(7):733. doi: 10.3390/rs9070733.
- Laidler GJ (2006). Inuit and Scientific Perspectives on the Relationship Between Sea Ice and Climate Change: The Ideal Complement? *Climatic Change*, 78(2–4):407–444. doi: 10.1007/s10584-006-9064-z.
- Laidler GJ, Dialla A, Joamie E (2008). Human geographies of sea ice: freeze/thaw processes around Pangnirtung, Nunavut, Canada. *Polar Record*, 44(4):335–361. doi: 10.1017/S003224740800750X.
- Laidler GJ, Elee P (2008). Human geographies of sea ice: freeze/thaw processes around Cape Dorset, Nunavut, Canada. *Polar Record*, 44(1):51–76. doi: 10.1017/S0032247407007061.
- Laidler GJ, Ikummaq T (2008). Human geographies of sea ice: freeze/thaw processes around Igloolik, Nunavut, Canada. *Polar Record*, 44(02). doi: 10.1017/S0032247407007152.
- Laxon SW, Giles KA, Ridout AL, Wingham DJ, Willatt R, Cullen R, Kwok R, Schweiger A, Zhang J, Haas C, et al. (2013). CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume: CRYOSAT-2 SEA ICE THICKNESS AND VOLUME. *Geophysical Research Letters*, 40(4):732–737. doi: 10.1002/grl.50193.
- Leeuw Sd, Cameron ES, Greenwood ML (2012). Participatory and community-based research, Indigenous geographies, and the spaces of friendship: A critical engagement: A critical engagement. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 56(2):180–194. doi: 10.1111/j.1541-0064.2012.00434.x.
- Legendre P, Legendre L (2003). Numerical Ecology, Volume 24 3rd Edition. volume 20 de Developments in Environmental Modelling. Elsevier, second english edition edition. https://www.elsevier.com/books/numerical-ecology/legendre/978-0-444-53868-0.
- Leisti H, Riska K, Heiler I, Eriksson P, Haapala J (2009). A method for observing compression in sea ice fields using IceCam. *Cold Regions Science and Technology*, 59(1):65–77. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.06.007.
- Lemke P, Jacobi HW (2012). Arctic Climate Change: The ACSYS Decade and Beyond. volume 43 de Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Springer Netherlands. http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-2027-5.
- Liu J, Chen R, Song Y, Yang Y, Qing W, Han C, Liu Z (2015). Observations of precipitation type using a time-lapse camera in a mountainous region and calculation of the rain/snow proportion based on the critical air temperature. *Environmental Earth Sciences*, 73(4):1545–1554. doi: 10.1007/s12665-014-3506-0.

- Ljubicic GJ, Pulsifer PL, Hayes A, Taylor DRF (2014). Chapter 14 The Creation of the Inuit siku (Sea Ice) Atlas. *Modern Cartography Series*. Taylor DRF, éditeur, Academic Press, volume 5 de *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography*, pages 201–218.
- Lohse J, Doulgeris AP, Dierking W (2019). An Optimal Decision-Tree Design Strategy and Its Application to Sea Ice Classification from SAR Imagery. *Remote Sensing*, 11(13):1574. doi: 10.3390/rs11131574.
- Loomba A (2015). Colonialism/postcolonialism. Routledge, Taylor and Francis Group, 3rd edition.
- Loseto LL, Brewster JD, Ostertag SK, Snow K, MacPhee SA, McNicholl DG, Choy ES, Giraldo C, Hornby CA (2018). Diet and feeding observations from an unusual beluga harvest in 2014 near Ulukhaktok, Northwest Territories, Canada. Arctic Science, 4(3):421–431. doi: 10.1139/as-2017-0046.
- Lyonnais MC (2017). Les médias sociaux dans le cadre d'une recherche participative en santé auprès des Inuit du Nunavik. Thèse de doctorat, Université Laval.
- MacMillan GA, Falardeau M, Girard C, Dufour-Beauséjour S, Lacombe-Bergeron J, Menzies AK, Henri DA (2019). Highlighting the potential of peer-led workshops in training early-career researchers for conducting research with Indigenous communities. *FACETS*, 4(1):275–292. doi: 10.1139/facets-2018-0046.
- Mahmud MS, Geldsetzer T, Howell SEL, Yackel JJ, Nandan V, Scharien RK (2018). Incidence Angle Dependence of HH-Polarized C- and L-Band Wintertime Backscatter Over Arctic Sea Ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11):6686–6698. doi: 10.1109/TGRS.2018.2841343.
- Mahoney A, Gearheard S (2008). *Handbook for community-based sea ice monitoring*. volume 14 de *Special Report*. National Snow and Ice Data Center.
- Mahoney A, Gearheard S, Oshima T, Qillaq T (2009). Sea ice thickness measurements from a community-based observing network. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3):370.
- Mailhot A, Chaumont D (2017). Élaboration du portrait bioclimatique futur du Nunavik Tome II. Rapport présenté au Ministère de la forêt, de la faune et des parcs. 215 pages.
- Marchenko A (2018). Thermo-mechanical loads of confined sea ice on structures. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2129):20170341. doi: 10.1098/rsta.2017.0341.
- Martin T (2013). Normativité sociale et normativité épistémique: La recherche en milieu autochtone au Canada et dans le monde anglo-saxon. *Socio*, (1):135–152. doi: 10.4000/socio.291.
- Matsuoka T, Uratsuka S, Satake M, Nadai A, Umehara T, Maeno H, Wakabayashi H, Nishio F, Fukamachi Y (2002). Deriving sea-ice thickness and ice types in the Sea of Okhotsk using dual-frequency airborne SAR (Pi-SAR) data. Annals of Glaciology, 34:429–434. doi: 10.3189/172756402781817392.
- McMahon R, Mangiok T (2014). From the First Mile to Outer Space: Tamaani Satellite Internet in Northern Quebec. 10(2):18.

- MDA (2018). *RADARSAT-2 Product Description*. Numéro RN-SP-52-1238. 91 pages. https://mdacorporation.com/docs/default-source/technical-documents/geospatial-services/52-1238_rs2_product_description.pdf.
- Meier W, Markus T, Comiso J (2018). AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Daily 12.5 km Brightness Temperatures, Sea Ice Concentration, Motion and Snow Depth Polar Grids, Version 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/RA1MIJOYPK3P.
- Meier WN, Hovelsrud GK, van Oort BE, Key JR, Kovacs KM, Michel C, Haas C, Granskog MA, Gerland S, Perovich DK, et al. (2014). Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity: ARCTIC SEA ICE: REVIEW OF RECENT CHANGES. *Reviews of Geophysics*, 52(3):185–217. doi: 10.1002/2013RG000431.
- Mitchell TL, Baker E (2005). Community-Building Versus Career-Building Research: The Challenges, Risks, and Responsibilities of Conducting Research With Aboriginal and Native American Communities. *Journal of Cancer Education*, 20:41–46. doi: 10.1207/s15430154jce2001s_10.
- Morton Ninomiya ME, Pollock NJ (2017). Reconciling community-based Indigenous research and academic practices: Knowing principles is not always enough. *Social Science & Medicine*, 172:28–36. doi: 10.1016/j.socscimed.2016.11.007.
- Mudryk LR, Derksen C, Howell S, Laliberté F, Thackeray C, Sospedra-Alfonso R, Vionnet V, Kushner PJ, Brown R (2018). Canadian snow and sea ice: historical trends and projections. *The Cryosphere*, 12(4):1157–1176. doi: 10.5194/tc-12-1157-2018.
- Mussells O, Dawson J, Howell S (2017). Navigating pressured ice: Risks and hazards for winter resource-based shipping in the Canadian Arctic. *Ocean and Coastal Management*, 137:57–67. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.12.010.
- Mémin A, Flament T, Rémy F, Llubes M (2014). Snow- and ice-height change in Antarctica from satellite gravimetry and altimetry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 404:344–353. doi: 10.1016/j.epsl.2014.08.008.
- Nakamura K, Wakabayashi H, Naoki K, Nishio F, Moriyama T, Uratsuka S (2005). Observation of sea-ice thickness in the sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (pi-SAR) data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11):2460–2469. doi: 10.1109/TGRS.2005.853928.
- Nakamura K, Wakabayashi H, Uto S, Ushio S, Nishio F (2009). Observation of Sea-Ice Thickness Using ENVISAT Data From LÜtzow-Holm Bay, East Antarctica. *IEEE Geoscience and Remote* Sensing Letters, 6(2):277–281. doi: 10.1109/LGRS.2008.2011061.
- Nandan V, Geldsetzer T, Islam T, Yackel JJ, Gill JP, Fuller MC, Gunn G, Duguay C (2016). Ku-, X- and C-band measured and modeled microwave backscatter from a highly saline snow cover on first-year sea ice. *Remote Sensing of Environment*, 187:62–75. doi: 10.1016/j.rse.2016.10.004.
- Nandan V, Geldsetzer T, Mahmud M, Yackel J, Ramjan S (2017). Ku-, X-and C-Band Microwave Backscatter Indices from Saline Snow Covers on Arctic First-Year Sea Ice. *Remote Sensing*, 9(7):757. doi: doi.org/10.3390/rs9070757.

- NCAI (2012). 'Walk Softly and Listen Carefully': Building Research Relationships with Tribal Communities. NCAI Policy Research Center and MSU Center for Native Health Partnerships, Washington, DC, and Bozeman, MT.
- Nghiem SV, Kwok R, Yueh SH, Gow AJ, Perovich DK, Kong JA, Hsu CC (1997). Evolution in polarimetric signatures of thin saline ice under constant growth. *Radio Science*, 32(1):127–151. doi: 10.1029/96RS03051.
- Nickels S, Furgal C, Buell M, Moquin H (2005). Unikkaaqatigiit Putting the Human Face on Climate Change: Perspectives from Inuit in Canada. Inuit Tapiriit Kanatami, Nasivvik Centre for Inuit Health and Changing Environments at Université Laval and the Ajunnginiq Centre at the National Aboriginal Health Organization, pre-release english only version edition.
- Nickels S, Knotsch C (2011). Inuit perspectives on research ethics: The work of Inuit Nipingit. Études/Inuit/Studies, 35(1-2):57. doi: 10.7202/1012835ar.

NRCAN (2008). Microwave remote sensing. https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensingtutorials/microwave-remote-sensing/9371. Last Modified: 2015-12-01.

- NSIDC (2020a). NASA Distributed Active Archive Center (DAAC) at NSIDC AMSR-E/AMSR2 Unified Data - Advanced Microwave Scanning Radiometers - AMSRU Overview. https://nsidc.org/data/amsre_amsr2. (11 mars 2020).
- NSIDC (2020b). NASA Distributed Active Archive Center (DAAC) at NSIDC SMMR, SSM/I, and SSMIS Sensors. https://nsidc.org/ancillary-pages/smmr-ssmi-ssmis-sensors. (11 mars 2020).
- NSIDC (2020c). Ocean waves in November—in the Arctic / Arctic Sea Ice News and Analysis. https://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/11/blue-waves-in-november-in-the-arctic/.
- NSIDC (2020d). Remote Sensing: Passive Microwave / National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/cryosphere/seaice/study/passive_remote_sensing.html.
- Ocean Networks Canada (2020). Cambridge Bay Community Observatory. https://www.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/community-observatories/cambridge-bay.
- O'Faircheallaigh C (2013). Community development agreements in the mining industry: an emerging global phenomenon. *Community Development*, 44(2):222–238. doi: 10.1080/15575330.2012.705872.
- Olonscheck D, Mauritsen T, Notz D (2019). Arctic sea-ice variability is primarily driven by atmospheric temperature fluctuations. *Nature Geoscience*, 12(6):430–434. doi: 10.1038/s41561-019-0363-1.
- Onstott RG (1992). SAR and Scatterometer Signatures of Sea Ice. Geophysical Monograph 68. American Geophysical Union. Google-Books-ID: xp867lasMuwC.
- Orloff J, Bloom J (2014a). Comparison of frequentist and Bayesian inference. Numéro 18.05 Class 20 de MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/terms.

- Orloff J, Bloom J (2014b). Null Hypothesis Significance Testing I. Numéro 18.05 Class 17b de MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/terms.
- OSPO (2015). NOAA Office of Satellite and Product Operations (OSPO) About AMSR2. https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amsr2.html.
- Paul S, Willmes S, Hoppmann M, Hunkeler PA, Wesche C, Nicolaus M, Heinemann G, Timmermann R (2015). The impact of early-summer snow properties on Antarctic landfast sea-ice X-band backscatter. Annals of Glaciology, 56(69):263–273. doi: 10.3189/2015AoG69A715.
- Pelletier JF, Guy E (2015). Supply and demand for the Eastern Canadian Arctic Sealift. Maritime Policy and Management, 42(7):669–681. doi: 10.1080/03088839.2014.925594.
- Peltoniemi M, Aurela M, Bottcher K, Kolari P, Loehr J, Karhu J, Linkosalmi M, Tanis CM, Tuovinen JP, Arslan AN (2018). Webcam network and image database for studies of phenological changes of vegetation and snow cover in Finland, image time series from 2014 to 2016. Earth system science data, 10(1):173–184. doi: 10.5194/essd-10-173-2018.
- Perovich DK (2003). Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3). doi: 10.1029/2001JC001079.
- Perovich DK, Gow AJ (1996). A quantitative description of sea ice inclusions. Journal of Geophysical Research: Oceans, 101(C8):18327–18343. doi: 10.1029/96JC01688.
- Peters IR, Amundson JM, Cassotto R, Fahnestock M, Darnell KN, Truffer M, Zhang WW (2015). Dynamic jamming of iceberg-choked fjords. *Geophysical Research Letters*, 42(4):1122–1129. doi: 10.1002/2014GL062715.
- Petit JG, Viger YB, Aatami P, Iserhoff A (2011). Les Inuit et les Cris du Nord du Québec: Territoire, gouvernance, société et culture. PUQ. Google-Books-ID: bfr98ksBfMYC.
- Petrich C, Eicken H (2016). Overview of sea ice growth and properties, 1–41 pages. John Wiley and Sons, Ltd.
- Pfeifer P (2018). An Inuit Critique of Canadian Arctic Research. https://www.arcticfocus.org/stories/inuit-critique-canadian-arctic-research/.
- Philie P (2016). Perception de l'état des glaces dans la baie de Wakeham (observations faîtes par le gérant du poste de traite de la Compagnie de la Baie d'Hudson entre les années 1914 et 1939). Parc national des Pingualuit.
- Planck CJ, Whitlock J, Polashenski C, Perovich D (2019). The evolution of the seasonal ice mass balance buoy. 165:102792. doi: 10.1016/j.coldregions.2019.102792.
- Pottier E (2007). Polarimetry Basics. http://earth.esa.int/landtraining07/D1LA3-Pottier.pdf.
- Provencher JF, McEwan M, Mallory ML, Braune BM, Carpenter J, Harms NJ, Savard G, Gilchrist HG (2013). How wildlife research can be used to promote wider community participation in the North. *Arctic*, 66(2):237–243.
- QNW (2012). Guidelines for Research with Aboriginal Women. Quebec Native Women. 21 pages.

- Ramjan S, Geldsetzer T, Scharien R, Yackel J (2018). Predicting Melt Pond Fraction on Landfast Snow Covered First Year Sea Ice from Winter C-Band SAR Backscatter Utilizing Linear, Polarimetric and Texture Parameters. *Remote Sensing*, 10(10):1603. doi: 10.3390/rs10101603.
- Ramsay B, Manore M, Weir L, Wilson K, Bradley D (1998). Use of Radarsat Data in the Canadian Ice Service. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24(1):36–42. doi: 10.1080/07038992.1998.10874689.
- Ressel R, Singha S (2016). Comparing Near Coincident Space Borne C and X Band Fully Polarimetric SAR Data for Arctic Sea Ice Classification. *Remote Sensing*, 8(3):198. doi: 10.3390/rs8030198.
- Revuelto J, Jonas T, López-Moreno JI (2016). Backward snow depth reconstruction at high spatial resolution based on time-lapse photography. *Hydrological Processes*, 30(17):2976–2990. doi: 10.1002/hyp.10823.
- Richards C, Pittman M, Phelan K, Nudds S, Hamilton J (2017). The Barrow Strait Real Time Observatory: Under-ice Monitoring in the Canadian High Arctic. Proceedings of the International Conference on Underwater Networks and Systems - WUWNET'17, ACM Press, 1–7 pages.
- Ricker R, Hendricks S, Beckers J (2016). The Impact of Geophysical Corrections on Sea-Ice Freeboard Retrieved from Satellite Altimetry. *Remote Sensing*, 8(4):317. doi: 10.3390/rs8040317.
- Ricker R, Hendricks S, Kaleschke L, Tian-Kunze X, King J, Haas C (2017). A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere*, 11(4):1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.
- Riddell JK, Salamanca A, Pepler DJ, Cardinal S, McIvor O (2017). Laying the Groundwork: A Practical Guide for Ethical Research with Indigenous Communities. *International Indigenous Policy Journal*, 8(2). doi: 10.18584/iipj.2017.8.2.6.
- ROCHE, CANARCTIC (1993). Projet Raglan. Évaluation des impacts et des risques associés au transport maritime à Baie Déception. Présenté à Falconbridge. 100 pages.
- Rodon T, Lévesque F, Blais J (2013). De Rankin Inlet à Raglan, le développement minier et les communautés inuit. *Études/Inuit/Studies*, 37(2):103. doi: 10.7202/1025712ar.
- Roscoe HK, Brooks B, Jackson AV, Smith MH, Walker SJ, Obbard RW, Wolff EW (2011). Frost flowers in the laboratory: Growth, characteristics, aerosol, and the underlying sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 116(D12). doi: 10.1029/2010JD015144.
- Ruffin É, Alaku SP (2011). Community Building de Salluit : Les Sallumiut et l'urbanisme. Les Inuit et les Cris du Nord du Québec: Territoire, gouvernance, société et culture, PUQ, 468 pages.
- Saas Y, Gosselin F (2014). Comparison of regression methods for spatially-autocorrelated count data on regularly- and irregularly-spaced locations. *Ecography*, 37:476–489. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00279.x.
- Scharien RK, Hochheim K, Landy J, Barber DG (2014). First-year sea ice melt pond fraction estimation from dual-polarisation C-band: Part 2: Scaling in situ to Radarsat-2. The Cryosphere, 8(6):2163–2176. doi: 10.5194/tc-8-2163-2014.

- Scharien RK, Yackel JJ, Barber DG, Asplin M, Gupta M, Isleifson D (2012). Geophysical controls on C band polarimetric backscatter from melt pond covered Arctic first-year sea ice: Assessment using high-resolution scatterometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C00G18). doi: 10.1029/2011JC007353.
- Schmitt A, Wendleder A, Hinz S (2015). The Kennaugh element framework for multi-scale, multi-polarized, multi-temporal and multi-frequency SAR image preparation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102:122–139. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.007.
- Segal R (2019). "The best of both worlds" connecting remote sensing and Arctic communities for safe sea ice travel. Thèse de doctorat, University of Victoria. Accepted: 2019-09-06T20:37:08Z.
- Shalina EV, Sandven S (2018). Snow depth on Arctic sea ice from historical in situ data. *The Cryosphere*, 12(6):1867–1886. doi: 10.5194/tc-12-1867-2018.
- Shih SE, Ding KH, Nghiem SV, Hsu CC, Kong JA, Jordan AK (1998). This saline ice thickness retrieval using time-series C-band polarimetric radar measurements. *Geoscience and Remote* Sensing, IEEE Transactions on, 36(5):1589–1598.
- Simon J, Dufour-Beauséjour S (2020). RS2_bayesian_linear_regression doi: 10.5281/zenodo.3905286.
- Singha S, Johansson M, Hughes N, Hvidegaard SM, Skourup H (2018). Arctic Sea Ice Characterization Using Spaceborne Fully Polarimetric L-, C-, and X-Band SAR With Validation by Airborne Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7):3715–3734.
- Sjöberg Y, Gomach S, Kwiatkowski E, Mansoz M (2019). Involvement of local Indigenous peoples in Arctic research — expectations, needs and challenges perceived by early career researchers. *Arctic Science*, 5(1):27–53. doi: 10.1139/as-2017-0045.
- SmartICE (2019). SmartICE. https://smartice.org. (6 mars 2020).
- Smith GC, Allard R, Babin M, Bertino L, Chevallier M, Corlett G, Crout J, Davidson F, Delille B, Gille ST, et al. (2019). Polar Ocean Observations: A Critical Gap in the Observing System and Its Effect on Environmental Predictions From Hours to a Season. *Frontiers in Marine Science*, 6. doi: 10.3389/fmars.2019.00429.
- Smith K, Baldwin R, Glatts R, Chereskin T, Ruhl H, Lagun V (2003). Weather, ice, and snow conditions at Deception Island, Antarctica: long time-series photographic monitoring. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(10–11):1649–1664. doi: 10.1016/S0967-0645(03)00084-5.
- Smith L (2012). Decolonizing methodologies: Research and indigenous peoples. Zed Books, 2nd edition.
- Snelgrove C, Dhamoon RK, Corntassel J (2014). Unsettling settler colonialism: The discourse and politics of settlers, and solidarity with Indigenous nations. *Decolonization: Indigeneity, Education & Society*, 3(2).
- Sobiech J, Boike J, Dierking W (2012). Observation of melt onset in an arctic tundra landscape using high resolution TerraSAR-X and RADARSAT-2 data. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3552–3555 pages.

- St-Hilaire A, Gloaguen E (2018). EAU 464 Géostatistique.
- Statistics Canada (2011). Boundary Files, 2011 Census. Numéro Catalogue No. 92-160-G. https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/geo/bound-limit/bound-limit-2011-eng.cfm.
- Stettner S, Lantuit H, Heim B, Eppler J, Roth A, Bartsch A, Rabus B (2018). TerraSAR-X Time Series Fill a Gap in Spaceborne Snowmelt Monitoring of Small Arctic Catchments—A Case Study on Qikiqtaruk (Herschel Island), Canada. *Remote Sensing*, 10(7):1155. doi: 10.3390/rs10071155.
- Stuhl A (2016). Unfreezing the Arctic: Science, Colonialism, and the Transformation of Inuit Lands. University of Chicago Press. Google-Books-ID: UXdODQAAQBAJ.
- Tivy A, Howell SEL, Alt B, McCourt S, Chagnon R, Crocker G, Carrieres T, Yackel JJ (2011). Trends and variability in summer sea ice cover in the Canadian Arctic based on the Canadian Ice Service Digital Archive, 1960–2008 and 1968–2008. *Journal of Geophysical Research*, 116(C3). doi: 10.1029/2009JC005855.
- Tjuatja S, Fung AK, Bredow J (1992). A scattering model for snow-covered sea ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4):804–810. doi: 10.1109/36.158876.
- Tondu J, Balasubramaniam A, Chavarie L, Gantner N, Knopp J, Provencher J, Wong P, Simmons D (2014). Working with Northern Communities to Build Collaborative Research Partnerships: Perspectives from Early Career Researchers. Arctic, 67(3):419–429.
- Tremblay M (2020). Private communication. 11 mai 2020.
- Tremblay M, Ford J, Statham S, Pearce T, Ljubicic GJ, Gauthier Y, Braithwaite L (2018). Chapter 11: Access to the Land and Ice: Travel and Hunting in a Changing Environment, 323–342 pages. ArcticNet. In Bell, T. and Brown, T.M. (Eds) From Science to Policy in the Eastern Canadian Arctic: An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization.
- Tremblay M, Furgal C, Larrivée C, Annanack T, Tookalook P, Qiisik M, Angiyou E, Swappie N, Savard JP, Barrett M (2008). Climate Change in Northern Quebec: Adaptation Strategies from Community-Based Research. Arctic, 61:27–34.
- Tremblay M, Furgal C, Larrivée C, Savard JP, Barrett M, Annanack T, Enish N, Etidloie B (2006). Communities and Ice: Bringing Together Traditional and Scientific Knowledge, 289 pages. Aboriginal Issues Press.
- Tuck E, Yang KW (2012). Decolonization is not a metaphor. *Decolonization: Indigeneity*, *Education & Society*, 1(1):1–40.
- Tuniq J, Usuituayuk T, Saviadjuk P, Papigatuk Lebreux I, Delisle Alaku A, Cameron M (2017). Observations of Arctic Change from Salluit, Nunavik. Arctic Change 2017, Québec.
- Turmel M, Guy E, Lasserre F (2013). Marine carriers' business model and development in the canadian arctic. 48th Annual Conference Proceedings, Canadian Transportation Research Forum.

- Ulaby FT, Moore RK, Fung AK (1986). Microwave remote sensing: Active and passive. volume Volume 3-From theory to applications. Addison-Wesley Publishing Company. https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19860041708.
- Veci L (2015). SAR Basics with the Sentinel-1 Toolbox. Tutorials. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials.
- Vogel S, Eckerstorfer M, Christiansen HH (2012). Cornice dynamics and meteorological control at Gruvefjellet, Central Svalbard. The Cryosphere, 6(1):157–171. doi: 10.5194/tc-6-157-2012.
- Warren SG, Rigor IG, Untersteiner N, Radionov VF, Bryazgin NN, Aleksandrov YI, Colony R (1999). Snow Depth on Arctic Sea Ice. *Journal of Climate*, 12(6):1814–1829. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1814:SDOASI>2.0.CO;2.
- Weeks WF, Ackley SF (1982). The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice,. Numéro CRREL-MONO-82-1. https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a123762.pdf.
- Wetzels R, Wagenmakers EJ (2012). A default Bayesian hypothesis test for correlations and partial correlations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(6):1057–1064. doi: 10.3758/s13423-012-0295-x.
- Whapmagoostui First Nation (2019). *History and Culture | Whapmagoostui First Nation*. http://www.whapmagoostuifn.com/culture/. 2019-07-17.
- Wilson K, Zagon T (2017). Canadian Ice Service Pilot Project: Ice Information for Northern Emergency Management.
- WMO (2014). Sea-Ice Nomenclature. Numéro 259 de WMO/OMM/BMO 259, Tech. Paper 145.
- Wobus C, Anderson R, Overeem I, Matell N, Clow G, Urban F (2011). Thermal Erosion of a Permafrost Coastline: Improving Process-Based Models Using Time-Lapse Photography. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 43(3):474–484. doi: 10.1657/1938-4246-43.3.474.
- Yackel J, Geldsetzer T, Mahmud M, Nandan V, Howell S, Scharien R, Lam H (2019). Snow Thickness Estimation on First-Year Sea Ice from Late Winter Spaceborne Scatterometer Backscatter Variance. *Remote Sensing*, 11(4):417. doi: 10.3390/rs11040417.
- Yackel JJ, Barber DG, Papakyriakou TN, Breneman C (2007). First-year sea ice spring melt transitions in the Canadian Arctic Archipelago from time-series synthetic aperture radar data, 1992–2002. *Hydrological Processes*, 21(2):253–265. doi: 10.1002/hyp.6240.
- Yitayew TG, Dierking W, Divine DV, Eltoft T, Ferro-Famil L, Rosel A, Negrel J (2018). Validation of Sea-Ice Topographic Heights Derived From TanDEM-X Interferometric SAR Data With Results From Laser Profiler and Photogrammetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11):6504–6520. doi: 10.1109/TGRS.2018.2839590.
- Zakhvatkina N, Smirnov V, Bychkova I (2019). Satellite SAR Data-based Sea Ice Classification: An Overview. *Geosciences*, 9(4):152. doi: 10.3390/geosciences9040152.

Zell H (2017). *IceBridge Mission Overview*. http://www.nasa.gov/mission_pages/icebridge/mission/index.html. (6 mars 2020).

- Zhang E, Liu L, Huang L (2019). Automatically delineating the calving front of Jakobshavn Isbræ from multitemporal TerraSAR-X images: a deep learning approach. *The Cryosphere*, 13(6):1729–1741. doi: https://doi.org/10.5194/tc-13-1729-2019.
- Zhang X, Dierking W, Zhang J, Meng J, Lang H (2016). Retrieval of the thickness of undeformed sea ice from simulated C-band compact polarimetric SAR images. *The Cryosphere*, 10(4):1529–1545. doi: 10.5194/tc-10-1529-2016.
- Zhang X, Zhang J, Meng J, Su T (2013). Analysis of multi-dimensional SAR for determining the thickness of thin sea ice in the Bohai Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31(3):681–698. doi: 10.1007/s00343-013-2057-7.

Annexe I

Documents complémentaires -Chapitre 2

Cette annexe reproduit les documents complémentaires (*supplementary materials*) associés à mon premier article (chapitre 2), soit *Combining TerraSAR-X and time-lapse photography for seasonal sea ice monitoring: the case of Deception Bay, Nunavik.* La pagination ainsi que la numérotation des tableaux et figures sont indépendantes du reste de la thèse (exemple : Figure S1).





Supplement of

Combining TerraSAR-X and time-lapse photography for seasonal sea ice monitoring: the case of Deception Bay, Nunavik

Sophie Dufour-Beausé

Correspondence to: Sophie Dufour-Beauséjour (sophie.dufour-beausejour@ete.inrs.ca)

The copyright of individual parts of the supplement might differ from the CC BY 4.0 License.

Change detection and linear regression on backscattering time-series

Here we present range estimations for seasonal features in Fig. S1, S2 and S3 (post-freeze-up and spring peak, beginning and end of monotone backscattering), as well as the linear regressions on the monotone winter backscattering in Fig. S4.



Figure S1: Post-freeze-up peak estimation. Left: TerraSAR-X median VV in orbits 13 (square), 21 (circle) and 89 (diamond). Markers used for peak estimation are in color, the rest of the series is in gray. For reference, freeze-up is identified with a vertical line. Right: Peak ranges reproduced from left. The range obtained from combining all orbits is color-shaded. Peak estimation is indicated with a dashed line. Data is color-coded for each year.



Figure S2: Spring peak estimation. Left: TerraSAR-X median VV in orbits 13 (square), 21 (circle) and 89 (diamond). Markers used for peak estimation are in color, the rest of the series is in gray. For reference, break up is identified with a vertical line. Right: Peak ranges reproduced from left. The range obtained from combining all orbits is color-shaded. Peak estimation is indicated with a dashed line. Data is color-coded for each year.



Figure S3: Monotone backscattering limits estimation. Left and center: TerraSAR-X median VV in orbits 13 (square), 21 (circle) and 89 (diamond). Markers used for limit estimation are in color, the rest of the series is in gray. Right: Limit ranges reproduced from left and center. The ranges obtained from combining all orbits are color-shaded. Limit estimation is indicated with a dashed line. Data is color-coded for each year.



Figure S4: TerraSAR-X median VV backscattering during the monotone period. Observations are plotted for each orbit (orbit 13: squares, orbit 21: circles, orbit 89: diamonds) and color-coded for each year. The linear regression on the data is plotted as a solid line. Slope and standard error are indicated in the top right corner.

Newly formed ice on TerraSAR-X images

Here we present TerraSAR-X VV images featuring newly formed ice as indentified from co-interpretation with time-lapse photography.



Figure S5: TerraSAR-X VV images of newly formed ice in 2016 (scaled from -19 to -5 dB) and AOIs used to compute statistics.



Figure S6: TerraSAR-X VV images of newly formed ice in 2017 (scaled from -19 to -5 dB) and AOIs used to compute statistics.

Air temperature in Deception Bay

In the absence of weather station in Deception Bay, two alternative sources were investigated for the air temperature: the nearest weather station located 50 km away at Salluit airport and camera measurements in Deception Bay.

Data acquisition and description

The closest weather station to Deception Bay is located in neighboring Salluit at the airport. Measurements at the station are taken hourly during the day and their daily mean is available online from Environment Canada. Salluit is a Nunavik coastal community located 50 km west of Deception Bay; the airport is located 2.8 km inland at an altitude of 226 m.

Two Reconyx PC800 Hyperfire Professional Semi Covert cameras were installed in Deception Bay as part of the CAIMAN research project. These cameras were installed near the study area, in front of Moosehead Island at an altitude of 22 m (series A) and on Black Point at an altitude of 33 m (series B), as shown on Fig. S7. They rely on 12 V batteries and solar panels for power and are mounted at 1.8 meters above the ground. They measure the temperature within the camera case and record this information in the photographs' metadata. Data is available hourly during the day between 7:00 and 18:00 local time; a daily mean is computed from this daytime data.



Figure S7: Map of time-lapse camera locations and Panasonic fields of view. Inset: Reconyx camera on the south-western shore in front of Moosehead Island (solar panel and battery also shown).

Temperature time-series were assembled from photograph metadata for two cameras: Moosehead Island (Series A) and Black Point (Series B). Series A was continuous over the study period except for a gap between 27 January and 18 September 2016. Series B extends from 11 September 2015 to 16 September 2016. The two series were compared for the overlapping period (11 September 2015 to 27 January 2016). The difference between series A and B was 0.4 °C on average, with a standard deviation of 0.7 °C. This was deemed sufficiently small to combine the two series with no transformation. Series B was used up to 16 September 2016 and series A from 18 September 2016. Since the Reconyx temperature sensor sometimes erroneously recorded a 0°C measurement in lieu of "not-a-number", all 0 °C values were removed from the datasets.

Comparing camera and airport measurements

Figure S8 shows the camera and airport datasets from 2015 to 2018. The camera and airport measurements showed a Pearson coefficient of 0.98 and 0.99 for the three years of the study, which proves a strong correlation despite despite their different locations. The camera dataset however differs from the aiport's dataset with a root mean-squared-error (RMSE) of 3.9 to 4.3°C. In order to investigate this discrepancy, the daily difference between the two datasets is also plotted in Fig. S8. This difference is roughly flat from September to January, and then peaks in April-May.



Figure S8: Left: Daily mean air temperature measured by the camera in Deception Bay (black) and at the Salluit airport (red). Right: Daily difference between the two datasets.

Several factors may cause differences between temperature measurements by the cameras in Deception Bay and at the Salluit airport. First, temperatures might actually be different between the two locations; the airport is located inland while the camera is located on the shore, the airport is roughly 200 m higher in terms of altitude, and it is located 50 km west of the cameras. Second, the camera measurement may suffer from measurement biases: for example, heating of the camera by the sun may increase the temperature around the sensor.

Mean air temperature at Salluit airport

Since the data measured 50 km away at Salluit airport is strongly correlated to the temperature measured with the cameras in Deception Bay, and because the camera data is shown to present a non-trivial seasonal bias, we chose to use the dataset from Salluit airport to compare the three years in terms of air temperature. Figure S9 shows the monthly mean air temperature at Salluit airport.



Figure S9: Monthly mean air temperature from 2015 to 2018 measured at Salluit airport.

Freezing and thawing degree-days at Salluit airport

The freezing and thawing degree-days (FDD and TDD) were computed from the Salluit airport data. Their cumulative sum over a period is typically used to characterize how cold or warm that period (Permafrost Subcommittee, 1988). The Ouranos consortium for instance computes the annual cumulative sum of freezing and thawing degree-days for their climate projections and provide them as indicators (Mailhot and Chaumont, 2017).

FDD and TDD are defined in Eq.(1):

FDD(T) = 0 if T>0, |T| if T0(1a) TDD(T) = T if T0, 0 if T<0(1b)

where T is the daily mean temperature (NSIDC, 2019).

Using the Salluit airport daily temperature time-series, the monthly cumulative freezing and thawing degree-days were computed from 2015 to 2018. These are presented in Fig. S10. Winter was earliest in 2015, where the months of October, November and December were the coldest of the three years. The mildest winter was 2016-2017, with the warmest months of January through April. The coldest winter occurred in 2017-2018, with colder temperatures in January and February than in the two previous years. The latest spring was also in 2018, which featured the coldest months of May and June observed in the study.



Figure S10: Monthly cumulative freezing (CFDD, in teal) and thawing (CTDD, in orange) degree-days from 2015 to 2018 at Salluit airport.

References

Mailhot, A., and D. Chaumont. 2017. "Élaboration Du Portrait Bioclimatique Futur Du Nunavik - Tome II. Rapport présenté au Ministère de la forêt, de la faune et des parcs." Montréal, Que.: Ouranos.

Permafrost Subcommittee, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada, ed. 1988. *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. Technical Memorandum 142. Ottawa, Ont.: Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada.

Annexe II

Documents complémentaires -Chapitre 3

Cette annexe reproduit les documents complémentaires (supplementary materials) associés à mon deuxième article (chapitre 3), soit Tenuous correlation between snow depth or sea ice thickness and C- or X-band backscattering in three Nunavik fjords of the Hudson Strait. La pagination ainsi que la numérotation des tableaux et figures sont indépendantes du reste de la thèse (exemple : Figure S1).
Supplementary materials for

Tenuous correlation between snow depth or sea ice thickness and C- or

X-band backscattering in three Nunavik fjords of the Hudson Strait

Sophie Dufour-Beauséjour^{a,b*}, Monique Bernier^{a,b}, Jérome Simon^a, Saeid Homayouni^{a,b}, Véronique Gilbert^c, Yves Gauthier^{a,b}, Juupi Tuniq^d, Anna Wendleder^e and Achim Roth^e

^aCentre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada;
^bCentre d'études nordiques, Québec, Canada;
^cKativik Regional Governement, Québec, Canada;
^dSalluit, Québec, Canada;
^eGerman Aerospace Center (DLR), Germany;

Correspondence to: Sophie Dufour-Beauséjour (sophie.dufour-beausejour@ete.inrs.ca)

Monthly precipitation data at Salluit airport



Figure S1: Monthly total precipitation measured at Salluit airport. Grey is used for months with median temperature over 0°C. Data source: Environment Canada.

Relative timing of fieldwork and image acquisitions

Table S1 shows fieldwork and RADARSAT-2 acquisition dates, as well as the difference between the two, for Salluit and Kangiqsujuaq. Table S2 shows fieldwork, RADARSAT-2 and TerraSAR-X acquisition dates, and the difference between the two, for Deception Bay.

Fieldwork (Salluit)	RADARSAT-2	Δ	Fieldwork (Kangiqsujuaq)	RADARSAT-2	Δ
2016-01-25	2016-01-12	+13	2016-01-22	2016-01-16	-6
-	-	-	2016-04-20	2016-04-21	+1
2017-01-19	2017-01-30	+11	2017-01-10	2017-01-10	0
2017-04-27	2017-04-12	-15	2017-04-25	2017-04-16	-9
2018-01-30	2018-01-25	-5	2018-01-28	2018-01-29	+1
2018-05-09	2018-05-01	-8	2018-05-08 and	2018-05-29	+21
			2018-05-15		+14

Table S1: Fieldwork dates in Salluit and Kangiqsujuaq, RADARSAT-2 acquisition dates, and

the difference between the two.

Fieldwork (Deception Bay)	RADARSAT-2	Δ	TerraSAR-X	Δ
2016-01-21	2016-01-19	-2	2016-01-25	+4
2016-04-23	2016-04-24	+1	2016-04-22	-1
2017-01-14	2017-01-13	-1	-	-
2017-04-29	2017-04-19	-8	2017-05-01	+2
2018-02-02	2018-02-01	+1	2018-01-31	-2
2018-05-11	2018-05-08	-3	2018-05-10	-1

 Table S2: Fieldwork dates in Deception Bay, RADARSAT-2 and TerraSAR-X acquisition dates,

and the difference between the two..

Snow depth and ice thickness histograms

Figures S2 shows histograms for end-of-winter snow depth and ice thickness measurements in each site and season.



Figure S2: Measurement distributions for snow depth (left) and ice thickness (right) measured in April-May of each season. Mean and standard deviation for each case are annotated on the graphs.

5 of 17

Supplementary materials

SAR parameters vs snow depth or ice thickness

Figures S3-S5 show the standardized C-band HH backscattering coefficient as a function of standardized snow depth and ice thickness for Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq. For Deception Bay, X-band data is also presented.



Figure S3: Standardized C-band backscattering HH coefficient versus standardized snow depth (top) and ice thickness (bottom) for available cases in Salluit. The associated linear correlation coefficient *r*-squared is indicated on the graphs. Trend line is plotted when *r*-squared is greater than or equal to 0.3.

6 of 17

Supplementary materials



Figure S4: Same as S3 for Deception Bay. X-band data is also shown with empty markers and gray lines.

Supplementary materials



Figure S5: Same as S3 for Kangiqsujuaq.

Supplementary materials

8 of 17

Snow depth		Salluit		Dec	eption	Bay	Ka	ngiqsuji	uaq
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Sigma_HH	n/a	0.1	0.0	n/a	0.4	0.4	n/a	0.0	0.0
Sigma_HV	n/a	0.1	0.0	n/a	0.2	0.2	n/a	0.0	0.1
Sigma_VV	n/a	0.2	0.0	n/a	0.3	0.3	n/a	0.0	0.0
VV/HH ratio	n/a	0.1	0.1	n/a	0.2	0.1	n/a	0.0	0.0
HV/HH ratio	n/a	0.0	0.0	n/a	0.1	0.3	n/a	0.0	0.2
VH/VV ratio	n/a	0.1	0.2	n/a	0.0	0.3	n/a	0.0	0.1
H (entropy)	n/a	0.1	0.0	n/a	0.2	0.2	n/a	0.1	0.1
A (anisotropy)	n/a	0.1	0.0	n/a	0.1	0.0	n/a	0.0	0.1
a (alpha angle)	n/a	0.1	0.0	n/a	0.2	0.3	n/a	0.1	0.1

Table S3: Linear correlation coefficient (r-squared) between C-band SAR parameter values. and January-February snow depth (top) and ice thickness (bottom).

Ice thickness	Salluit		Dec	Deception Bay			Kangiqsujuaq		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	5 2017	2018
Sigma_HH	n/a	0.0	0.0	n/a	0.3	0.3	n/a	0.2	0.1
Sigma_HV	n/a	0.0	0.2	n/a	0.2	0.2	n/a	0.5	0.0
Sigma_VV	n/a	0.0	0.0	n/a	0.3	0.3	n/a	0.2	0.1
VV/HH ratio	n/a	0.0	0.0	n/a	0.1	0.0	n/a	0.0	0.0
HV/HH ratio	n/a	0.1	0.0	n/a	0.1	0.2	n/a	0.0	0.1
VH/VV ratio	n/a	0.0	0.1	n/a	0.0	0.2	n/a	0.0	0.0
H (entropy)	n/a	0.0	0.0	n/a	0.1	0.1	n/a	0.1	0.1
A (anisotropy)	n/a	0.0	0.0	n/a	0.1	0.0	n/a	0.3	0.0
a (alpha angle)	n/a	0.0	0.0	n/a	0.2	0.1	n/a	0.0	0.1

Snow depth		Salluit		 Dec	eption	Bay	Ka	ngiqsuji	uaq
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Sigma_HH	n/a	0.1	0.1	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0
Sigma_HV	n/a	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Sigma_VV	n/a	0.1	0.3	0.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0
VV/HH ratio	n/a	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HV/HH ratio	n/a	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
VH/VV ratio	n/a	0.3	0.3	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
H (entropy)	n/a	0.1	0.1	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.0
A (anisotropy)	n/a	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0
a (alpha angle)	n/a	0.0	0.1	0.0	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0

Table S4: Linear correlation coefficient (r-squared) between C-band SAR parameter values. and April-May snow depth (top) and ice thickness (bottom).

Ice thickness		Salluit		Dec	ception	Bay		Ka	ngiqsujı	ıaq
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2	016	2017	2018
Sigma_HH	n/a	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3		0.0	0.0	0.0
Sigma_HV	n/a	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2		0.0	0.1	0.2
Sigma_VV	n/a	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3		0.0	0.0	0.0
VV/HH ratio	n/a	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0
HV/HH ratio	n/a	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0		0.0	0.0	0.1
VH/VV ratio	n/a	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1		0.0	0.0	0.0
H (entropy)	n/a	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1		0.1	0.0	0.1
A (anisotropy)	n/a	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1		0.0	0.0	0.0
a (alpha angle)	n/a	0.0	0.0	0.1	0.5	0.2		0.1	0.0	0.1

Bayesian linear regression

Bayesian linear regression leverages Bayes' theorem to infer the probability of a linear model's parameters (H_i) from the observed data (D). Bayes' theorem states:

$$p(H|D) = p(D|H) p(H) / p(D) \propto p(D|H)$$
(S1)

where

p(H|D) = posterior probability of the model

$$p(D|H) =$$
 likelihood

p(H) = prior probability of the model

p(D) = evidence, a normalizing constant

The prior probability of a model is constant when the outcome is completely uncertain, which is why the posterior probability reduces to the likelihood. For a linear model

$$y_i = \bar{x}_i^T \bar{\alpha} + n_i, \ n_i \sim N(0, \ \sigma), \ H = (\bar{\alpha}, \ \sigma)$$
(S2)

the likelihood is further developed as a product of probabilities associated to each observed sample, that is

$$p(H|D) \propto \prod_{i=1}^{N} p(y_i, \bar{x}_i \mid \bar{a}, \sigma)$$
(S3)

where

$$p(y_i, \bar{x}_i \mid \bar{\alpha}, \sigma) \propto \sigma^{-1} exp(-(y_i - \bar{x}_i^T \bar{\alpha})^2/(2\sigma^2)).$$

Supplementary materials

11 of 17

The last statement is due to the variability of the model being accounted for by the noise variable $n_i = y_i - \bar{x}_i^T \bar{\alpha}$. In other words, $(y_i, \bar{x}_i) \sim N(y_i - \bar{x}_i^T \bar{\alpha}, \sigma)$. $p(y_i, \bar{x}_i | \bar{\alpha}, \sigma)$ is computed for a range of discrete arbitrary values of $(\bar{\alpha}, \sigma)$ that include the null hypothesis $H_0 = (\bar{0}, \sigma)$ (variability is due to noise only) and other probable hypotheses, yielding a probability function over parameters $(\bar{\alpha}, \sigma)$.

Hypotheses comparison is carried out by dividing posterior probabilities $p(H_i|D)$, thus eliminating the proportionality constants and yielding a Bayes factor $K = p(D|H_i) / p(D|H_j) = p(H_i|D) / p(H_j|D)$ which quantifies the evidence in favor of one of the hypotheses.

Figure S6 shows an example of a marginal probability distribution, taken from the H_{snow} hypothesis described by Eq. (4) and most likely in the Salluit 2018 case. γ is the snow depth slope, is an offset term and η_{σ} is the noise term. The maximum probability for the gamma parameter is negative, indicating a negative relationship between snow depth and the C-band HH backscattering coefficient.



Figure S6: Example: marginal probability distributions for the H_snow hypothesis parameters in the Salluit 2018 case.

Figures S7 and S8 show the pair-wise logarithmic Bayes factors and most likely hypothesis for each case, respectively for the C- and the X-bands. The mean and standard deviation for each parameter's marginal probability distribution are shown for the C- and X-bands in Fig. S9-S12 for each hypothesis: the snow-driven backscattering coefficient, ice-driven backscattering coefficient and snow-and-ice-driven backscattering coefficient (Eq. 5).



Figure S7: Pair-wise logarithmic Bayes factors $\log_{10}(K) = \log_{10}(p(D|H_i)/p(D|H_j))$ for the Bayesian linear regression analysis of the relationship between the C-band HH backscattering coefficient and either snow depth, ice thickness, or both. A $\log_{10}(K)$ value of 0.5 or higher denotes substantial evidence against the hypothesis being tested. The most likely hypothesis given the data is framed in black.



Figure S8: Same as S6 for the X-band in Deception Bay.



Figure S9: Mean and standard deviation of the parameters' marginal probability distributions for H_{snow} , the snow-driven backscattering coefficient model, applied to C-band data.



Figure S10: Mean and standard deviation of the parameters' marginal probability distributions for H_{ice} , the ice-driven backscattering coefficient model, applied to C-band data.



Figure S11: Mean and standard deviation of the parameters' marginal probability distributions for H_{both} , the snow-and-ice-driven backscattering coefficient model, applied to C-band data.



Figure S12: Mean and standard deviation of the parameters' marginal probability distributions for H_{snow} (left), H_{ice} (center) and H_{both} (right), applied to X-band data.

Annexe III

Documents complémentaires -Chapitre 4

Cette annexe présente certains des documents d'information aux communautés discutés dans mon troisième article (chapitre 4), soit *Our practice of outreach during the Ice Monitoring project in Nunavik: an early-career researcher perspective.* Les deux premiers documents sont des affiches d'informations sur le projet de suivi des glaces, la première préparée en 2017 et la deuxième en 2018. Le troisième document est une affiche présentant l'instrumentation du projet de suivi des glaces. Le quatrième est une affiche remerçiant tous les collaborateurs de Salluit et de Kangiqsujuaq. Les trois derniers documents sont des cartes postales présentant les données d'épaisseur de neige et de glace mesurées dans les trois communautés de 2015 à 2018.



Ice Monitoring in Deception Bay, Salluit and Kangigsujuag

Thanks to all the Inuit collaborators and experts and to the teachers from Salluit and Kangiqsujuaq schools, as well as the interns who worked on the project.

Poster prepared for the Environmental Forum 2017 in Kangiqsujuaq



Ice Monitoring in Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq

This collaboration between Raglan Mine, Kativik Regional Governement and Université INRS is supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage)





Sikumik kamagutiit Salluni, Salluit Aippanginni ammalu Kangiqsujuami



ح< حار حه ح ح العوم المعنون معنون المعنون معنون المعنون المعنون المعنون معنون المعنون معنون معنون المعنون معنون محرف معنون المعنون معنون م معنون م

Kangiqsujuaq	⊲>∩ / Aputi	r'd ∕ Siku
2016 January 22 and 23rd April 19, 20th	2" to 10" 0" to 18"	2' to 3'1" 3'3" to 4'9"
2017 January 10th April 25th	2″ to 8″ 4″ to 20″	1′6″ to 3′ 2′10″ to 3′10″
2018 January 27th and 28th May 8th,15th	1″ to 10″ 0″ to 20″	1'11" to 3'1" 2'7" to 4'5"

Salluit	⊲>∩ / Aputi	r²d ∕ Siku
2016 January 25th	4" to 8"	2'2" to 2'10"
2017 January 18th January 26th March 21st April 27th	0" to 4" 1" to 6" 0" to 15" 0" to 11"	2'2" to 27" 2'4" to 2'9" 3'6" to 4'1" 3'8" to 4'8"
2018 January 30th May 9th	2" to 4" 2" to 12"	2'6" to 2'9" 4'2" to 4'6"

Salluit Aippanga	⊲>∩ / Aputi	r'd ∕ Siku
2016 January 21st April 23rd	2″ to 10″ 0″ to 16″	27″ to 3′4″ 37″ to 5′5″
2017 January 13th and 14th January 29th April 28th and 29th	1" to 5" 1" to 8" 0" to 15"	1'8" to 2'2" 2'1" to 2'7" 3'7" to 4'3"
2018 February 1st and 2nd May 11th	1" to 8" 0" to 10"	2' to 3'5" 3'9" to 4'8"





Thanks to all the Inuit collaborators and experts and to the teachers from Salluit and Kangiqsujuaq schools, as well as the interns who worked on the project.

Poster prepared in November 2018

᠈᠊᠋᠊ᡆᡃ᠆᠋᠘ᠵᢋ᠋᠆᠆᠃ Sikuup itjuninga suqqaatiqt

۸۲۵٬۵۵۷ میرلم Pijarirtaugunnatuq nunalimmiunut



This collaboration between Raglan Mine, Kativik Regional Governement and Université INRS is supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage)

^ናレンシンク 2015-2018 ح 2015 על C Qaujigutiit nuitaviniillu 2015-2018 mulingajut د

Ice Monitoring in Deception Bay, Salluit and Kangiqsujuaq



Poster prepared for Salluit, March 2018

Ice Monitoring in Salluit, Deception Bay and Kangiqsujuaq This collaboration between Raglan Mine, Kativik Regional Governement and Université INRS is supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage)

לל⊂⁶ bLJĊ ² כ_∠² עי_א י∆ Sikumik kamagutiit Salluni, Salluit Aippanginni ammalu Kangiqsujuami

ჲძˤ广ˤხ᠀᠋ Ĺˤ٩ˤᢕᠠ᠈ᡄĹ᠈ᢧᠯᡕ᠋᠂ Nakurmiiqavut maqaittisijilimaangujut!

Salluit, Salluit Aippanga Kangiqsujuaq Markusi Jaaka Johnny Ashevak Peter Arngak Elijah Ningiuruvik Joannasie Juupi Tuniq Noah Annahatak Kakayuk Adamie Putulik Cameron and Kululak Tayara Raly Kadjulik Maasiu Arngak Charlie Alaku Elijah Qisiiq Michael Cameron Denis Napartuk Joe Pilurtuut Chris Alaku Luuku Isaac Adamie Jr. Jani Kenuajuak Dany Alaku Sakiagak Jimmy Kakayuk Casey Mark Charlie Ikey Eyetsiaq Pierre Lebreux Papigatuk Peter Qisiiq Jamie Jaaka

Thanks to all the Inuit collaborators and experts and to the teachers from Salluit and Kangiqsujuaq schools, as well as the interns who worked on the project.

Poster prepared in November 2018 This collaboration between Raglan Mine, Kativik Regional Governement and Université INRS is supported by Polar Knowledge Canada (Safe Passage)



לdГʰ bLJᡤْ ᢣᡄᠴᠣ, ᢣᡄᠴ᠘ᡃ ᢦᢩ᠆ᠺ᠆ᡐ᠆ᡐ᠊᠕ᡃLᠴ b∿ᠬᡃᠯᢣᡆΓ

Sikumik kamagutiit Salluni, Salluit Aippanginni ammalu Kangiqsujuami

Salluit	⊲>∩ / Aputi	r∕d / Siku
2016 January 25th	4″ to 8″	2′2″ to 2′10″
2017 January 26th March 21st April 27th	1″ to 6″ 0″ to 15″ 0″ to 11″	2'4" to 2'9" 3'6" to 4'1" 3'8" to 4'8"
2018 January 30th May 9th	2" to 4" 2" to 12"	2'6" to 2'9" 4'2" to 4'6"



sophie.dufour-beausejour@ete.inrs.ca vgilbert@krg.ca



לdГʰ bLJᡤْ ᢣᡄᠴᠣ, ᢣᡄᠴ᠘ᡃ ᢦᢩ᠆ᠺ᠆ᡐ᠆ᡐ᠊᠕ᡃLᠴ b∿ᠬᡃᠯᢣᡆΓ

Sikumik kamagutiit Salluni, Salluit Aippanginni ammalu Kangiqsujuami

Salluit Aippanga	⊲>∩ / Aputi	ィd / Siku
2016 January 21st April 23rd	2″ to 10″ 0″ to 16″	31″ to 40″ 43″ to 65″
2017 January 13th and 14th January 29th April 28th and 29th	1″ to 5″ 1″ to 8″ 0″ to 15″	20″ to 26″ 25″ to 31″ 43″ to 51″
2018 February 1st and 2nd May 11th	1″ to 8″ 0″ to 10″	24" to 41" 45" to 56″



sophie.dufour-beausejour@ete.inrs.ca vgilbert@krg.ca



לdГʰ bLJᡤْ ᢣᡄᠴᠣ, ᢣᡄᠴ᠘ᡃ ᢦᢩ᠆ᠺ᠆ᡐ᠆ᡐ᠊᠕ᡃLᠴ b∿ᠬᡃᠯᢣᡆΓ

Sikumik kamagutiit Salluni, Salluit Aippanginni ammalu Kangiqsujuami

Kangiqsujuaq	⊲>∩ / Aputi	rd / Siku
2016 January 22 and 23rd April 19, 20th	2″ to 10″ 0″ to 18″	2' to 3'1" 3'3" to 4'9"
2017 January 10th April 25th	2″ to 8″ 4″ to 20″	1′6″ to 3′ 2′10″ to 3′10″
2018 January 27th and 28th May 8th,15th	1″ to 10″ 0″ to 20″	1'11" to 3'1" 2'7" to 4'5"



sophie.dufour-beausejour@ete.inrs.ca vgilbert@krg.ca