TRAITEMENT ET ANALYSE D'IMAGES RADARSAT-1 DE L'ARCHIPEL DE MELCHIOR DANS LE CADRE DE LA MISSION ANTARCTIQUE DU SEDNA IV

Rapport technique final

Présenté à L'Agence Spatiale Canadienne

> Par Monique Bernier Yves Gauthier Ali El Battay

INRS-ETE

Rapport de recherche No. R-908

Le 30 janvier 2007

ISBN: 2-89146-532-6

TABLE DES MATIÈRES

Tab	e des mati	ères	iii	
List	Liste des tableauxiv			
List	Liste des figures			
1.	Contexte		1	
2.	Objectif d	lu présent contrat	1	
3.	Livrables		1	
4.	Zone d'intérêt2			
5.	Descriptio	on des images RADARSAT-1	3	
6.	Caractéris	stiques de la glace de mer	4	
7.	Télédétec	tion de la glace de mer à l'aide du radar en bande C	5	
8.	Méthodol	logie	7	
9.	Résultats		10	
	9.1 Con	ditions météorologiques	10	
	9.2 Imag	ge de 1997	. 14	
	9.3 Imag	ges de 1998	16	
	9.4 Imag	ges de 2000	20	
	9.5 Imag	ges de 2001	29	
	9.6 Imag	ges de 2004	31	
	9.7 Imag	ges de 2006	42	
	9.8 Calc	cul des superficies	47	
10.	Conclu	sion et recommandations	50	
11.	Référei	nces :	51	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Liste des images RADARSAT-1	3
Tableau 2 :	Température mensuelle moyenne historique à la station météorologique de Palmer (Île Anvers)1	1
Tableau 3 :	Température de l'air et processus habituel dominant de la glace pour la saison1	1
Tableau 4 :	Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT-14	8

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Localisation de la zone d'intérêt. Le secteur d'analyse commun à toutes les images (en pointillés) est de 53km par 57km
Figure 2 ·	Schéma général de la méthodologie appliquée
Figure 3 :	Températures journalières enregistrées à la station Palmer en 2000. Les points correspondent aux dates d'acquisition des images RADARSAT
Figure 4 :	Températures journalières enregistrées à la station Palmer en 2004. Les points correspondent aux dates d'acquisition des images RADARSAT
Figure 5 :	Comparaison des températures journalières moyennes enregistrées à la station Palmer en 2000 et 2004.
Figure 6 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 6 mars 1997, à partir de données SSM/I
Figure 7 :	Extrait de l'image RADARSAT du 6 mars 1997
Figure 8 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 6 mars 1997
Figure 9 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 19 mars 1998, à partir de données SSM/I
Figure 10 :	Extrait de l'image du 19 mars 1998 (archipel de Melchior)
Figure 11 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 19 mars 1998
Figure 12 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 29 mars 1998, à partir de données SSM/I
Figure 13 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 29 mars 1998
Figure 14 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 11 mai 2000, à partir de données SSM/I
Figure 15 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 11 mai 2000
Figure 16 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 13 septembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de http://nsidc.org/data/seaice/
Figure 17 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 13 septembre 2000
Figure 18 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 15 septembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de http://nsidc.org/data/seaice/24
Figure 19 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 15 septembre 2000
Figure 20 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 16 octobre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de http://nsidc.org/data/seaice/25
Figure 21 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 16 octobre 2000
Figure 22 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 2 novembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de http://nsidc.org/data/seaice/27
Figure 23 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 2 novembre 2000
Figure 24 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 9 novembre 2000, à partir de données SSM/I
Figure 25 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 9 novembre 2000

Figure 26 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 9 décembre 2001, à partir de données SSM/I
Figure 27 :	Extrait de l'image RADARSAT (texture) du 9 décembre 2001
Figure 28 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 9 décembre 2001
Figure 29 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 10 octobre 2004, à partir de données SSM/I
Figure 30 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 10 octobre 2004
Figure 31 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 19 octobre 2004, à partir de données SSM/I
Figure 32 :	Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA (résolution de 500m). Période couvrant le 19 octobre 2004
Figure 33 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 19 octobre 2004
Figure 34 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 3 novembre 2004, à partir de données SSM/I
Figure 35 :	Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 3 novembre 2004
Figure 36 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 3 novembre 2004 36
Figure 37 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antarctique le 12 novembre 2004, à partir de données SSM/I
Figure 38 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 12 novembre 2004
Figure 39 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 27 novembre 2004, à partir de données SSM/L.
Figure 40 :	Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 27 novembre 2004.
Figure 41 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 27 novembre 2004
Figure 42 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 23 décembre 2004, à partir de données SSM/I
Figure 43 :	Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 23 décembre 2004
Figure 44 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 23 décembre 2004
Figure 45 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 2 août 2006, à partir de données SSM/I
Figure 46 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 2 août 2006
Figure 47 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 5 août 2006, à partir de données SSM/I 45
Figure 48 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 5 août 2006
Figure 49 :	Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 8 août 2006, à partir de données SSM/I
Figure 50 ·	Composite 8 jours d'images MODIS-AOUA. Période couvrant le 8 août 2006 46
Figure 51 :	Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 8 août 2006

Figure 52 :	Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT et groupées par	
	années	49
Figure 53 :	Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT et groupées par	
	saisons	49

1. CONTEXTE

Dans le cadre du volet scientifique de la mission Antarctique du voilier SEDNA IV, l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER, Québec, Canada) et ses partenaires mènent une étude temporelle et latitudinale des effets combinés du rayonnement ultraviolet B, de l'augmentation de CO₂ et du réchauffement climatique sur la pompe biologique. En marge de cette expérience, des images RADARSAT-1 d'archives (1997-2004) ont été récupérées et de nouvelles images ont été acquises en août 2006 afin de mesurer le niveau d'englacement de la région de l'Archipel de Melchior (64°24'S, 62°52'W) pour éventuellement le comparer aux informations biologiques disponibles.

2. OBJECTIF

Cette étude a pour but de compléter le traitement et l'analyse des 19 images RADARSAT-1 précitées afin d'y cartographier la couverture de glace de mer, en réponse aux besoins exprimés par l'Agence Spatiale Canadienne et l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski.

3. LIVRABLES

Ce rapport technique est accompagné d'un DVD contenant les images traitées, et les cartes du couvert de glace de l'Archipel de Melchior, ainsi que le pourcentage de couverture de la glace, pour chacune des images RADARSAT-1.

4. ZONE D'INTÉRÊT

La zone d'intérêt est située sur l'ouest de la péninsule de l'Antarctique (Figure 1), dans le secteur des îles de Melchior (64°24'S, 62°52'W).



Figure 1: Localisation de la zone d'intérêt. Le secteur d'analyse commun à toutes les images (en pointillés) est de 53km par 57km.

5. DESCRIPTION DES IMAGES RADARSAT-1

19 images RADARSAT-1 en mode Standard (résolution spatiale de 25m) ont été fournies pour cette étude (Tableau 1). Elles couvrent partiellement les années 1997 à 2006 et se concentrent principalement sur la période printanière de l'hémisphère sud. Les années 2000 et 2004 sont mieux représentées, avec 6 images chacune. Les angles d'incidence varient de 24° à 49° sur l'ensemble des images mais la majorité (13 images) demeure dans la gamme 41-49°.

Date d'acquisition	Faisceau	Angles	Orbite	Processus habituel
		d'incidence		dominant de la glace de
				mer pour cette période
6 mars 1997	S2	24-31°	Ascendante	Absence
19 mars 1998	S2	24-31°	Ascendante	Absence
29 mars 1998	S3	30-37°	Ascendante	Absence
11 mai 2000	S7	45-49°	Ascendante	Formation
13 septembre 2000	S 6	41-46°	Descendante	Croissance
15 septembre 2000	S 6	41-46°	Ascendante	Croissance
16 octobre 2000	S 6	41-46°	Ascendante	Désintégration
2 novembre 2000	S 6	41-46°	Ascendante	Désintégration
9 novembre 2000	S 6	41-46°	Ascendante	Désintégration
9 décembre 2001	S 3	30-37°	Descendante	Absence
10 octobre 2004	S 6	41-46°	Descendante	Désintégration
19 octobre 2004	S 6	41-46°	Ascendante	Désintégration
3 novembre 2004	S 6	41-46°	Descendante	Désintégration
12 novembre 2004	S 6	41-46°	Ascendante	Désintégration
27 novembre 2004	S 6	41-46°	Descendante	Désintégration
23 décembre 2004	S 6	41-46°	Ascendante	Absence
2 août 2006	S 3	30-37°	Ascendante	Croissance
5 août 2006	S 1	20-27°	Descendante	Croissance
8 août 2006	S 7	45-49°	Ascendante	Croissance

Tableau 1 : Liste des images RADARSAT-1

Chaque image couvre une zone de 100km par 100km. Toutefois, la zone commune à toutes les images, sur laquelle l'étude a été effectuée, est de 53km x 57km (Figure 1).

6. CARACTÉRISTIQUES DE LA GLACE DE MER

La salinité de l'eau de mer et la constante turbulence de l'océan déterminent grandement les caractéristiques de la glace de mer. Tout d'abord, le processus est plus lent que pour l'eau douce. En effet, la salinité de l'eau de mer entraîne l'augmentation de sa densité à l'approche du point de congélation. Ainsi, l'eau très froide descend souvent en profondeur avant de geler. De plus, l'eau de mer arctique gèle à une température plus basse (-1.8°C) et la masse d'eau à refroidir est plus importante.

Lorsque l'eau de mer commence à geler, des cristaux de glace appelés frasil se forment. En remontant à la surface, ils se fusionnent en plaques. En eaux calmes, les cristaux fusionnés forment une mince couche discontinue à l'aspect huileux (sorbet ou *grease ice*), qui évolue par la suite en une mince couche continue (glace vitrée ou *nilas*) à l'aspect d'abord sombre, puis s'éclaircissant avec l'épaisseur. Ballottés par les courants ou les vents légers, les plaques de glace vitrée peuvent entrer en collision et se superposer. Éventuellement, la glace devient plus épaisse et plus stable. Le dessous de ce type de glace est lisse. En eaux plus agitées, les cristaux de frasil s'accumulent d'abord à la surface en plaques circulaires (*pancakes*). La périphérie des ces plaques présente des crêtes caractéristiques, en raison des nombreuses collisions. Si le mouvement de l'eau est suffisant, les plaques peuvent même se superposer. En se fusionnant, les *pancakes* forment un couvert continu. S'il est suffisamment épais, le mouvement de l'eau peut créer des fractures et des crêtes de pression. Éventuellement, le couvert devient solide et cohérent, mais avec un dessous rugueux. Une fois formée, la glace de mer continue de s'épaissir tout au long de l'hiver.

Parce que le sel ne gel pas, les cristaux de glace le rejettent dans l'eau. Les particules de sel accumulées forment alors une saumure liquide qui demeure parfois emprisonnée dans des poches entre les cristaux de glace. Avec le temps, cette saumure finira par migrer jusqu'à l'eau.

La glace de mer est généralement classifiée selon son stade de développement, relié à son âge (glace de première année, glace de plusieurs années) et à son épaisseur (glace nouvelle (<10cm), jeune glace (grise 10-15cm, blanchâtre 15-30cm), glace de première année (>30cm).

La géographie de l'Antarctique (terre entourée d'eau) favorise le libre mouvement de la glace. Celle-ci est donc plus souvent déformée par les forts courants. Elle est toutefois moins soumise à des pressions internes que la glace arctique (eau entourée de terre) et présente alors moins de crêtes. Et puisque la glace peut migrer vers le nord (eau plus chaude) sans entrave, elle fond complètement en été. On retrouve donc en Antarctique, presque uniquement de la glace de première année. Par le fait même, le couvert de glace antarctique atteint typiquement des épaisseurs limitées de 1 à 2m. Par contre, l'humidité disponible sur l'océan entraîne des chutes de neige plus abondantes.

Source: NSIDC (NOAA), All about Sea Ice, http://nsidc.org/seaice/index.html

7. TÉLÉDÉTECTION DE LA GLACE DE MER À L'AIDE DU RADAR EN BANDE C

Au cours des 20 dernières années, de nombreux chercheurs ont étudié le potentiel du radar en bande C pour la détection et la caractérisation de la glace de mer, particulièrement à l'aide des données de SIR-C, ERS-1 et 2, RADARSAT-1 et Envisat-ASAR. Grâce aux connaissances acquises par ces études, les données radar satellitaires sont maintenant intégrées dans les systèmes opérationnels de suivi de la glace de mer de nombreux pays (Canada, États-Unis, Europe du Nord) [1]. Toutefois, dans tous les cas, l'extraction de l'information des images radar passe encore par une interprétation visuelle d'analystes qualifiés. En effet, l'interprétation des images radar pour détecter et classifier la glace de mer est une tâche complexe. D'abord, parce que les zones d'eau libre, tout comme celles recouvertes de glace, présentent des signatures variables spatialement et temporellement. Dans le cas de l'eau libre, la rétrodiffusion du signal est influencée par les conditions locales de vent. Pour atténuer ce phénomène, on favorise l'acquisition d'images à de plus forts angles d'incidence (>40°) [2]. Dans le cas de la glace, la réflectivité du milieu est fortement influencée par son humidité et sa salinité, alors que la

diffusion est reliée à la rugosité de l'interface, à l'hétérogénéité du milieu et à ses propriétés diélectriques [3]. Ces dernières sont fortement reliées à la distribution de la saumure liquide et des gaz dans le couvert de glace. Dans le cas de l'Archipel de Melchior, la glace présente sera de première année. Donc relativement saline et avec de nombreuses bulles d'air, ce qui limite la pénétration de l'onde radar à environ 10cm, et même à 5cm en présence de frasil. Ainsi, le mécanisme dominant de rétrodiffusion provient de l'interface saline neige/glace [4]. Pour une glace lisse, le signal sera réfléchi majoritairement dans la direction opposée à celle de l'antenne du radar et aura une teinte sombre sur l'image, souvent similaire à celle de l'eau calme. Pour une glace rugueuse, la rétrodiffusion sera plus forte et la teinte sera donc plus claire [5].

Le couvert de neige joue lui aussi, un rôle primordial. Durant l'hiver, le phénomène du forçage atmosphérique entraîne la création de larges grains à l'interface neige/glace et ceux-ci augmentent la rétrodiffusion [6]. De plus, lorsque le poids de la neige est suffisant, elle enfonce la glace sous le niveau de la mer et l'eau qui s'infiltre crée une couche de forte salinité à l'interface neige/glace, ce qui augmente aussi la rétrodiffusion [7]. Enfin, en période de fonte, le signal radar est soit absorbé par la neige humide, soit rétrodiffusé si sa surface est rugueuse [7]. Dans les deux cas, l'information provenant de la glace est masquée. Enfin, on note également dans la littérature, l'importance du givre (frost flowers), particulièrement lorsqu'il se dépose sur une glace nouvellement formée. Sa forte salinité augmente le contraste diélectrique à la surface et par conséquent, la rétrodiffusion [8].

Ainsi, la rétrodiffusion globale d'un couvert de glace dépend du type de glace, de sa concentration, de la rugosité de la surface, de la neige en surface et du niveau de la fonte. Et elle dépend aussi de l'angle d'incidence du signal radar. Ainsi, la plupart des études s'entendent sur les problèmes majeurs d'interprétation des images, soient : une ambiguïté entre la glace et l'eau libre à de faibles angles d'incidence ou en présence de forts vents, une confusion entre la glace mince et l'eau libre, l'effet masquant de la neige en période de fonte et la difficulté de discriminer les types de glace de première année.

Devant ces problèmes, les analystes font appel à d'autres sources d'informations pour soutenir leur interprétation des images radar, incluant les données de micro-ondes passives (ex : SSM/I (DMSP)) et les données optiques (ex : AVHRR (NOAA)) à plus basse résolution (1 à 25km). Parallèlement, les chercheurs explorent et développent des approches basées sur l'utilisation de la segmentation [9, 5], l'ajout de la texture des images [3, 10] et l'emploi de la polarimétrie [11, 12]. Bien que certaines méthodes s'avèrent efficaces, leur mise en place est encore complexe et ne peut être envisagée dans le cadre d'un échéancier restreint.

8. MÉTHODOLOGIE

À la lumière des connaissances actuelles et des méthodes existantes, nous avons opté pour une méthodologie qui combine la classification non-supervisée, l'emploi de la texture et l'interprétation visuelle assistée par les données de micro-ondes passives et validées grâce à des données optiques (Figure 2). Les images ont d'abord été traitées pour transformer les niveaux de gris en coefficients de rétrodiffusion (puissances). Une correction géométrique sommaire a ensuite été effectuée afin de co-localiser les images. Les données géoréférencées utilisées proviennent de la base de données gratuite : *Antarctic Digital Database*, du Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), disponibles sur le site Internet : <u>http://www.add.scar.org/</u>. La projection cartographique de ces données est la Stéréographique Polaire, Ellipsoïde E012 : WGS 84, à l'échelle du 1 :250 000. La précision de ces données demeure relative et certains décalages peuvent subsister entre les images. Néanmoins, ce travail a permis de découper les images sur la zone commune à l'ensemble, soit le quadrilatère : 62°23'S, 63°57'W ; 61°54'S, 64°22'W ; 63°24'S, 64°11'W ; 62°55'S, 64°35'W. Les données vectorielles ont aussi été utilisées pour créer un masque de la portion terrestre.

Dans l'étape suivante, des images de texture ont été crées à partir des images de rétrodiffusion. Dans la littérature, on recommande d'utiliser les paramètres de *contraste*, d'*entropie* et de *corrélation*, basés sur la matrice de co-occurrence des niveaux de gris

(GLCM). Après une série de tests et selon la qualité visuelle des résultats, nous avons opté pour les trois paramètres suivants : *dissimilitude* (même groupe statistique que *contraste*), $2^{\grave{e}me}$ moment angulaire (même groupe statistique qu'*entropie*) et moyenne (même groupe statistique que *corrélation*). Nous avons par la suite procédé à une classification non-supervisée avec l'algorithme Fuzzy K-Means.



Figure 2 : Schéma général de la méthodologie appliquée

Le résultat de cette classification présentait certains artéfacts indésirables reliés à l'emploi des paramètres de *dissimilitude* et d'*entropie*. Ce phénomène est dû au fait que dans notre cas, l'algorithme de classification est appliqué sur chaque pixel et non sur les objets d'une

image préalablement segmentée. Nous n'avons donc conservé que le paramètre de *moyenne* de la matrice de co-occurrence, qui permettait de conserver le maximum d'information. Il est défini comme :

$$Moyenne_i = SOMME (i, j=0, N-1)(i*P(i, j))$$
(1)

P(i,j) étant la matrice de co-occurrence normalisée pour que SOMME (i,j=0,N-1) (P(i,j))=1.

Le paramètre a été appliqué sur une fenêtre non directionnelle de 7 x 7. Nous avons par la suite repris la classification non-supervisée Fuzzy K-means, en masquant la terre et en imposant 16 classes. Ce nombre de classe permettait par la suite une plus grande latitude dans l'interprétation et le regroupement des classes. Un filtre modal 3x3 a finalement été appliqué au résultat de la classification, tout en préservant les étroites formes rectilignes classifiées. Pour interpréter les 16 classes et discriminer l'eau de la glace, nous avons utilisé notre connaissance des mécanismes de rétrodiffusion ainsi que les données de concentration de glace fournies par les capteurs de micro-ondes passives SSM/I (DMSP) et AMSR-E (AQUA).

Le premier produit (DMSP SSM/I Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations) est un ensemble de cartes de concentration de glace produites à partir des données du capteur SSM/I du satellite DMSP. Elles ont une résolution spatiale de 25 km et proviennent du National Snow and ICE data Center (NSIDC) des États-unis (disponible gratuitement sur http://nsidc.org/data/seaice/). Le second produit (*Daily Updated AMSR-E Sea Ice Maps*) est un ensemble de cartes de concentration de glace du capteur AMSR-E du satellite AQUA. Elles ont une résolution plus fine de 12.5 km et proviennent du site de l'IUP-Université de Bremen, Allemagne (Disponibles gratuitement pour 2006 sur http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html). Le troisième produit (MODIS/AQUA Surface reflectance 8 day L3 global 500m SIN) provient du capteur MODIS du satellite AQUA. Il s'agit d'images composites de réflectances acquises sur 8 jours, à une résolution de 500m. Ces données sont disponibles gratuitement à partir du EOS Data Gateway du **NSIDC** (NASA), à l'adresse : http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/. Les données météorologiques de la station de recherche Palmer, située dans l'archipel (64° 40'S, 64° 03'W), ont également été utilisées lors de l'interprétation des classifications. Elles ont été obtenues sur le site du projet *Palmer Long-Term Ecological Research (LTER)* à l'adresse : http://pal.lternet.edu/data/study_catalog.php.

Une fois les classes regroupées selon la présence ou l'absence de glace, les superficies respectives ont été calculées.

9. RÉSULTATS

9.1 Conditions météorologiques

La présence ou l'absence de glace est bien entendu reliée aux conditions météorologiques. L'archipel de Melchior étant situé dans la péninsule de l'Antarctique (nord-ouest), il bénéficie du climat le plus doux du continent. Les plus hautes températures mensuelles moyennes (entre 0 et 3°C) sont observées de décembre à mars (Tableau 2). Les plus froides s'échelonnent de mai à octobre. Ainsi, parmi les 19 images RADARSAT acquises, une seule est acquise au début de la période hivernale (mai), trois sont acquises en milieu d'hiver (août), cinq en deuxième portion d'hiver (septembre-octobre), cinq au printemps (novembre), deux au début de la période estivale (décembre) et 3 à la fin de l'été (mars) (Tableau 3).

 Tableau 2 : Température mensuelle moyenne historique à la station météorologique de Palmer (Île

 Anvers). Tiré de: Baker, Karen S. "Palmer LTER: Palmer Station air temperature 1974 to 1996",

 http://www.nsf.gov/od/opp/antarct/ajus/nsf9828/9828html/g3.htm

Month	Average	Standard deviation
January	2.51	1.21
February	2.29	0.96
March	0.68	1.04
April	-1.33	1.08
May	-3.32	1.50
June	-5.23	2.22
July	-7.33	3.74
August	-7.76	3.21
September	-5.90	2.68
October	-3.25	2.18
November	-0.37	1.46
December	1.53	1.19

Tableau 3 : Température de l'air et processus habituel dominant de la glace pour la saison

Date d'acquisition de		Température [°C]	Processus habituel
l'image	Saison	Moyenne de la journée /	dominant de la glace de
1 mage		Moyenne du mois	mer pour cette période
11 mai 2000	Début hiver	0.8 / -2.1	Formation
2 août 2006	Milieu hiver	-2.6 / -5.7	Croissance
5 août 2006	Milieu hiver	-5.8 / -5.7	Croissance
8 août 2006	Milieu hiver	-7.3 / -5.7	Croissance
13 septembre 2000	2 ^{ème} moitié hiver	-4.7 / -6.8	Croissance
15 septembre 2000	2 ^{ème} moitié hiver	-2.1 / -6.8	Croissance
10 octobre 2004	2 ^{ème} moitié hiver	-8.5 / -4.2	Croissance
16 octobre 2000	2 ^{ème} moitié hiver	-2.2 / -1.4	Croissance
19 octobre 2004	2 ^{ème} moitié hiver	-6.8 / -4.2	Croissance
2 novembre 2000	Printemps	1.2 /3	Désintégration
3 novembre 2004	Printemps	-3.3 / 0.0	Désintégration
9 novembre 2000	Printemps	-1.3 / -0.3	Désintégration
12 novembre 2004	Printemps	1.6 / 0.0	Désintégration
27 novembre 2004	Printemps	-0.5 / 0.0	Désintégration
9 décembre 2001	Début été	nd /nd	Absence
23 décembre 2004	Début été	3.2 / 1.3	Absence
6 mars 1997	Fin été	0.9 / 0.5	Absence
19 mars 1998	Fin été	-0.7 / 1.0	Absence
29 mars 1998	Fin été	2.3 / 1.0	Absence

Si l'on compare les températures des tableaux 2 et 3, on constate que pour les 19 dates d'acquisition d'images (1997-2006), la moyenne du mois d'acquisition demeure à l'intérieur d'un écart-type de la moyenne historique (1974-1996) pour ce mois. Pour les deux années où l'on a une plus grande série d'images (2000 et 2004), les Figure 3 et Figure 4 présentent la température journalière moyenne. En 2000, les images de septembre devraient présenter la plus grande surface d'englacement puisque la température y est la plus basse de l'hiver et précède un réchauffement graduel. En 2004, le minimum est atteint en juillet et en août, mais la température demeure froide en septembre et octobre, ce qui devrait se traduire par une plus grande présence de glace. La Figure 5 illustre d'ailleurs ces températures plus froides de 2004.



Figure 3 : Températures journalières enregistrées à la station Palmer en 2000. Les points correspondent aux dates d'acquisition des images RADARSAT.



Figure 4 : Températures journalières enregistrées à la station Palmer en 2004. Les points correspondent aux dates d'acquisition des images RADARSAT.



Figure 5 : Comparaison des températures journalières moyennes enregistrées à la station Palmer en 2000 et 2004.

9.2 Image de 1997

Une seule image a été acquise en 1997, soit celle du 6 mars (fin d'été). La température moyenne y était autour du point de congélation. Comme le montre la carte de concentrations de glace de la Figure 6, il y a encore peu de glace autour du continent. Toutefois, le zoom sur la région d'étude montre certaines taches plus pâles autour des îles Brabant et Anvers, laissant supposer la présence d'un peu de glace dans le secteur. Il faut toutefois noter que ces cartes présentent aussi une certaine marge d'erreur et que ces taches pourraient être de fausses détections. Néanmoins, on s'attend à une prédominance d'eau libre dans le secteur. Dans ces conditions, l'image RADARSAT en mode S2 (faibles angles d'incidence) présente certaines difficultés d'interprétation puisque le vent augmente la rétrodiffusion de l'eau libre. Dans un cas, si la rétrodiffusion est forte mais que le patron de vent est visible sur l'image (vagues), on sait qu'on est en présence d'eau. Si la rétrodiffusion est forte mais qu'on ne distingue pas de patron de vent, c'est déjà plus ambigu. Et si le patron disparaît, laissant place à une rétrodiffusion faible, l'on fait face à deux interprétations possibles : 1) l'eau est libre mais calme (diffusion spéculaire), 2) on est en présence de glace nouvelle (sorbet / grease ice ou glace vitrée / nilas). Cette ambiguïté est présente sur l'extrait de l'image du 6 mars, présenté à la Figure 7 (archipel de Melchior). En effet, soit que les zones sombres sont abritées des vents par les îles et que l'eau y est plus calme, soit qu'il y ait présence de glace nouvelle, ou même une combinaison des deux. Dans ce cas, notre interprétation n'a pu être validée par d'autres types d'images. Conséquemment la classification de la Figure 8 est à prendre avec certaines réserves mais représente le maximum d'englacement possible.



Figure 6 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 6 mars 1997, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 7 : Extrait de l'image RADARSAT du 6 mars 1997.



Figure 8 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 6 mars 1997

9.3 Images de 1998

Lors de l'acquisition des images du 19 et 29 mars 1998 (modes S2 et S3), on retrouve pratiquement les mêmes conditions que sur l'image de 1997. En cette fin d'été, la température moyenne est de 1°C, soit près de la normale historique. On s'attend encore à une dominance de l'eau libre. Le 19 mars, l'image SSM/I (Figure 12) présente encore quelques faibles possibilités de glace dans le secteur. L'image RADARSAT présente les mêmes incertitudes que pour mars 1997 (Figure 10). Nous pouvons supposer la présence de glace nouvelle en certains endroits (faible rétrodiffusion). Par contre, il est impossible de classifier les blocs de glace à la dérive (forte rétrodiffusion) car ils ont la même signature que l'eau agitée. La classification est présentée à la Figure 11.



Figure 9 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 19 mars 1998, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 10 : Extrait de l'image du 19 mars 1998 (archipel de Melchior).



Figure 11 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 19 mars 1998.

Le 29 mars 1998, la température moyenne de l'air atteint 2.3°C. La carte des concentrations de glace de la Figure 12 est similaire aux précédentes et laisse présager peu de glace dans le secteur. L'image radar présente les mêmes conditions de rétrodiffusion que sur celle du 19 mars. Les zones cartographiées comme glace sur la Figure 13 se réfèrent à la présence possible de glace nouvelle puisque nous n'avons pas de données auxiliaires pour le valider.



Figure 12 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 29 mars 1998, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 13: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 29 mars 1998

9.4 Images de 2000

Pour 2000, 5 images RADARSAT sont disponibles. L'une en début d'hiver (11 mai) et les autres en milieu ou fin d'hiver (septembre à novembre). La température moyenne de mai 2000 (-2.1°C) est dans les normales historiques (-3.3°C). La carte des concentrations de glace de la Figure 14 témoigne d'une zone exempte de glace. Ce que confirme la cartographie RADARSAT de la Figure 15.



Figure 14 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 11 mai 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 15: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 11 mai 2000

Septembre est historiquement l'un des mois les plus froids de l'année et nous sommes donc en plein cœur de l'hiver. L'année 2000 ne fait pas exception en termes de moyenne mensuelle ou journalière. On s'attend donc à une couverture de glace importante. La carte de la Figure 16 montre bien que le continent entier est entouré de glace. Le zoom sur la zone d'intérêt montre toutefois que ce secteur de la péninsule demeure celui où de plus basses concentrations de glace sont estimées. Conséquemment, il y a possibilité de retrouver aussi des zones d'eau libre. La classification de l'image RADARSAT est présentée à la Figure 17.



Figure 16 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 13 septembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 17: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 13 septembre 2000

Deux jours plus tard, soit le 15 septembre 2000, la carte de la Figure 18 montre une certaine détérioration du couvert dans le secteur d'intérêt mais une banquise encore bien présente. Ce qui est confirmé par la classification de la Figure 19.



Figure 18 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 15 septembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 19 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 15 septembre 2000

Le 16 octobre 2000, la détérioration semble plus avancée entre la péninsule et les îles du secteur d'intérêt, même si le reste du continent est encore englacé (Figure 20). Le patron de vagues est partiellement visible sur l'image RADARSAT, on sait que l'eau libre occupe une bonne partie du secteur. La classification est présentée à la Figure 21.



Figure 20 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 16 octobre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 21 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 16 octobre 2000.

Le 2 novembre, la glace s'est retirée plus au sud (Figure 22). On s'attend donc à une dominance d'eau libre, telle que détecté sur la classification RADARSAT (Figure 23). Le 9 novembre, la situation a peu changée (Figure 24, Figure 25).



Figure 22 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 2 novembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 23: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 2 novembre 2000



Figure 24 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 9 novembre 2000, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 25: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 9 novembre 2000

9.5 Images de 2001

Une seule image est disponible pour 2001 et elle est du 9 décembre. La Figure 26 montre bien que la désintégration du couvert de glace est bien amorcée à cette date et qu'il ne reste vraisemblablement plus de glace dans l'archipel de Melchior. L'image RADARSAT (mode S3) viendra facilement confirmer ce fait puisque les patrons de vent sur l'eau y sont clairement visibles (Figure 27). La classification de l'image est présentée à la Figure 28.



Figure 26 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 9 décembre 2001, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 27 : Extrait de l'image RADARSAT (texture) du 9 décembre 2001.



Figure 28: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 9 décembre 2001.

9.6 Images de 2004

6 images RADARSAT ont été acquises en 2004. Tel que présenté en début de section, l'englacement du continent demeure maximal en octobre 2004. Toutefois, la région de l'archipel de Melchior est une fois de plus à la limite de la banquise. Selon la Figure 29, la concentration de glace y est faible le 10 octobre 2004 et les probabilités d'y retrouver de l'eau libre sont donc élevées. Selon la classification RADARSAT-1 de la Figure 30, la glace se concentre surtout dans les baies.



Figure 29 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 10 octobre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 30: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 10 octobre 2004

Le 19 octobre 2004, la désintégration du couvert de glace est amorcée et la Figure 31 montre des concentrations de glace à la baisse autour du continent. Pour l'archipel de Melchior, la situation semble similaire à la semaine précédente. Toutefois, pour le 19 octobre, nous disposons d'un outil supplémentaire pour confirmer notre interprétation. Une composition d'images MODIS/AQUA couvrant cette période (Figure 32) démontre la prédominance d'eau libre (en noir) et la présence de glace en désintégration (bleu) près

de l'île de Brabant et près de l'île d'Anvers. Ces deux couverts de glace étant reliés par un cordon à l'ouest. Ces éléments se retrouvent clairement dans la classification RADARSAT-1 (Figure 33), où l'on constate effectivement la désintégration du couvert de glace.



Figure 31 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 19 octobre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 32 : Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA (résolution de 500m). Période couvrant le 19 octobre 2004. Le contour des îles est en rouge. L'eau libre est en noir. La glace est en tons de bleu. Les nuages en blanc et gris-jaune.



Figure 33 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 19 octobre 2004

Au 3 novembre 2004, la Figure 34, indique une baisse constante de la concentration de glace dans la région d'étude. Ce qui est confirmé par la composite MODIS de la Figure 35, où entre les îles Brabant et Anvers, la glace n'est visible que dans la partie sud-est. Encore une fois, la classification RADARSAT (Figure 36) reproduit bien ces observations.



Figure 34 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 3 novembre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 35 : Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 3 novembre 2004.



Figure 36: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 3 novembre 2004

Le 12 novembre 2004, la carte de concentration de glaces de la Figure 37 semble indiquer dans le secteur d'étude, une migration de glaces provenant de la désintégration de la banquise. Toutefois, aucune image MODIS n'est disponible pour confirmer ces observations et la classification RADARSAT (Figure 38) ne montre pratiquement aucune trace de glace. La discordance des informations pourrait être reliée à des températures audessus du point de congélation ce jour là (moyenne de 1.6°C). S'il y a présence de neige

humide sur la glace, elle pourrait absorber le signal radar et entraîner une confusion avec l'eau libre.



Figure 37 : Concentrations de glace de mer sur l'Antarctique le 12 novembre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 38: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 12 novembre 2004

Le 27 novembre 2004, la Figure 39 montre clairement que le couvert de glace a été poussé sur la côte et que la région est de nouveau englacée. La composite MODIS montre toutefois plus d'eau libre (Figure 40). Cette composite est toutefois basée principalement sur les images des jours précédents. Elle pourrait ne pas être représentative des conditions qui évoluent d'une journée à l'autre. La classification RADARSAT-1 (Figure 41) est toutefois sans ambiguïté. Le couvert de glace est bien présent.



Figure 39 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 27 novembre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 40: Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 27 novembre 2004



Figure 41 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 27 novembre 2004

Un mois plus tard, la désintégration de la banquise est presque complétée (Figure 42) mais des glaces migrent encore vers le nord et risquent de passer par le site d'étude. La composite MODIS (Figure 43) confirme toutefois qu'entre les îles Brabant et Anvers, le secteur est libre de glace le 23 décembre 2004. Ce que confirme aussi la classification RADARSAT-1 (Figure 44).



Figure 42 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 23 décembre 2004, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://nsidc.org/data/seaice/</u>.



Figure 43: Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 23 décembre 2004



Figure 44: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 23 décembre 2004

9.7 Images de 2006

En août 2006, 3 images RADARSAT ont été acquises en 1 semaine. Pour leur interprétation, nous disposons de cartes de concentrations de glace plus précises provenant du capteur AMSR-E. Le 2 août, la Figure 45 indique un englacement complet du continent, sauf dans le secteur d'étude. Ces observations sont confirmées par la classification RADARSAT (Figure 46).



Figure 45 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 2 août 2006, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html</u>.



Figure 46: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 2 août 2006

Le 5 août, la situation a peu évolué, tel que le démontrent la Figure 47 et la Figure 48. Toutefois, le 8 août, on constate l'apparition de glace près de l'île Brabant (Figure 49). Une composite MODIS est disponible pour cette période mais la couverture nuageuse ne permet pas une interprétation concluante (Figure 50). La classification RADARSAT-1 concorde toutefois avec une plus forte présence de glace près de l'île Brabant (Figure 51).



Figure 47 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 5 août 2006, à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de <u>http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html</u>.



Figure 48: Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 5 août 2006.



255075100Figure 49 : Concentrations de glace de mer sur l'Antactique le 8 août 2006,
à partir de données SSM/I. Figure originale tirée de

http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html.



Figure 50 : Composite 8 jours d'images MODIS-AQUA. Période couvrant le 8 août 2006.



Figure 51 : Carte RADARSAT de l'englacement autour de l'archipel de Melchior, le 8 août 2006

9.8 Calcul des superficies

Pour les images RADARSAT de 2001, 2004 et 2006, les informations disponibles pour l'interprétation et la validation nous permettent de conclure à la fiabilité des cartes de glace produites et l'évaluation des superficies englacées pour ces dates. Par contre, pour les images de 1997, 1998 et 2000, le manque d'informations précises pour établir les conditions en mer ne permettent pas de valider notre interprétation, particulièrement

lorsqu'il y a confusion causée par le vent sur l'eau libre en début d'hiver. Il peut donc y avoir dans ce cas, une surestimation des superficies englacées.

Date de l'image	Superficie englacée (km ²)	% (sur 1985 km²)
1997-03-06	325,4	16,4
1998-03-19	544,4	27,4
1998-03-29	59,5	3,0
2000-05-11	215,5	10,9
2000-09-13	1564,4	78,8
2000-09-15	1401,1	70,6
2000-10-16	273,4	13,8
2000-11-02	49,9	2,5
2000-11-09	105,9	5,3
2001-12-09	15,6	0,8
2004-10-10	205,2	10,3
2004-10-19	632,0	31,8
2004-11-03	208,2	10,5
2004-11-12	83,4	4,2
2004-11-27	1599,0	80,6
2004-12-23	166,1	8,5
2006-08-02	52,0	2,6
2006-08-05	244,3	12,3
2006-08-08	485,7	24,5

Tableau 4: Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT-1. En vert, l'interprétation des images a été validée à partir de données optiques. En jaune, l'interprétation n'a pu être validée à partir de données précises.



Superficie englacée

Figure 52: Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT et groupées par années



Superficie englacée Données groupées par saisons

Figure 53 : Superficies englacées calculées à partir des images RADARSAT et groupées par saisons

10. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Malgré les avancées scientifiques faites dans l'utilisation des images radar pour la classification de la glace de mer, il n'existe actuellement aucune méthode automatique de détection qui ne nécessite l'implication d'un analyste expérimenté. Donc, s'il est clair que les images RADARSAT-1 peuvent apporter une information pertinente sur la présence de glace de mer, la complexité d'interprétation de ces images demande une très bonne connaissance des conditions environnementales et l'appui de données complémentaires pour résoudre les confusions possibles. De plus, la majorité des travaux publiés portent sur l'Arctique, qui présente des conditions de glace souvent différentes de l'Antarctique. Le secteur de la péninsule et plus spécifiquement celui de l'archipel de Melchior présente un défi supplémentaire puisqu'il est situé à la limite des zones de gel intense (sud) et d'eau libre (nord). Ainsi, les conditions y sont très variables et souvent peu représentatives de la saison et du reste du continent. Les mouvements de glace y semblent également plus fréquents, emmenant de rapides changements des conditions observées. Entre autres, lors de la désintégration du couvert, les glaces du sud migrent vers le nord et peuvent s'accumuler dans le secteur de l'archipel. Néanmoins, les informations disponibles pour l'interprétation et la validation nous permettent de conclure à la fiabilité des cartes de glace produites et à l'évaluation des superficies englacées pour les 10 images acquises à partir de 2001.

Dans un souci de réduire l'incertitude reliée à l'utilisation des images radar pour la cartographie de la glace de mer de la péninsule Antarctique, nous recommandons à l'ISMER d'établir une meilleure documentation des processus de glace du secteur de la péninsule, pour chaque période de l'année. L'expertise de scientifiques ayant travaillé sur la région pourrait être mise à profit, avec photos des types de glace à l'appui. L'utilisation des images MODIS/AQUA pour les années 2002 et plus, peut certainement aider à compléter cette documentation. L'effet des vents dans la région doit être aussi documenté (vents dominants, zones abritées, zones exposées). Cette documentation donnera de plus solides bases pour l'interprétation des images radar. Par la suite, l'acquisition de nouvelles images radar pourrait être faite simultanément à des observations au sol, afin de

valider le tout. Une fois ces paramètres maîtrisés, il sera possible de mieux utiliser les images radar historiques et les nouvelles séries temporelles.

11. RÉFÉRENCES :

[1] Maillard, P., Clausi, D.A. and H. Deng (2005). Operational map-guided classification of SAR sea ice imagery. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 43 (12), pp. 2940-2951.

[2] Gill, R.S. (2001). Operational detection of sea ice edges and icebergs using SAR. Canadian Journal of Remote Sensing, 27(5), pp. 411-431.

[3] Bing Y. (2002). SAR Sea Ice Recognition Using Texture Methods, M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 174 pages.

[4] De Abreu, R., Yackel, J.J., Barber, D. and M. Arkett (2001). Operational satellite sensing of Arctic first-year sea ice melt. Canadian Journal of Remote Sensing, 27(5), pp. 487-501.

[5] Deng H. and D.A. Clausi (2005). Unsupervised segmentation of synthetic aperture Radar sea ice imagery using a novel Markov random field model. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 43 (3), pp. 528-538.

[6] Barber D., Hanesiak J.M. and J.J. YACKEL (2001). Sea ice, RADARSAT-1 and arctic climate processes: A review and update. Canadian Journal of Remote Sensing, 27(1), pp. 51-61.

[7] Hall, D.K. (1998). "Remote sensing of snow and ice", in *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*, 3rd ed. New York Wiley, 1998, vol.2, pp. 677-703.

[8] Steffan, K. and J. Heinrichs (1994). Feasibility of sea ice typing with synthetic aperture radar (SAR): Merging of Landsat thematic mapper and ERS 1 SAR satellite imagery. Journal of Geophysical Research, 99 (C11), pp. 22413-22424.

[9] Soh, L.-K., Tsatsoulis, C., Gineris, D. and C. Bertoia (2004). ARKTOS: an intelligent system for SAR sea ice image classification. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 42 (1), pp. 229-248.

[10] Clausi, D.A. (1996). Texture Segmentation of SAR Sea Ice Imagery," Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada, 194 pages.

[11] Nghiem S.V. and C. Bertoia (2001). Study of Multi-Polarization C-Band Backscatter Signatures for Arctic Sea Ice Mapping with Future Satellite SAR. Canadian Journal of Remote Sensing, 27(5), pp.387-402.

[12] Arkett, M., Flett, D., De Abreu, R. and C. Gillespie (2006). Sea ice type and open water discrimination for operational ice monitoring with RADARSAT-2. Proceedings from the RADARSAT-2 Symposium, Canadian Space Agency, St-Hubert, Canada, 11-15 September 2006.