

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

**UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION RADAR HAUTE-RÉSOLUTION
POUR L'ÉTUDE DU RÉGIME GLACIEL MARIN AU VOISINAGE DES
INFRASTRUCTURES MARITIMES DU NUNAVIK**

Par

Charles GIGNAC

B.Sc. en géomatique appliquée à l'environnement (Université de Sherbrooke)

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe

Dr. Roger DeAbreu
Centre Canadien de Télédétection

Examineur interne

Pr. Yves Gratton
INRS Centre Eau Terre Environnement

Directeur de recherche

Pr. Monique Bernier
INRS Centre Eau Terre Environnement

Codirecteur de recherche

Pr. David A. Clausi
University of Waterloo



REMERCIEMENTS

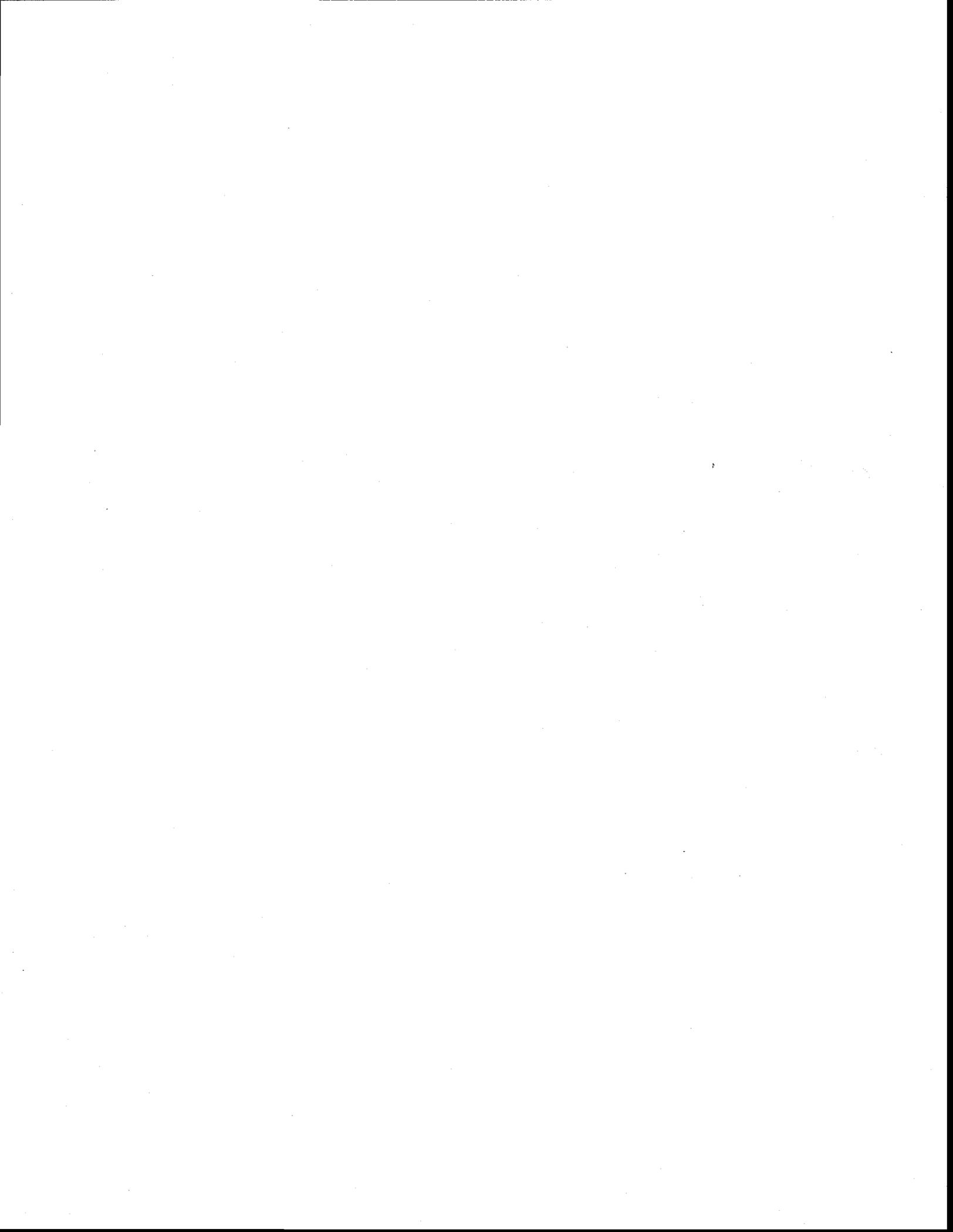
J'adresse mes premiers remerciements à l'équipe de télédétection de l'INRS, d'abord à ma directrice de recherche, la professeure Monique Bernier, pour m'avoir fait confiance et m'avoir laissé pleine autonomie pour réaliser ce projet. Ensuite, je tiens à remercier M. Yves Gauthier, agent de recherche dans l'équipe mais avant tout un ami et mentor, qui malgré un horaire chargé est toujours disponible pour un coup de main. Aussi, je veux remercier Jimmy Poulin, Jean-Simon Bédard et Clément Clerc pour leur soutien technique et leur participation essentielle au projet.

Je remercie également mon co-directeur de recherche, le professeur David Clausi de l'Université de Waterloo pour ses conseils et je le remercie pour avoir permis au laboratoire de l'INRS d'utiliser l'algorithme MIRGS qui est un élément central de ce projet. Également, merci à Peter Yu, ancien étudiant du Pr. Clausi pour ses conseils techniques sur l'utilisation de MIRGS.

Un grand merci au Service Canadien des Glaces pour m'avoir laissé visiter leurs installations et un merci spécial à M. Claude Dicaire, analyste principal des glaces au SCG pour ses explications précises. Merci également à l'Agence Spatiale Canadienne pour avoir fourni les nombreuses images RADARSAT-2 ayant permis la réalisation de cette étude.

Un merci spécial au professeur Karem Chokmani qui, même si il ne s'est pas impliqué directement dans le projet, m'a permis, durant mes deux années de maîtrise d'avoir ma première expérience d'enseignement et de préparation d'un cours, ce qui a été pour moi une expérience très enrichissante.

À mes collègues étudiant(e)s, merci pour le support et la bonne compagnie durant ces années ardues. Le temps passe toujours plus rapidement lorsqu'on est bien entouré.



AVANT-PROPOS

Les infrastructures maritimes assurent un accès à l'eau plus grand et sécuritaire et jouent un rôle clé dans la vie et la dynamique des communautés nordiques. L'intégrité de ces infrastructures est dépendante de plusieurs facteurs et l'un de ces facteurs est le régime glaciaire. De par son action physique sur l'infrastructure, la glace peut causer des dommages et des pressions sur les quais, brise-lames ou autres sections d'une infrastructure maritime. Pour cette raison, Transports Québec, en charge de la gestion des infrastructures maritimes au Nunavik, a mandaté un groupe de chercheurs de différents organismes, pour réaliser un grand projet visant à évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques.

La mission de l'INRS au sein de ce groupe de chercheurs est de documenter les conditions de glace actuelles et récentes (2000-2011) au niveau de certaines infrastructures maritimes et de faire le lien entre les conditions locales et régionales des régions avoisinantes comme la Baie d'Hudson et le Détroit d'Hudson. Les autres partenaires du projet sont le consortium Ouranos, l'Institut des Sciences de la Mer de Rimouski (ISMER), Environnement Canada, Affaires Autochtones et Développement du Nord Canada (Anciennement Affaires Indiennes et du Nord Canada) et l'administration régionale Kativik (ARK) qui participent à d'autres volets du projet.



RÉSUMÉ

Les glaces de mer sont observées depuis plus de trente ans grâce aux satellites radar (Carsey *et al.*, 1992). Par contre, malgré les multiples recherches effectuées sur le suivi des glaces marines grâce au radar, peu de ces dernières portent sur de petits territoires. Avec l'avènement des effets probants du réchauffement climatique et de ses effets sur le couvert glaciaire, des avenues de recherche visant l'utilisation de l'imagerie radar haute résolution se sont présentées.

Combinant à la fois une approche de cartographie des glaces de mer au niveau local dans les communautés nordiques de Quaqtaq et Umiujaq et l'extraction de données de concentrations pouvant s'avérer utiles aux experts en ingénierie maritime, cette recherche est un premier pas vers une approche de suivi local des glaces marines.

La réalisation de ce projet a impliqué l'acquisition de plusieurs images du satellite canadien RADARSAT-2 et l'utilisation de l'algorithme de segmentation d'images MIRGS (Multivariate Iterative Region Growing Using Semantics) développé à l'Université de Waterloo en Ontario (Qin *et al.*, 2010). Cette recherche constitue en soi un test pour l'algorithme avec de l'imagerie haute résolution car il fut originalement conçu pour être utilisé avec de l'imagerie en mode ScanSAR ayant une résolution spatiale de 250m.

L'objectif principal de ce projet est d'adapter la méthode MIRGS aux images de haute-résolution. Les objectifs secondaires sont la création d'une cartographie permettant de suivre l'évolution du couvert de glace autour des infrastructures maritimes au Nunavik et également la comparaison des concentrations observées avec le radar haute-résolution et celles observées avec les données NSIDC provenant de micro-ondes passives.

Les résultats montrent le potentiel de MIRGS avec les données radar en haute résolution et permettent de cerner les forces et faiblesses de l'algorithme. Une base de données, créée à partir des cartes de glace produites, a été compilée et permet d'observer la dynamique de la concentration totale de glaces autour des infrastructures. La précision des classifications est de 79 % pour les cartes produites en période de formation du couvert (1 à 4 types de glace) et de 94% pour celles produites en période de fonte (1 à 2 types de glace). Ce résultat est très acceptable pour suivre le processus d'englacement et estimer les concentrations de glace autour des infrastructures. Des améliorations au processus de segmentation ont été proposées et permettront certainement de faire augmenter le niveau de précision. La comparaison inter-

échelle n'a permis de dégager aucun lien. Plus forte lors de l'englacement que lors de la fonte, la corrélation entre les deux échelles n'a toutefois qu'une signification très faible.

Les conclusions apportées par cette étude permettront d'améliorer les performances de MIRGS et de guider les ingénieurs maritimes en charge des infrastructures dans leurs évaluations de la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik.

TABLE DES MATIÈRES

SECTION 1 : SYNTHÈSE	1
1. INTRODUCTION.....	3
2. PROBLÉMATIQUE.....	7
2.1 La glace de mer.....	7
2.2 Glace et climat.....	12
2.3 La télédétection radar	13
2.3.1 Caractéristiques du signal transmis	14
2.3.2 Caractéristiques d'une cible radar	15
2.4 L'interaction entre le signal et la glace.....	16
2.4.1 Saumure	17
2.4.2 Rugosité de surface.....	18
2.4.3 Couvert de neige et mares de fonte	18
2.4.4 Spécificités de la glace côtière	19
2.5 La classification d'images.....	19
2.5.1 Principales méthodes.....	19
2.5.2 La segmentation.....	20
2.5.3 L'approche MIRGS.....	20
2.6 Objectifs et hypothèses de recherche.....	21
3. MÉTHODOLOGIE.....	23
3.1 Sites de recherche	23
3.2 Données	24
3.2.1 Imagerie Radarsat-2.....	24
3.2.2 Photographies aériennes	24
3.2.3 Photographies au sol.....	25
3.2.4 Données météorologiques.....	27
3.2.5 Données NSIDC	28
3.2.6 Données topographiques.....	28

3.3 Méthode de traitement des images	29
3.3.1 Segmentation de l'image radar.....	30
3.3.2 Étiquetage sémantique des régions.....	33
3.3.3 Validations comparatives.....	35
3.3.4 Positionnement spatial des cartes de glace.....	36
3.3.5 Extraction de statistiques de concentration.....	36
3.3.6 Comparaison inter-échelle.....	37
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	41
4.1 Cartes des conditions de glace	41
4.2 Validation de la cartographie	51
4.2.1 Photographies au sol – Précision des concentrations.....	51
4.2.2 Photographies aériennes – Précision des étiquettes de types de glace.....	53
4.3 Dynamique des périodes d'englacement et de fonte au voisinage des infrastructures maritimes	55
4.3.1 Période de fonte 2009.....	56
4.3.2 Période d'englacement 2009.....	58
4.3.3 Période de fonte 2010.....	60
4.3.4 Période d'englacement 2010.....	62
4.4 Évolution des caractéristiques des glaces au voisinage des infrastructures	65
4.4.1 Période de fonte 2009.....	65
4.4.2 Période d'englacement 2009.....	67
4.4.3 Période de fonte 2010.....	69
4.4.4 Période d'englacement 2010.....	70
4.5 Comparaison des cartes locales et régionales	72
4.6 Difficultés rencontrées	76
4.6.1 Limitations de l'imagerie comme intrant unique à la segmentation.....	76
4.6.2 Limitations de MIRGS pour l'utilisation avec l'imagerie haute résolution.....	76
4.6.3 Limitations et signification de la comparaison inter-échelle.....	76
4.7 Perspectives de développement	77
4.7.1 Améliorations proposées à MIRGS.....	77
4.7.2 Automatisation de la procédure d'étiquetage.....	78

5. CONCLUSION	81
SECTION 2 : ARTICLE	83
Auteurs et affiliations professionnelles	85
Nature de la contribution de l'étudiant	85
Titre du journal ou du journal où l'article a été publié.....	85
Modification exigées par le comité de lecture	85
1. INTRODUCTION	89
2. CLASSIFICATION OF SEA ICE TYPES	90
3. SAR DATA	91
3.1 SAR in sea ice imagery	91
3.2 Effect of sea ice physical structure on radar backscatter	92
4. METHODOLOGY	92
4.1 SAR segmentation	93
4.2 MIRGS steps	94
4.3 MIRGS calibration and application	94
4.4 Region labelling	95
4.5 Georeference and spatial statistics extraction	95
5. RESULTS AND ANALYSIS	96
5.1 Ice maps	96
5.2 Ice regimes of 2009-2010 and 2010-2011.....	96
5.3 Validation and limitations	99
6. CONCLUSION	101
7. ACKNOWLEDGMENTS	101



LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Type d'infrastructure maritime trouvée au Nunavik.</i>	5
<i>Figure 2 : Variation de la température de congélation de l'eau de mer en fonction de la salinité.</i>	7
<i>Figure 3 : Salinité de surface moyenne des océans en PSU ou PPM. (Antonov et al., 2005)</i>	8
<i>Figure 4 : Processus de formation de la glace de mer selon les conditions océaniques.</i>	11
<i>Figure 5 : Évolution de la pression (MPa) soutenable par une carotte de glace de première année en fonction du jour julien de prélèvement de la carotte. (Tiré de Johnston et al., 2003)</i>	12
<i>Figure 6 : Albédo (α) des différentes configurations de surface présentes dans l'océan Arctique.</i>	13
<i>Figure 7 : Processus de réflexion de l'onde radar. (Planète Sciences Midi-Pyrénées, 2011)</i>	16
<i>Figure 8 : Types de diffusions possibles dans un couvert de glace.</i>	17
<i>Figure 9 : Processus de diffusion dominant selon le type de glace. Inspiré de (Carsey et al., 1992)</i>	18
<i>Figure 10 : Carte du Nunavik. (Société Makivik, 2011)</i>	23
<i>Figure 11 : Exemples de photographies aériennes de Quaqtq et Umiujaq.</i>	25
<i>Figure 12 : Systèmes de caméras installés à Quaqtq, la Reconyx en haut et la Harbortronics plus bas.</i>	26
<i>Figure 13 : Photographie Harbortronics des infrastructures maritimes de Quaqtq 1 (rouge) et Quaqtq 2 (jaune). Les informations auxiliaires à droite ont été ajoutées ultérieurement à la photo prise le 07/12/2009 à 10h.</i>	26
<i>Figure 14 : Photographie Reconyx de l'infrastructure maritime d'Umiujaq. Les informations auxiliaires à droite ont été ajoutées ultérieurement à la photo prise le 20/05/2010 à 13h.</i>	27
<i>Figure 15 : Exemple du jeu de données de concentrations de glace NSIDC.</i>	28
<i>Figure 16 : Masque vectoriel utilisé pour masquer les images de Quaqtq.</i>	29
<i>Figure 17 : Schéma méthodologique global.</i>	30
<i>Figure 18 : Les quatre étapes de l'algorithme MIRGS.</i>	31
<i>Figure 19 : Procédure de validation des cartes avec les photos aériennes et avec les photos au sol.</i>	35
<i>Figure 20 : Étapes du positionnement spatial des cartes de glace.</i>	36
<i>Figure 21 : Procédure ArcGIS d'extraction des statistiques de concentration.</i>	37
<i>Figure 22 : Étapes de la comparaison inter-échelle.</i>	37
<i>Figure 23 : Superposition de la grille du modèle océanique de la baie d'Hudson de l'ISMER et des données micro-ondes passives de concentration de glace régionales du NSIDC (Bleu = Faible concentration, Rouge = Forte concentration).</i>	38
<i>Figure 24 : Mailles du modèle ISMER sélectionnées pour la comparaison régionale/locale à Quaqtq. En vert, 2 mailles AMSR/E et en rouge 4 mailles AMSR/E.</i>	39
<i>Figure 25 : Mailles du modèle ISMER sélectionnées pour la comparaison régionale/locale à Umiujaq. En vert, 2 mailles AMSR/E et en rouge 4 mailles AMSR/E.</i>	39

Figure 26 : Comparatif des résultats à l'englacement (Umiujaq) et à la fonte (Quaqtaq) en fonction des deux modes d'acquisition RADARSAT-2 (Fin (8m) et Ultra-Fin (3m)).....	43
Figure 27 : Carte des conditions de glace d'Umiujaq le 25 janvier 2011 (Englacement), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Fin (20km ²).....	44
Figure 28 : Image originale du 25 janvier 2011 en mode fin, polarisation HH.	45
Figure 29 : Carte des conditions de glace de Quaqtaq le 27 mai 2010 (Fonte), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode fin (50km ²).	46
Figure 30 : Image originale du 27 mai 2010 en mode fin, polarisation HH.	47
Figure 31 : Carte des conditions de glace de Quaqtaq le 17 décembre 2009 (Englacement), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin (20km ²).....	48
Figure 32 : Image originale du 17 décembre 2009 en mode ultra-fin, polarisation HH.	49
Figure 33 : Carte des conditions de glace d'Umiujaq le 2 mai 2010 (Fonte), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin (50km ²).	50
Figure 34 : Image originale du 2 mai 2010 en mode ultra-fin, polarisation HH.	51
Figure 35 : Illustration de l'effet de la marée basse sur l'image radar et sur la carte résultante. La plage rocailleuse et mouillée près des infrastructures maritimes semble de la glace (forte rétrodiffusion).....	52
Figure 36 : Effet de lissage sur la carte de glace causant la disparition de certaines entités de glace.....	54
Figure 37 : Comparatif des processus d'englacement (Umiujaq, janvier 2011) et de fonte (Quaqtaq, mai 2010).	55
Figure 38 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtaq 1 et 2 lors de la période de fonte 2009.	56
Figure 39 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – mai, juin et juillet 2009.	57
Figure 40 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – mai, juin et juillet 2009.	57
Figure 41 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtaq 1 et 2 lors de la période d'englacement 2009.....	58
Figure 42 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – novembre et décembre 2009.....	59
Figure 43 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – novembre et décembre 2009.....	59
Figure 44 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtaq 1 et 2 lors de la période de fonte 2010.	60
Figure 45 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – mai et juin 2010.	61
Figure 46 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – mai et juin 2010.	61
Figure 47 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtaq 1 et 2 lors de la période d'englacement 2010.....	62
Figure 48 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – décembre 2010 et janvier 2011.	63
Figure 49 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – décembre 2010 et janvier 2011.	63
Figure 50 : Dynamique de fonte 2009 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.....	66

<i>Figure 51 : Dynamique de fonte 2009 dans la zone tampon de 1 km de Quaqtqaq-1.</i>	66
<i>Figure 52 : Dynamique d'englacement 2010 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.</i>	67
<i>Figure 53 : Dynamique d'englacement 2010 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqtqaq-1.</i>	68
<i>Figure 54 : Fracturation du couvert de glace observée à Quaqtqaq le 20/12/2009.</i>	68
<i>Figure 55 : Dynamique de fonte 2010 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.</i>	69
<i>Figure 56 : Dynamique de fonte 2010 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqtqaq-1.</i>	70
<i>Figure 57 : Dynamique d'englacement 2011 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.</i>	71
<i>Figure 58 : Dynamique d'englacement 2011 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqtqaq-1.</i>	71
<i>Figure 59 : Corrélations RS-2 versus NSIDC2 en période de fonte (1 et 10 km).</i>	75
<i>Figure 60 : Corrélations RS-2 versus NSIDC2 en période d'englacement (1 et 10 km).</i>	75
<i>Figure 61 : Schéma proposé pour l'automatisation de la procédure de segmentation et d'étiquetage.</i>	79
<i>Figure 62 : Study sites.</i>	90
<i>Figure 63 : Sea ice types and color codes in accordance to WMO standards + Brash Ice.</i>	91
<i>Figure 64 : Segmentation Process Scheme, adapted from (P. Yu, 2009).</i>	93
<i>Figure 65 : Ice maps from RADARSAT-2 images: On the left, Umiujaq, January 25th, 2011 (Ultra-fine, 3m) and on the right, Quaqtqaq, January 24th, 2009 (Fine, 8m). The semi circles are the 10km, 1km and 100m buffers.</i>	96
<i>Figure 66 : Temporal evolution of total ice coverage in Umiujaq for 100m, 1km and 10km buffers during 2 years.</i> ..97	
<i>Figure 67 : Temporal evolution of total ice coverage in Quaqtqaq for 100m, 1km and 10km buffers during 2 years.</i> ..97	
<i>Figure 68 : Ice concentration per type for the 1km buffer in Umiujaq (left) and Quaqtqaq (right).</i>	99
<i>Figure 69 : Effects of wind on radar image segmentation.</i>	101

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Description des types de glaces de mer présents en Arctique. (SCG, 2005).....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 2 : Images acquises pour le projet MTQ.</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 3 : Caractéristiques des deux systèmes de caméras</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 4 : Aspects, morphologies et apparences sur les images radar des différents types de glace.</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 5 : Comparaison entre les concentrations observées sur les photographies au sol dans la zone tampon 100m et les valeurs de concentration obtenues dans les cartes de glace pour la même zone tampon.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 6 : Comparaison entre le nombre de types de glace observés sur les photos et ceux observés sur la carte pour le jeu de photographies de la période de fonte à Quaqtqaq, le 27/05/2010.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 7 : Comparaison entre le nombre de type de glace observés sur les photos et ceux observés sur la carte pour le jeu de photographies de la période d'englacement à Umiujaq, le 25/01/2011.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 8 : Synthèse des dates d'englacement et de fonte pour Quaqtqaq et Umiujaq 2009-2010.</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 9 : Synthèse des corrélations obtenues entre les données locales et régionales.</i>	<i>74</i>
<i>Table 10 : Summary of acquired images and modes per village.</i>	<i>93</i>
<i>Table 11 : Comparison of ice first appearance and ice total disappearance dates from different sources.....</i>	<i>98</i>

« Il ne faut pas faire de l'intelligence un dieu, car si celle-ci est douée de muscles puissants, elle ne possède pas de personnalité. »

- Albert Einstein (1879-1955)

« L'intelligence, ce n'est pas seulement ce que mesurent les tests, c'est aussi ce qui leur échappe. »

- Edgar Morin (1921–)



**SECTION 1 :
SYNTHÈSE**



1. INTRODUCTION

La glace marine joue un rôle majeur dans la région arctique. Les navigateurs, explorateurs, géographes et spécialistes du climat ont, depuis fort longtemps, éprouvé un grand intérêt pour l'étude et l'observation du couvert glaciaire. Les opérations maritimes, incluant la navigation en surface, les opérations de forage en mer et les opérations côtières sont toutes intimement concernées par les conditions de glaces, que ce soit la localisation des glaces minces, l'identification de zones à risques et la prévision des conditions de glace.

Sa présence est d'importance capitale pour le maintien du climat. Toutefois, les dernières décennies ont vu des changements climatiques affecter le climat arctique et les effets sur le couvert de glace sont majeurs. On note soit une disparition hâtive et une apparition tardive du couvert dans les régions plus au sud et, au nord, on note une présence de plus en plus réduite de glaces pluriannuelles (Maslanik et al., 2007). Ces changements ont des implications importantes dans plusieurs domaines. Ils induisent entre autres, une augmentation de la vulnérabilité des infrastructures maritimes. Pour les communautés inuites, ces infrastructures constituent le seul moyen sécuritaire de mise à l'eau et jouent souvent un rôle capital dans la vie communautaire. Aussi, en ingénierie maritime, un changement du régime glaciaire implique un changement au niveau de la gestion, de la conception et de la maintenance des infrastructures maritimes. En effet, bien que la composition et la dynamique du couvert de glace arctique soit relativement simple, la prise en compte des changements locaux et journaliers au niveau de l'épaisseur de glace, de la distribution et du type de couvert est impérative à la gestion efficace des infrastructures. Ce sont les raisons qui ont motivé la réalisation de cette recherche, soit de développer un outil pour documenter de façon récurrente, les conditions de glace autour des infrastructures maritimes du Nunavik.

L'observation des conditions de glaces à partir de stations côtières et de navires a débuté il y a près de 80 ans. Toutefois, la cartographie régulière des conditions de glace avec des moyens technologiques tels les capteurs aéroportés et spatioportés date de la deuxième guerre mondiale. L'imagerie aéroportée a été utilisée majoritairement avant les années 1980 pour ensuite laisser la place à l'imagerie spatiale.

Les capteurs satellites sont effectivement des instruments de premier ordre pour l'observation et la surveillance du couvert glaciaire. Plusieurs capteurs œuvrant dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge ont, et continuent, à contribuer au développement des connaissances

sur les glaces marines (Onstott, 2005). Les premiers satellites utilisés pour le suivi des conditions de glace furent les capteurs visibles et infrarouges comme ceux à bord de NIMBUS-1 (1964-1974), des satellites du programme TIROS (1960-1966) et le « Earth Resources and Technology Satellite » (1972-1978) plus tard renommé LANDSAT 1. Le désavantage majeur des capteurs optiques est leur incapacité à imager une région lors de la présence d'un couvert nuageux, ce qui est très fréquent dans les régions maritimes. Le second est leur incapacité à imager la nuit ou dans des conditions de faible éclaircissement comme en arctique. Pour pallier à ces désavantages, l'imagerie micro-ondes, tant active que passive est une excellente alternative.

Les premiers systèmes de télédétection micro-ondes passives, utilisés pour étudier les glaces marines ont été lancés par les soviétiques sur les satellites COSMOS-243 et COSMOS-384, respectivement en 1968 et 1970 (Kurskaya, 1973). Les américains ont également participé à l'essor de la télédétection micro-ondes passive avec le « Electrically Scanning Microwave Radiometer » (EMSR) à bord du satellite NIMBUS en 1973 (Parkinson *et al.*, 1987). Pour prendre la relève d'EMSR, un instrument plus avancé, le « Scanning Multichannel Microwave Radiometer » (SMMR) a été lancé à bord de NIMBUS-7 et a été fonctionnel de 1978 à 1987 (Gloersen *et al.*, 1992). Le successeur de SMMR, le « Special Sensor Microwave Imager » (SSM/I) a fourni des mesures continues durant une période de 25 ans. Tous ces capteurs ont permis un suivi des conditions de glaces à grande échelle et l'établissement d'une base de données fiables sur une longue période temporelle. Aujourd'hui, les données micro-ondes passives proviennent du successeur de SSM/I soit le « Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System » (AMSR/E) qui améliore la résolution spatiale atteinte jusqu'à 6km.

Les systèmes actifs de télédétection micro-onde, communément appelés radar, ont été utilisés pour la première fois pour l'étude des glaces en 1978 avec le capteur SEASAT, qui malheureusement n'a pu être utilisé que durant 3 mois dû à une défaillance technique. Les premières utilisations opérationnelles du radar spatioporté pour l'observation des glaces ont été avec les satellites européens ERS-1 et ERS-2 du programme « *European Remote Sensing* », lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ces deux satellites ont fournis des dizaines de milliers d'images radar de zones couvertes par les glaces marines et représentent une étape clé de la télédétection radar des conditions de glace.

Lancé en novembre 1995, le satellite canadien RADARSAT-1 fournit de l'imagerie pour l'étude des glaces avec une résolution spatiale de 8 à 100m et est toujours en orbite et fonctionnel.

Toutefois, il n'opère que dans une seule polarisation (HH). Son successeur, RADARSAT-2 (lancé en 2007) permet d'atteindre des plus hautes résolutions (3m voire 1 m) et offre la multipolarisation (HH, VV, HV, VH). L'avenir quant à la disponibilité de capteurs radar est très prometteur car le lancement de plusieurs systèmes radar est prévu dans la prochaine décennie (Power *et al.*, 2011) dont la mission canadienne RADARSAT-Constellation, les satellites de la série SENTINEL de l'ESA et le capteur ALOS-2 de la JAXA.

Cette recherche vise donc le développement d'une approche pour produire à partir de l'imagerie RADARSAT-2 haute résolution (<10m) des cartes de glace au voisinage des infrastructures maritimes du Nunavik (Figure 1) et d'évaluer la précision de ces cartes.



Figure 1 : Type d'infrastructure maritime trouvée au Nunavik.

Telle que présentée dans l'avant-propos, la mission de l'INRS au sein du projet est de documenter les conditions de glace récentes (2000-2011) au niveau de certaines infrastructures maritimes et de faire le lien entre les conditions à l'échelle locale (images RADARSAT-2) et à l'échelle régionale (images AMSR/E). Le second objectif de ce mémoire est donc de comparer les concentrations à l'échelle locale et régionale afin d'en comprendre les relations. En effet, l'évolution de la concentration de glace autour des infrastructures peut être extrêmement rapide comme elle peut être lente et progressive. Plusieurs cas de figure se sont présentés durant la

période du projet. Cela a permis de voir les différences entre les dynamiques des périodes d'englacement et de fonte qui peuvent varier d'années en années.

Ce mémoire est divisé en deux sections. La première synthétise les travaux effectués et les résultats obtenus et comprend 5 chapitres. La seconde présente l'article publié en anglais dans les comptes-rendus de 21st *International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, c'est le chapitre 6. Le mémoire se termine par la liste des références (chapitre 7).

2. PROBLÉMATIQUE

Ce second chapitre décrit le médium à cartographier, c'est à dire la glace de mer (2.1) et son lien avec le climat (2.2). Les sections suivantes expliquent le système radar (2.3), l'interaction radar/glace (2.4) et les approches de segmentation (2.5).

2.1 La glace de mer

La différence majeure entre l'eau douce et l'eau de mer réside dans la salinité. Le sel fait décliner le point de congélation de l'eau (T_f) suivant l'approximation mathématique suivante (Équation 1) (Figure 2) (Newmann *et al.*, 1966) :

$$T_f = -0.003 - 0.0527S_w - 0.00004S_w^2 \quad (1)$$

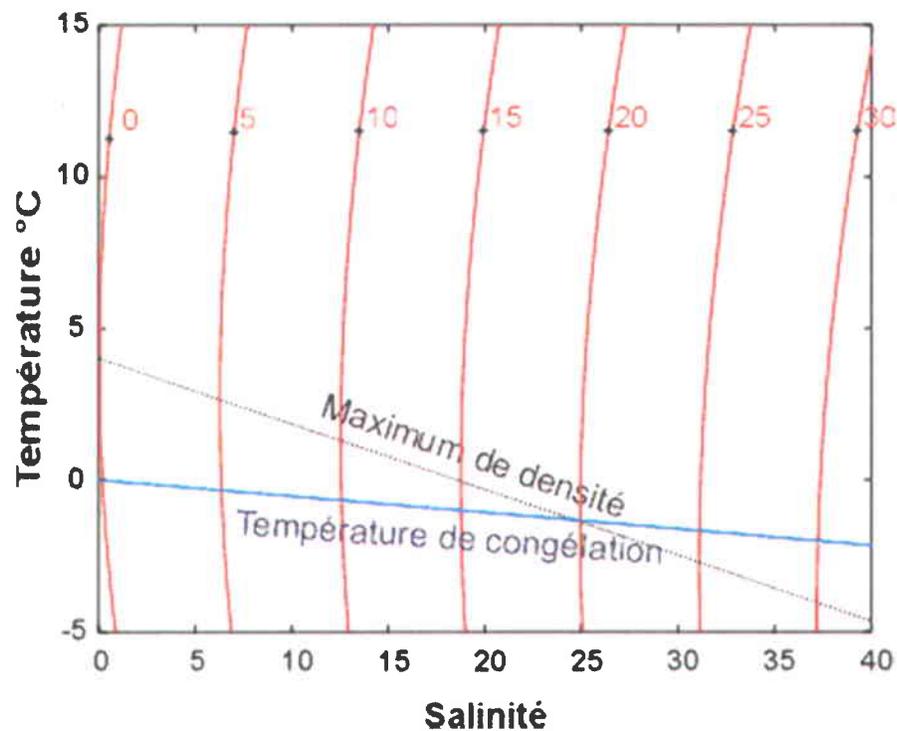


Figure 2 : Variation de la température de congélation de l'eau de mer en fonction de la salinité.

Où S_w est la salinité de l'eau en parties par milliers (ppm). La salinité moyenne dans la Baie d'Hudson et le Détroit d'Hudson oscille entre 32-33 ppm (Figure 3) ce qui signifie que dans nos régions d'étude, le point de congélation devrait être autour de -1.8°C .

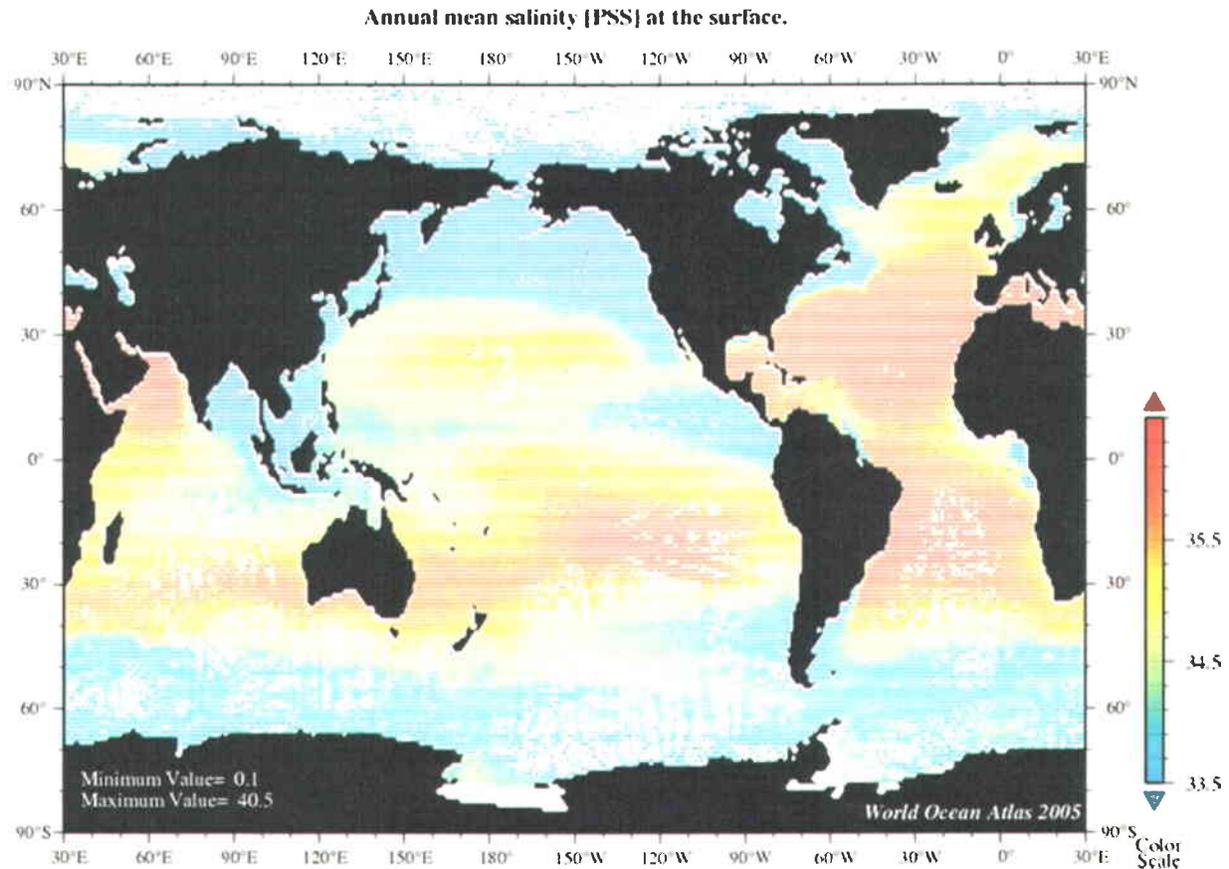


Figure 3 : Salinité de surface moyenne des océans en PSU ou PPM. (Antonov *et al.*, 2005)

De plus, la température de densité maximale de l'eau, soit la température à laquelle l'eau de mer est la plus dense en fonction de la salinité, pour des salinités supérieures à 24.7 ppm est plus basse que celle du point de congélation calculé avec l'équation 1. Il en résulte un refroidissement continu des eaux se trouvant au-dessus de ce seuil de température créant un brassage ou instabilité dans la distribution verticale des masses d'eau. C'est ce qu'on appelle une instabilité convective et cette dernière se poursuit jusqu'à ce que la masse d'eau atteigne le point de congélation (Tucker *et al.*, 1992).

La formation initiale de la glace commence à la surface, là où la perte de chaleur est la plus importante, ce qui permet d'être en présence de surfusion (Supercooling) nécessaire à la croissance de la glace. Tout débute avec la formation de plaques et d'aiguilles de frasil qui, au fur et à mesure s'agglomèrent pour former une couche d'aspect huileux à la surface appelée

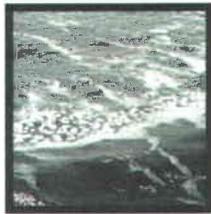
sorbet. Si la croissance se continue en conditions calmes, les cristaux de frasil se regroupent pour former un couvert solide qui, jusqu'à une épaisseur maximale de 10cm, est appelé nilas.

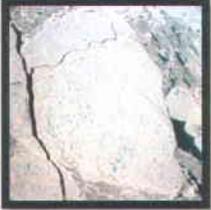
En zones dégagées, comme à la limite de la zone de glace marginale (ZGM), soit la limite entre la banquise fixe et les glaces flottantes, l'effet du vent et des vagues cause la formation de glace en crêpes, qui est en fait une masse circulaire de frasil semi-consolidé. La croissance de la glace se continue sous ces glaces consolidées. Généralement, la croissance se fait lorsque l'eau sous la glace atteint le point de congélation grâce à la conduction de chaleur au travers du couvert. Dans ce cas, le taux de croissance est déterminé par le gradient de température dans le couvert de glace et sa conductivité thermique effective (Tucker *et al.*, 1992). La figure 4 résume le processus de formation de la glace.

Lorsqu'une situation de couvert de glace stable est atteinte, on observe une période de maturation de la glace, en débutant au stade de glace grise en mûrissant jusqu'au stade de glace de première année. Le tableau 1 présente une synthèse des différents types de glaces présents dans l'arctique :

Tableau 1 : Description des types de glaces de mer présents en Arctique. (SCG, 2005)

Type de glace	Description	Apparence
Nouvelle glace	Frasil [EN : Frazil] : Fines aiguilles de glace d'un diamètre d'environ 3mm, en suspension dans l'eau. Elles représentent le premier stade de formation de la glace de mer.	
	Sorbet [EN : Grease ice] : Stade de la congélation postérieur au frasil; les cristaux commencent à s'agglutiner pour former en surface une couche épaisse comme de la soupe. À ce stade, la mer réfléchit peu la lumière et prend une apparence mate.	

	<p>Gadoue [EN : Slush ice] : Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou la glace ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.</p>	
	<p>Shuga [EN : Shuga] : Glace à l'aspect spongieux et granuleux dont les morceaux sont séparés de quelques cm ayant tendance à se former en mer agitée.</p>	
<p>Nilas</p>	<p>Nilas [EN : Nilas] : Couche de glace lisse de moins de 10 cm. Plus il est mince, plus le nilas est sombre. Il est élastique et ondule sous l'effet des vagues. Sous la pression, le nilas a tendance à former des avancés sous forme de « doigts » entrecroisés.</p>	
<p>Glace grise</p>	<p>Glace grise [EN : Grey Ice] : Jeune glace de 10 à 15 cm d'épaisseur, moins souple que le nilas et se brisant sous l'effet de la houle. En général, les fragments se chevauchent sous l'effet de la pression.</p>	
<p>Glace blanchâtre</p>	<p>Glace blanchâtre [EN : Grey-White Ice] : Jeune glace de 15 à 30 cm d'épaisseur. Sous l'effet de la pression, elle aura plus tendance à faire des crêtes qu'à s'empiler.</p>	
<p>Glace de première année</p>	<p>Glace de première année [EN : First Year Ice] : Glace ayant au plus un hiver de croissance, provenant de jeune glace et dont l'épaisseur est d'au moins 30 cm.</p>	

<p>Glace pluriannuelle</p>	<p>Glace pluriannuelle [EN : Multiyear Ice] : Glace de mer ayant survécu à au moins deux étés de fonte. La plupart des accidents topographiques sont plus arrondis que sur la glace de première année.</p>	
<p>Sarrasins</p>	<p>Sarrasins [EN : Brash Ice] : Accumulation de glaces flottantes d'un diamètre inférieur à 2m provenant de parties arrachées a d'autres types de glaces.</p>	

CROISSANCE DE LA GLACE

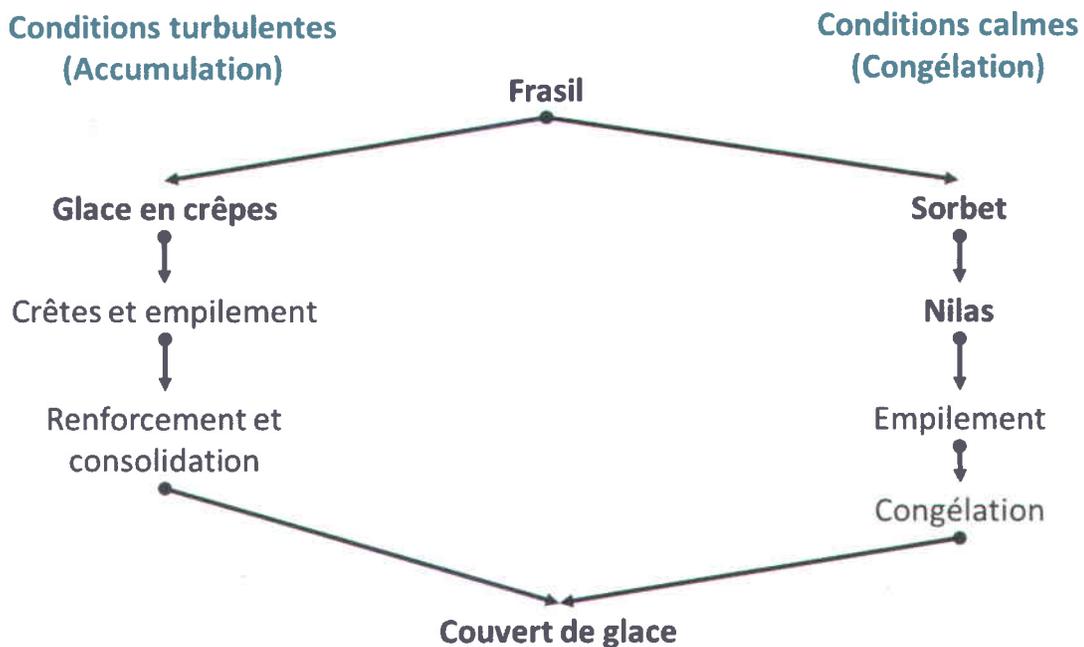


Figure 4 : Processus de formation de la glace de mer selon les conditions océaniques.

Dépendamment de la période de l'année, la pression maximale pouvant être appliquée sur la glace avant qu'elle se brise varie. Pour la glace de première année, la pression nécessaire

diminue graduellement plus la période de fonte avance (Figure 5) car on y trouve une abondance d'inclusions d'air et ces dernières sont bien souvent remplies de saumure. La saumure absorbe le rayonnement solaire beaucoup plus efficacement que l'air ce qui engendre une fonte rapide. Considérant que plus la porosité augmente, plus la force structurale de la glace diminue (Johnston et al., 2003), il est donc normal d'observer un affaiblissement de la glace plus la saison de fonte avance.

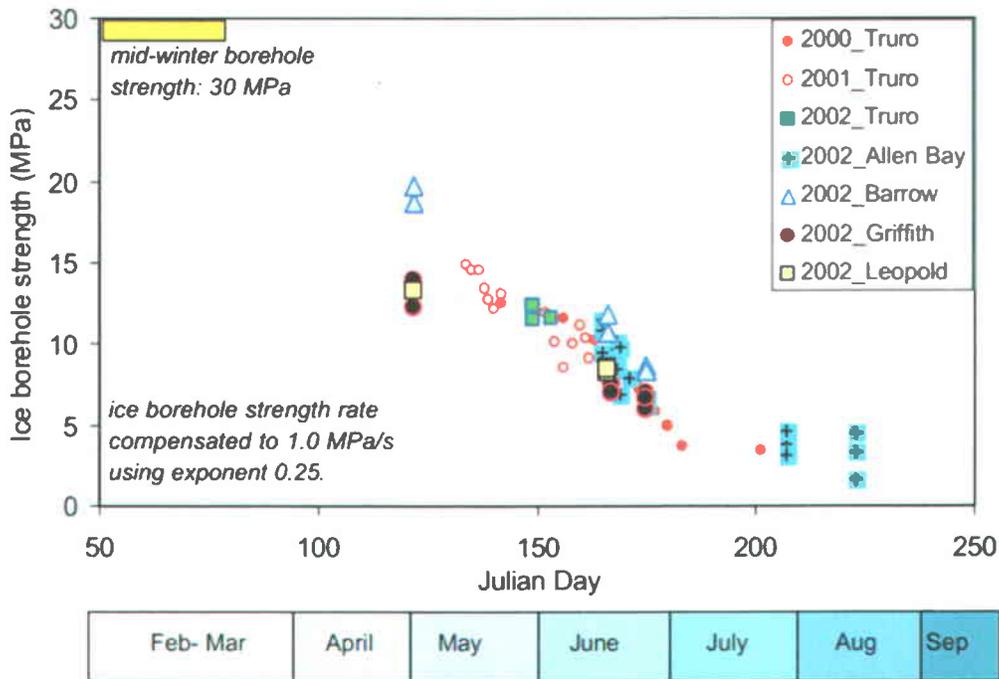


Figure 5 : Évolution de la pression (MPa) soutenable par une carotte de glace de première année en fonction du jour julien de prélèvement de la carotte. (Tiré de Johnston et al., 2003)

2.2 Glace et climat

Le couvert de glace interagit fortement avec l'océan et l'atmosphère et participe activement aux processus climatiques à grande échelle du système climatique terrestre.

Le couvert de glace est un acteur important au niveau du bilan radiatif de l'arctique. En fait, en présence d'un couvert de glace, le bilan est négatif car les valeurs d'albédo de la neige et de la glace sont largement plus élevées que celle de l'eau ($\alpha=0.06$), ce qui signifie simplement que la neige ($\alpha=0.9$) et la glace ($\alpha=0.5$) agissent comme des réflecteurs du rayonnement solaire (Figure 6). Ceci résulte en un refroidissement du climat polaire lorsque le couvert est consolidé

et couvert de neige. Logiquement, lorsque les mares de fonte apparaissent durant l'été, cela accélère la fonte de la glace sous-jacente.

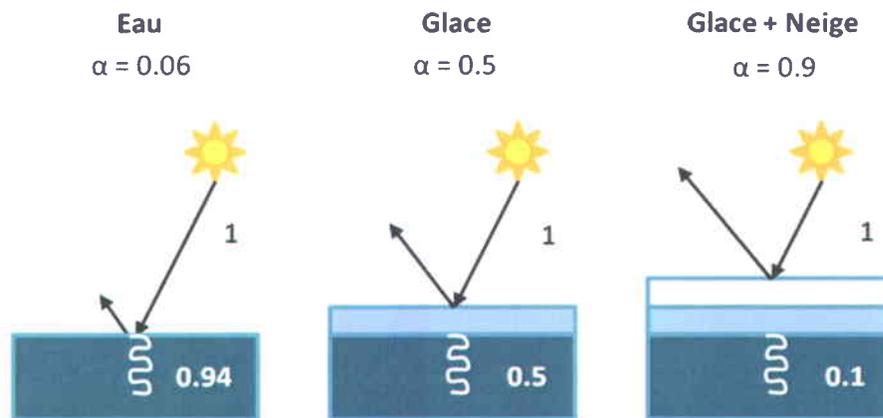


Figure 6 : Albédo (α) des différentes configurations de surface présentes dans l'océan Arctique.

Un couvert de glace est un isolant efficace entre l'air froid arctique et les eaux océaniques tandis que les zones d'eau libre et de glace mince perdent rapidement de la chaleur durant l'hiver. Avec le déclin continu du couvert de glace arctique, de plus en plus d'énergie est absorbée par les masses d'eau et ce gain d'énergie induit des changements dans la dynamique des masses d'eau arctiques. Cela explique l'intérêt de plus en plus marqué par la communauté scientifique pour la télédétection de la glace à partir de capteurs micro-ondes (Heygster, 2011, Kongoli *et al.*, 2011, Maaß *et al.*, 2010, Markus *et al.*, 2000).

2.3 La télédétection radar

Cette section décrit le fonctionnement d'un système radar et l'interaction de son signal avec les différents types de cibles présents à la surface. Le radar à synthèse d'ouverture est un système de télédétection actif dirigeant un faisceau d'ondes polarisées pour illuminer une section de la surface terrestre. L'intensité du retour d'onde reçu par l'antenne normalisé par la section équivalente radar est appelé coefficient de rétrodiffusion (σ^0) (Gherboudj, 2008) et forme l'image. La valeur σ^0 est généralement exprimée en dB (Équation 2) et varie en fonction des propriétés du diffuseur (cible), de l'angle d'incidence, de la longueur d'onde et de la polarisation de l'onde.

$$P_{db} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_r}{P_t} \right] \quad (2)$$

Où :

P_r = Puissance reçue

P_T = Puissance transmise

Les ondes radar font partie de la région micro-ondes dans le spectre électromagnétique. Cette région du spectre s'étend de la longueur d'onde 1 mm à 1 m. L'avantage principal du radar est qu'il permet d'imager le territoire en tout temps, même sous couvert nuageux. Cet avantage est particulièrement important pour des études impliquant un suivi temporel.

L'équation 3 exprime la relation entre le système radar et la cible.

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_T A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4} \quad (3)$$

Où :

P_r = Puissance reçue

P_T = Puissance transmise

G = Gain de l'antenne

λ = Longueur d'onde

σ = Section équivalente radar

R = Distance entre le capteur et le sol

A = Ouverture effective de l'antenne

2.3.1 Caractéristiques du signal transmis

Le signal transmis est caractérisé par sa fréquence et sa polarisation.

La fréquence est le nombre de cycles d'une onde par seconde. Elle est généralement exprimée en gigahertz (GHz), ce qui correspond à un milliard de cycles par seconde. La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Elle influence la profondeur de pénétration de l'onde et la taille des diffuseurs avec lesquelles l'onde interagit. Par exemple, un signal radar en bande L ($\approx 1,5$ GHz) traversera une canopée dense tandis qu'un signal en bande X (≈ 10 GHz) ne pourra la traverser.

La polarisation fait référence à l'orientation du champ électromagnétique d'une onde à l'émission et à la réception et peut être horizontale, verticale ou circulaire. L'acquisition des images peut être faite, selon les caractéristiques propres à chaque capteur, en polarisation simple, en double polarisation ou en quadrature. Chaque combinaison de polarisations offre ses avantages. Les polarisations croisées (HV, VH) offrent un meilleur discernement des structures

verticales tandis que les polarisations linéaires (HH, VV) permettent un meilleur discernement des phénomènes à la surface.

2.3.2 Caractéristiques d'une cible radar

Une cible radar est caractérisée par la constante diélectrique et la rugosité de la surface.

La constante diélectrique, ou permittivité complexe ϵ_c caractérise la réponse d'un milieu à la présence d'un champ électrique. Elle détermine la profondeur de pénétration de l'onde radar car plus elle est élevée, moins l'onde pénètre dans le milieu et plus l'intensité rétrodiffusée est forte. Elle est définie par l'équation 4 :

$$\epsilon_c = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (4)$$

Où, ϵ' est la partie réelle et ϵ'' est la partie imaginaire pour laquelle $i = \sqrt{-1}$. La partie réelle décrit la capacité d'un médium à stocker l'énergie électrique tandis que la partie imaginaire décrit les pertes électromagnétiques dans le médium.

Plusieurs observations montrent que plus la teneur en eau d'un médium augmente, plus la constante diélectrique augmente (Ulaby *et al.*, 1986). Les valeurs des parties réelle et imaginaire pour l'eau douce, soit $\epsilon' = 40$ et $\epsilon'' = 4$ (Onstott, 2005), expliquent pourquoi le signal n'arrive pas à pénétrer dans l'eau car le contraste diélectrique avec l'air est grand étant donné sa valeur réelle de 1.

Un autre facteur important expliquant les variations de constante diélectrique, est la salinité. La salinité augmente le taux de perte électromagnétique dans le médium. Donc, plus la glace est salée, plus la valeur de ϵ'' augmente.

Un dernier facteur agissant sur la constante diélectrique est la température. Une fois gelée, l'eau de mer, sous forme de glace, devient un médium où les pertes de signal sont très faibles car le milieu devient très peu conducteur à cause du changement de phase de l'eau.

La rugosité de surface est un facteur important pour comprendre la réflexion d'une onde. Trois types de réflexion sont identifiés dans la figure 7.

La réflexion diffuse correspond à un type de réflexion qui survient lorsque la surface est rugueuse, ce qui fait que la réflexion est faite dans toutes les directions. La réflexion spéculaire est quant à elle une réflexion faite sur une surface lisse, dont le signal de retour est faible parce que l'onde est presque entièrement réfléchiée dans la direction opposée au capteur. La réflexion

en coin correspond à une combinaison de réflexions spéculaires ce qui peut causer un fort retour vers le capteur.

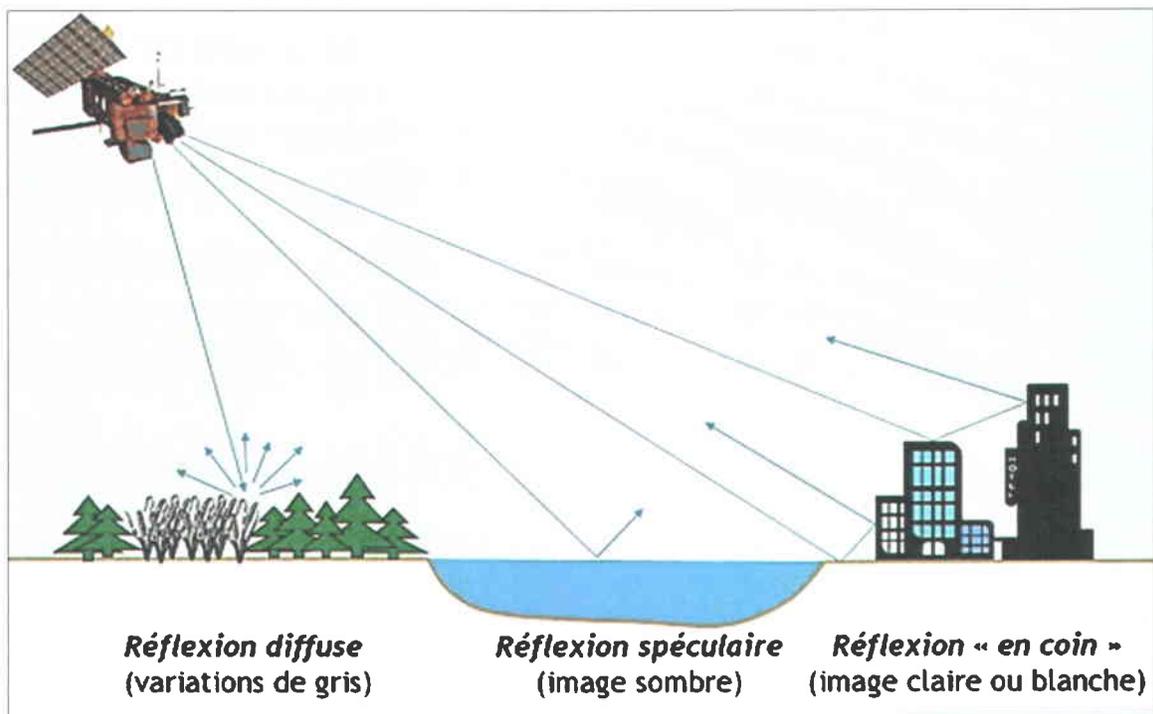


Figure 7 : Processus de réflexion de l'onde radar. (Planète Sciences Midi-Pyrénées, 2011)

2.4 L'interaction entre le signal et la glace

L'interaction principale de l'onde avec un milieu est appelée diffusion (Figure 8), l'interaction opposée étant l'absorption. On dénote deux types de diffusion; la diffusion de surface et la diffusion de volume. La diffusion de surface survient à l'interface entre deux médiums ayant des propriétés physiques et diélectriques différentes. La diffusion de volume est causée par la présence de particules dans un milieu hétérogène.

Lorsque la diffusion est effectuée par interaction entre plusieurs types de diffusion, on parle de diffusion multiple ou « terme d'interaction ». L'onde peut également être absorbée par le milieu.

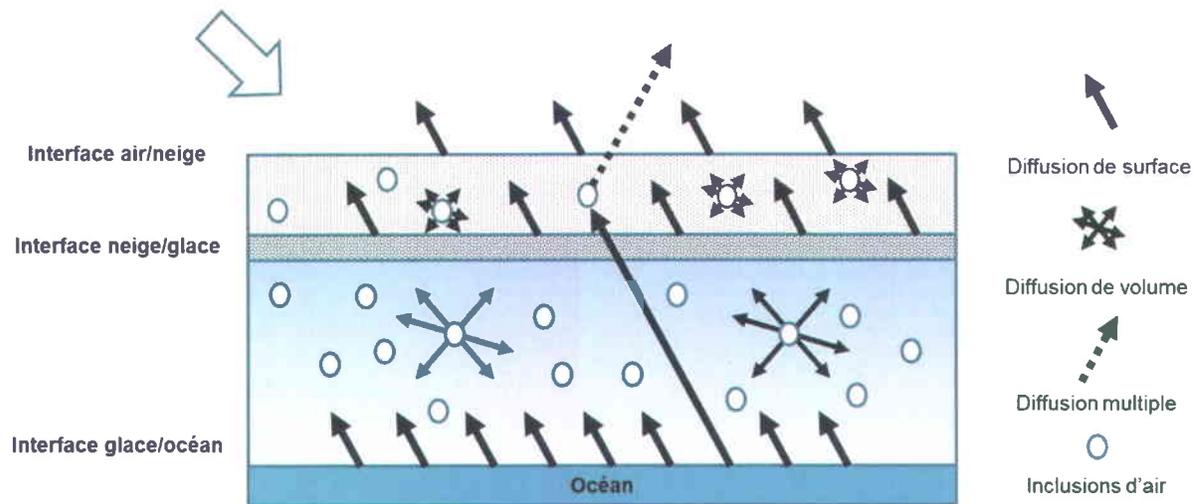


Figure 8 : Types de diffusions possibles dans un couvert de glace.

2.4.1 Saumure

Pendant la formation de la glace de mer, la saumure, soit le sel en solution aqueuse, est retenue dans les cellules de saumure. Avec la progression du refroidissement, la pression au sein de la glace augmente causant l'expulsion de la saumure des cellules, permettant le mouvement de la saumure vers la surface (Geldsetzer *et al.*, 2009, Tucker *et al.*, 1992). C'est ce phénomène qui permet l'apparition des fleurs de gel. La salinité de la surface peut alors atteindre jusqu'à 100 ‰ (Drinkwater *et al.*, 1988).

La saumure étant composée de divers sels dissous, elle reste liquide bien en-dessous de 0°C, malgré que les sels solides précipitent à l'atteinte de leur température eutectique, soit la température à laquelle un mélange est à sa température minimale en phase liquide (Assur, 1960). Une fois un couvert de neige en place, c'est un médium idéal pour que la saumure s'y diffuse par capillarité. La saumure migre par les interstices entre les grains de neige. Les effets de la saumure dans le couvert de neige sur la rétrodiffusion radar incluent : l'augmentation de la rétrodiffusion de volume dans le couvert de neige, la réduction de la profondeur de pénétration des ondes dans le couvert, l'augmentation de la rétrodiffusion du couvert de neige ainsi que de l'importance de la taille des grains et de leur forme. La conductivité, et donc la perte de signal, sont dépendantes de la concentration de sels dissous dans les inclusions et de la connectivité entre ces dernières. Ces effets peuvent potentiellement masquer ou rendre ambiguë l'information sur la glace de mer sous-jacente.

2.4.2 Rugosité de surface

La rugosité de la surface du couvert de glace est intimement liée aux conditions météorologiques et climatiques durant l'englacement. L'importance de la rugosité de surface contrôle l'intensité du retour d'énergie, donc de la rétrodiffusion. La rétrodiffusion des glaces de première année, de la nouvelle glace et de l'eau est dominée par la rugosité de surface (Figure 9).

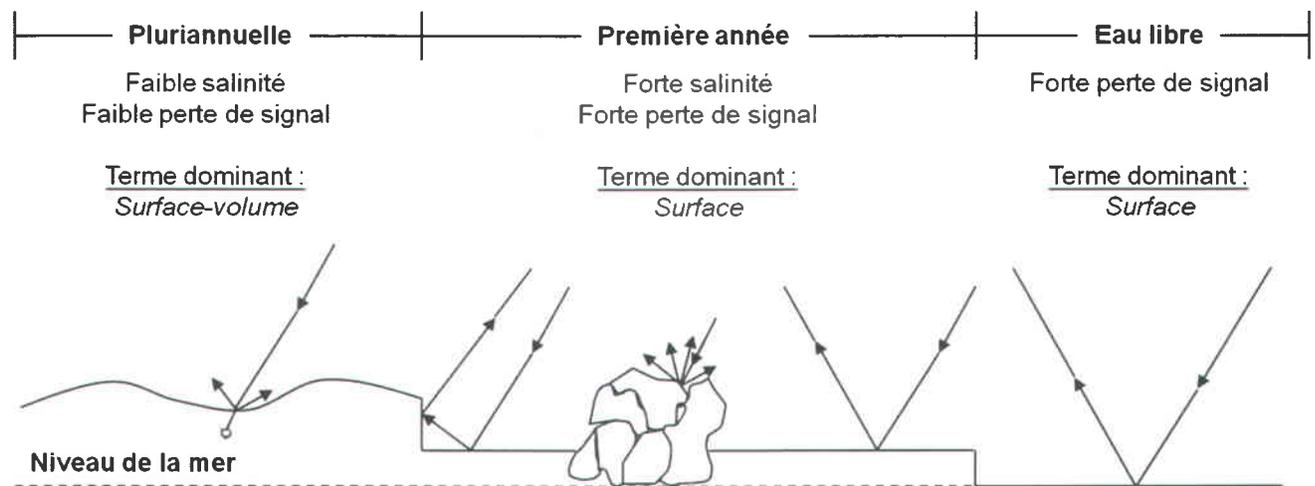


Figure 9 : Processus de diffusion dominant selon le type de glace. Inspiré de (Carsey *et al.*, 1992)

Les inclusions d'air participent quant à elle à la rétrodiffusion de volume car elles ont un fort contraste diélectrique avec la glace. Les inclusions d'air majeures dans la glace sont les cellules de saumure une fois vidées de leur contenu. Par déduction, la rétrodiffusion de volume aura tendance à augmenter plus la glace vieillit, donc plus les cellules de saumures se vident de leur contenu et laissent place à l'air. La rétrodiffusion de volume est particulièrement dominante dans la glace pluriannuelle (Onstott, 2005).

2.4.3 Couvert de neige et mares de fonte

Les mares de fonte varient spatialement et sont une composante importante du régime glaciaire durant l'été. Leur taille, distribution, et évolution sont liées au type de glace sur laquelle elles se forment et la proximité de la rive. Les micro-ondes actives sont sensibles à la fraction du pixel occupée par les mares de fonte et sont sujettes à être affectées par le vent qui altère la rétrodiffusion (De Abreu *et al.*, 2001).

2.4.4 Spécificités de la glace côtière

La glace côtière a comme spécificité le milieu dynamique dans lequel elle croît. La glace côtière croît dans un milieu à profondeurs variables et cela implique que le couvert de glace puisse se fixer au fond marin et faire que le signal soit affecté par une nouvelle interface non présentée dans la figure 6, soit l'interface glace/fond marin. Lors de l'analyse des images, la possibilité que le signal soit affecté par un tel phénomène doit être prise en compte, car il risque d'augmenter la diffusion multiple étant donné le fort contraste diélectrique en la glace et un sol gorgé d'eau.

La glace côtière est également affectée par les marées, qui engendrent beaucoup de mouvements et de pressions sur le couvert. La glace côtière est donc propice à être fissurée, empilées ou en crêtes.

Au début des périodes d'englacement, la glace se formant le long des côtes est affectée par l'apport d'eau douce provenant des rivières se déversant dans l'océan. Il est donc important de considérer cet apport pour comprendre la rétrodiffusion de la glace le long des côtes, située près des exutoires de rivières, étant donné la salinité différente de l'eau douce et de l'eau salée.

2.5 La classification d'images

2.5.1 Principales méthodes

La classification est l'action visant à associer une étiquette sémantique à un pixel, une zone ou un objet détecté dans une image de télédétection. Plusieurs méthodes de classifications existent et elles peuvent être séparées en deux catégories, les approches dirigées et les approches non-dirigées.

L'approche dirigée, est basée sur la prémisse que l'utilisateur est apte à identifier, préalablement à l'application de l'algorithme de classification, des pixels, zones ou régions et à leur attribuer une étiquette sémantiquement valide. De ces pixels, zones ou régions sont extraites des informations spectrales à partir desquelles on associe les autres pixels, régions ou zones à la bonne classe. Les principaux algorithmes utilisés sont celui du Maximum de vraisemblance (Campbell, 2007), les réseaux neuronaux (Tso *et al.*, 2001) ou Support Vector Machine (SVM) (Cristianini *et al.*, 2000, Mermoz, 2010, Mountrakis *et al.*, 2011).

Toutefois, souvent l'utilisateur possède peu ou pas d'information sur les classes d'intérêt comme c'est le cas généralement pour les glaces de mer ou de rivières, l'on fait face à une situation de classification non-dirigée. Le critère de classification des pixels, zones ou régions est basé uniquement sur le critère de ressemblance spectrale ou texturale (Campbell, 2007, Haralick *et al.*, 1973). L'algorithme le plus souvent utilisés est K-means (Campbell, 2007, Gauthier *et al.*, 2006). L'étiquetage des classes ou assignation des types de glace le cas échéant, est effectué après la classification dans un tel cas (Caloz *et al.*, 2001).

2.5.2 La segmentation

La segmentation d'image est l'action visant à séparer l'image en régions fermées de taille plus ou moins grande, où les pixels voisins ont des caractéristiques spectrales semblables. À partir de ces zones, groupements ou régions, il devient possible de mener une classification supervisée ou non. Parmi les algorithmes les plus populaires au Canada on trouve le *Support Vector Machine* (SVM) et le *Classification and Regression Tree* (CART), employés par le logiciel Ecognition™ pour la segmentation multirésolution et l'algorithme « *Multivariate Iterative Region Growing Using Semantics* » (MIRGS) développé par des ingénieurs de l'Université de Waterloo (Clausi *et al.*, 2010, Qin *et al.*, 2010, Q. Yu *et al.*, 2007).

2.5.3 L'approche MIRGS

L'approche MIRGS a comme grand avantage d'utiliser les champs aléatoires de Markov pour prendre en considération le contexte spatial dans le processus de segmentation. C'est une approche itérative par croissance de régions, c'est-à-dire que les régions voisines et semblables, après chaque itération, sont fusionnées en une seule nouvelle région. L'approche jumelle, faisant appel à des images radar univariée, soit des images ayant une seule couche d'information, nommée IRGS, est utilisée pour la segmentation des images radar en vue de classer les glaces à l'échelle régionale mais jamais auparavant à l'échelle locale (Qin *et al.*, 2010). L'IRGS est un algorithme très performant et les cartes produites par cet algorithme montraient une excellente correspondance avec les cartes produites par les experts du Service Canadien des Glaces (Yu *et al.*, 2007). Nous pensons donc que l'approche multivariée MIRGS est bien adaptée à la glace de mer et qu'elle peut aussi fonctionner à l'échelle locale.

Une approche de segmentation quantitative est plus appropriée, dans le cas d'un suivi des types de glace qu'une approche qualitative car l'objectif est d'obtenir des résultats comparables

tout au long de la période d'observation en réduisant au maximum la subjectivité reliée à l'interprétation de l'utilisateur. Malgré tout, l'étiquetage, c'est-à-dire l'identification de la classe à laquelle est associé un agroupement, reste dans notre cas, manuelle, donc qualitative. Cette étape se base sur une multitude de critères comme la teinte, la forme et le contexte. Une telle approche nécessite une bonne capacité d'interprétation de la part de l'utilisateur pour classifier les agroupements obtenus. Pour cette étude, l'approche de segmentation MIRGS a été sélectionnée.

2.6 Objectifs et hypothèses de recherche

Afin de répondre aux besoins de produire des cartes des conditions de glace près des infrastructures maritimes (échelle locale) lors des périodes d'englacement et de fonte au Nunavik, nous allons donc adapter l'approche MIRGS à l'utilisation d'images radar haute résolution comme l'imagerie RADARSAT-2. C'est notre principal objectif.

Nous allons aussi évaluer : a) la précision des cartes de glace produites et b) documenter les forces et faiblesses de l'algorithme MIRGS lorsque utilisé avec les données radar haute résolution. De plus, nous allons comparer les dates d'englacement et de fonte ainsi que les concentrations du couvert de glace obtenues à l'échelle locale avec les résultats des cartes produites à l'échelle régionale grâce aux micro-ondes passives. Cette comparaison est nécessaire pour valider s'il existe une relation entre les deux échelles puisque les modèles climatiques simulent les concentrations de la glace à l'échelle régionale (résolution spatiale de 10 km) (Saucier *et al.*, 2004).

En résumé, l'objectif principal est de :

- Adapter l'approche MIRGS à l'échelle locale et à l'imagerie SAR haute-résolution.

Et les objectifs secondaires sont de :

- Évaluer la précision des cartes produites avec MIRGS.
- Lister les forces et faiblesses de l'algorithme MIRGS pour guider son développement.
- Comparer les résultats obtenus à l'échelle locale avec les cartes régionales produites avec les micro-ondes passives.

Nous émettons donc deux hypothèses :

1. Il est possible de documenter les conditions de glace en utilisant conjointement les images radar haute résolution de RADARSAT-2 et l'algorithme de segmentation MIRGS.
2. Il existe une relation modélisable (mathématique) entre les concentrations observées par l'imagerie radar haute résolution et les concentrations observées par l'imagerie micro-ondes passive faible résolution.

Le prochain chapitre décrit la méthodologie pour atteindre les objectifs et valider les hypothèses présentées ci-dessus.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Sites de recherche

Les sites de recherche sont localisés au voisinage des infrastructures maritimes de Quaqtac et d'Umiujaq, deux communautés du Nunavik (Figure 10). Il y a deux infrastructures à Quaqtac et une à Umiujaq. La communauté de Quaqtac se trouve approximativement à une latitude de 61°00'N et Umiujaq se trouve à 56°30'N. Selon l'atlas climatique des glaces de mer pour les eaux du nord canadien 1981-2010, la date d'englacement moyenne pour les deux communautés est le 4 décembre et la date de fonte moyenne est le 2 juillet pour Quaqtac et le 18 juin pour Umiujaq.



Figure 10 : Carte du Nunavik. (Société Makivik, 2011)

3.2 Données

3.2.1 Imagerie Radarsat-2

Un total de 101 images ont été acquises lors des saisons d'englacement et de débâcle et ce pour les communautés nordiques de Quaqtq et Umiujaq. Le tableau 2 donne le décompte pour chaque village et chaque mode d'acquisition. Les images en mode fin offrent une résolution spatiale de 8m et couvrent environ 50km². Les angles d'incidence varient entre 30 et 50°. Celles en mode Ultra-Fin offrent une résolution spatiale de 3m mais une couverture plus réduite d'approximativement 20km². Les angles d'incidences varient entre 20° et 49°. Si aucune glace n'est observable sur l'image, cette dernière n'est pas traitée dans l'algorithme.

Tableau 2 : Images acquises pour le projet MTQ.

Communautés	Mode fin (HH+HV)	Mode Ultra-Fin (HH)	Total
Umiujaq	18	25	43
Quaqtq	25	33	58

3.2.2 Photographies aériennes

Une banque de photographies aériennes obliques (Figure 11) a été compilée à partir de photos acquises lors de deux survols, les 27 mai 2010 à Quaqtq et 25 janvier 2011 à Umiujaq. Ces photos sont utilisées pour la calibration et la validation de l'approche de classification à ces deux dates précises. Un total de 173 photographies ont été acquises, soit 106 à Quaqtq et 67 à Umiujaq.



Quaqtq (27 mai 2010)
106 photographies



Umiujaq (25 janvier 2011)
67 photographies

Figure 11 : Exemples de photographies aériennes de Quaqtq et Umiujaq.

3.2.3 Photographies au sol

Un système de caméras (Tableau 3) (Figure 12) a été installé à proximité des infrastructures maritimes des communautés de Quaqtq (Figure 13) et d'Umiujaq (Figure 14) dans le cadre du projet avec le MTQ. Ces caméras font normalement l'acquisition de photographies aux heures et ce depuis le mois d'octobre 2009. Des défaillances ont toutefois été notées à cause d'erreurs humaines ou de bris techniques. Ceux-ci ont été documentés dans un rapport soumis au MTQ (Clerc *et al.*, 2011). Avant d'être archivée dans la base de données, les informations suivantes sont ajoutées à droite de la photo : la marée projetée, l'heure d'acquisition de la photo, les conditions météorologiques, la direction du vent, les concentrations locales de RADARSAT-2 et les concentrations régionales des cartes du SCG et de AMSR/E.

Tableau 3 : Caractéristiques des deux systèmes de caméras

Modèle	Reconyx	Harbortronics
Description	Caméra de chasse	Caméra standard + boîtier
Résolution	3,1 MP	10,2 MP
Zoom	1,7 X	3,0 X
Angle de champ	V : 30°, H : 40°	V : 17-48°, H : 25-67°

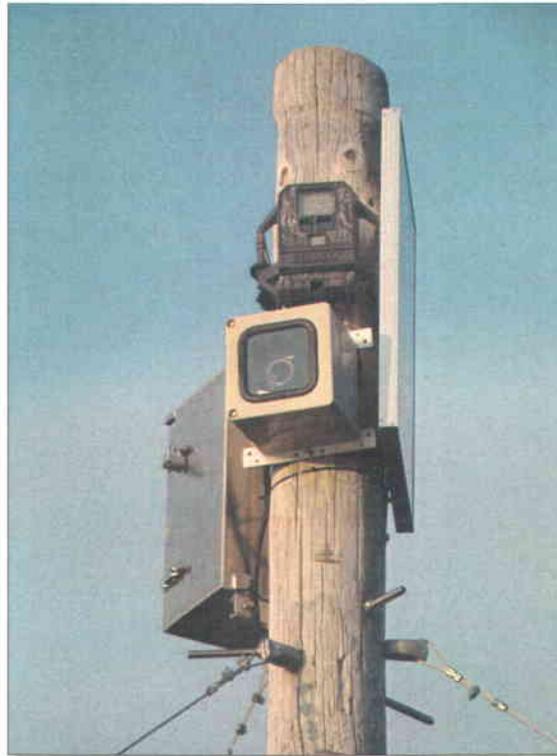


Figure 12 : Systèmes de caméras installés à Quaqtaq, la Reconyx en haut et la Harbortronics plus bas.

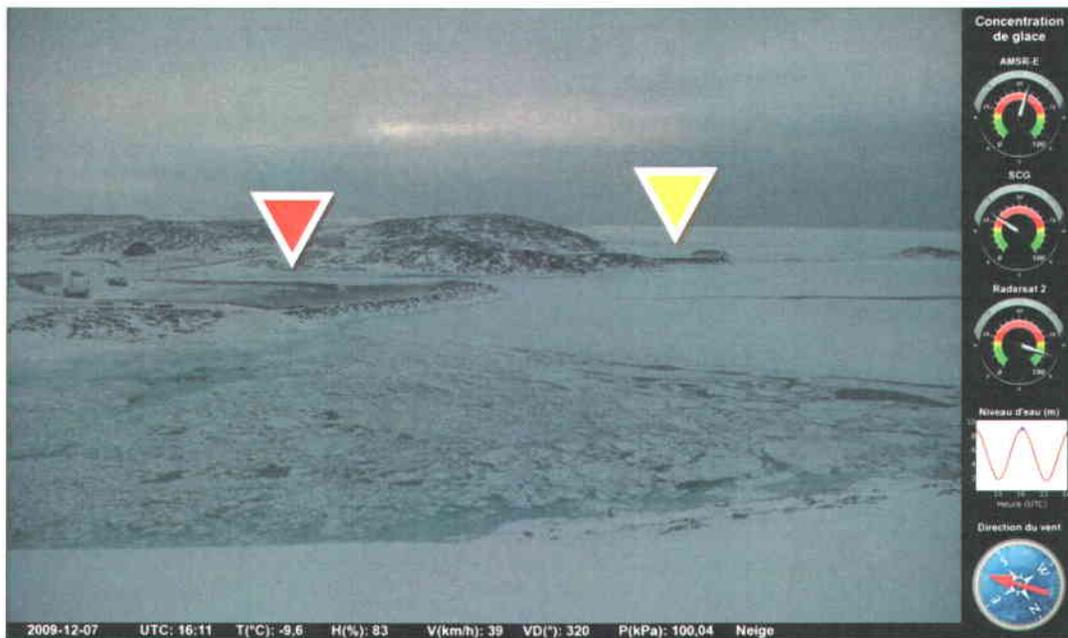


Figure 13 : Photographie Harbortronics des infrastructures maritimes de Quaqtaq 1 (rouge) et Quaqtaq 2 (jaune). Les informations auxiliaires à droite ont été ajoutées ultérieurement à la photo prise le 07/12/2009 à 10h.



Figure 14 : Photographie Reconyx de l'infrastructure maritime d'Umiujaq. Les informations auxiliaires à droite ont été ajoutées ultérieurement à la photo prise le 20/05/2010 à 13h.

3.2.4 Données météorologiques

Les données météorologiques d'Environnement Canada ont été recueillies depuis le printemps 2009 afin de lier l'information météorologique aux phénomènes d'englacement et de fonte observés. La résolution temporelle des données durant la saison 2009-2010 était variable car les stations d'Environnement Canada, positionnées aux aéroports des deux communautés, étaient activées par les préposés des aéroports et ce entre 8h et 16h généralement. En septembre 2010 des stations météorologiques automatiques ont été installées par l'équipe de l'INRS près des côtes dans le cadre du projet des Infrastructures maritimes (Clerc *et al.*, 2011). Depuis leur installation, les données climatiques à l'exception des précipitations sont disponibles 24h/24h.

3.2.5 Données NSIDC

Les données du NSIDC offrent de l'information sur les concentrations de glaces pour l'ensemble de l'arctique. Ces informations sont obtenues à partir d'un algorithme (Markus *et al.*, 2000) appliqué sur les données du capteur micro-ondes passives AMSR/E (Figure 15). La résolution spatiale de ces données est de 12,5 km².



Figure 15 : Exemple du jeu de données de concentrations de glace NSIDC.

3.2.6 Données topographiques

Les données vectorielles du Centre d'information topographique (CIT), téléchargées sur le portail GeoGratis, ont permis de constituer les masques vectoriels (Figure 16) nécessaires pour masquer la région continentale de l'image avant l'application de l'algorithme de segmentation de la couverture de glace (algorithme MIRGS, section 2.5.3). Un prétraitement et une conversion en format .BIN est aussi effectuée grâce à un algorithme en langage IDL (Interactive Data Language).

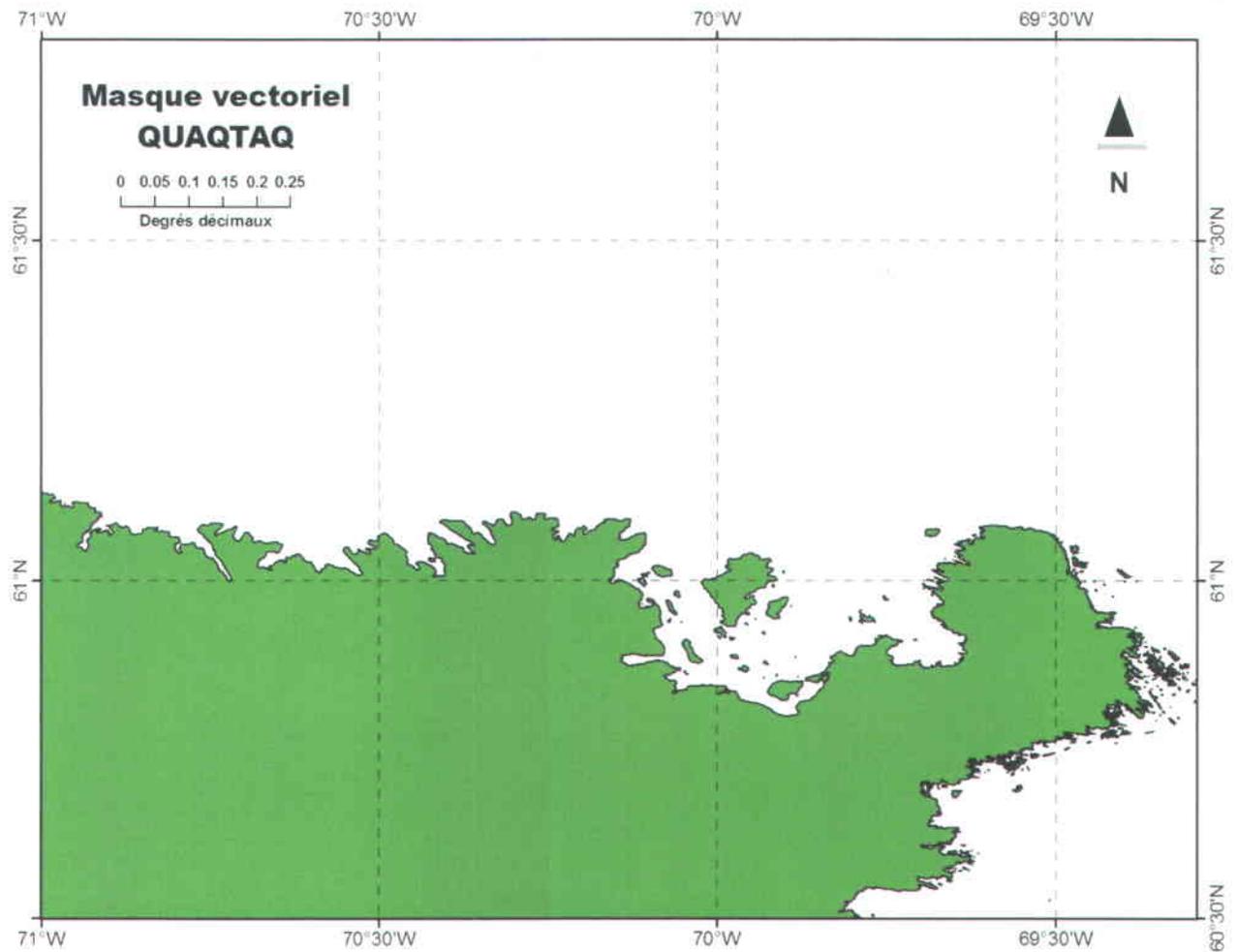


Figure 16 : Masque vectoriel utilisé pour masquer les images de Quaqaq.

3.3 Méthode de traitement des images

Le processus est constitué d'un total de 6 étapes qui permettent de passer de l'image brute jusqu'à la comparaison inter-échelle (Figure 17). Les sous-sections suivantes décrivent chacun de ces processus.

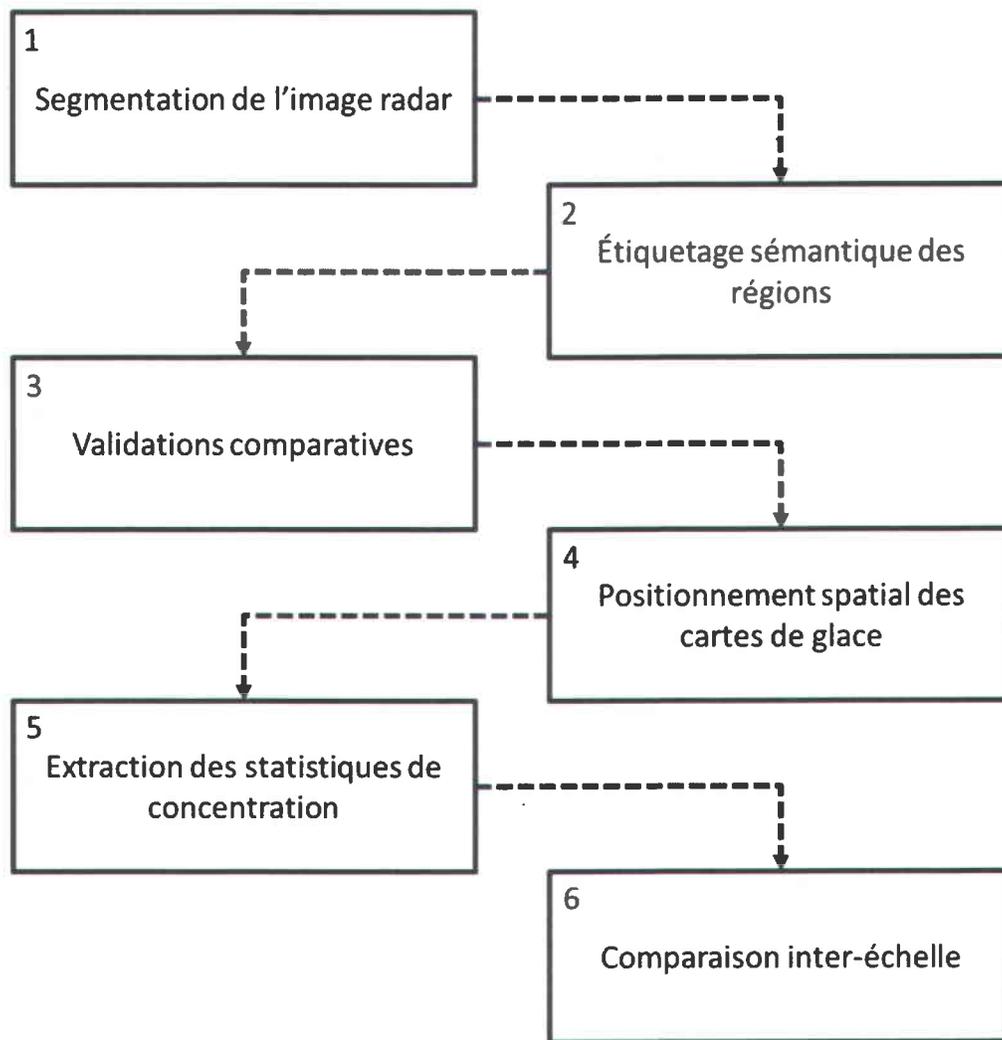
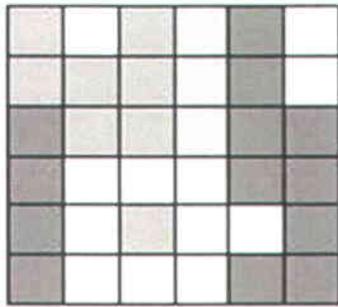


Figure 17 : Schéma méthodologique global.

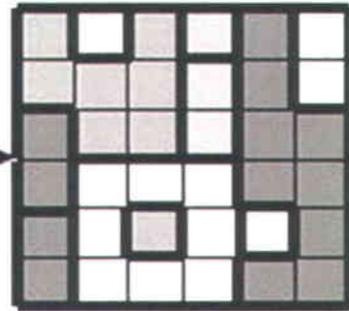
3.3.1 Segmentation de l'image radar

La segmentation des images radar est effectuée en utilisant l'algorithme « Multivariate Iterative Region Growing Using Semantics » (Qin *et al.*, 2010). Cet algorithme, qui n'offre pas encore la possibilité d'effectuer une précorrection géométrique sur l'image radar, est divisé en quatre étapes présentées à la figure 18 :

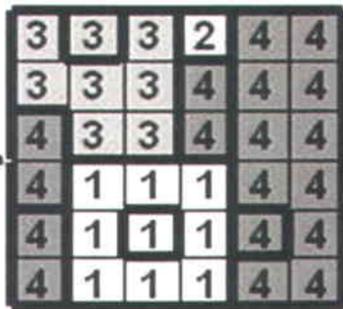
Sous-section RSO



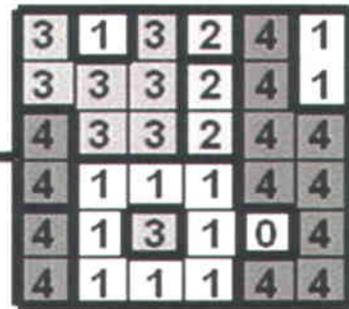
1. Algorithme BV



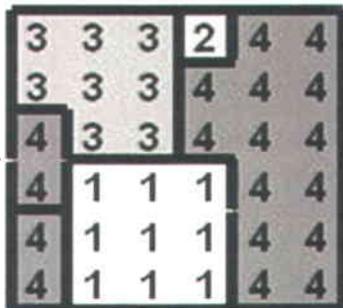
3. Étiquetage Gibbs



2. Étiquetage K-Means



4. Croissance de régions



Résultat

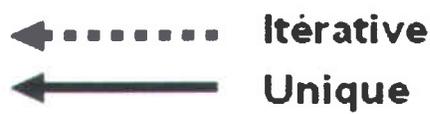
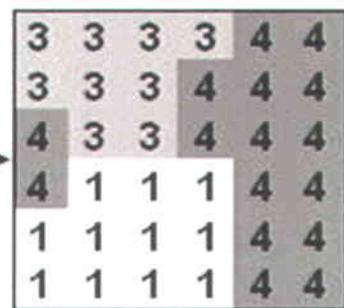


Figure 18 : Les quatre étapes de l'algorithme MIRGS.

Algorithme de calcul de bassin versant (Étape 1)

L'algorithme de bassin versant (Vincent *et al.*, 1991) est utilisé afin de déterminer, dans l'image, des regroupements de pixels ayant des caractéristiques de rétrodiffusion (σ^0) semblables. La méthode proposée dans cet algorithme utilise le principe d'immersion. En considérant les valeurs numériques des pixels comme étant des élévations, l'algorithme identifie les minimas locaux et commence la procédure d'immersion jusqu'à ce que deux zones immergées provenant de minimas différents se rencontrent. Lors de la rencontre de deux zones immergées, l'algorithme procède à l'établissement d'une barrière infranchissable entre les deux zones immergées permettant de continuer le processus d'immersion. Ce processus continue tant que des zones d'immersion fermées (bassins versants) ne sont pas obtenues pour chaque minima local.

Regroupement K-Means (Étape 2)

Les regroupements (*clusters*) initiaux effectués par MIRGS utilisent l'approche K-Means qui vise à minimiser l'inertie intra-classes tout en maximisant l'inertie interclasses (Gançarski, 2009). Dans MIRGS, K-Means est utilisé pour grouper les régions obtenues à l'étape 1 sous un nombre défini de classes sans signification propre (sémantique). Dans l'exemple de la figure 16, le nombre de classes est quatre. Qin et Clausi (2010) y font référence en tant que RKM, soit « *Region K-Means* ». RKM fonctionne en minimisant la somme des carrés à l'intérieur de chaque regroupement (*cluster*) en assignant à ces dernières le numéro de classe associé à la moyenne dont ils sont statistiquement le plus proche. Les moyennes sont initialisées automatiquement suivant l'approche décrite par Qin et Clausi (2010).

Regroupement Gibbs (Étape 3)

À partir de cette étape, MIRGS entre dans un processus itératif qui tient en compte le contexte spatial, c'est-à-dire le voisinage de chaque région. Le concept derrière cette étape se nomme l'échantillonneur de Gibbs, un algorithme basé sur la construction itérative d'images. Cet algorithme visite aléatoirement chaque région (groupe de pixels) de l'image et calcule la probabilité conditionnelle locale (probabilité d'appartenance) d'une région à une classe un très grand nombre de fois (Sigelle *et al.*, 1999). Il en résulte une distribution des probabilités conditionnelles pour chacune des régions et le numéro de classe ayant la plus haute probabilité lui est alors assigné.

Croissance de régions (Étape 4)

Dernière étape du processus itératif, la croissance de régions vise à fusionner les régions adjacentes ayant la même étiquette et répondant à un critère de fusion précis défini par Qin et Clausi (2010). Cette étape réduit le nombre de régions à traiter lors de la prochaine itération de l'étiquetage Gibbs et du même coup réduit considérablement le temps de traitement. Ce processus itératif entre les étapes 3 et 4 est répété jusqu'à ce que le nombre d'itérations soit atteint. C'est la fin de la segmentation.

3.3.2 Étiquetage sémantique des régions

L'étiquetage des régions obtenues par segmentation de l'image radar est basé sur les trois critères suivants : 1) aspect des régions, 2) morphologie des régions et 3) cartographie antérieure. L'aspect et la morphologie sont utilisés pour définir l'étiquette sémantique des régions en fonction d'informations contenues dans la littérature scientifique (Barber *et al.*, 2001, Meteorological Service of Canada, 1990, P. Yu, 2009). Les étiquettes sont attribuées suite à une analyse de la teinte, de la texture ainsi que de la forme des glaces en superposant la segmentation à l'image radar.

Aspect des régions

L'aspect d'une région sur une image radar est affecté par l'interaction du signal avec la glace. Tel que discuté à la section 2.3, la salinité et la rugosité de la surface affectent le signal retourné au capteur. Ces deux paramètres sont différents pour chacun des types de glaces, ce qui permet de discerner les types de glace observés sur l'image radar. Le tableau 4 décrit l'aspect des différents types de glace.

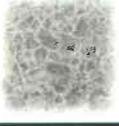
Morphologie des régions

La morphologie d'une région peut s'avérer un excellent indice pour l'identification du type de glace. En fonction du milieu de croissance de la glace et des pressions induites par les mouvements des floes, la morphologie des différents types de glace diffère. Le tableau 4 décrit aussi la morphologie des différents types de glace.

Cartographie antérieure

Dans les cas où l'identification avec l'aspect et la morphologie s'avère ardue, l'utilisation des cartes précédentes est un atout important car cet outil nous permet d'induire le type de glace présent.

Tableau 4 : Aspects, morphologies et apparences sur les images radar des différents types de glace.

Type de glace	Aspect	Morphologie	Apparence sur l'image radar (HH)
Nouvelle glace	Clair	Non-consolidé, Trainées	
Nilas	+ Sombre/+ Clair	Consolidé, Plaques, Affecté par les vagues	
Glace grise	Clair	Consolidé, Floe irrégulier	
Glace blanchâtre	Sombre	Consolidé, Floe ± arrondi	
Glace de première année	+Clair	Consolidé, Floe arrondi	
Glace pluriannuelle	+ Clair	Consolidé, Floe + arrondi	
Sarrasins	+ Clair	Parfois compactée entre des floes ou à la dérive	

3.3.3 Validations comparatives

Deux méthodes de validation (Figure 19) ont été utilisées pour s'assurer de la qualité des classifications produites à partir des images haute résolution (Objectif 1). La première méthode permet de valider la précision de la segmentation et de l'étiquetage dans les conditions d'englacement et de fonte. Les photographies aériennes prises à Umiujaq, le 25/01/2011, et Quaqaq, le 27/05/2010, sont interprétées et comparées avec les cartes de glaces produites à ces mêmes dates. C'est une comparaison ponctuelle (2 dates de survols) mais spatiale.

La seconde méthode vise à comparer les concentrations extraites des cartes et calculées pour la zone tampon de 100m, avec une estimation de la concentration faite à partir des photographies des caméras fixes à proximité des infrastructures maritimes. C'est une validation temporelle car près d'une quarantaine de cartes ont été réalisées dans différentes conditions climatiques.

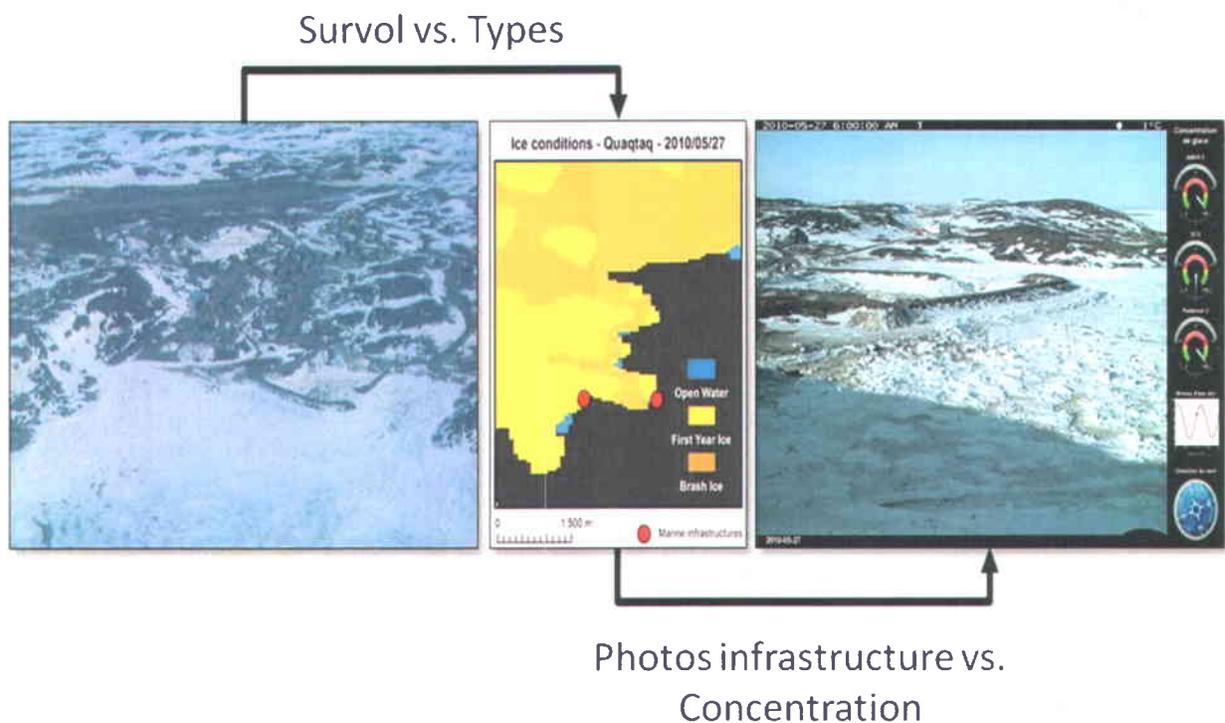


Figure 19 : Procédure de validation des cartes avec les photos aériennes et avec les photos au sol.

3.3.4 Positionnement spatial des cartes de glace

Les deux étapes du positionnement spatial des cartes de glaces sont présentées dans le schéma ci-dessous (Figure 20) :

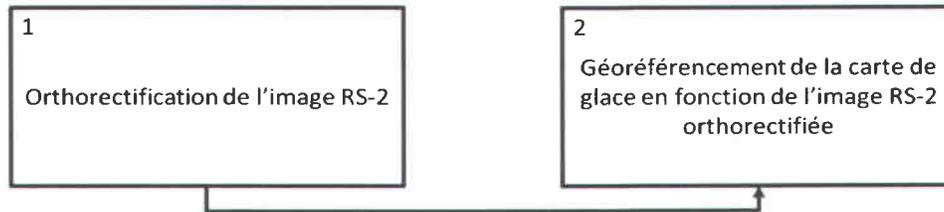


Figure 20 : Étapes du positionnement spatial des cartes de glace.

Orthorectification de l'image RS-2

Cette étape vise à corriger le positionnement spatial de l'image radar en prenant en compte le relief et les paramètres de visée du capteur. Ces informations, contenues dans l'entête du fichier de l'image, permettent à l'algorithme d'effectuer ces corrections. L'algorithme utilisé pour orthorectifier l'image RS-2 est l'algorithme de Toutin (Toutin *et al.*, 2009) qui a comme avantage de ne pas nécessiter d'entrées manuelles (Points de contrôle), car le tout est automatisé. Cette étape est réalisée avec PCI Geomatica ©.

Géoréférencement de la carte de glace en fonction de l'image RS-2 orthorectifiée

Pour réaliser cette étape, la carte de glace ainsi que l'orthoimage sont ouvertes dans le logiciel ArcGIS© et des points de contrôle correspondants sont relevés afin de créer des correspondances. Lorsqu'un nombre suffisant de points (~ 8 points), bien répartis spatialement, sont relevés, une correction polynomiale est appliquée à la carte de glace pour l'ajuster à l'orthoimage.

3.3.5 Extraction de statistiques de concentration

Les statistiques de concentration ont été extraites (objectif 2) grâce à une chaîne de commandes programmée dans l'outil « modeler » d'ArcGIS et en langage Python. Voici un schéma qui présente les différentes étapes de la chaîne de commande (Figure 21).

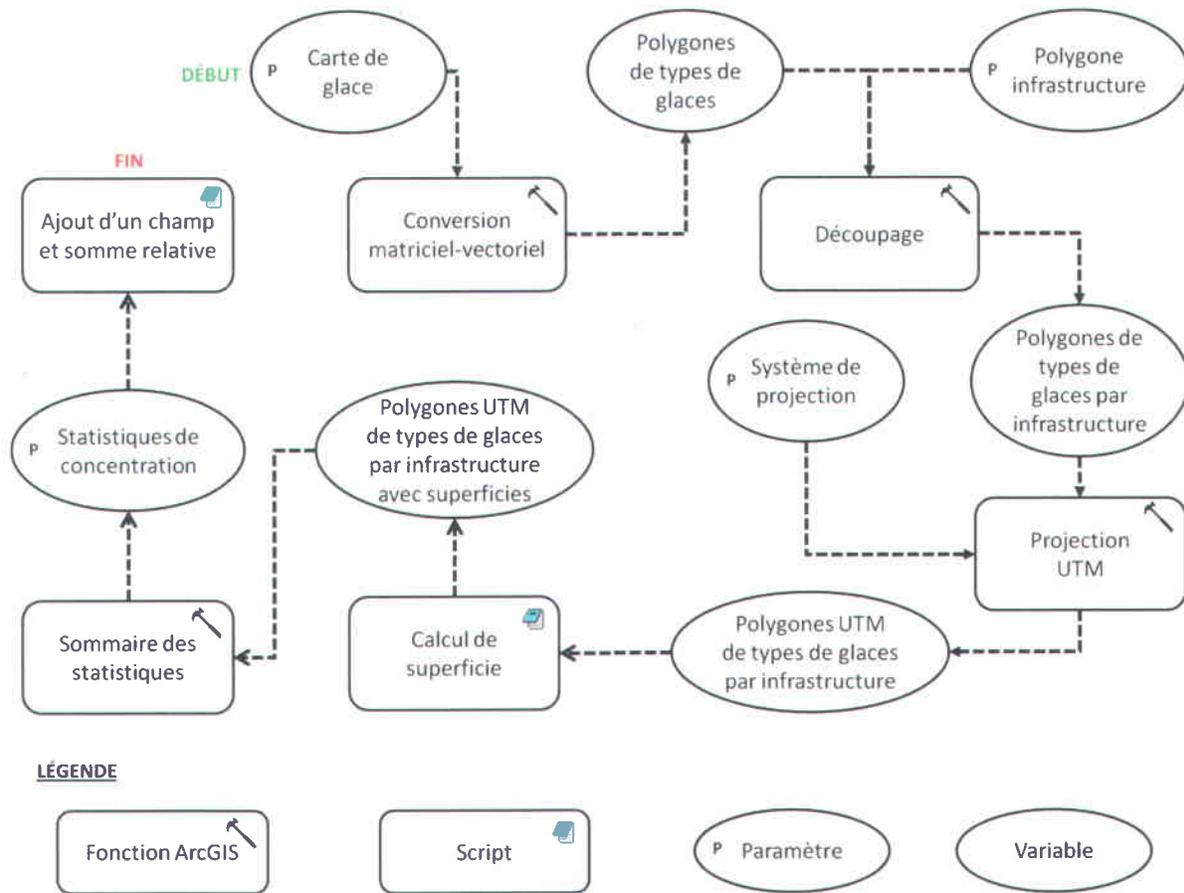


Figure 21 : Procédure ArcGIS d'extraction des statistiques de concentration.

3.3.6 Comparaison inter-échelle

Les trois étapes de la comparaison inter-échelle entre les données locales et les données régionales sont présentées dans le schéma ci-dessous (Figure 22) :

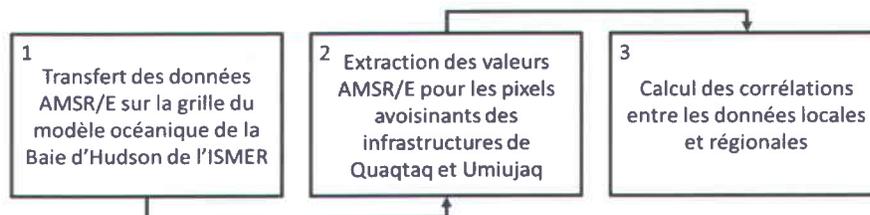


Figure 22 : Étapes de la comparaison inter-échelle.

Transfert des données AMSR/E sur la grille du modèle océanique de la Baie d'Hudson de l'ISMER

Les données micro-ondes passives, d'une résolution spatiale de 12,5 km, sont transférées sur la grille du modèle océanique de la Baie d'Hudson de l'ISMER, d'une résolution spatiale de 10 km. (Figure 23) (Saucier *et al.*, 2004). Les données sont transférées sur ce modèle car les chercheurs de l'ISMER souhaitent les utiliser pour valider les sorties du modèle de glace. La mise à l'échelle est faite par une prise en compte de l'occupation spatiale des pixels AMSR/E dans les pixels de la grille ISMER.

Grille ISMER superposée aux données régionales de glace

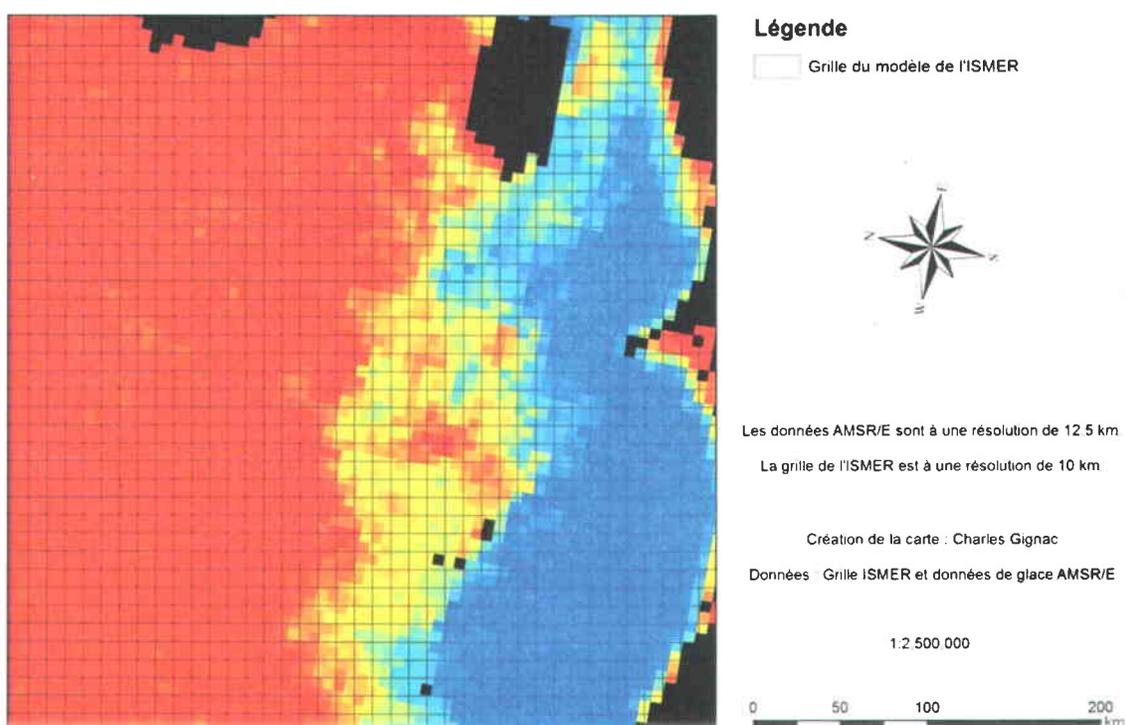


Figure 23 : Superposition de la grille du modèle océanique de la baie d'Hudson de l'ISMER et des données micro-ondes passives de concentration de glace régionales du NSIDC (Bleu = Faible concentration, Rouge = Forte concentration).

Extraction des valeurs AMSR/E pour les pixels avoisinants des infrastructures de Quaqaq et Umiujaq

Les valeurs de concentrations mises à l'échelle sont extraites pour les pixels voisins des infrastructures qui sont inclus dans les zones tampons de 1 et 10 km afin de pouvoir procéder aux comparaisons inter-échelles. Les mailles de la grille ISMER utilisées pour les communautés de Quaqaq et Umiujaq sont respectivement présentées dans les figures 24 et 25.

Mailles utilisées pour le comparatif RS2 & AMSR/E
Communauté de Quaqtaq

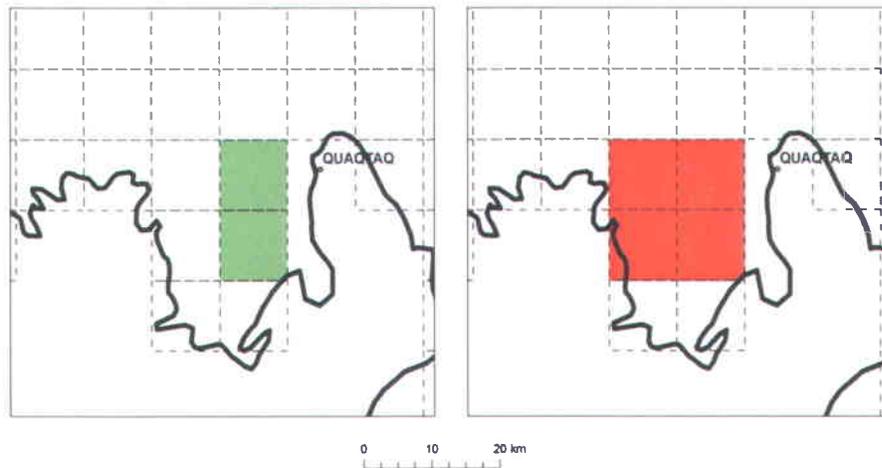


Figure 24 : Mailles du modèle ISMER sélectionnées pour la comparaison régionale/locale à Quaqtaq. En vert, 2 mailles AMSR/E et en rouge 4 mailles AMSR/E.

Mailles utilisées pour le comparatif RS2 & AMSR/E
Communauté d'Umiujaq

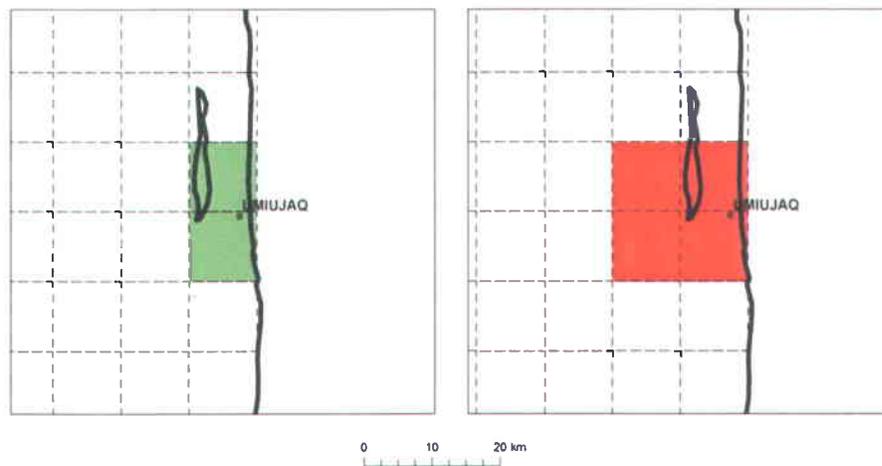


Figure 25 : Mailles du modèle ISMER sélectionnées pour la comparaison régionale/locale à Umiujaq. En vert, 2 mailles AMSR/E et en rouge 4 mailles AMSR/E.

Calcul des corrélations entre les données locales et régionales

Les corrélations sont établies dans le logiciel Microsoft Excel © à partir de la moyenne des valeurs de concentration des jeux de mailles du modèle ISMER contenant les données du NSIDC et les données locales des zones tampons de 1 et 10 km. Les moyennes sont nommées NSIDC2 pour les groupes de 2 mailles (en vert dans les figures 24-25) et NSIDC4 pour les groupes de 4 mailles (en rouge dans les figures 24-25).



4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La section suivante présente les résultats obtenus suite à l'application des méthodes décrites dans le chapitre 3. Des éléments d'analyse et de discussion sont également présentés.

4.1 Cartes des conditions de glace

Le produit final de la classification est la carte de glace. Les cartes présentées (Figures 26, 27, 29, 31 et 33) font partie d'une collection d'un peu plus de soixante cartes, toutes réalisées à partir de l'approche décrite à la section 3.3. Ces cartes ont été produites en fonction de la nomenclature officielle utilisée au SCG et la mise en page des cartes est une adaptation de la mise en page utilisée par le SCG pour la cartographie régionale des glaces.

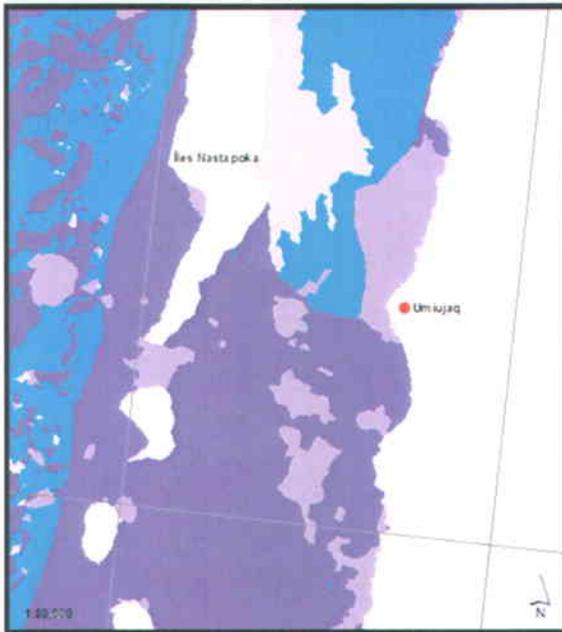
Les couvertures spatiales avec les images RADARSAT-2 en mode fin et Ultra-Fin (Figures 28, 30, 32 et 34) sont différentes (Figure 26). Avec les images en mode fin, à Quařtaq, la baie Diana est entièrement couverte et à Umiujaq, la couverture plus large permet d'identifier les glaces au large des îles Nastapoka. En mode Ultra-Fin, à Quařtaq, la couverture permet de couvrir approximativement la moitié de la baie Diana et à Umiujaq, la section couverte se rend uniquement jusqu'à l'archipel des îles Nastapoka.

Au niveau des résolutions, les cartes produites avec le mode fin (8m) permettent d'avoir une vue plus globale sur le territoire mais ne fournissent pas un niveau de détails aussi précis qu'avec une image en mode Ultra-Fin (3m) (Figures 26, 31 et 33). En mode fin (Figures 26, 27 et 29) il devient possible d'identifier plus clairement les frontières entre les floes et d'identifier de manière plus claire (moins saccadée) la limite de la banquise. Au niveau cartographique, le rendu en mode fin est plus esthétique mais rends moins bien compte de la forme réelle des floes. D'un point de vue stratégique, pour la cartographie des glaces au voisinage des infrastructures, le mode Ultra-Fin est donc mieux adapté. Pour une cartographie des conditions locales, de l'environnement englobant les infrastructures, le mode fin est de mise. Il y a donc des avantages et des faiblesses aux deux modes pour la cartographie de la glace.

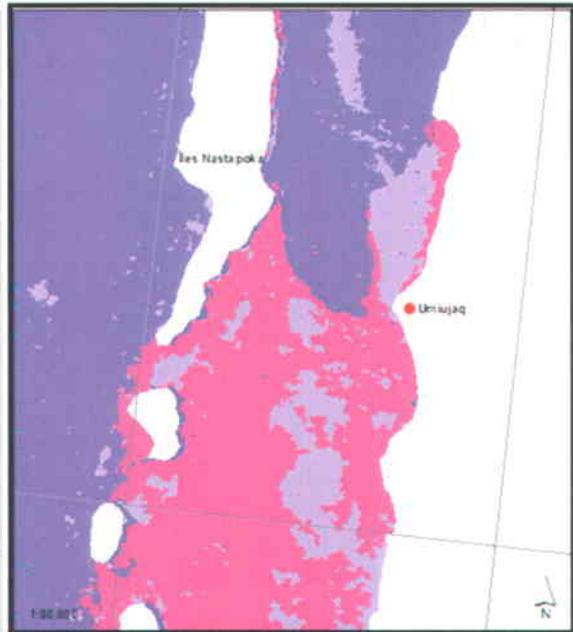
Ces cartes de glace, créées à partir d'imagerie acquise avec une fréquence de 3-4 jours, permettent de suivre les conditions de glace. La carte d'englacement du 25 janvier 2011 à Umiujaq (Figure 27) montre bien l'importance qu'a le chapelet d'îles face à Umiujaq dans le processus de consolidation du couvert. Les îles Nastapoka agissent comme une protection

contre les glaces en mouvement provenant du large. On observe des ouvertures (en bleu) dans le couvert au large des îles tandis que les glaces protégées sont restées intactes. La carte de fonte du 27 mai 2010 à Quaqtq (Figure 29) montre bien les dynamiques océaniques différentes entre le détroit d'Hudson (sarrasins et eau libre) et la Baie Diana (glace de première année), où le couvert reste bien stable et fixe. Le couvert stable dans la Baie Diana s'étend généralement sur toute la baie et se rend jusqu'à la hauteur de l'Île Hearn, en face de Quaqtq. La carte d'englacement du 17 décembre 2009 de Quaqtq (Figure 31) montre que la Baie Diana, durant la période d'englacement, est affectée par le transport des glaces provenant du Détroit d'Hudson. La glace dans la Baie se forme d'abord au fond de la baie, le long des côtes dans les eaux plus calmes et croît jusqu'à se rendre à la hauteur de l'île Hearn, au nord-ouest de Quaqtq. La carte de fonte du 2 mai 2010 à Umiujaq (Figure 33) montre l'exemple d'une situation où il y a reformation de glace (nilas) durant une saison de fonte. Également, on peut observer sur cette carte que les dernières glaces à décrocher ou à fondre sont les glaces fixées à la côte (glace de première année).

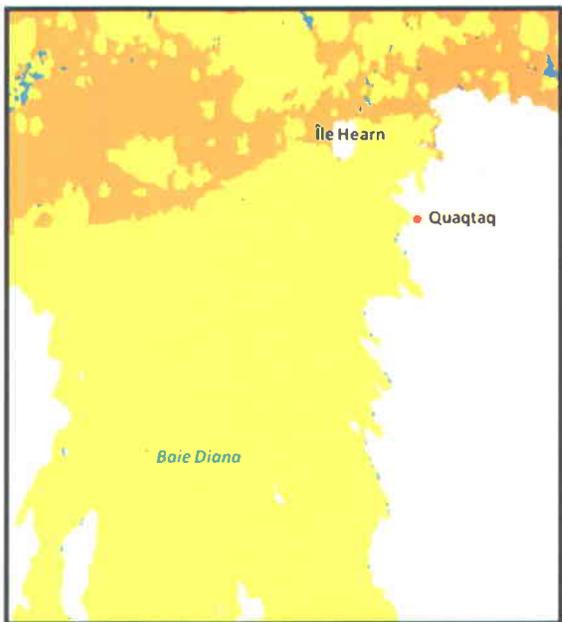
Mode fin : 18 janvier 2011



Mode ultra-fin : 21 janvier 2011



Mode fin : 27 mai 2010



Mode ultra-fin : 30 mai 2010

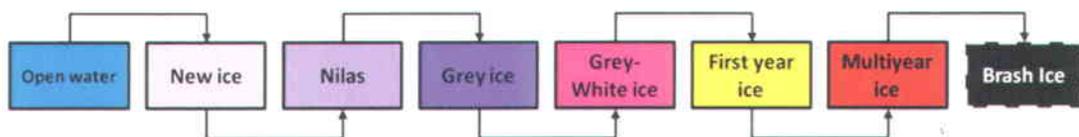


Figure 26 : Comparatif des résultats à l'englacement (Umiujaq) et à la fonte (Quaqtaq) en fonction des deux modes d'acquisition RADARSAT-2 (Fin (8m) et Ultra-Fin (3m)).

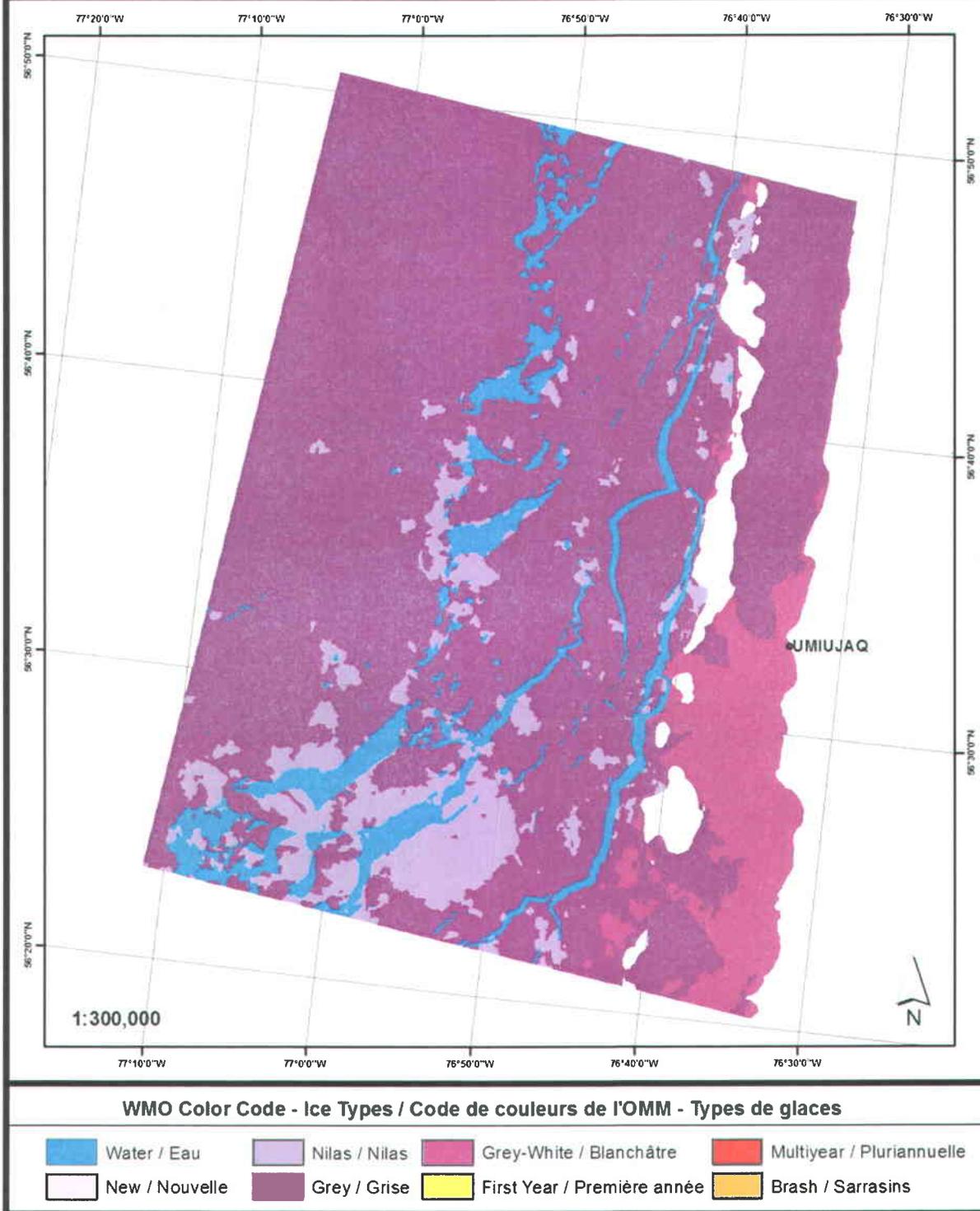


Figure 27 : Carte des conditions de glace d'Umiujaq le 25 janvier 2011 (Englacement), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Fin (20km²).

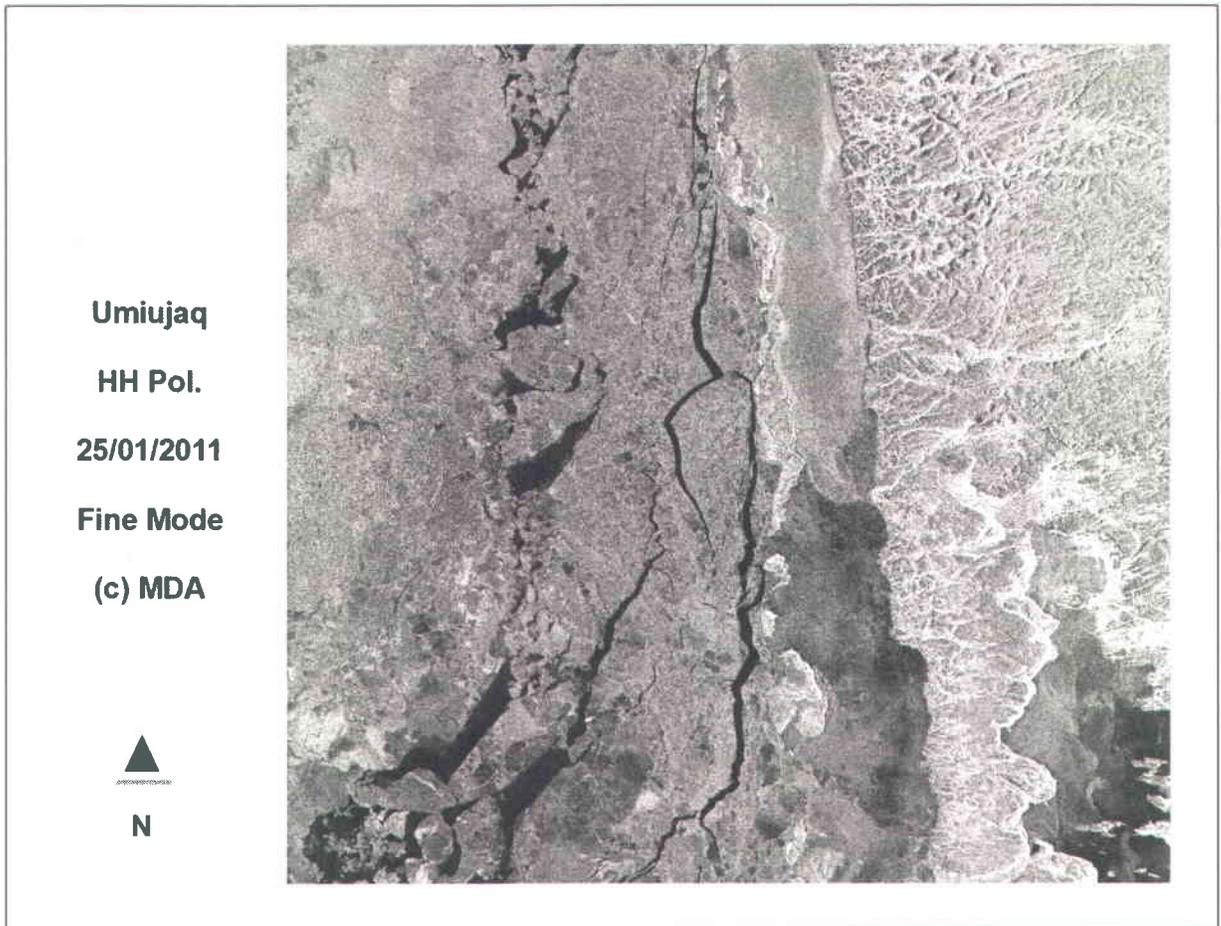


Figure 28 : Image originale du 25 janvier 2011 en mode fin, polarisation HH.

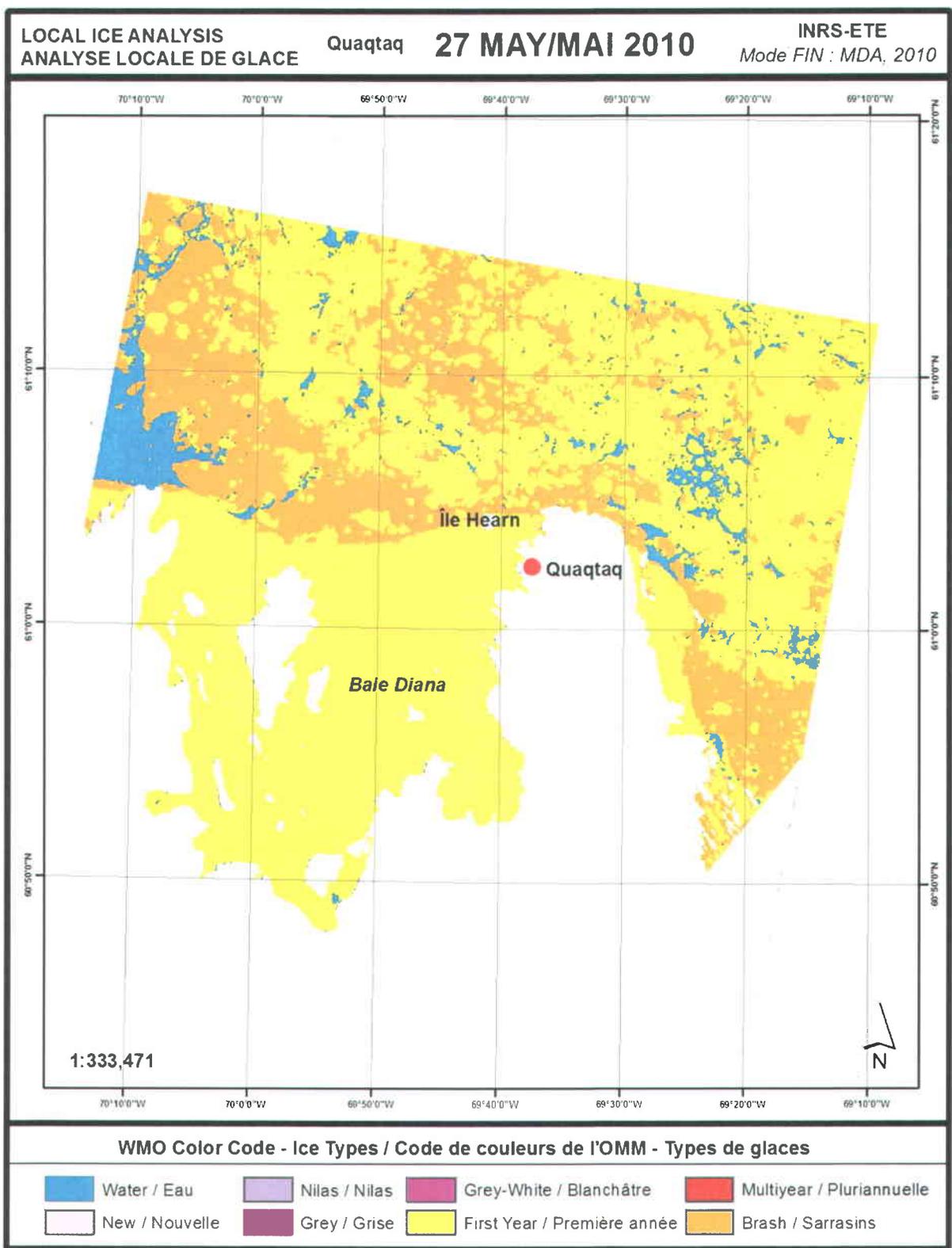


Figure 29 : Carte des conditions de glace de Quaqtaq le 27 mai 2010 (Fonte), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode fin (50km²).

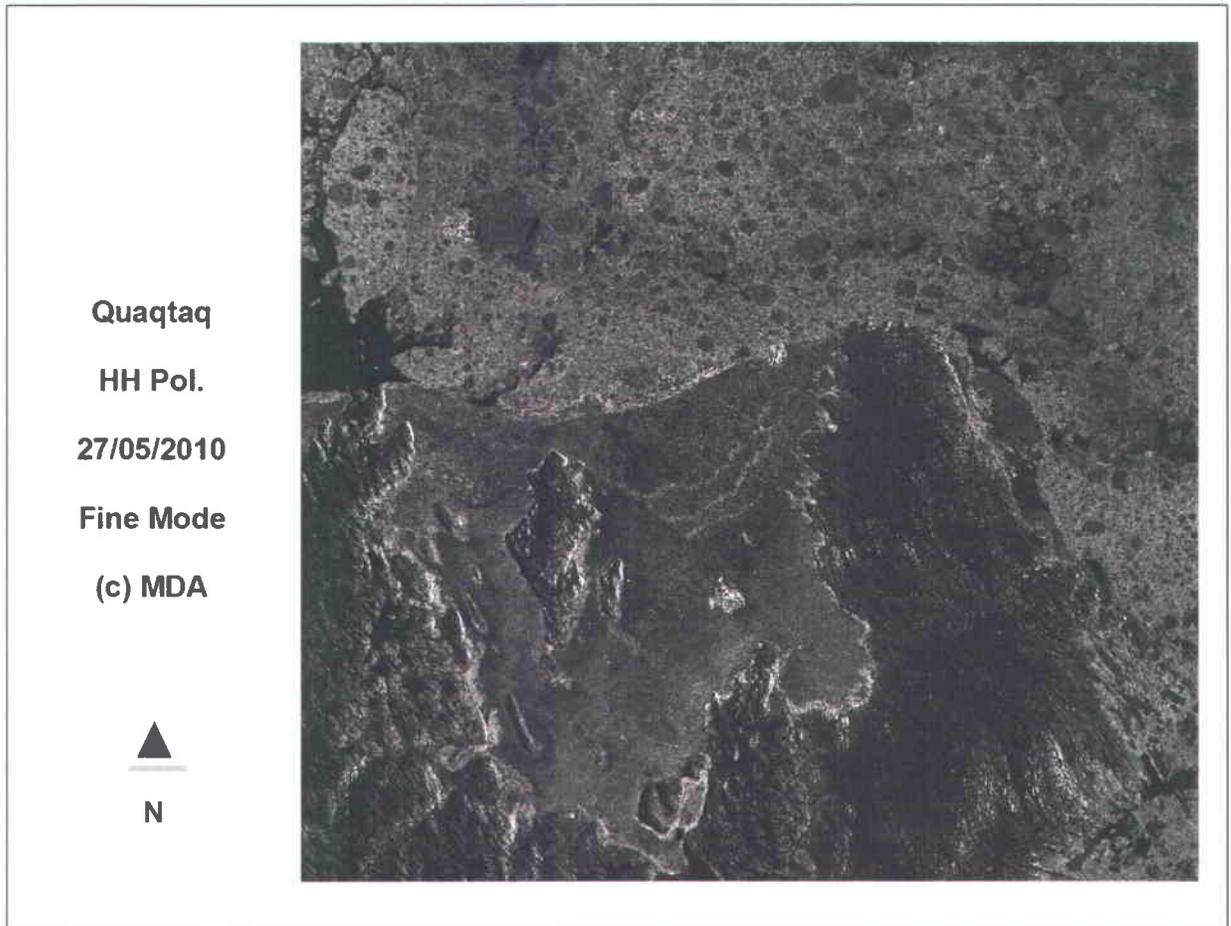


Figure 30 : Image originale du 27 mai 2010 en mode fin, polarisation HH.

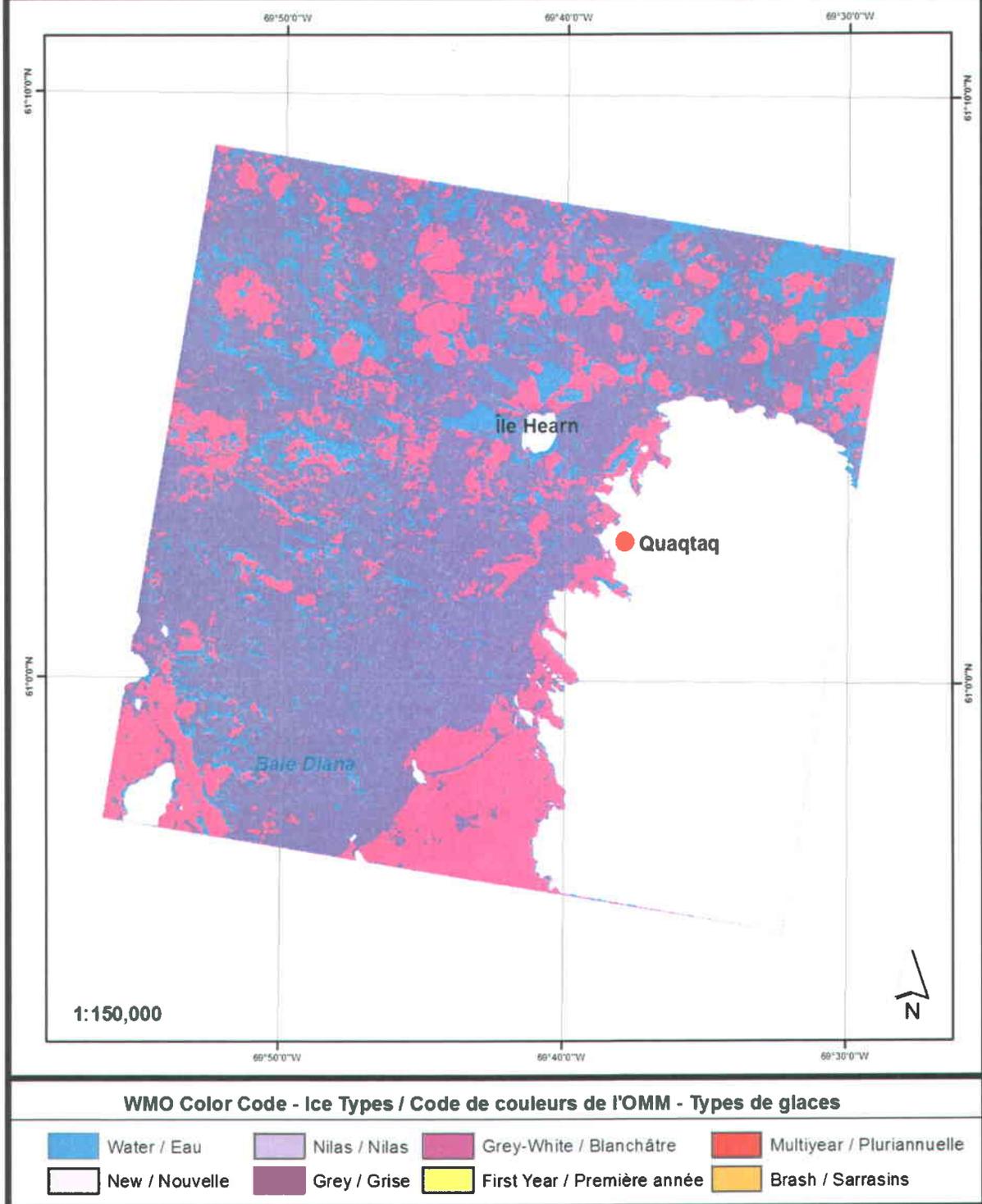


Figure 31 : Carte des conditions de glace de Quaqtaq le 17 décembre 2009 (Englacement), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin (20km²).

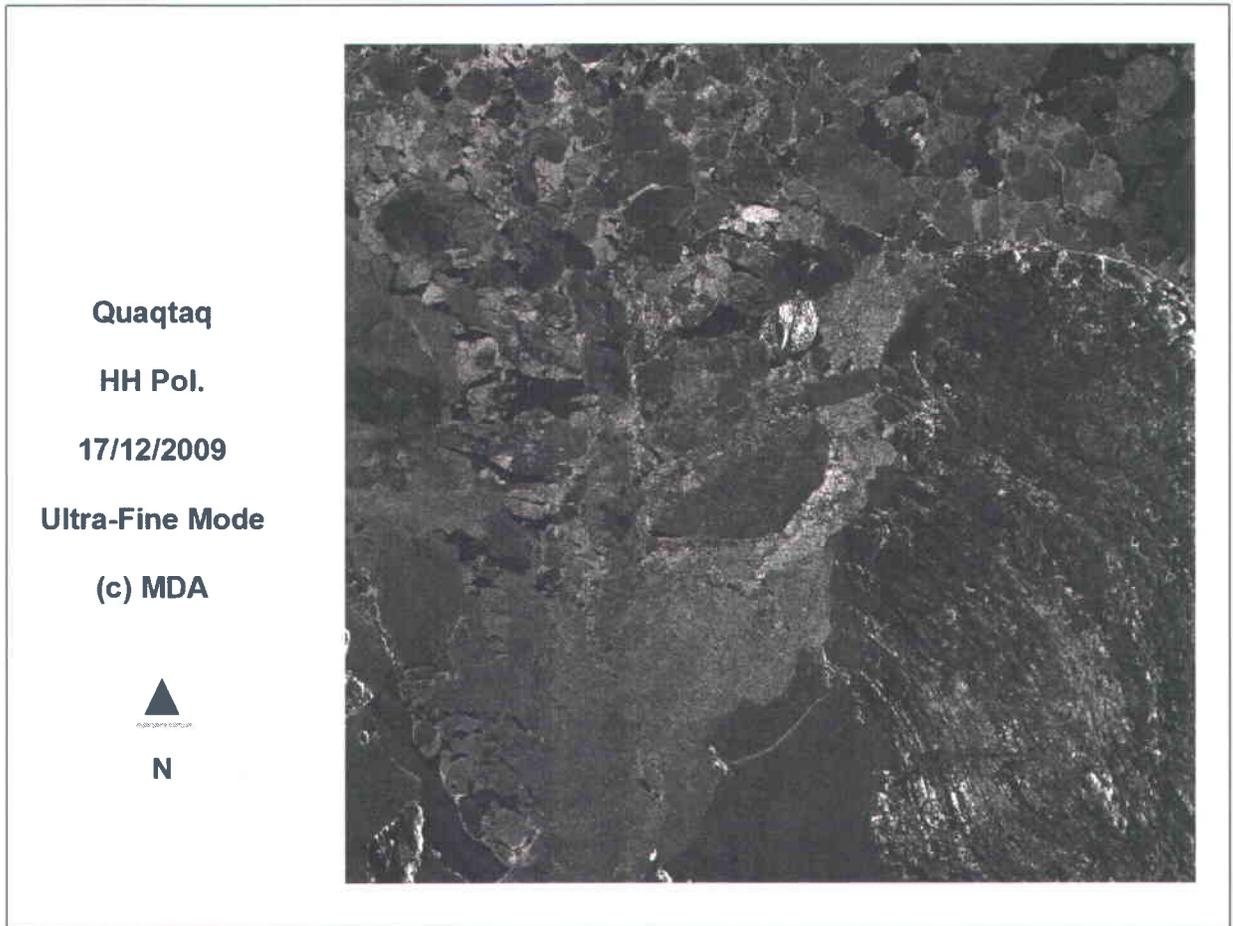


Figure 32 : Image originale du 17 décembre 2009 en mode ultra-fin, polarisation HH.

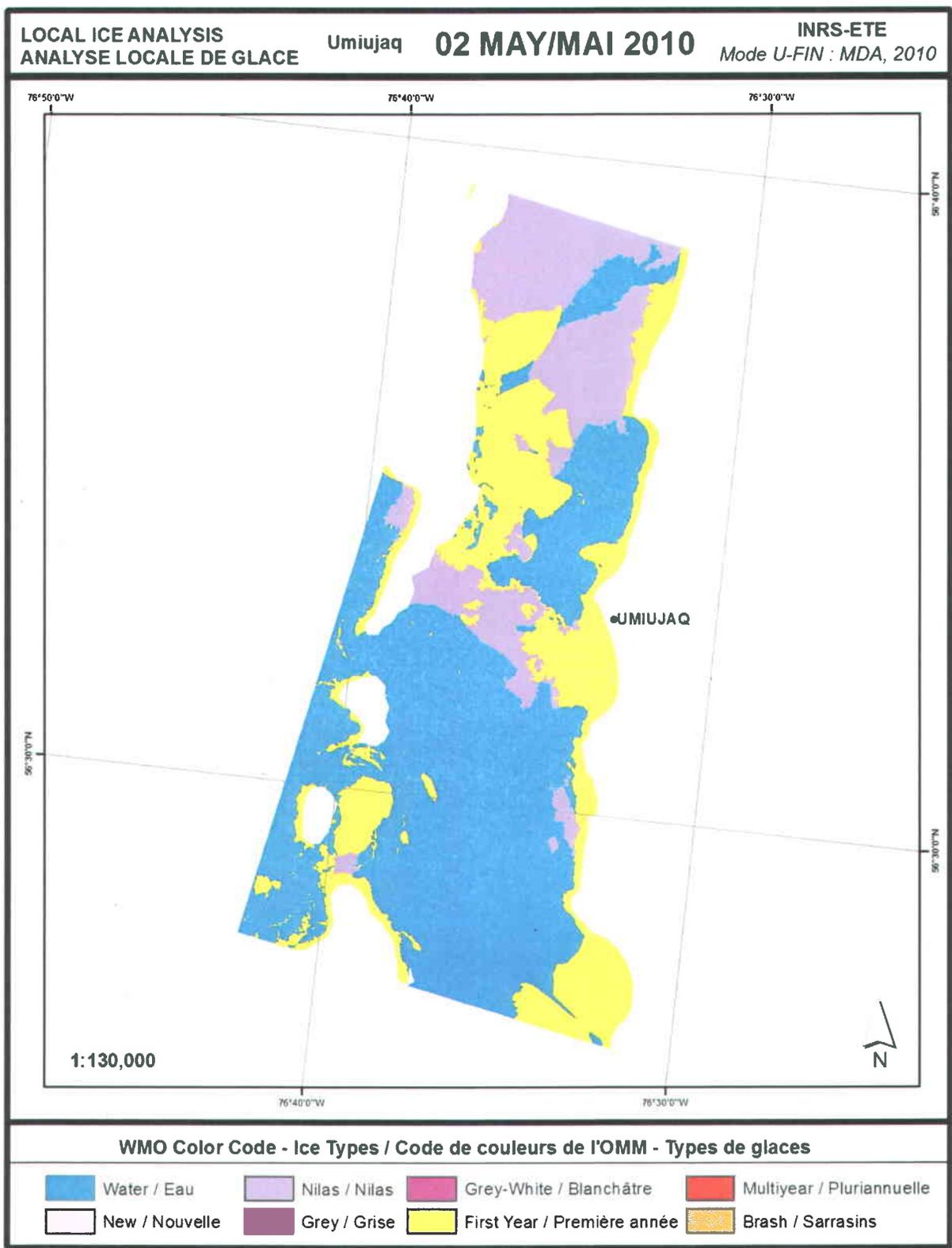


Figure 33 : Carte des conditions de glace d'Umiujaq le 2 mai 2010 (Fonte), tirée d'une image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin (50km²).

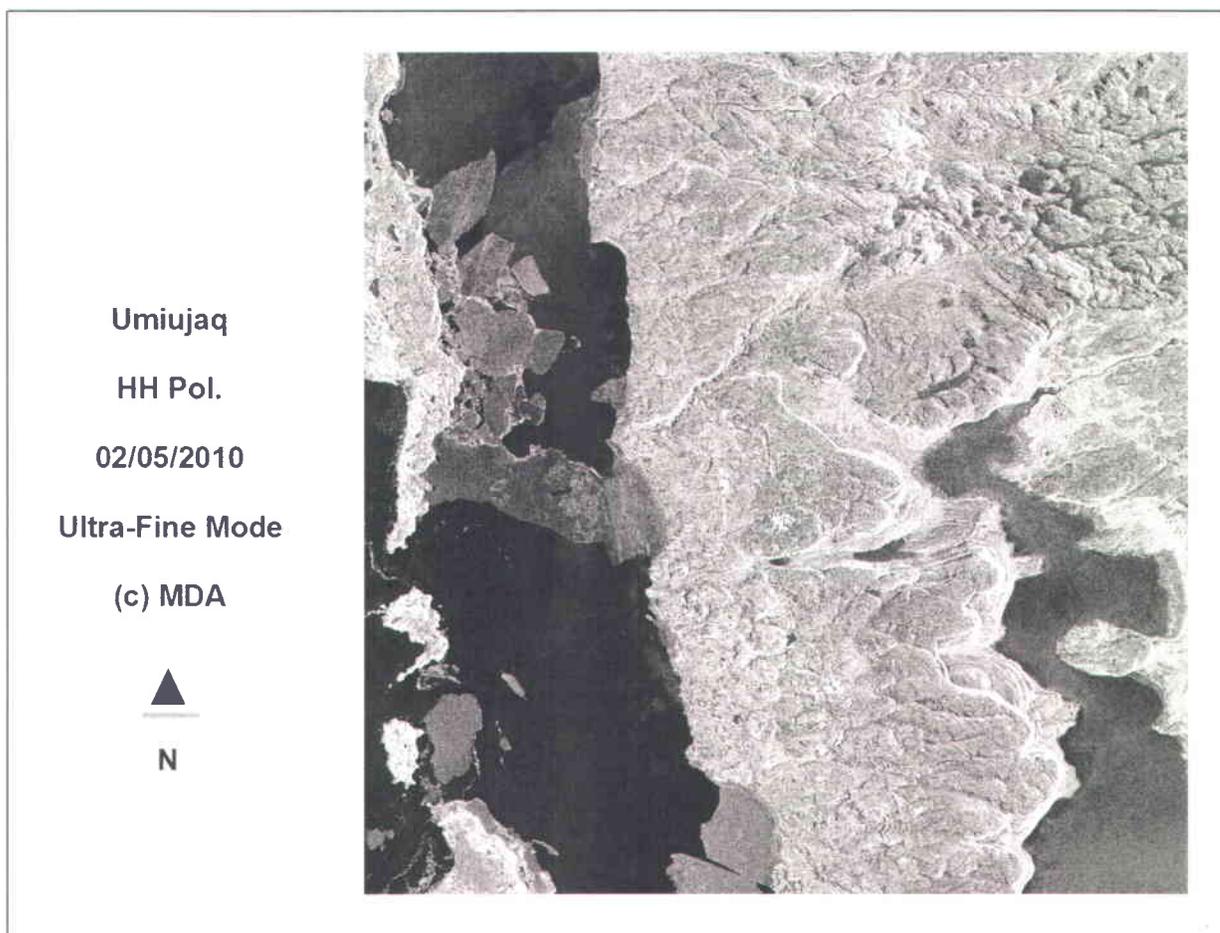


Figure 34 : Image originale du 2 mai 2010 en mode ultra-fin, polarisation HH.

4.2 Validation de la cartographie

Cette section présente 1) les validations des extractions de concentration de glace, avec la méthode basée sur les photographies au sol et 2) la validation des étiquettes (nombre de types de glace), basée sur les photographies aériennes.

4.2.1 Photographies au sol – Précision des concentrations

Sur les 37 cartes disponibles, 31 présentaient de la glace et la photo qui leur était associée offrait une bonne visibilité. Dans 73% des cas, les concentrations observables à partir des

résultats cartographiques sont en accord avec les concentrations observées avec les photographies prises au sol grâce aux caméras (Tableau 5). Dans les autres cas, on constate une surestimation de la concentration de glace causée par le dégagement de l'estran et le décalage causé par l'impossibilité d'effectuer une correction géométrique sur l'image radar. En absence de glace dans le tampon 100m la donnée n'était pas prise en compte. L'option N/A est utilisée lorsqu'une carte a été produite mais que les photos au sol n'étaient pas utilisables parce qu'embuées, par exemple.

Tableau 5 : Comparaison entre les concentrations observées sur les photographies au sol dans la zone tampon 100m et les valeurs de concentration obtenues dans les cartes de glace pour la même zone tampon.

Saison	Concordance	Sous-estime	Surestime	N/A	Total
Englacement 09-10	5	0	1	5	11
Fonte 10-11	9	0	4	0	13
Englacement 10-11	5	0	2	0	7

**Les données de la fonte 09-10 ne sont pas présentées car les caméras n'étaient pas encore installées à ce moment.

En fait, lorsque la marée est basse, l'estran a une rétrodiffusion très élevée comparativement à la mer étant donné la signature particulière d'un sol gorgé d'eau (Figure 35). Donc en conditions de faible concentration (couvert non stable) et en marée basse, il est probable que la carte soit erronée. Ce problème est donc un obstacle à une automatisation du processus de cartographie car il nécessite des corrections manuelles.

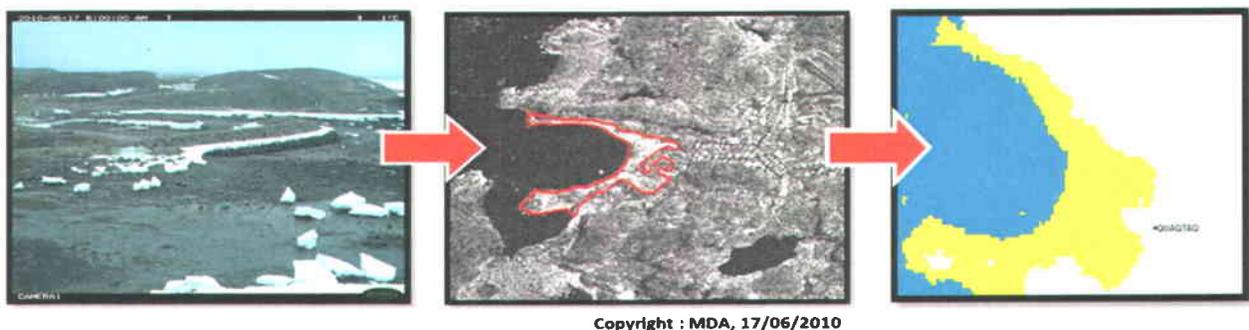


Figure 35 : Illustration de l'effet de la marée basse sur l'image radar et sur la carte résultante. La plage rocailleuse et mouillée près des infrastructures maritimes semble de la glace (forte rétrodiffusion).

4.2.2 Photographies aériennes – Précision des étiquettes de types de glace

La comparaison entre les cartes de glace et les photographies aériennes prises les 27/05/2010 à Quaqtq et 25/01/2011 à Umiujaq montrent que la précision des classifications est plus grande lors de la fonte, car les types de glace en présence sont moins variés.

Dans 94% des cas, les types de glace observés sur les cartes de glaces de Quaqtq correspondent aux types de glace en présence sur les 66 photographies aériennes prises le même jour que l'acquisition de l'image (Tableau 6). La comparaison est faite sur le nombre de types de glace observés dans la photographie versus le nombre de types de glace observés sur la carte dans le secteur couvert par la photo. Les erreurs causées par la marée étant corrigées manuellement, la principale cause d'erreur est le lissage effectué par l'algorithme qui fait que de petites entités, comme par exemple un agglomérat de sarrasins (Figure 36), se trouve englobé par le couvert voisin et n'apparaît pas sur la carte. La résolution spatiale de l'image, en mode fin ou Ultra-Fin, entre également en compte pour expliquer les erreurs.

Tableau 6 : Comparaison entre le nombre de types de glace observés sur les photos et ceux observés sur la carte pour le jeu de photographies de la période de fonte à Quaqtq, le 27/05/2010.

FONTE		Carte	
		1 type	2 types
Photo	1 type	57	2
	2 types	2	3



Figure 36 : Effet de lissage sur la carte de glace causant la disparition de certaines entités de glace.

La précision diminue en période d'englacement, à Umiujaq, où, dans 79% des cas, les types de glace identifiés sur les cartes de glace correspondaient à ceux observés sur les 57 photographies aériennes (Tableau 7). Cette erreur est due au fait qu'il y a une plus grande variabilité en terme de types de glaces et que l'hétérogénéité spatiale est beaucoup plus importante. Également, la taille de certaines entités, comme les failles dans le couvert, est souvent plus petite que la résolution spatiale du pixel, ce qui fait qu'on l'observe sur la photo, mais pas sur la cartographie résultante. Le type le plus difficile à identifier est la nouvelle glace, car la structure physique de ces glaces est irrégulière et l'algorithme a tendance à les englober dans le floe voisin, cette dernière se trouvant généralement entre l'eau libre et la banquise.

Tableau 7 : Comparaison entre le nombre de type de glace observés sur les photos et ceux observés sur la carte pour le jeu de photographies de la période d'englacement à Umiujaq, le 25/01/2011.

ENGLACEMENT		Carte			
		1 type	2 types	3 types	4 types
Photo	1 type	7	3	0	0
	2 types	2	15	0	0
	3 types	1	4	18	1
	4 types	0	0	1	5

Les changements de structure physique, donc de réponse au signal radar, sont beaucoup plus fréquents lorsque la glace est en croissance (Figure 37). Il en résulte une plus grande variabilité spatiale et radiométrique qui rend l'étiquetage plus complexe à l'englacement qu'à la fonte. En période de fonte, les changements dans la rétrodiffusion sont principalement causés par les mares de fonte sur le couvert de glace mais ne signifient pas un changement physique au sein même du couvert.



Figure 37 : Comparatif des processus d'englacement (Umiujaq, janvier 2011) et de fonte (Quaqtaq, mai 2010).

4.3 Dynamique des périodes d'englacement et de fonte au voisinage des infrastructures maritimes

Les cartes de glace sont utilisées pour caractériser la dynamique des périodes d'englacement et de fonte dans le voisinage immédiat (1 km) des infrastructures maritimes de Quaqtaq et Umiujaq. L'évolution de la concentration de glace autour des infrastructures peut être extrêmement rapide comme elle peut être lente et progressive. Plusieurs cas de figure se sont présentés durant la période du projet. Dans tous les cas, il faut prendre en compte que le village d'Umiujaq est à une latitude plus basse ($56^{\circ}30'N$) que le village de Quaqtaq ($61^{\circ}02'N$), ce qui explique en partie pourquoi l'englacement y est plus tardif et la fonte plus précoce. La précision de la caractérisation de cette dynamique est toutefois dépendante de la fréquence d'acquisition des images.

Dans les figures 38 à 49, les triangles jaunes indiquent le début de la période et le carré bleu la complétion de cette dernière.

4.3.1 Période de fonte 2009

Pour Umiujaq, la température est passée pour la première fois au-dessus de zéro (de jour) le 22 mai. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 27 mai, mais il est probable que la fonte ait débutée avant cette date (Figure 38). Une décroissance accélérée de la concentration est observée entre le 4 et le 7 juin. La fonte finale est notée le 7 juin, ce qui étend la période de fonte sur environ 2 semaines (Figure 39).

Pour Quaqtq, la température est passée pour la première fois au-dessus de zéro (de jour) le 22 mai. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 25 juin, mais il est probable que la fonte ait débutée avant cette date (Figure 38). Une décroissance accélérée de la concentration est observée entre le 5 et le 9 juillet. La fonte finale est notée le 19 juillet, ce qui étend la période de fonte sur plus d'un mois (Figure 40).

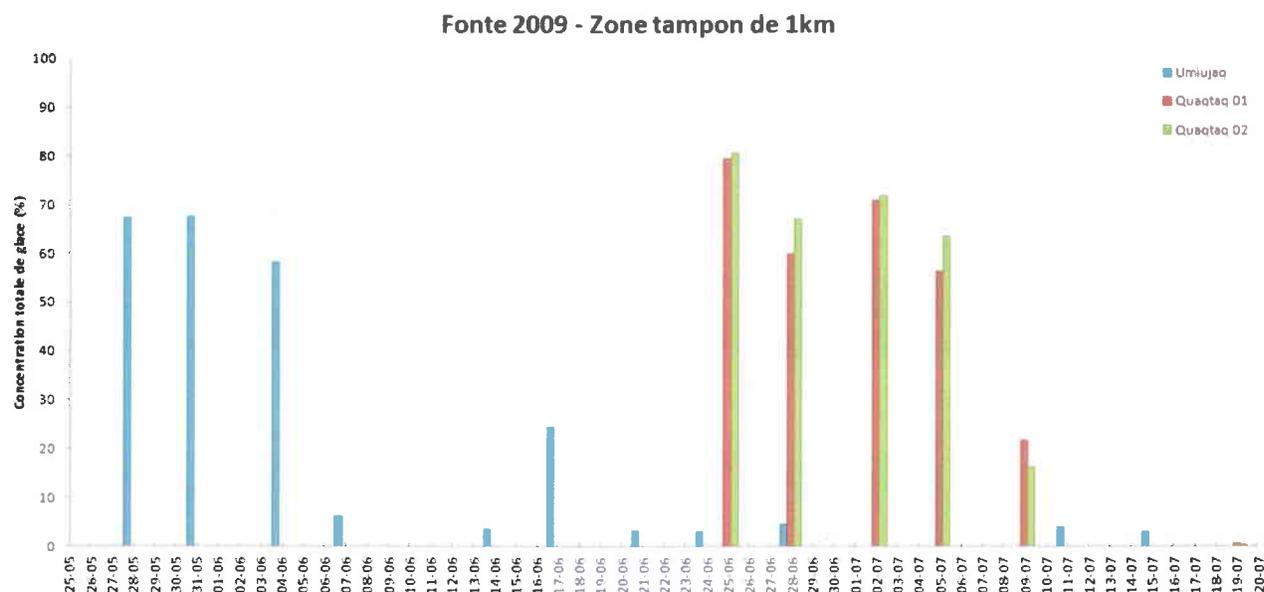


Figure 38 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtq 1 et 2 lors de la période de fonte 2009.

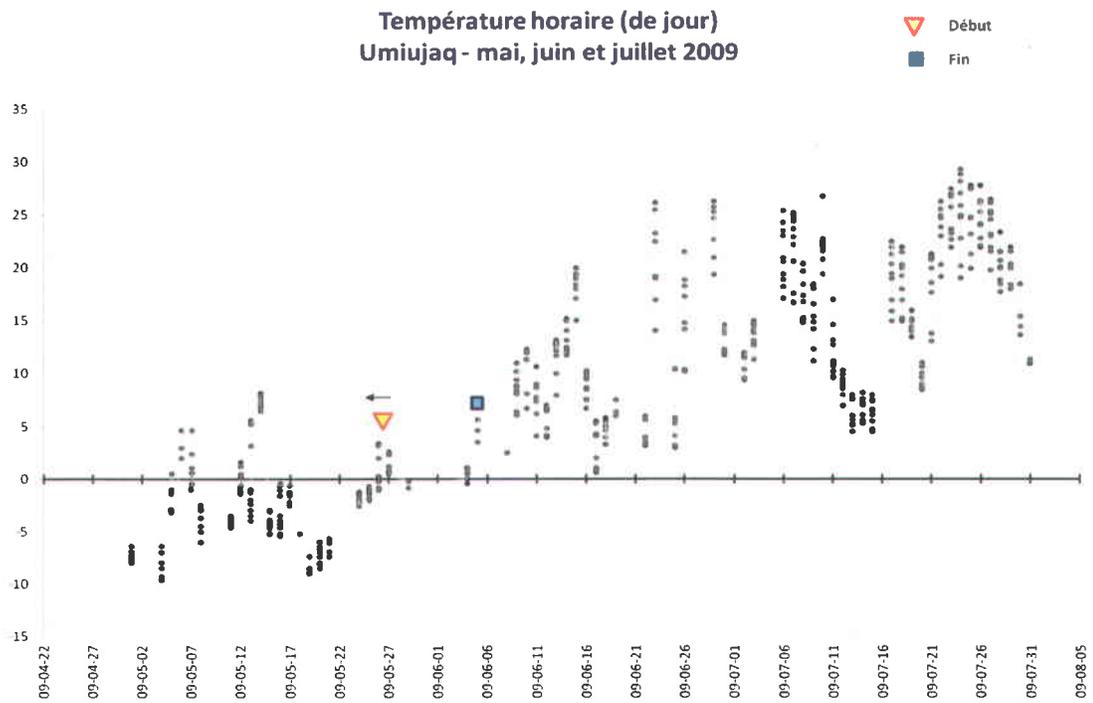


Figure 39 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – mai, juin et juillet 2009.

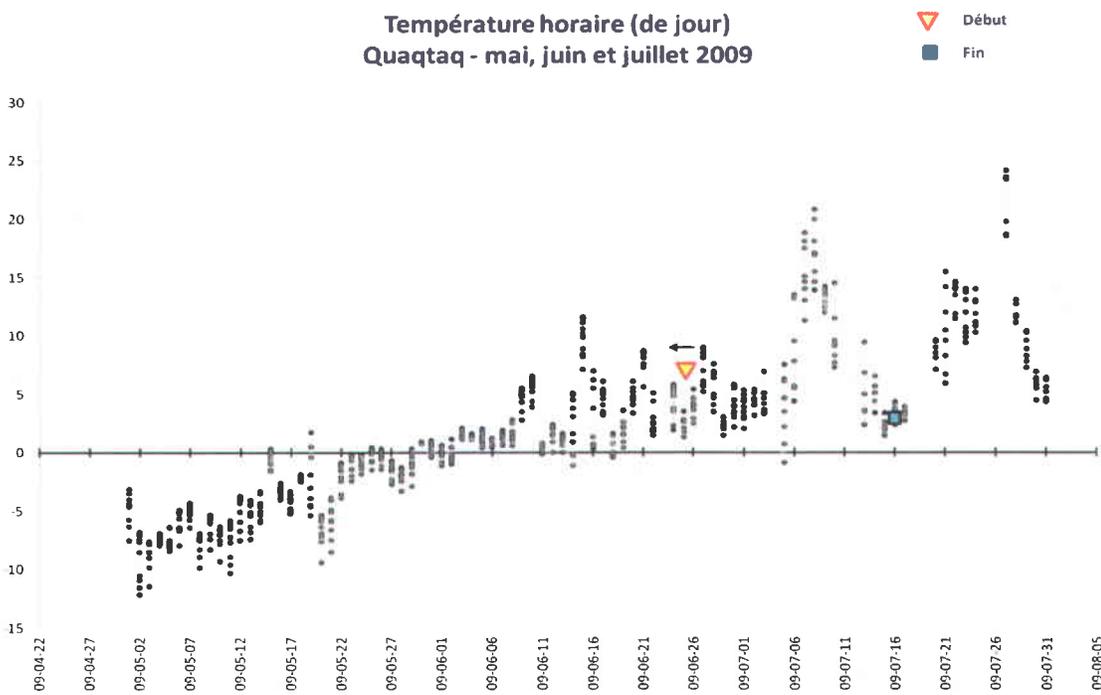


Figure 40 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – mai, juin et juillet 2009.

4.3.2 Période d'englacement 2009

Pour Umiujaq, la température est passée pour la première fois sous zéro (de jour) le 3 novembre. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 23 décembre, mais il est probable que l'englacement ait débuté avant cette date (Figure 41). Il n'est pas possible de déceler une période pour laquelle une accélération du processus est observable, car il n'y a eu que 2 images sur lesquelles des glaces ont été observées. L'englacement final est noté le 9 janvier 2010, ce qui étend la période d'englacement sur 2 semaines (Figure 42).

Pour Quaqtq, la température est passée pour la première fois sous zéro (de jour) le 19 octobre. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 23 novembre, mais il est probable que l'englacement ait débuté avant cette date (Figure 41). Une croissance accélérée de la concentration est observée entre le 3 et le 7 décembre. L'englacement final est noté le 7 décembre, ce qui étend la période d'englacement sur 3 semaines (Figure 43).

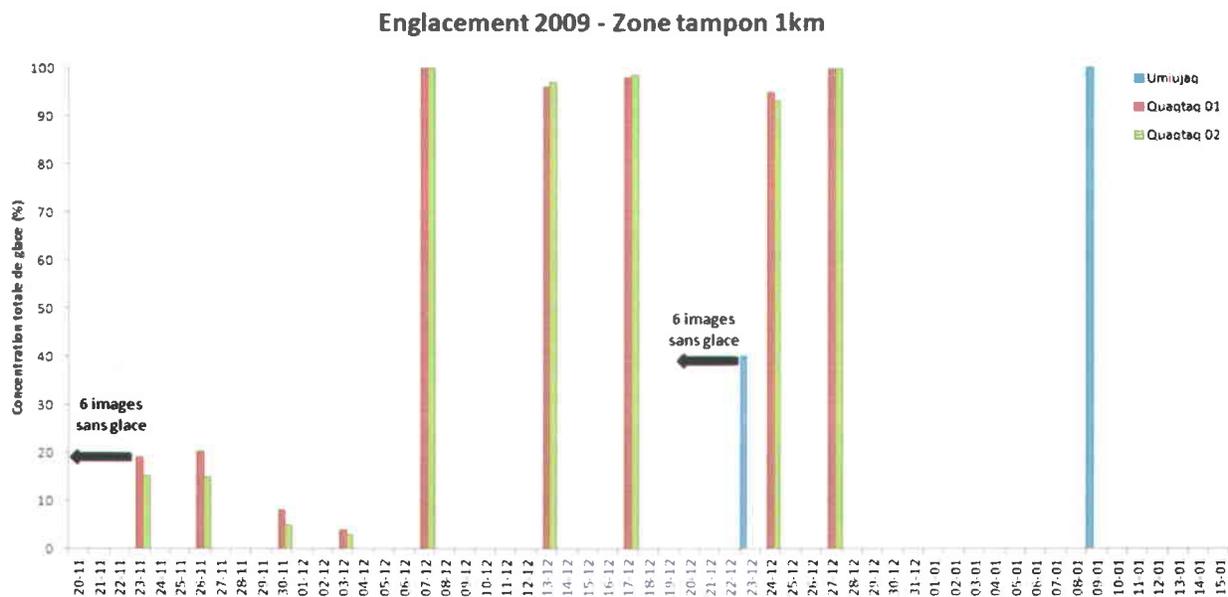


Figure 41 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtq 1 et 2 lors de la période d'englacement 2009.

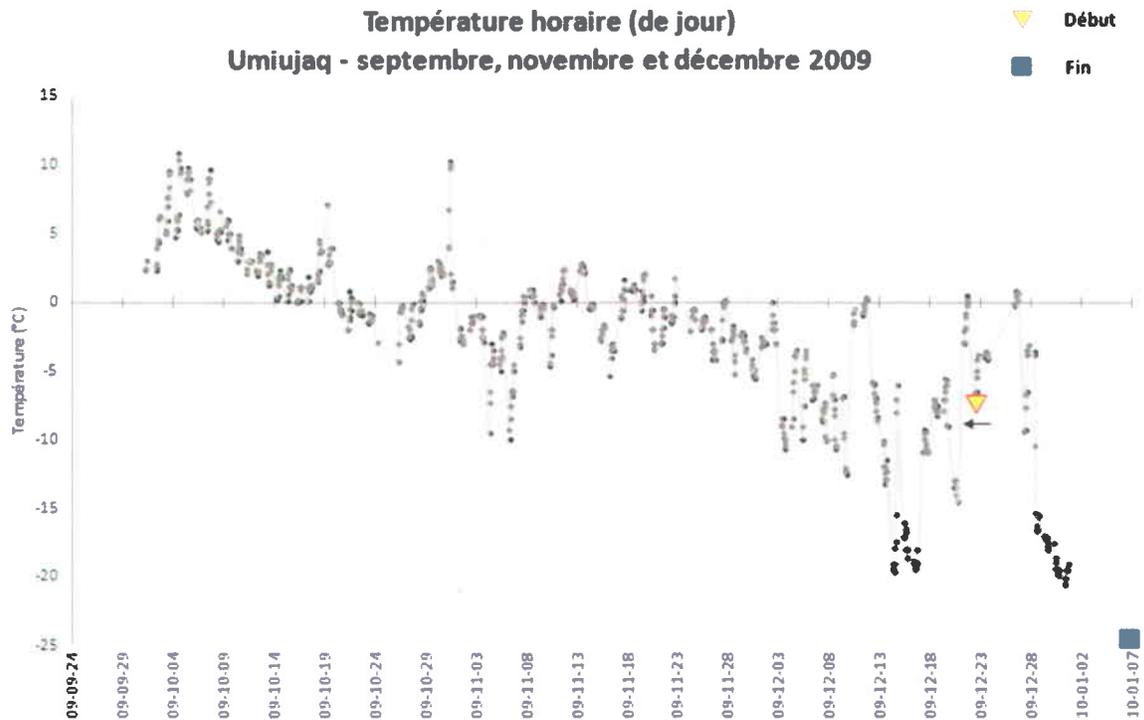


Figure 42 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – novembre et décembre 2009.

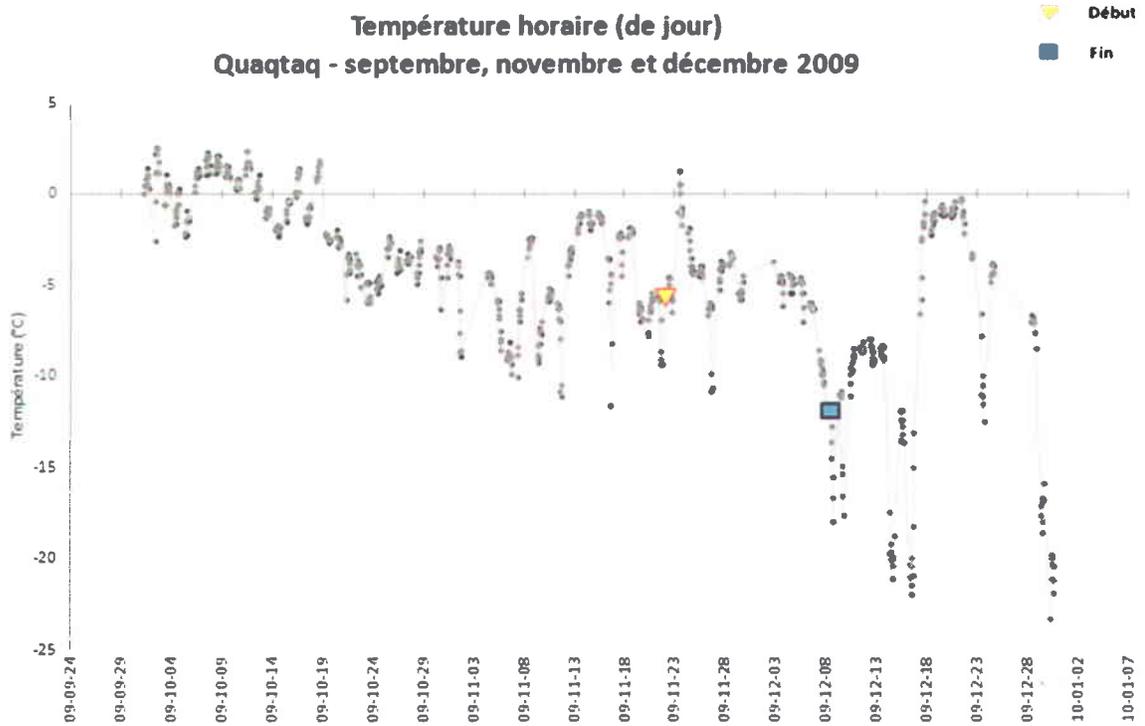


Figure 43 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – novembre et décembre 2009.

4.3.3 Période de fonte 2010

Pour Umiujaq, la température est passée pour la première fois au-dessus de zéro (de jour) le 2 avril. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 2 mai (Figure 44). Une décroissance accélérée de la concentration est observée entre le 2 et le 6 mai, date à laquelle la fonte finale est notée. La période de fonte s'est étendue sur 1 semaine (Figure 45).

Pour Quaqtac, la température est passée pour la première fois au-dessus de zéro (de jour) le 27 mai. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 20 mai (Figure 44). Aucune période de fonte accélérée n'a été observée et la période de fonte n'a pas été complètement couverte par les images acquises. La fonte a débuté le 6 juin et s'est terminée après le 17 juin, la fonte a donc eu une durée de plus de 2 semaines (Figure 46).



Figure 44 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtac 1 et 2 lors de la période de fonte 2010.

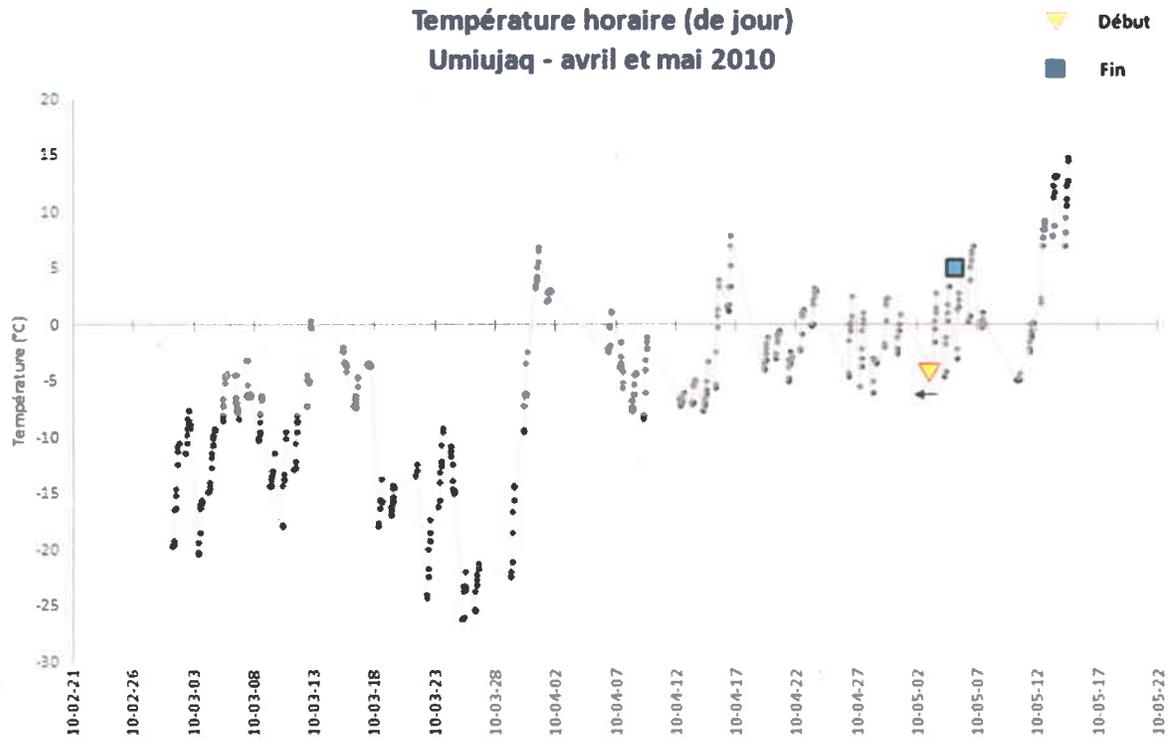


Figure 45 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – mai et juin 2010.

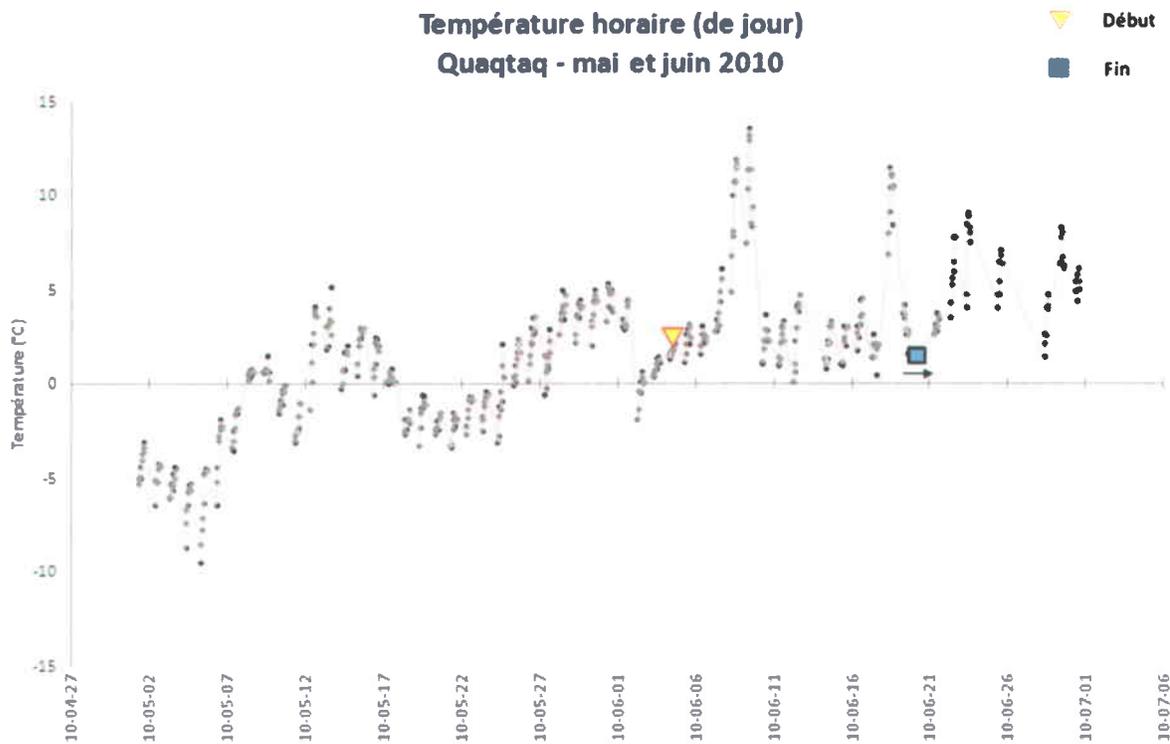


Figure 46 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – mai et juin 2010.

4.3.4 Période d'englacement 2010

Pour Umiujaq, la température est passée pour la première fois sous zéro (de jour) le 23 décembre. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 7 janvier 2011 (Figure 47). L'image précédente date du 1 janvier 2011, et ne montrait aucune présence de glace, ce qui signifie que l'englacement a eu lieu au maximum en 1 semaine (Figure 48).

Pour Quaqtq, la température est passée pour la première fois sous zéro (de jour) le 18 décembre. La première image sur laquelle de la glace a été observée date du 29 décembre (Figure 47). Une croissance accélérée de la concentration est observée entre le 9 et le 15 janvier 2011, date à laquelle l'englacement final est noté. La période d'englacement s'est étendue sur 1 semaine au plus (Figure 49). Une diminution de la concentration du couvert est notée entre le 5 et le 9 janvier 2011.

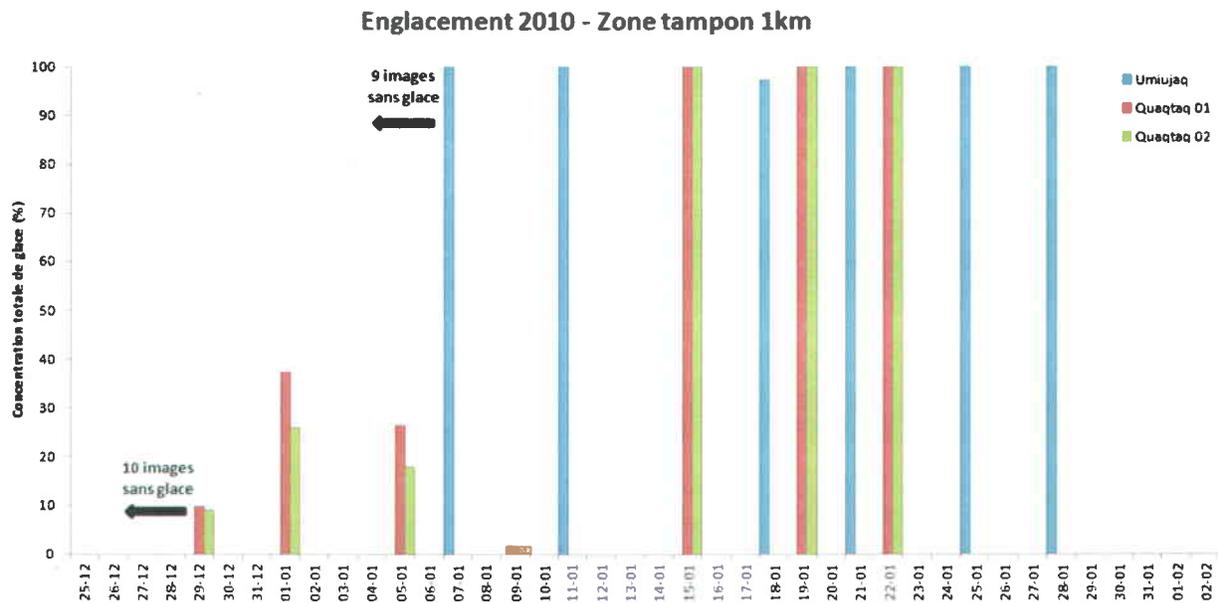


Figure 47 : Évolution de la concentration de glace pour les tampons de 1 km autour des infrastructures maritimes d'Umiujaq et de Quaqtq 1 et 2 lors de la période d'englacement 2010.

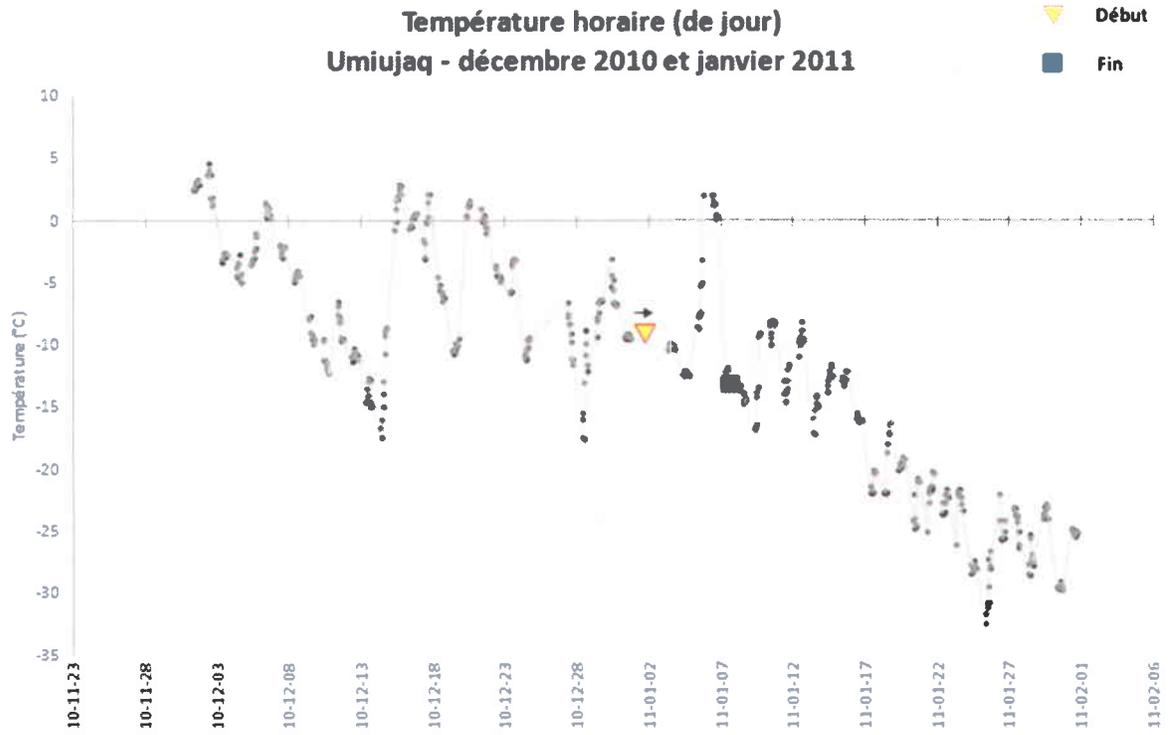


Figure 48 : Températures horaires à l'aéroport d'Umiujaq – décembre 2010 et janvier 2011.

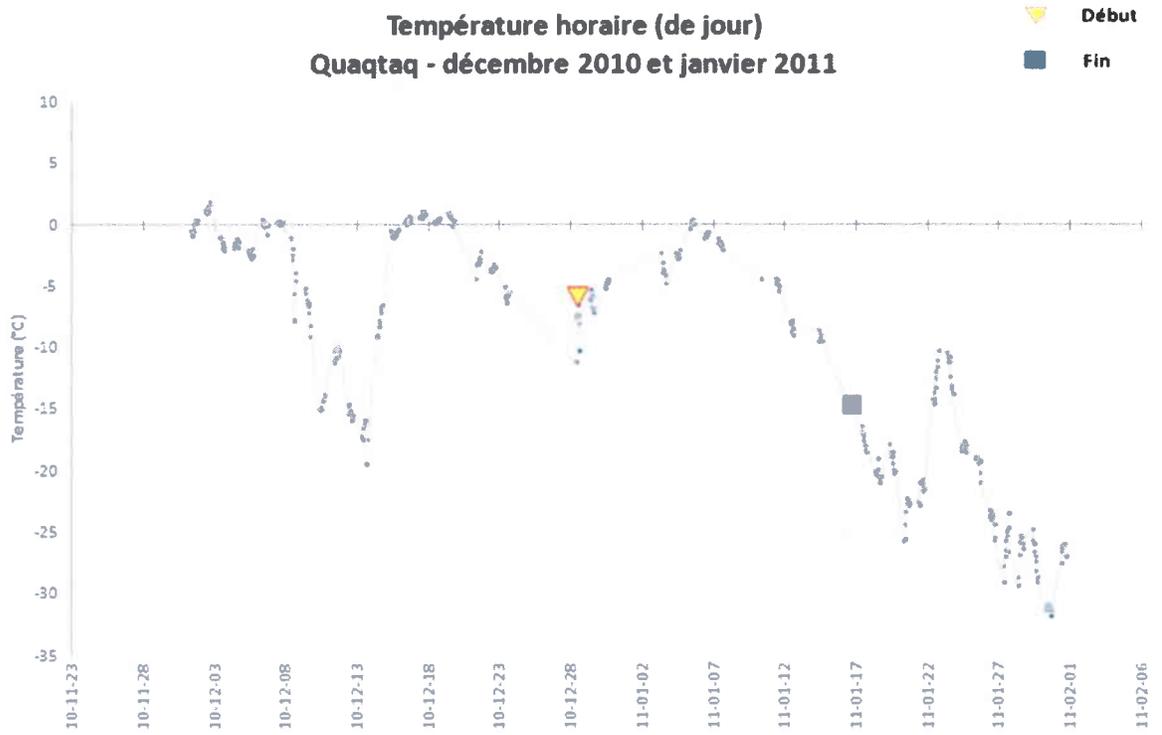


Figure 49 : Températures horaires à l'aéroport de Quaqtaq – décembre 2010 et janvier 2011.

Le tableau 8 présente une synthèse des informations contenues dans les graphiques précédents :

Tableau 8 : Synthèse des dates d'englacement et de fonte pour Quaqtq et Umiujaq 2009-2010.

	Période	Seuil 0°C	Début	Fin	Durée	Période accélérée
Quaqtq	Fonte 2009	22/05	Avant le 25/06	19/07	+ d'un mois	5/07 au 9/07
	Englacement 2009	19/10	Avant le 23/11	7/12	+ 3 semaines	3/12 au 7/12
	Fonte 2010	27/05	6/06	Après 17/06	+ 2 semaines	N/A
	Englacement 2010	18/12	29/12	15/01 (2011)	+2 semaines	9/01 au 15/01 (2011)
Umiujaq	Fonte 2009	22/05	Avant le 27/05	7/06	2 semaines	4/06 au 7/06
	Englacement 2010	3/11	Avant 23/12	9/01 (2011)	2 semaines	N/A
	Fonte 2010	2/04	Avant 2/05	6/05	1 semaine	2/05 au 6/05
	Englacement 2010	23/12	Entre 1/01 et 7/01 (2011)	7/01	Maximum 1 semaine	1/01 au 7/01(2011)

4.4 Évolution des caractéristiques des glaces au voisinage des infrastructures

Toujours à partir des cartes de glace, les données de concentration par type de glace provenant de la zone tampon de 1km permettent de faire un suivi de l'évolution de la glace autour des infrastructures maritimes de Quaqtaq et d'Umiujaq. Les figures 46 à 54 permettent de bien suivre la transformation du couvert dans la zone tampon 1km. Les couleurs correspondent aux types de glace (voir figure 26).

4.4.1 Période de fonte 2009

À Umiujaq, entre le 28 mai et le 4 avril, on dénote une dominance de glace de première année dans la zone (Figure 50). Sur l'image du 28 mai, une petite quantité de glace grise est présente, signe que la fonte avait probablement débuté auparavant. Du 7 au 28 juin, la faible concentration de glace de première année provient de l'intérieur de l'infrastructure, ce ne sont pas des glaces à la dérive. La hausse de concentration de glace grise observée le 17 juin est causée par un floe ayant dérivé entre les îles Nastapoka.

À Quaqtaq, la glace de première année est observée au voisinage de l'infrastructure seulement jusqu'au 25 juin, par la suite, le 28 juin et le 2 juillet, la glace de première année est contenue à l'intérieur de l'infrastructure (Figure 51). Le 5 mai, un floe de glace de première année dérive dans la zone tampon 1km. Ensuite, le 9 juillet, des sarrasins apparaissent dans la zone tampon, transportés par les courants et les marées. Entre le 9 et le 12 juillet, la glace a quitté l'intérieur de l'infrastructure.

Fonte du couvert 2009 - Umiujaq - Tampon 1km

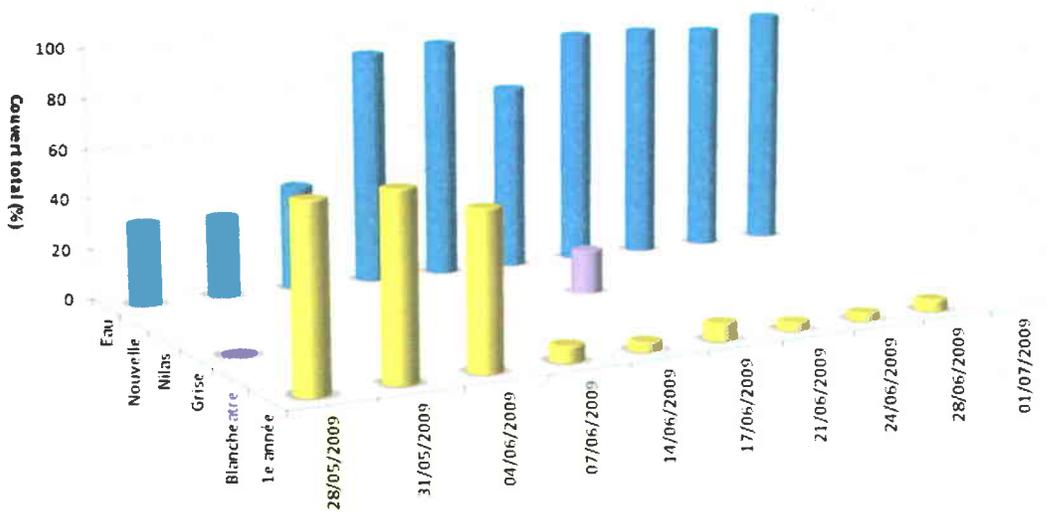


Figure 50 : Dynamique de fonte 2009 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.

Fonte du couvert 2009 - Quaqtacq - Tampon 1km

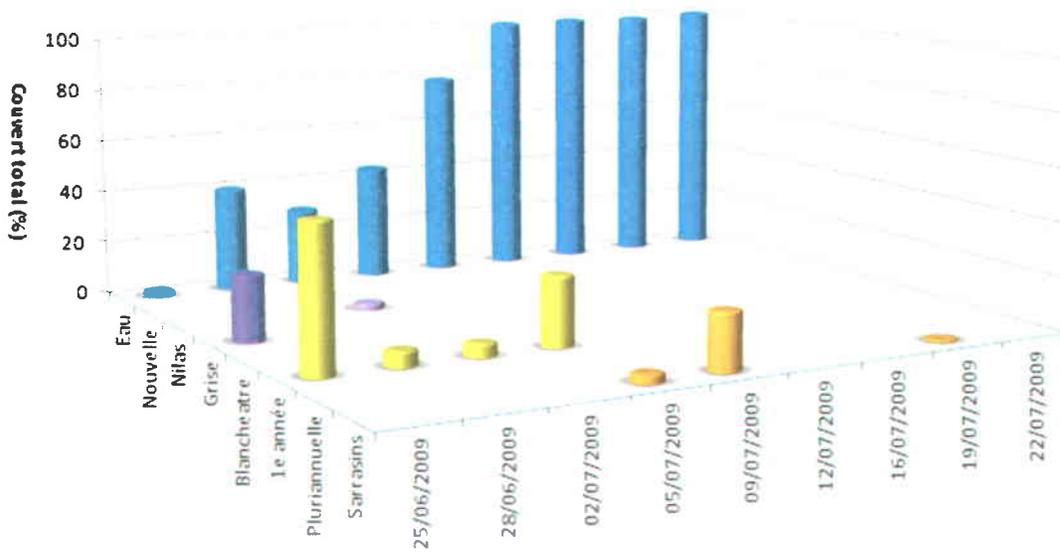


Figure 51 : Dynamique de fonte 2009 dans la zone tampon de 1 km de Quaqtacq-1.

4.4.2 Période d'englacement 2009

À Umiujaq, l'englacement n'a pu être observé que grâce à deux images mais on peut tout de même observer une maturation du couvert entre les deux images (Figure 52). Le 23 décembre, la zone tampon de 1 km est occupée majoritairement par de l'eau libre et de la nouvelle glace tandis qu'un peu de glace grise a pris place à l'intérieur de l'infrastructure. Le 9 janvier 2010, la glace a vieilli et la concentration de glace grise dans la zone tampon a augmenté, le couvert occupant complètement la zone tampon.

À Quaqaq, la première observation de glace (nouvelle glace) a été faite le 23 novembre. Entre le 23 novembre et le 3 décembre, cette glace, formée le long des côtes, n'est pas restée accrochée et a été emportée par la marée (Figure 53). Un épisode d'englacement entre le 3 et le 7 décembre a mené à l'apparition de glace grise, cette dernière ayant évolué vers le stade de glace blanchâtre, entre le 7 et le 24 décembre. Le jour du 20 décembre, un important décrochage du couvert, tel qu'illustré dans la figure 54, explique la hausse soudaine du pourcentage d'eau dans la zone tampon observé le 24 décembre. La reprise de l'englacement a été le 27 décembre.

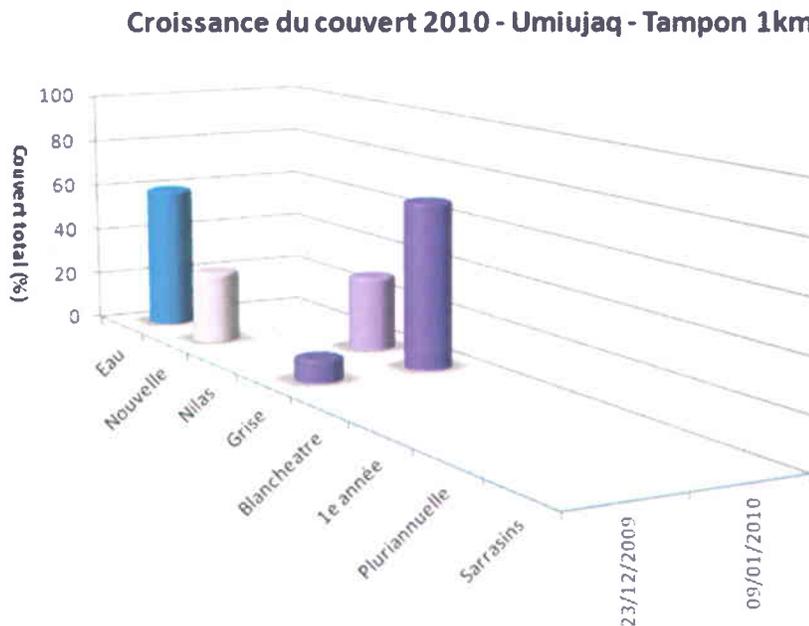


Figure 52 : Dynamique d'englacement 2010 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.

Croissance du couvert 2010 - Quaqtaq - Tampon 1km

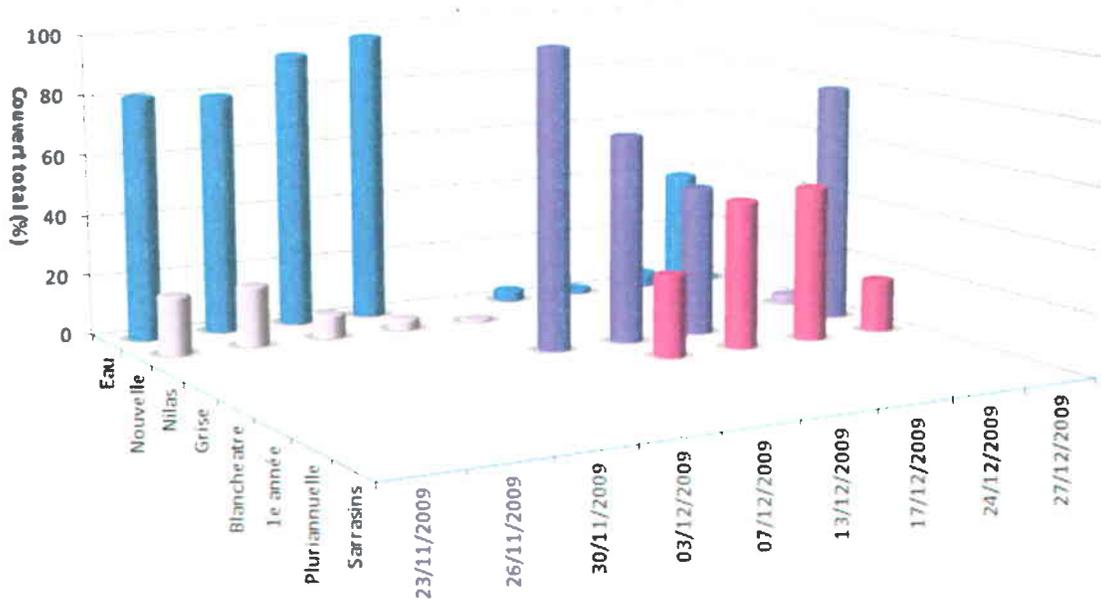
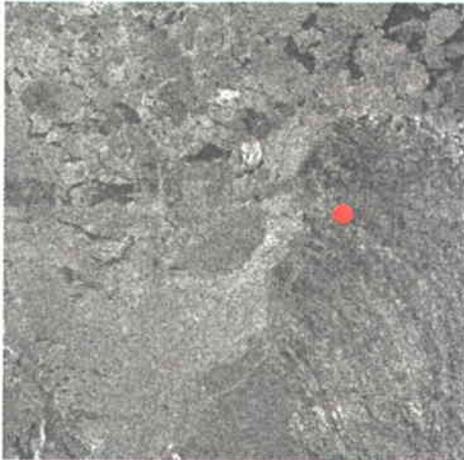


Figure 53 : Dynamique d'englacement 2010 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqtaq-1.

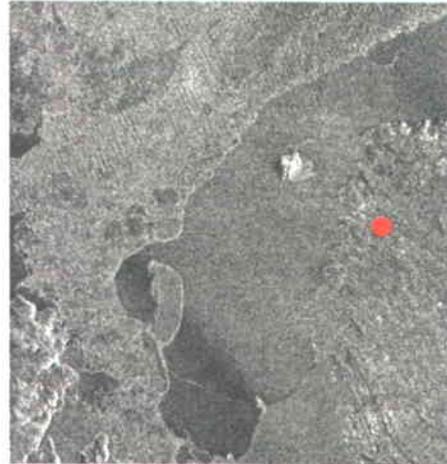
Image RADARSAT-2, 17 décembre 2009



© MDA, 2009

● Village de Quaqtaq

Image RADARSAT-2, 20 décembre 2009



© MDA, 2009

Figure 54 : Fracturation du couvert de glace observée à Quaqtaq le 20/12/2009.

4.4.3 Période de fonte 2010

À Umiujaq, la première image acquise le 2 mai montre une prédominance de glace de première année et la présence d'eau et d'un peu de nilas, signe que la fonte a débuté avant cette date (Figure 55). Par la suite, à l'intérieur d'une période de 4 jours, la quasi-totalité de la glace s'est retirée de la zone tampon, la faible concentration de glace de première année restante étant à l'intérieur de l'infrastructure.

À Quaqtq, la première image acquise le 20 mai, montre un couvert présentant des sarrasins ainsi qu'un important pourcentage de glace de première année (Figure 56). Entre le 20 et le 27 mai, on assiste à une reconsolidation du couvert. Ce couvert consolidé restera en place jusqu'au 10 juin, jour où la fonte s'entame, laissant de plus en plus de place à l'eau et aux sarrasins à la dérive dans la baie Diana. Le 20 juin, le processus de fonte est complété.

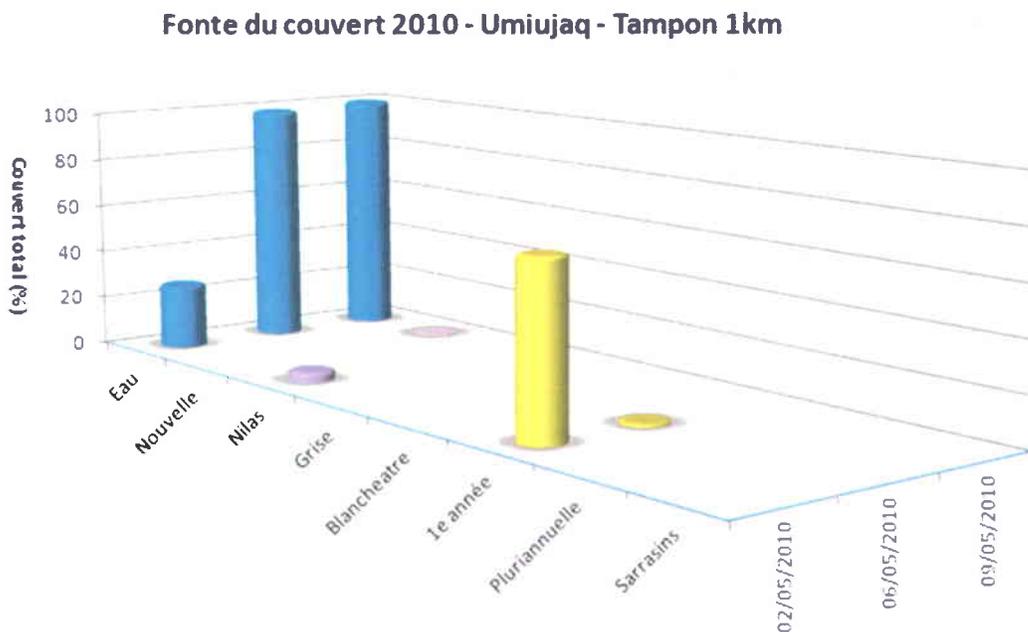


Figure 55 : Dynamique de fonte 2010 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.

Fonte du couvert 2010 - Quaqtaq - Tampon 1km

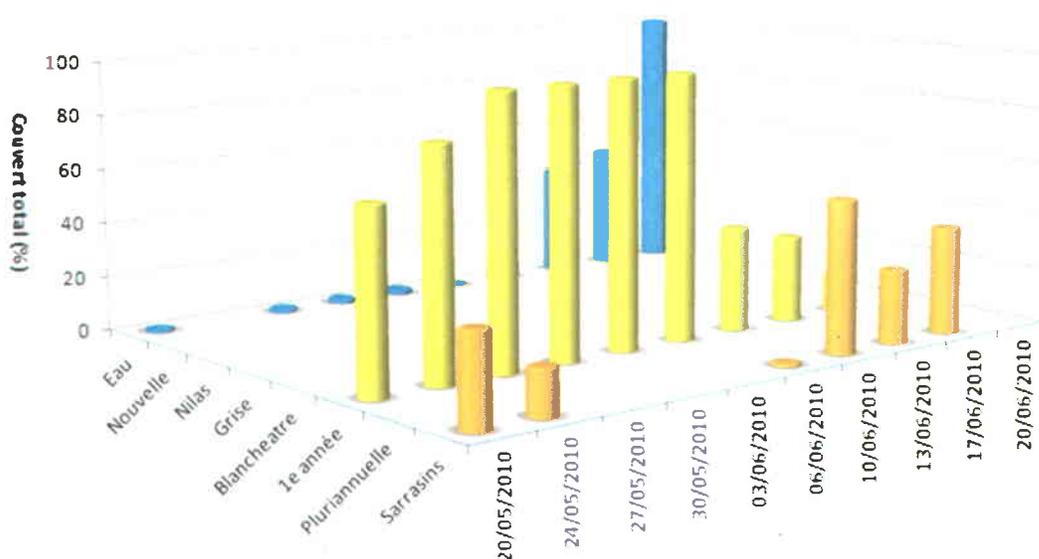


Figure 56 : Dynamique de fonte 2010 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqtaq-1.

4.4.4 Période d'englacement 2010

À Umiujaq, l'englacement 2010-2011 montre une structure idéale, caractérisée par la forme en « S ». Le passage graduel de nouvelle glace (7-11 janvier 2011), vers le stade de nilas et de glace grise (18 janvier), pour ensuite atteindre le stade de glace blanchâtre (21-28 janvier 2011) (Figure 57). La maturation du couvert est bien observable dans ce cas-ci, contrairement à la période d'englacement précédente.

À Quaqtaq, l'englacement a été en 2 phases. D'abord, du 29 décembre 2010 jusqu'au 5 janvier 2011, on a pu observer le long des côtes l'apparition de nouvelle glace qui, faute de conditions adéquates, a été emportée par la marée (Figure 58). Cela explique pourquoi, le 9 janvier 2011, la concentration d'eau libre est totale dans le tampon 1km. Ensuite, entre le 9 janvier et le 15 janvier, un englacement rapide a eu lieu, expliquant l'apparition de glace grise dans la totalité de la zone. Cette glace a ensuite mûri, tel qu'on peut l'observer, entre le 15 et le 22 janvier 2011.

Croissance du couvert 2011 - Umiujaq - Tampon 1km

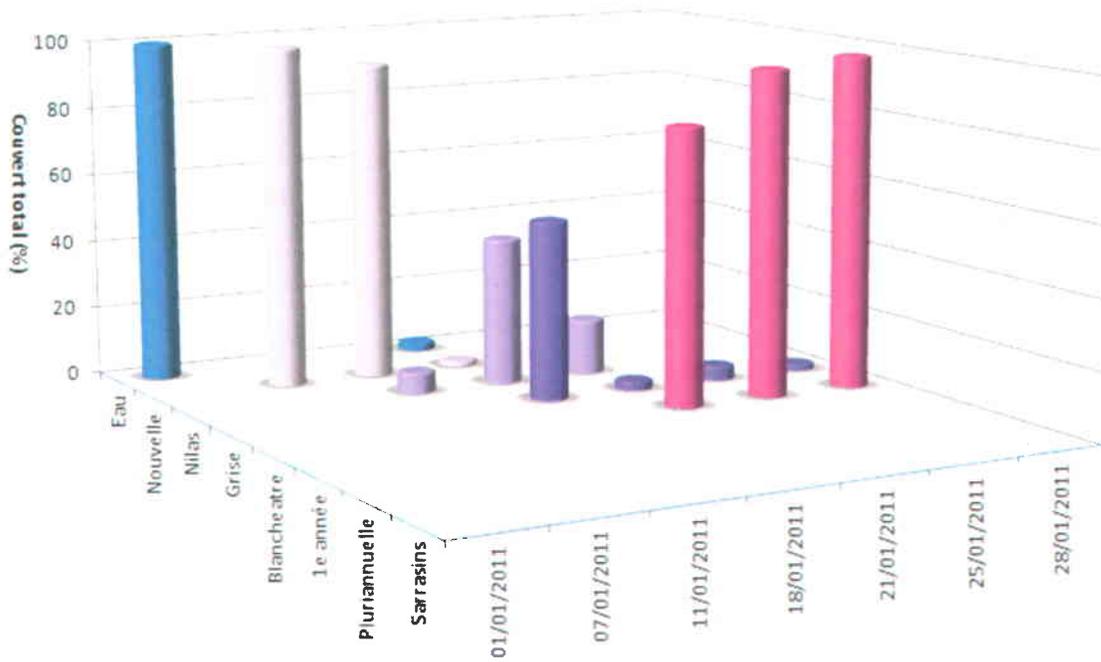


Figure 57 : Dynamique d'englacement 2011 dans la zone tampon de 1 km à Umiujaq.

Croissance du couvert 2011 - Quaqaq - Tampon 1km

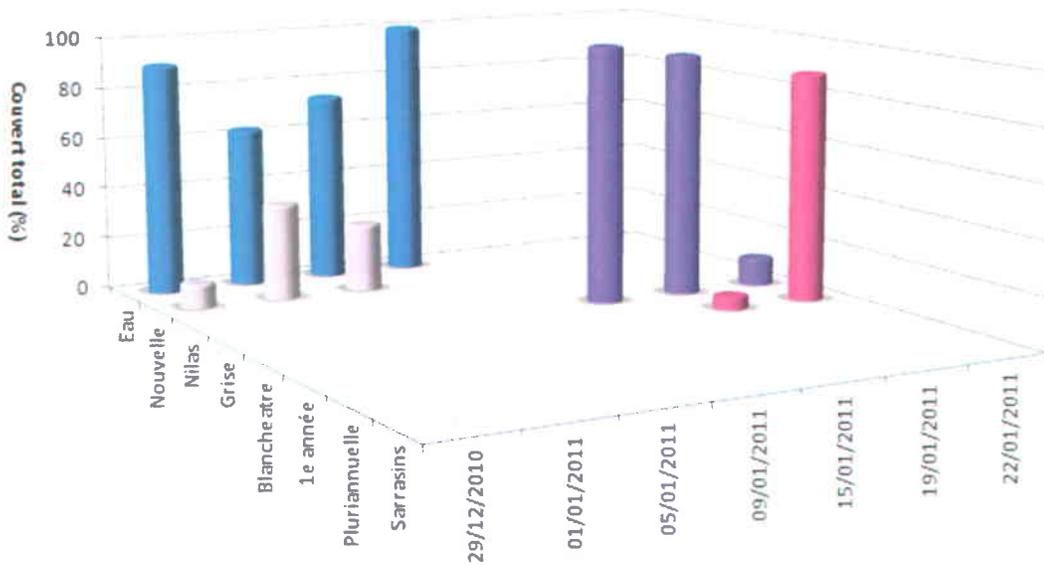


Figure 58 : Dynamique d'englacement 2011 dans la zone tampon de 1 km pour Quaqaq-1.

4.5 Comparaison des cartes locales et régionales

Alors que les données RADARSAT-2 fournissent une information précise à l'échelle locale, elles présentent une lacune au niveau de la fréquence d'acquisition. À l'inverse, les données du NSIDC fournissent une carte de glace quotidienne, mais à une échelle plus grossière (~12 km).

Nous avons voulu comparer les concentrations de glace à l'échelle de l'infrastructure (1 et 10 km) avec celles issues des cartes du NSIDC (2 et 4 mailles les plus proches de l'infrastructure), afin de voir si avec les données grossières, il serait possible d'inférer les conditions de glace à l'infrastructure.

Une analyse de corrélation liant les observations à l'échelle régionale (NSIDC) et ce qui est observé à l'échelle locale (RADARSAT-2) a été effectuée. Une synthèse des corrélations obtenues est présentée au tableau 8. Les corrélations varient de 0,37 à 0,95. En général, les corrélations sont plus fortes lors de l'englacement qu'à la fonte.

L'algorithme automatique de classification du NSIDC (section 3.2.5) calculé sur les données AMSR/E a tendance, lors de la fonte, à sous-estimer la concentration de glace car la présence d'eau à la surface de la glace est problématique pour un système de micro-ondes passif comme AMSR/E (Markus *et al.*, 2000). Il est donc normal que les corrélations soient très faibles au niveau des saisons de fonte car ce problème n'affecte pas autant les données radar due à l'heure d'acquisition des images (6hrs et 18hrs) et une approche d'étiquetage manuelle (Section 3.3.2). En période d'englacement, malgré le peu de points présents pour effectuer une comparaison, la relation semble bonne entre les concentrations régionales et les concentrations locales. Un des problèmes inhérent aux capteurs micro-ondes passives est leur difficulté à discerner les nouvelles glaces (Heygster, 2011) ce qui peut causer problème, particulièrement au début des saisons d'englacement, lorsqu'on détecte 100% de nouvelle glace sur l'image radar et que la concentration NSIDC est de 0%. Les corrélations sont similaires qu'on utilise les 2 mailles les plus proches de l'infrastructure ou les 4 mailles les plus proches. Un facteur pouvant potentiellement expliquer la faiblesse de certaines corrélations peut est le fait que les deux échelles comparées sont très différentes.

On s'attendrait donc à ce que les corrélations soient meilleures lors de comparaisons avec le tampon 10 km, puisqu'à ce moment l'échelle est presque de même ordre. Toutefois, ce n'est pas souvent le cas (différences de corrélation de -0,16 à +0,31) (Tableau 9).

En résumé, il ne se dégage pas de tendance régulière et significative lorsqu'on tente de corréler les données de 2 sources différentes, présentant des échelles différentes (Figures 59 et 60).

Tableau 9 : Synthèse des corrélations obtenues entre les données locales et régionales.

	Saison	NS2	NS4	NS2	NS4	DIFF R ²	DIFF R ²	DIFF R ²	DIFF R ²
		(10x20 km) VS 1KM	(20x20 km) VS 1KM	(10x20 km) VS 10KM	(20x20 km) VS 10KM	NS2 (1 vs 10km)	NS4 (1 vs 10km)	1KM (NS2 vs NS4)	10KM (NS2 vs NS4)
Umiujaq	Fonte 2009	0,63	0,63	0,79	0,79	-0,16	-0,16	0	0
	Englacement 2009**	X	X	X	X	X	X	X	X
	Fonte 2010**	X	X	X	X	X	X	X	X
	Englacement 2010	0,94	0,94	0,63	0,63	0,31	0,31	0	0
Quaqtaq	Fonte 2009	0,84	0,59	0,77	0,56	0,07	0,03	0,25	0,21
	Englacement 2009	0,33	0,33	0,37	0,37	-0,04	-0,04	0	0
	Fonte 2010	0,25	0,25	0,36	0,37	-0,11	-0,12	0	-0,01
	Englacement 2010	0,93	0,93	0,95	0,95	-0,02	-0,02	0	0

** Seulement 2 images disponibles, il est donc impossible d'en tirer une relation valide.

Corrélation FONTE - 1 et 10km vs NSIDC 2

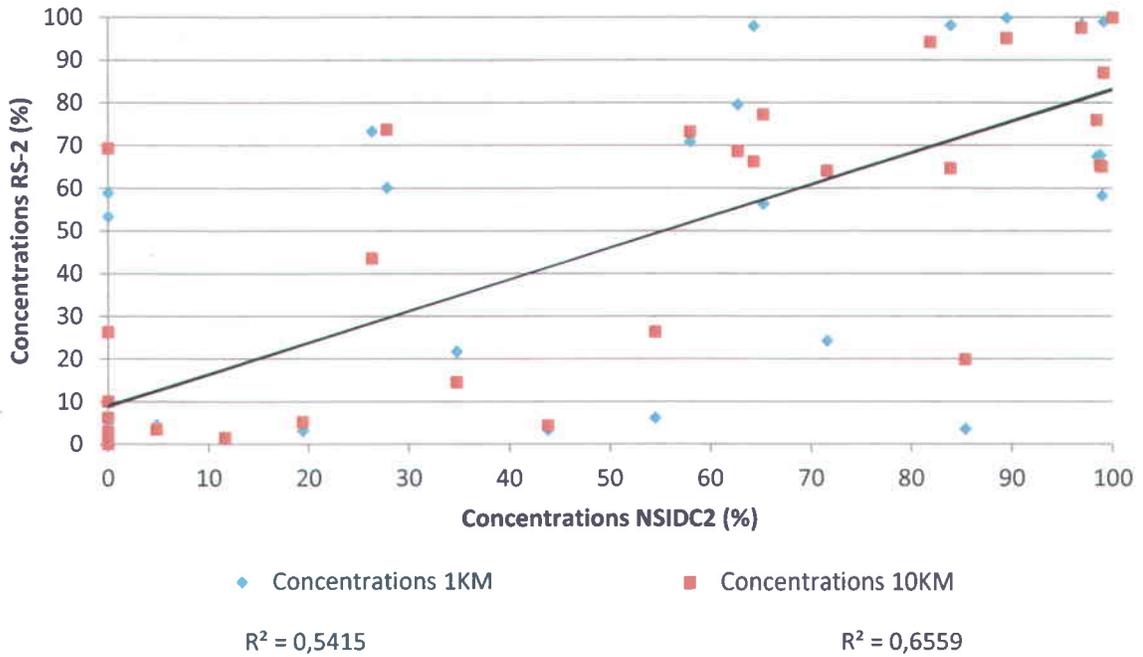


Figure 59 : Corrélations RS-2 versus NSIDC2 en période de fonte (1 et 10 km).

Corrélation ENGLACEMENT - 1 et 10km vs NSIDC 2

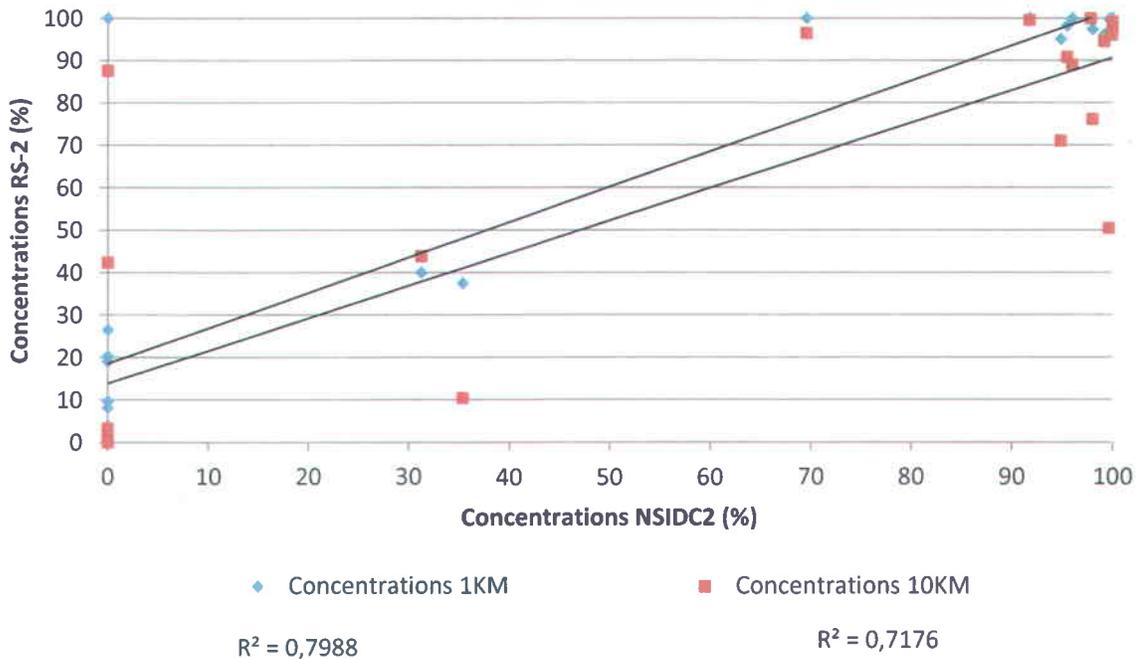


Figure 60 : Corrélations RS-2 versus NSIDC2 en période d'englacement (1 et 10 km).

4.6 Difficultés rencontrées

Cette section présente les diverses difficultés rencontrées au cours de la recherche et des idées de solutions pour contrer ces problèmes.

4.6.1 Limitations de l'imagerie comme intrant unique à la segmentation

Le milieu côtier présente une dynamique très différente que celle de la haute mer. L'application d'un algorithme de segmentation en milieu côtier implique la prise en compte des marées, donc de l'estran et de la position de la ligne des eaux. Sans une prise en compte de la marée, des erreurs de segmentation, tel que présenté au point 4.2.1, sont causées par une rétrodiffusion de l'estran très forte par rapport à l'eau libre ce qui laisserait croire que l'infrastructure est entourée de glace tandis qu'il n'en est rien. Il serait possible de corriger cette erreur en utilisant des données bathymétriques combinées à des prévisions de marées ce qui nous permettrait de modifier, en cas par cas, le masque utilisé pour masquer le continent lors des classifications en utilisant l'information temporelle contenue en en-tête de l'image.

4.6.2 Limitations de MIRGS pour l'utilisation avec l'imagerie haute résolution

L'imagerie radar haute résolution présente une plus grande variabilité locale de la valeur de rétrodiffusion étant donné la nature des phénomènes affectant la radiométrie des pixels.

Par exemple, la variabilité de la rugosité de surface pour une même aire est beaucoup plus grande lorsque l'on considère des pixels de 3 m comparativement aux pixels du mode ScanSAR qui sont de 50 m. La variabilité engendrée par ces différences locales de rétrodiffusion se répercute au niveau statistique dans MIRGS et affecte la variabilité intraclasse, ce qui peut amener quelques erreurs de classification. Pour contrer ce problème une approche progressive par filtrage d'image pourrait permettre de contenir les effets de la variabilité locale.

4.6.3 Limitations et signification de la comparaison inter-échelle

Il s'est avéré non concluant de tenter d'inférer les conditions aux infrastructures en ne disposant que de données régionales. L'analyse de la dynamique des glaces sur 2 ans a montré que les villages sont situés dans des zones généralement plus protégées et que la morphologie locale des lieux joue un rôle important sur les processus de glace. Bref, que ce qui se passe au local

peut facilement différer du régional, surtout en période de transition. Cet état de fait est confirmé par la faible corrélation entre le buffer 1km et les mailles de 10km. Par contre, la différence de résolution des sources comparées et l'algorithme NSIDC sont aussi des sources de discordance.

Il est évidemment difficile de comparer des observations provenant de deux échelles différentes mais également de sources différentes (radar vs. micro-ondes passives). Toutefois, cet exercice a permis de cerner que lorsque les concentrations sont élevées au niveau régional dans les cas d'englacement, généralement il en est de même au niveau local.

De meilleures corrélations pourraient être obtenues si des améliorations étaient apportées aux algorithmes de classification de glace basés sur les données micro-ondes passives. Les faiblesses connues des micro-ondes passives en période de fonte tout particulièrement expliquent en partie la faiblesse des corrélations obtenues.

Il serait intéressant d'effectuer ce même exercice de comparaison mais en réduisant la contrainte de résolution, donc en utilisant l'imagerie radar à faible résolution et en comparant les concentrations.

4.7 Perspectives de développement

Cette section propose des améliorations qui permettraient d'améliorer la performance de l'algorithme MIRGS lors d'une utilisation avec de l'imagerie radar haute résolution et également d'éventuellement automatiser la procédure d'étiquetage.

4.7.1 Améliorations proposées à MIRGS

Des améliorations au point de vue géomatique permettraient d'améliorer grandement la précision de traitement de MIRGS.

Au point de vue du positionnement des images, le travail avec des images en haute résolution nécessite un positionnement précis de l'imagerie afin d'éviter tout décalage entre le masque et l'image. Pour obtenir un positionnement précis, une approche de correction d'image constituerait une importante étape préalable à la segmentation. Pour ce faire, deux options sont possibles. La première serait d'intégrer directement à MIRGS un algorithme d'orthorectification, comme celui présenté par Toutin (Toutin *et al.*, 2009), qui demande en entrée un modèle numérique d'élévation mais aucun point de contrôle. L'autre option serait de

permettre à MIRGS d'utiliser comme intrant des images orthorectifiées en d'autre format que le format .BIL utilisé actuellement dans MIRGS.

Le second point à améliorer avec MIRGS est le filtrage des images radar. En haute résolution, les images sont en proie à une plus grande variabilité des valeurs numériques de pixel. Actuellement, MIRGS offre uniquement une approche de ré-échantillonnage des pixels basée sur la moyenne. Cette approche réduit la résolution spatiale de l'image. Pour contrer cette perte de résolution, il serait intéressant d'intégrer des filtres spécialisés pour l'imagerie radar (Lopes *et al.*, 1990). Une telle amélioration améliorerait les capacités de traitement de MIRGS.

4.7.2 Automatisation de la procédure d'étiquetage

La procédure d'étiquetage actuelle demande à l'utilisateur une grande capacité d'interprétation d'image et des connaissances des mécanismes de rétrodiffusion qui, même lorsque utilisée minutieusement, peut amener à des erreurs d'étiquetage, tel que présenté dans la section 4.2 du présent mémoire. Une solution possible pour automatiser une telle procédure est la création d'un système expert basé sur les données historiques telles les classifications effectuées auparavant et les données météorologiques passées et également sur les données récentes et permanentes comme la date, la saison, la localisation spatiale de l'image et les conditions météorologiques du passé récent.

Hypothétiquement, une analyse croisée de tous ces facteurs pourrait permettre de générer une base de données dans laquelle il serait possible d'établir statistiquement la probabilité qu'un type de glace soit affecté à un polygone plutôt qu'un autre type et ce en fonction de sa latitude, de la saison, de l'historique météo récente, etc. L'utilisation et l'enrichissement du processus grâce aux images de texture peut également s'avérer une option intéressante. La figure 61 présente une vue schématique que pourrait prendre une telle approche d'automatisation.

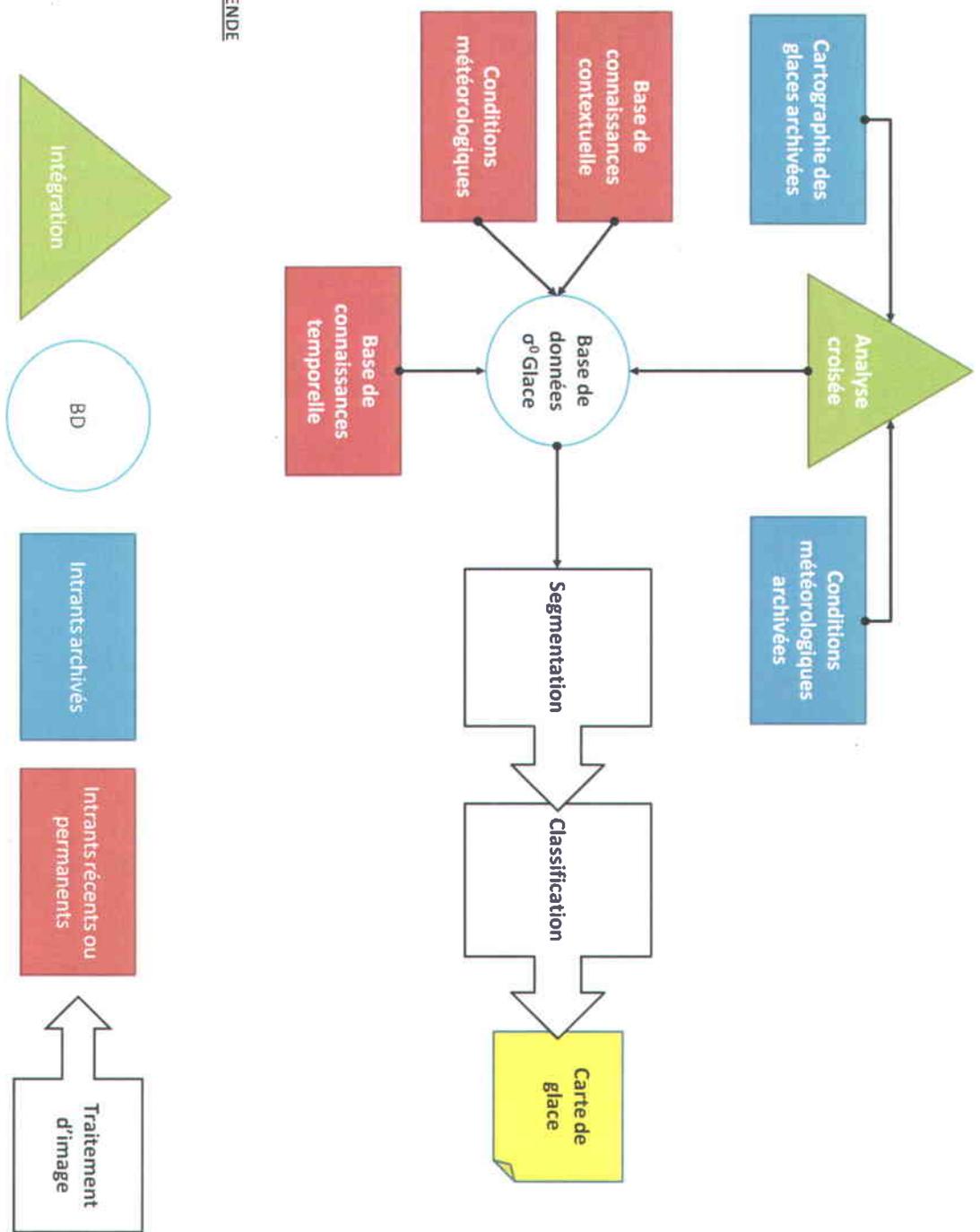


Figure 61 : Schéma proposé pour l'automatisation de la procédure de segmentation et d'étiquetage.

5. CONCLUSION

Afin de répondre aux besoins de produire des cartes des conditions de glace près des infrastructures maritimes du Nunavik lors des périodes d'englacement et de fonte, nous avons adapté l'approche MIRGS à l'utilisation d'images radar haute résolution. C'était notre principal objectif et il a été atteint. Des adaptations au niveau du masque vectoriel, de l'étiquetage manuel et des corrections post-traitement ont dues être apportées afin d'obtenir une précision suffisante à l'atteinte de l'objectif. À la lumière des données ponctuelles de validation disponibles, nous évaluons la précision des classifications entre 75% à 95%, selon la saison (objectif 1a). Le potentiel de la haute résolution (8 m et 3m) pour la cartographie des glaces marines s'avère donc très intéressant. Les utilisations possibles sont prometteuses dans plusieurs domaines tels l'ingénierie et la navigation en eaux dangereuses. Nous avons donc validé notre 1^{ère} hypothèse soit qu'il est possible de documenter les conditions de glace en utilisant conjointement les images radar haute résolution de RADARSAT-2 et l'algorithme de segmentation MIRGS.

Nous avons aussi documenté les forces et faiblesses de l'algorithme MIRGS (objectif 1b). Son utilisation s'est avérée très utile et efficace pour la segmentation des images haute résolution. Néanmoins, il nous est rapidement apparu que cet algorithme n'est pas optimisé pour les applications en haute résolution, au niveau de la précision spatiale tout particulièrement.

Le lien entre les processus locaux et régionaux (objectif 2) a été étudié mais ne peut être confirmé statistiquement, car les deux sources ne sont pas du tout de la même échelle. Les faiblesses de corrélation sont explicables par les limites des données micro-ondes passives au début de la période d'englacement et durant la fonte. Ainsi, notre seconde hypothèse, soit l'existence d'une relation modélisable entre les concentrations observées par l'imagerie radar haute résolution et les concentrations observées par l'imagerie micro-ondes passives faible résolution ne seraient valide que lors de l'englacement. Il faut en conclure qu'il n'existe pas de lien statistiquement valide entre les données NSIDC et les données des cartes de glace RADARSAT-2.

Les approches de cartographie des glaces à partir de données radar existent depuis très longtemps. Par contre, l'utilisation de la haute résolution, toute nouvelle, présente des avenues de développements et de nouveaux champs d'application jusque la, peu explorés. Ce mémoire se veut être une exploration du potentiel des données SAR haute-résolution.



**SECTION 2 :
ARTICLE**



HIGH RESOLUTION RADARSAT-2 SAR DATA FOR SEA-ICE CLASSIFICATION IN THE NEIGHBORHOOD OF NUNAVIK'S MARINE INFRASTRUCTURE

Auteurs et affiliations professionnelles

1. Charles Gignac, Étudiant en sciences de l'eau
Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement
2. Yves Gauthier, Agent de recherche en télédétection
Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement
3. Jean-Simon Bédard, Stagiaire de premier cycle en géomatique
Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement
4. Monique Bernier, Professeure en télédétection
Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement
5. David A. Clausi, Professeur en ingénierie de systèmes
Faculté d'ingénierie de l'Université de Waterloo

Nature de la contribution de l'étudiant

Traitement des images et analyse des résultats.

Rédaction complète de l'article.

Participation aux corrections et aux ajustements finaux avant l'envoi.

Titre du journal ou du journal où l'article a été publié

Actes de la 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions

Modification exigées par le comité de lecture

Statistical validation of the success of the MIRGS segmented product should be reported.

Conclusions should state the limitations.



RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Les infrastructures maritimes sont d'une importance capitale pour les communautés arctiques. Durant les dernières décennies, des signes des changements climatiques ont été observés à travers l'Arctique et peuvent être liés à la détérioration physique des infrastructures maritimes. Des changements dans les régimes éolien et marin ainsi qu'un changement dans le régime des glaces sont à l'origine de cette détérioration.

Les images satellites des radars à synthèse d'ouverture sont fréquemment utilisées pour effectuer le suivi des conditions glacielles sur de grandes étendues. Cette étude met l'accent sur l'usage d'imagerie radar à haute résolution spatiale pour suivre les conditions glacielles durant les périodes d'englacement et de débâcle des années 2009-2011 et ce au voisinage des infrastructures maritimes de deux communautés du Nunavik : Quaqtq et Umiujaq. Les données utilisées dans cette étude proviennent du satellite radar canadien RADARSAT-2 en mode fin (8m) et Ultra-Fin (3m). Elles ont été traitées avec l'algorithme MIRGS (Multivariate Iterative Region Growing using Semantics) développé au département d'ingénierie de systèmes de l'Université de Waterloo, en Ontario. En utilisant MIRGS, les cartes de glaces sont générées pour le voisinage immédiat des infrastructures. La validation est faite en utilisant des photographies aériennes et au sol, prises aux infrastructures. Des statistiques comme la date de première apparition de la glace et différents seuils de concentration sont calculés pour différentes zones tampon (0,1 à 10km) autour des infrastructures en utilisant des méthodes d'analyse spatiale dans le logiciel ArcGIS.

Cette étude est partie intégrante d'un projet visant le suivi de la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques, mené par Transports Québec et le consortium Ouranos. Les cartes de glace et les statistiques seront utilisées pour suivre le comportement des glaces autour des infrastructures et pour valider un modèle océanique 3D de la Baie d'Hudson créé à l'ISMER.



Figure 62 : Study sites.

2. CLASSIFICATION OF SEA ICE TYPES

Documenting ice conditions and ice behaviour starts with detecting and characterizing the ice. Sea ice types are classified given their age, physical aspect and thickness. Newer ice types are mostly distinguishable by their different physical aspects while older ice types are separable mostly by knowing their thickness or age.

By a combination of these criteria, an international standardized terminology of sea ice types was created (World Meteorological Organization, 1989). The following scheme (Figure 63) shows the sea ice types considered in our approach. Some ice types were not used given the geographic context of our SAR scenes. Finally, considering the impossibility of monitoring the

ice thickness with our imagery, the first year ice category combines all development stages from thin to thick. Finally, due to its completely different backscatter signal, we have integrated a new class called Brash Ice, which consists of an agglomerate of first year ice pieces.

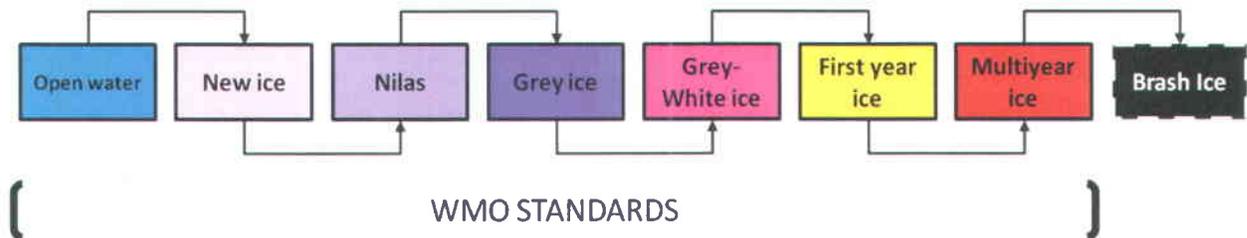


Figure 63 : Sea ice types and color codes in accordance to WMO standards + Brash Ice¹.

3. SAR DATA

3.1 SAR in sea ice imagery

SAR imagery is used to detect, locate and identify sea ice types, concentrations, floe size and leads. In our specific case, we focus on surface concentration of ice types and their potential impact of ice on marine infrastructure. One of the most important parameter to understand the impact of sea ice on infrastructures is ice thickness. Unfortunately, it still cannot be determined from SAR imagery².

However, it is possible to identify ice types and to monitor sea ice evolution through freeze-up and break-up seasons and to link the detected sea ice types with their given range of associated thickness³.

¹ For nominal ice thicknesses associated with these types of ice, please refer to table 1.

² It cannot be exactly determined but it can be inferred given the nominal thickness associated with each specific ice class.

³ Ice strength can be inferred from the ice class.

3.2 Effect of sea ice physical structure on radar backscatter

Sea ice structure affects the backscatter signal returning to the sensor. The major parameters affecting the scattering characteristics of sea ice are (Onstott, 2005):

- Surface roughness, at both large and small scales;
- Dielectric constant of sea ice and impurities, and;
- Dielectric discontinuities.

Ice surface roughness can be explained by the sea state and weather conditions during the ice formation. Roughness has an effect on how much signal is backscattered to the sensor and this is a function of SAR frequency and incidence angle. Generally, the rougher the surface, the more diffuse the scattering. Furthermore, if the ice features are oriented orthogonally to the radar wave, a strong dihedral backscatter occurs because of the reflection off the smooth ice surface onto a rough pressure ridge.

The dielectric constant is a basic electrical property of all materials. It affects the amount of signal absorbed, reflected or dissipated. For sea ice, the most important factor affecting its dielectric constant is salinity. New and first year ice types are very strong surface scatterers due to their high salinity and to the possible presence of frost flowers on the surface. As ice thickens, brine drains, the frost flowers erode and surface backscattering decreases. Then, the backscatter gets more influenced by volume scattering. Volume scattering intensity, while lower than surface scattering, is function of air inclusions (gas bubbles) and impurities inside the ice cover. In the spring, melting snow causes water to accumulate on top of the ice and it acts as a barrier to the radar waves due to its high dielectric constant.

Discrimination of sea ice types using SAR data is a complex task. Nevertheless, the ice cover backscattering coefficient (σ^0) tends to follow a certain logical pattern (Barber *et al.*, 2001) both during freeze-up and melting periods.

4. METHODOLOGY

The methodology used in this project combines an unsupervised SAR image segmentation algorithm with a manual sea ice type labelling of the resulting segmentation polygons. Following these steps, spatial statistics are extracted from the classification results using ESRI ArcGIS.

The segmentation was applied to 60 RADARSAT-2 images in fine or ultra-fine modes (Table 10).

Table 10 : Summary of acquired images and modes per village.

Village	Fine	Ultra-fine	Total
	(Spatial resolution of 8m)	(Spatial resolution of 3m)	
Umiujaq	7	18	25
Quaqtaq	8	27	35

It is important to take into account the fact that all these images were acquired at 6 AM⁴, which means that the observed evolution of the cover is based on scenes with various tides conditions.

4.1 SAR segmentation

The Multivariate Iterative Region Growing using Semantics (MIRGS) (Qin *et al.*, 2010) is the multivariate equivalent to the Iterative Region Growing using Semantics (IRGS) developed at the University of Waterloo in the System Design Engineering department (Q. Yu *et al.*, 2007). The MIRGS approach is separated in four distinct steps (Figure 64). The first two steps are executed once each and the last two steps are iterative, the number of iterations being specified by the user in the command window.

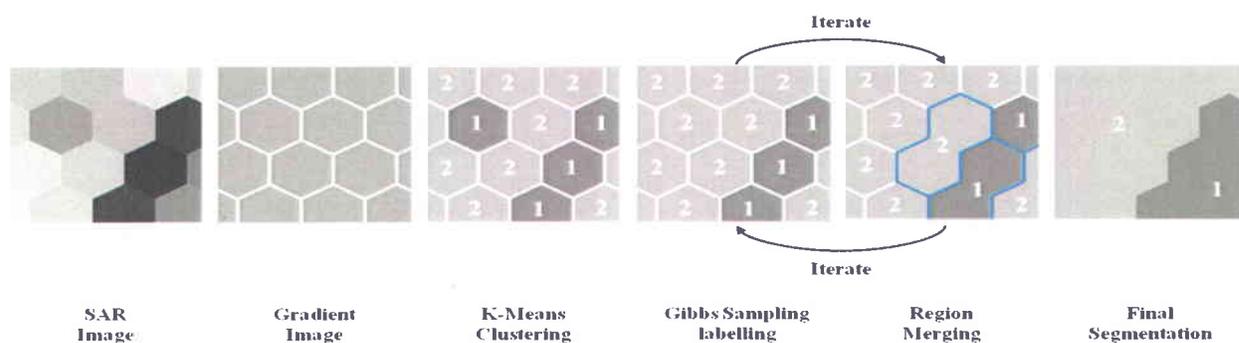


Figure 64 : Segmentation Process Scheme, adapted from (P. Yu, 2009).

⁴ Time is given according to the local time zone.

MIRGS is initially built to take into input polygons from sea ice maps made at the Canadian Ice Service (CIS) (Ochilov *et al.*, 2010). These polygons, with attached information like the number of ice classes and their relative concentrations, are used as a “*knowledge base*” to choose the adequate label set for the regions. In our case, a visual estimation of the correct number of sea ice classes observed on a scene is done, prior to the application of the algorithm. This information is used in MIRGS as our “*knowledge base*”, consisting of knowledge of the number of ice classes prior to segmenting and our input polygon is, in this case, the complete image, with land covered with a raster mask converted from vector GIS data. The segmentation process is then followed by a manual labelling process given the fact that no ice type information was contained in our “*knowledge base*”.

4.2 MIRGS steps

The first step of MIRGS is to use an image gradient to delimitate watersheds of uniform backscatter based on the Vincent-Soille algorithm (Vincent *et al.*, 1991). The regions, delineated by this algorithm, are used as base for future merging and labelling.

The second step is to reach a basic labelling using the K-means algorithm. Once the solution is reached, the Region Adjacency Graph (RAG), which represent adjacency relationships structure between regions. The RAG is, once completed, passed to the next step.

The third step aims at finding the optimal labelling taking into account both spatial and statistical context. This step takes part into the iterative process.

The last step merges neighbouring regions considering all pairs of adjacent regions which have the same label. When region merging is completed, the algorithm goes back to the third step. This process is repeated until the desired number of iterations is reached, at which point the final segmentation will be produced.

4.3 MIRGS calibration and application

A calibration test was used to determine a unique number of iterations to be run with all images. The test, based on both a complex heterogeneous scene and a simple homogeneous scene, aimed at finding the number of iterations at which regions where no longer significantly changing classes. The number of regions that are changing classes suddenly drops between

the 55th and 60th iterations. A minimum is reached shortly after. This applies to a radiometrically simple scene (low grey level variability) as well as to a radiometrically complex scene (large grey level variability). To account for some variation, the iteration threshold is set at 70.⁵

4.4 Region labelling

The manual labelling process is based on identification of sea ice types taking into account sea ice backscatter (σ^0) seasonal evolution (Barber *et al.*, 2001), floe shape and climate data. Reference books (Canadian Ice Service, 2005, Meteorological Service of Canada, 1990) are also used as a classification help. Validation air photos have also been acquired and used as a support to the labelling process. The first acquisition was in Quaqtaq, at the beginning of the melt season (May 27th, 2010) and the second one was in Umiujaq, at the end of freeze-up (January 25, 2011).

4.5 Georeference and spatial statistics extraction

Once segmentation and labelling are completed, geomatic tools are used to georeference the datasets, to map the final classification results and to extract spatial statistics around the infrastructures. The georeference is made by using CanVec data from Natural Resources Canada as a reference dataset and the ESRI ArcGIS Georeference tool. Spatial statistics are obtained from buffer zones of 0.1, 1 and 10km centered on the infrastructures.

These statistics are used to follow ice development and to establish the dates of important events such as first appearance, 75% surface concentration or full consolidated cover in each buffer zone. Total ice surface coverage is extracted for the 0.1, 1 and 10km buffers while surface concentrations per ice type are calculated for the 1km buffer.

⁵ Technically, once the algorithm reaches a solution, the following iterations are fast. The best way to use the algorithm is to specify a high number of iterations, such as a 100 iterations to make sure the best result is reached.

5. RESULTS AND ANALYSIS

5.1 Ice maps

Figure 65 shows an example of the ice maps obtained from the previously described methodology and the three buffers surrounding the infrastructures.

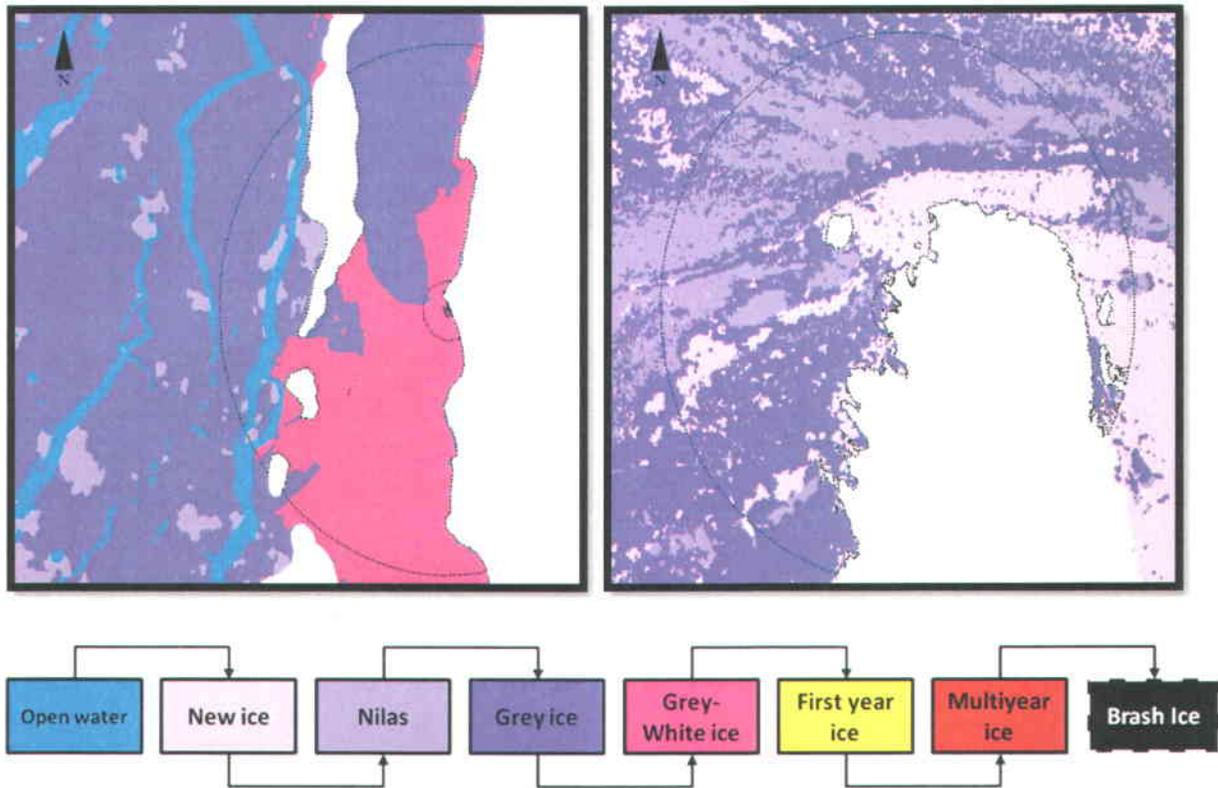


Figure 65 : Ice maps from RADARSAT-2 images: On the left, Umiujaq, January 25th, 2011 (Ultra-fine, 3m) and on the right, Quaqaq, January 24th, 2009 (Fine, 8m). The semi circles are the 10km, 1km and 100m buffers.

5.2 Ice regimes of 2009-2010 and 2010-2011

Figure 66 presents the evolution of the total ice coverage in Umiujaq for the freeze-up and melting seasons of 2009-2010 and 2010-2011, over three buffers (100m, 1km and 10km). Figure 67 shows the same data for Quaqaq.

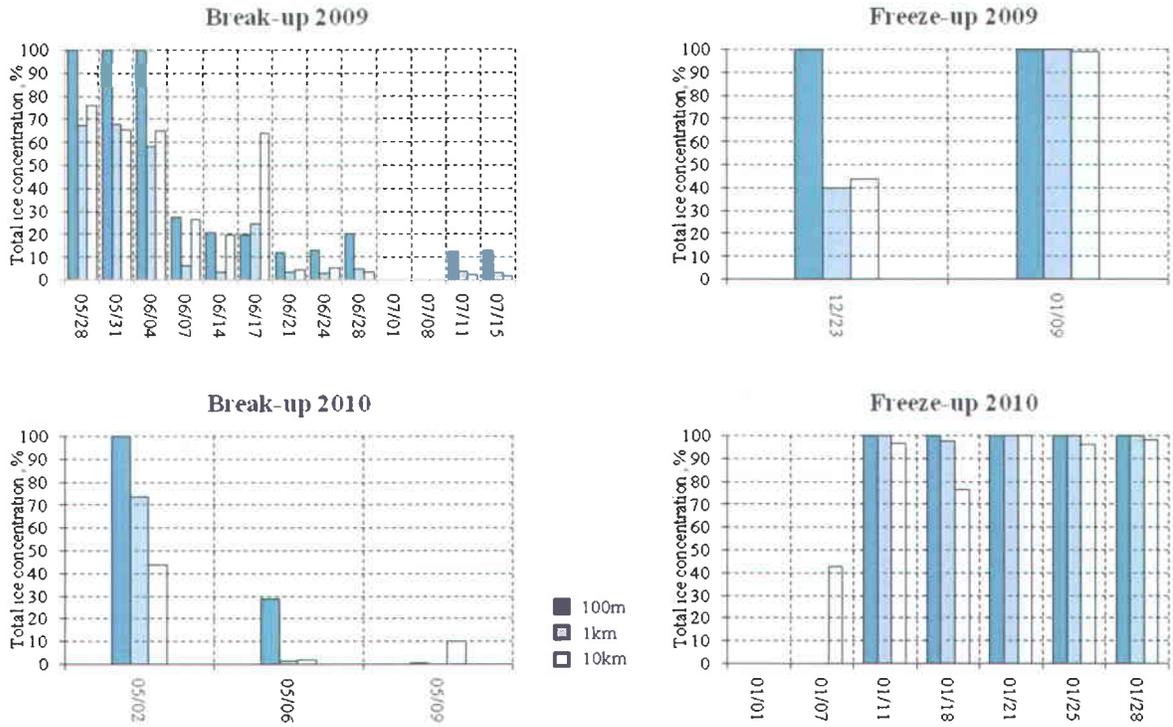


Figure 66 : Temporal evolution of total ice coverage in Umiujaq for 100m, 1km and 10km buffers during 2 years.

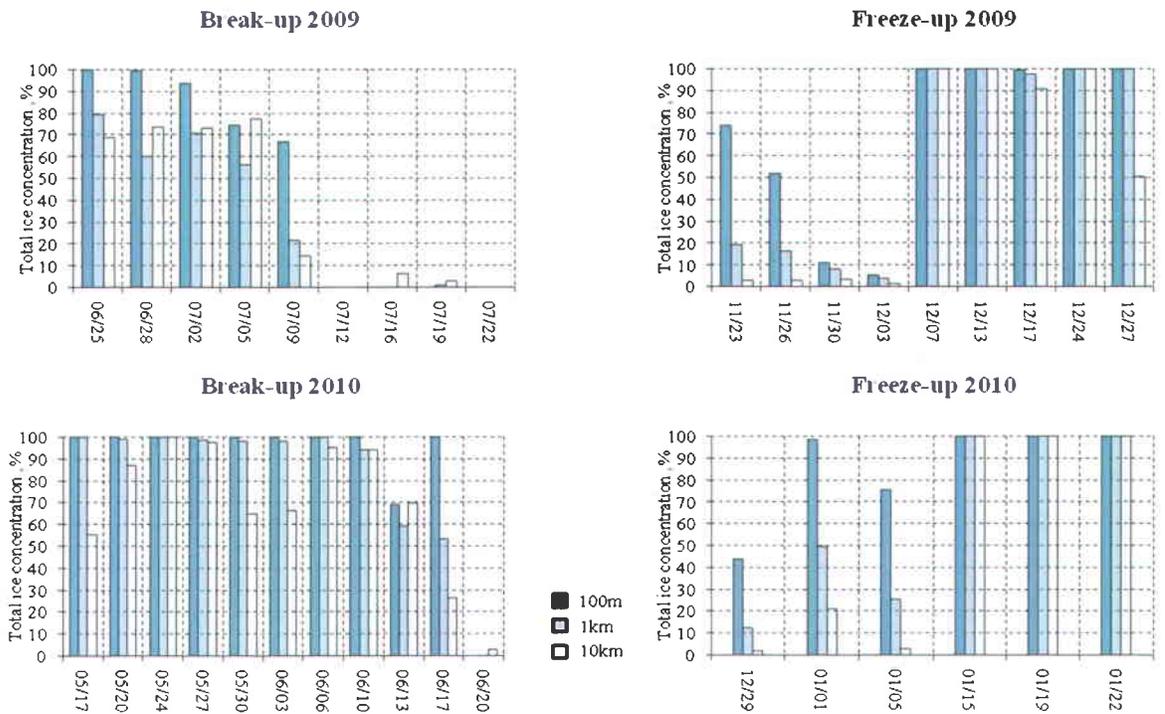


Figure 67 : Temporal evolution of total ice coverage in Quaqaq for 100m, 1km and 10km buffers during 2 years.

From the available information, we can see that for the Umiujaq 100m buffer, the break-up in 2009 (from 100% to 0%) was gradual and extended over at least a month, while in 2010, it was sudden and completed within a week. In both cases, the image frequency was 3-4 days. The duration of the 2009 freeze-up (from 0% to 100%) cannot be estimated as only 2 images are available. But it is at least two weeks. In 2010, it happens within 4 days.

For Quaqtac, the 2009 break-up in the 100m buffer is gradual and done within two weeks. In 2010, it is irregular and completed within a week. Again, we miss the beginning of the freeze-up in 2009 and 2010. However, we can observe that in 2009, the freeze-up takes at least two weeks but with a final and sudden freezing in less than four days. In 2010, it is more gradual but also takes two weeks.

In general, ice forms earlier and leaves later in the 100m buffer (direct contact with the infrastructure) than in the 1km buffer. The 10km buffer also shows more variability, as it includes areas of stronger currents. This indicates that monitoring ice at a large scale will not necessary be indicative of the ice conditions at the infrastructure. As an example, table 11 compares the ice-in and ice-out dates from large scale monitoring (Canadian Ice Service and US Naval Ice Center⁶) to the information extracted from RADARSAT-2 fine scale scenes. These results show that in certain situations, there are major differences in dates given the monitoring method used.

Table 11 : Comparison of ice first appearance and ice total disappearance dates from different sources.

	UMIUJAQ	QUAQTAQ
Data	Total disappearance/First appearance (2009)	Total disappearance/First appearance (2009)
CIS	July 20 th / December 21 st	July 27 th / December 7 th
NIC	July 5 th / December 20 th	August 2 nd / December 8 th
RS2	July 1 st / Before December 23 rd	July 12 th / Before November 23 rd
Data	Total disappearance/First appearance (2010)	Total disappearance/First appearance (2010)
CIS	May 24 th / January 17 th	June 21 st / December 27 th

⁶ Also know as National Ice Center.

NIC	May 23 rd / January 16 th	June 20 th / December 19 th
RS2	May 9 th / January 7 th	June 20 th / Before December 29 th

Furthermore, from the RADARSAT-2 ice maps, we can also monitor the timing of the freeze-up and break-up for each ice type. In figure 68, we first show an example of a regular freeze-up pattern (Umiujaq), with the progressive appearance of new ice, nilas, grey ice and grey-white ice. Then we show a pattern of break-up in Quaqtq, with the first year ice disintegrating and the appearance of brush ice.

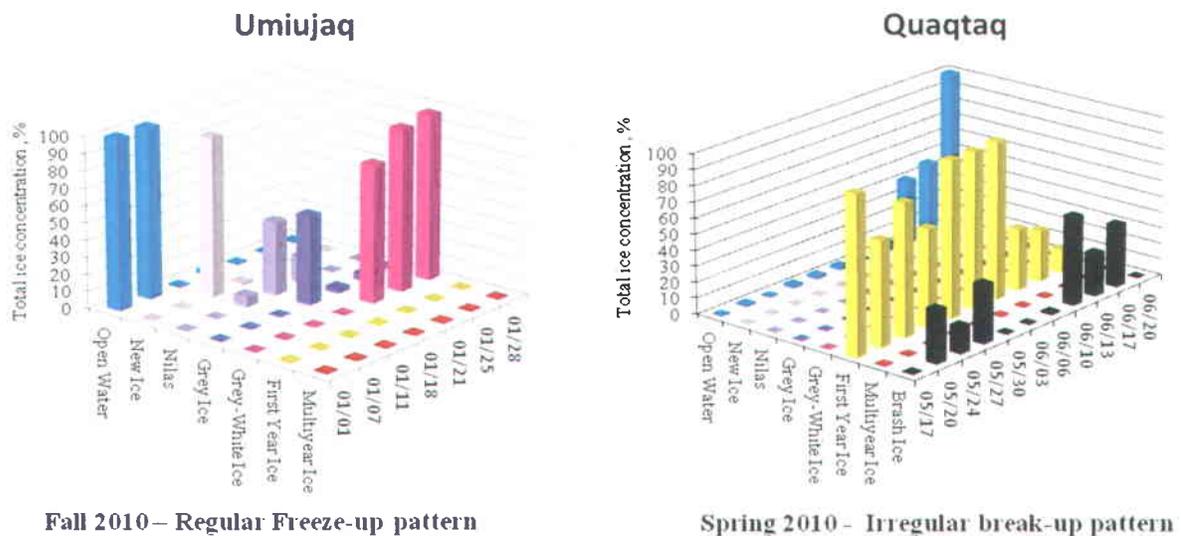


Figure 68 : Ice concentration per type for the 1km buffer in Umiujaq (left) and Quaqtq (right).

We can also deduce from the data that the environmental conditions (tides, winds) are more stable in Umiujaq than in Quaqtq, which is affected by stronger climatic and oceanic variability, due to the proximity of the Hudson Strait.

5.3 Validation and limitations

Two validation approaches were used. The first method was to compare ground photos at the infrastructures with the results of the classification to assess the accuracy of the concentration estimation in the 100m buffer. Given the fact that our photos are oblique and cannot be georeferenced, the concentration on these pictures was characterized as complete, partial or absent. From this validation, we have obtained an accuracy of 75% and the remaining 25%

constantly occurred to be an overestimation of the concentration in the RADARSAT-2 maps. This overestimation is mainly linked to the high backscatter of the foreshore causing this region to be segmented as ice.

The second method aimed at comparing georeferenced air photos with RADARSAT-2 maps to assess the accuracy of the labelling process. One set of air photos was acquired in each village and their approximate coverage was estimated to make the comparison possible. Considering the air photos are oblique and that their spatial extent has been estimated, it is impossible to assess the ice type regions extent accuracy. Then, the number and the labels of ice classes on map were compared with what is observable on air photos. The RADARSAT-2 maps, when compared with air photo sets, shown an accuracy of 78% in Umiujaq (Freeze-up) and 94% in Quaqtac (Break-up). The lower accuracy during the freeze-up period could be explained by the greater homogeneity in backscatter values through the freezing process.

The segmentation algorithm provided accurate delineation of ice floes for most of the scenes except for unstable periods where we observed a breakup in the ice cover combined with strong winds, like on December 20th 2009 in Quaqtac (Figure 69). The segmentation process is complicated by the greater signal heterogeneity brought by the finer resolution. The resolution being higher, more finer elements with various backscattering behaviour will interact with the signal meaning that statistically, the backscatter within a distinct ice floe will be more spread and variable in fine (8m) and ultra-fine (3m) than it would be within the same floe observed on a ScanSAR image. Another potential source of error is that the segmentation is done on RADARSAT-2 images prior to orthorectification, which may cause interference in the statistical approach used to determine regions.

Finally, planning image acquisitions is a critical part of the project. However, it is hard to predict the exact period when the ice will start to form or to break. We were able to obtain a good temporal frequency (3-4 days) but in some occasions, we missed the start or the end of the process. Alternative sources of large scale data, such as MODIS (250m) can help filling the voids.

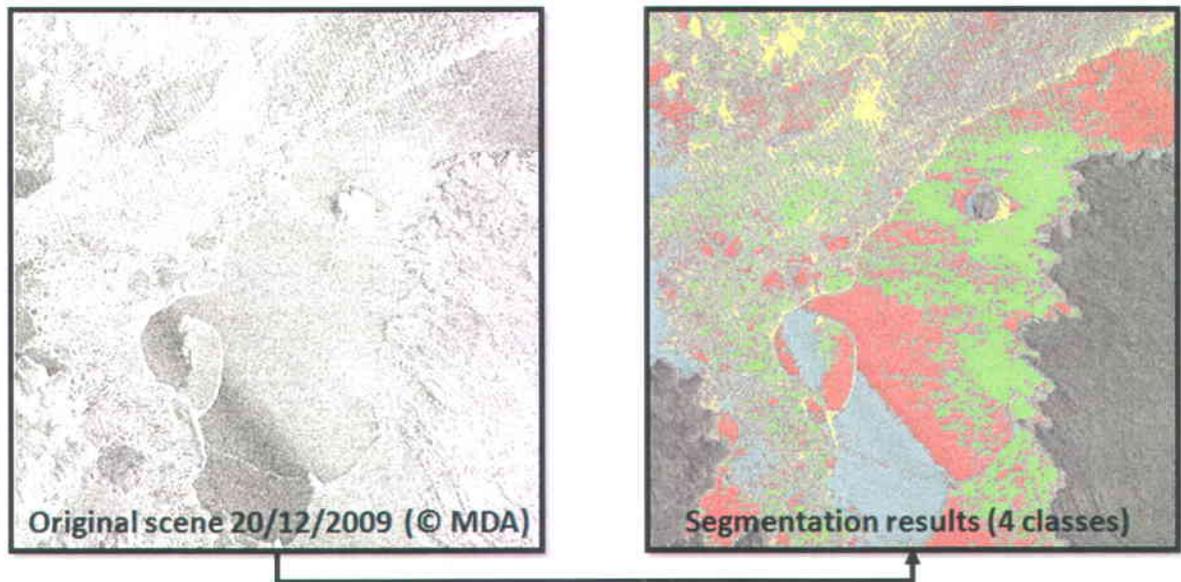


Figure 69 : Effects of wind on radar image segmentation.

6. CONCLUSION

RADARSAT-2 high resolution data, combined with the MIRGS algorithm (Qin *et al.*, 2010), shows classification results useful to follow the evolution, surface concentration and types of arctic sea ice when strong winds are not present. Such results, combined with other data like meteorological data may be of great help for structure engineers and managers, navigators and hunters. Finer elements being recognizable, ice mapping at fine scale provides interesting tools to evaluate the threat posed by ice on a marine infrastructure.

7. ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the project "Climate Change and Marine Infrastructures in Nunavik – Impacts and Adaptation" driven by Transports Québec.



RÉFÉRENCES

- Antonov J.I., Locarnini R.A., Boyer T.P., Mishonov A.V. & Garcia H.E. (2005) *World Ocean Atlas 2005, Volume 2 : Salinity*. US Government Printing Office, Washington, D.C.
- Assur A. (1960) *Composition of sea ice and its tensile strength*. Wilmette, Illinois
- Barber D.G., Yackel J.J. & Hanesiak J.M. (2001) Sea Ice, RADARSAT-1 and Arctic Climate Processes : A Review and Update. *Canadian Journal of Remote Sensing* 27(1):10.
- Caloz R. & Collet C. (2001) *Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy. 386 p
- Campbell J.B. (2007) *Introduction to Remote Sensing*. Guilford, New York, 4th. 626 p
- Canadian Council of Professional Engineers (2008) *Adapting to climate change - Canada's first national assessment of public infrastructure*. Engineers Canada, Ottawa
- Canadian Ice Service (2005) *MANICE - Manual of Standard Procedures for Observing and Reporting Ice Conditions*. Government of Canada, Ottawa
- Carsey F.D., Barry R. & Weeks W. (1992) Introduction. *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, (Geophysical monograph: 68), Agu (Édit.) American Geophysical Union. p 462.
- Clausi D.A., Qin A.K., Chowdhury M.S., Yu P. & Maillard P. (2010) MAGIC: MAp-guided ice classification system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 36(SUPPL.).
- Clerc C., Breton-Honeyman K., Bleau S., Gagnon M. & Tremblay M. (2011) Étude du comportement des glaces de mer et d'eau douce au voisinage des infrastructures maritimes du Nunavik - Connaissances locales et point de vue de la communauté. Rapport final sur les ateliers de savoir traditionnel de Kuujuaq, Quaqaq et Umiujaq. (Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau, Terre et Environnement, Québec).
- Cristianini N. & Shawe-Taylor J. (2000) *An introduction on support vector machines for pattern recognition and other kernel based learning methods*. Cambridge University Press.
- De Abreu R., Yackel J., Barber D. & Arnett M. (2001) Operational satellite sensing of Arctic first-year sea ice melt. *Canadian Journal of Remote Sensing* 27(5):487-501.
- Drinkwater M.R. & Crocker G.B. (1988) *Modelling changes in the dielectric and scattering properties of young snow-covered sea ice at GHz frequencies*. International Glaciological Society, Cambridge, ROYAUME-UNI
- Gauthier Y., Weber F., Savary S., Jasek M., Paquet L-M. & Bernier M. (2006) A combined classification scheme to characterise river ice from SAR data. in *European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL)*, Porto (Portugal).
- Gançarski P. (2009) Cours 4 - Classification et apprentissages - 2^{ème} volet : Très haute résolution spatiale et approches basées-régions. École d'été du GDR Magis, 7-11 Septembre 2009, Aussois, France
- Geldsetzer T. & Yackel J.J. (2009) Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35(1):73-84.

- Gherboudj I. (2008) Modélisation électromagnétique de la rétrodiffusion de la glace de rivière. Thèse pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, 155 p.
- Gloersen P., Campbell W.J., Cavalieri D.J., Comiso J.C., Parkinson C.L. & Zwally H.J. (1992) Arctic and Antarctic sea ice, 1978-1987 : Satellite passive-microwave observations and analysis. *NASA SP-511*.
- Haralick R.M., Shanmugam K. & Dinstein I.H. (1973) Textural Features for Image Classification. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 3(6):610-621.
- Heygster G. (2011) Communication électronique. Bremen, Allemagne.
- Kongoli C., Boukabara S.A., Banghua Y., Weng F. & Ferraro R. (2011) A New Sea-Ice Concentration Algorithm Based on Microwave Surface Emissivities Application to AMSU Measurements. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 49(1):175-189.
- Kurskaya A.A. (1973) COSMOS-243 measurements over Greenland Ice. Édit Nasa. Washington, D.C.
- Johnston M., Frederking R. & Timco G. (2003) Changes of First-year Ice and Old Ice during Summer Melt - Final Report, Conseil National de Recherche du Canada, Ottawa, 55 p.
- Lopes A., Touzi R. & Nezry E. (1990) Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 28(6):992-1000.
- Maaß N. & Kaleschke L. (2010) Improving passive microwave sea ice concentration algorithms for coastal areas: applications to the Baltic Sea. *Tellus A* 62(4):393-410.
- Markus T. & Cavalieri D.J. (2000) An enhancement of the NASA Team Sea Ice Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38:1387-1398.
- Mermoz S. (2010) *Contribution de la polarimétrie radar pour l'analyse de la glace de rivière*. Ph.D. (INRS-ETE, Québec). 194 p
- Meteorological Service of Canada (1990) SAR Ice interpretation guide. Environment Canada, Ottawa.
- Mountrakis G., Im J. & Ogole C. (2011) Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66(3):247-259.
- Newmann G. & Pierson Jr. W.J. (1966) *Principles of physical oceanography*. Englewood Cliffs, New Jersey
- Ochilov S. & Clausi D. (2010) Automated Classification of Operational SAR Sea Ice Images. *Proceedings of the 2010 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*. IEEE Computer Society, p 40-46.
- Onstott R., Shuchman, R. (2005) SAR Measurements of Sea Ice. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Christopher R. Jackson Jra (Édit.) Commerce Department, NOAA. p 474.
- Parkinson C.L., Comiso J.C., Zwally H.J., Cavalieri D.J., Gloersen P. & Campbell W.J. (1987) Arctic Sea Ice, 1973-1976 : Satellite passive microwave observations. Édit Nasa Washington, D.C.).
- Power D., Partington K. & Walker N. (2011) Synthetic aperture radar based ice and iceberg monitoring in support of tactical operations. *21st International Conference on Port and Ocean Engineering*. (Montreal, Quebec, July 10-14 2011).

- Qin A.K. & Claudi D.A. (2010) Multivariate Image Segmentation Using Semantic Region Growing With Adaptive Edge Penalty. *Image Processing, IEEE Transactions on* 19(8):2157-2170.
- Saucier F.J., Senneville S., Prinsenber S., Roy F., Smith G., Gachon P., Caya D. & Laprise R. (2004) Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. *Climate Dynamics* 23(3):303-326.
- Service canadien des glaces (2005) MANICE : Manuel des normes d'observation des glaces. Gouvernement du Canada, 9^{ème} édition. 115 pages.
- Sigelle M. & Tupin F. (1999) Champs de Markov en Traitement d'Image. École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France.
- Toutin T. & Chénier R. (2009) 3D Radargrammetric Modelling of RADARSAT-2 Ultrafine mode: Preliminary results of the geometric calibration. *IEEE Letters on Geosciences and Remote Sensing* 6(3).
- Tso B. & Mather P.M. (2001) *Classification methods for remotely sensed data*. Taylor & Francis, New York, 1st. 332 p
- Tucker W.B., Perovich D.K., Gow A.J., Weeks W. & Drinkwater M.R. (1992) Physical properties of sea ice relevant to remote sensing. *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, (Geophysical monograph: 68), Agu (Édit.) American Geophysical Union. p 462.
- Ulaby F.T., Moore R.K. & Fung A.K. (1986) *Microwave Remote Sensing - Active and Passive*. Addison-Wesley
- Vincent L. & Soille P. (1991) Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 13(6):583-598.
- World Meteorological Organization (1989) WMO Sea Ice Nomenclature. (World Meteorological Organization, Geneva).
- Yu P. (2009) *Segmentation of RADARSAT-2 Dual-Polarization Sea Ice Imagery*. Master of applied science in systems design engineering (University of Waterloo, Waterloo). 91 p
- Yu P. & Claudi D.A. (2007) SAR Sea-Ice Image Analysis Based on Iterative Region Growing Using Semantics. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 45(12):3919-3931.

