

Université du Québec
INRS : Eau, Terre et Environnement

Validation quantitative des cartes de glace de rivière RADARSAT-1

Par
Hugo Drouin

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

Jury d'évaluation

Examineur externe

Joost J. van der Sanden
Ressources Naturelles Canada
Secteur des sciences de la Terre
Centre canadien de télédétection

Examineur interne

Karem Chokmani
INRS : Centre Eau, Terre et Environnement

Directrice de recherche

Monique Bernier
INRS : Centre Eau, Terre et Environnement

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet FRAZIL dont le but ultime est la gestion et la prévision des embâcles causés par les glaces de rivière, les données de télédétection radar sont utilisées pour produire la cartographie des glaces de rivière. Des études récentes ont d'ailleurs permis de confirmer l'intérêt d'utiliser des images RADARSAT-1 pour la classification du couvert de glace. Cette cartographie permet d'identifier les différents types de glaces dominants qui recouvrent les rivières et de suivre l'évolution de ce couvert. Toutefois, dans un tel processus, des erreurs de classification surviennent en raison des caractéristiques complexes de la nature même de la glace et des spécificités du capteur (fréquence, niveau de bruit, résolution spatiale). Dans le but de connaître la précision des classifications de la glace de rivière à partir d'images RADARSAT-1, ce mémoire fournit une validation quantitative de la cartographie du couvert de glace. Trois approches de classification et trois variantes ont été testées sur quatre images satellites de la rivière Saint-François (Qc) et de la rivière Peace (Ab). Une méthode non-supervisée utilisant la rétrodiffusion (Weber et al., 2003), une méthode non-supervisée utilisant la texture et la rétrodiffusion (Gauthier et al., 2006), une approche orientée-objets (El Battay, 2006), une méthode non-supervisée utilisant la texture et la rétrodiffusion à 16 classes, une méthode utilisant l'algorithme Narendra-Goldberg et une approche par segmentation furent vérifiées. Sur les deux sites d'étude, la vérité-terrain fut acquise selon deux méthodes différentes, soit par survol aérien (rivière Peace) ou par reconnaissance au sol (rivière Saint-François). La matrice de confusion a été utilisée pour évaluer la concordance entre les différentes classifications du couvert de glace et la vérité-terrain. Pour la rivière Saint-François, une précision globale de classification variant entre 69 % et 99 % a été obtenue tandis que pour la rivière Peace, des résultats entre 57 % et 75 % ont été produits. Cette différence s'explique par la nature de la glace qui diffère et par la technique de production de la vérité-terrain. Dans presque tous les cas, la méthode orientée-objets a produit les meilleurs résultats. La glace fortement consolidée et l'eau libre ont été les classes le plus aisément discriminables par la majorité des méthodes. En revanche, les catégories de glace moyennement ou faiblement consolidées portent à confusion.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais grandement remercier ma directrice de recherche, la professeure Monique Bernier d'avoir eu confiance en moi en me permettant de travailler sur ce projet de recherche. Je la remercie profondément pour ces conseils très utiles et pour l'encadrement qu'elle m'a fourni tout au cours de ma maîtrise. De plus, j'apprécie grandement l'opportunité qu'elle m'a donnée d'aller présenter mes travaux ou les travaux de l'équipe en conférence, de participer aux écoles d'été GEOIDE et de contribuer à des expériences de terrains très enrichissantes.

J'aimerais également remercier Yves Gauthier, agent de recherche en télédétection, pour avoir été d'une immense aide durant mon séjour à l'INRS-ETE. Par ses conseils judicieux, ses idées, ses recommandations, son soutien technique, il m'a permis de faire progresser mon travail et de pouvoir accomplir les exigences de projet de recherche. Autant en laboratoire que sur le terrain, tu as été un collègue, un mentor, un ami sur qui je pouvais compter en tout temps malgré ton horaire très chargé.

De plus, un immense merci à tous les autres membres de l'équipe de recherche pour leur support et leur patience à répondre à mes interrogations. Une mention spéciale à Lisa-Marie Paquet, assistante de recherche en géomatique, pour ses conseils techniques, mais également pour les moments passés à rire, à délirer et de m'avoir permis de décrocher dans les moments opportuns. Merci aussi à Karem Chokmani, alors associé de recherche, sur qui toute l'équipe peut toujours compter lorsque nous avons une quelconque interrogation. J'aimerais aussi remercier les autres étudiants et stagiaires du laboratoire de télédétection pour leurs discussions amicales et toujours enrichissantes.

Merci à mes parents et ma famille qui m'ont soutenu et encouragé tout au cours de ma maîtrise et de mes études universitaires. Sans vous, cela aurait été très difficile et je ne serais pas où je suis présentement. Merci aussi de m'avoir donné le goût pour les études scientifiques, la géographie, la détermination et le respect. Je vous dois une fière chandelle pour votre présence lors des moments tant joyeux que plus difficiles.

Un immense merci à tous mes amis de l'INRS-ETE et collègues de bureau et de classe. Merci Isabelle, Brigitte, Nicolas, Kim, Simon, et tous les autres que je ne peux nommer. Les moments de détente, les soirées et les activités passés en votre compagnie furent toujours très plaisants et très énergisants pour continuer à progresser dans mes études.

De plus, j'aimerais souligner le soutien de quelques uns de mes amis depuis de nombreuses années. Guillaume, J-Fred, Jim et nombreux autres, votre présence est grandement appréciée et je sais que je peux compter sur vous à n'importe quel moment. Les nombreuses soirées, activités et sports avec vous sont marqués dans ma mémoire et le seront pour toujours.

Finalement, j'aimerais remercier le professeur Karem Chokmani et le Dr. Joost J. van der Sanden, chercheur au Centre canadien de télédétection, d'avoir accepté d'être réviseurs de mon mémoire. De plus, un merci spécial à l'équipe de BC Hydro pour leur collaboration précieuse.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des figures et tableaux.....	ix
1. Introduction et objectifs	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs de recherche et hypothèse.....	3
1.4 Plan du document	4
2. Cartographie des glaces de rivière par télédétection.....	5
2.1 Formation de la glace de rivière.....	5
2.1.1 Glace colonnaire	6
2.1.2 Glace de neige.....	7
2.1.3 Glace de frazil	8
2.1.4 Arrangements physiques des glaces.....	9
2.2 La télédétection radar	10
2.2.1 Le radar	11
2.2.2 Longueur d'onde, fréquence et polarisation	11
2.2.3 Résolution & angle d'incidence.....	13
2.2.4 Le satellite RADARSAT-1	14
2.2.5 Interaction du signal avec la surface.....	16
2.2.6 La texture	17
2.3 Classification des glaces de rivière.....	19
2.3.1 Classification non-supervisée à l'aide de la rétrodiffusion (NSR)	20
2.3.2 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion (NSTR).....	22
2.3.3 Classification orientée-objets (OO)	24
3. Méthodologie	29
3.1 Sites d'étude	29
3.2 Images utilisées	31
3.3 Procédure pour établir la vérité-terrain	33
3.3.1 Survol aérien (Rivière Peace)	34
3.3.2 Reconnaissance au sol (Rivière Saint-François).....	37
3.4 Classification du couvert de glace.....	40
3.4.1 Classification non-supervisée à l'aide la rétrodiffusion (NSR)	41
3.4.2 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion (NSTR).....	41
3.4.3 Classification orientée-objets (OO)	41
3.4.4 Autres méthodes de classifications	44
3.5 Validation des classifications	48
3.5.1 Matrice de confusion.....	48

4. Résultats	53
4.1 Matrices de confusion et analyse des résultats	53
4.1.1 Rivière Saint-François, 26 janvier 2006	56
4.1.2 Rivière Saint-François, 12 février 2006	58
4.1.3 Rivière Saint-François, 7 février 2007	61
4.1.4 Rivière Peace, 16 mars 2006	65
4.1.5 Précision globale des méthodes de classifications	69
4.2 Discussion	71
5. Conclusion	75
5.1 Perspectives de recherche	77
Liste des références	79
Annexe A - Cartes de la vérité-terrain pour les quatre images à l'étude	85
Annexe B - Exemples des résultats cartographiques des glaces de rivière selon les 6 méthodes à l'étude	95

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 :	Glacé colonnaire, Rivière Saint-François, QC, 12 février 2006.....	6
Figure 2 :	Carotte de glace, le carré rouge (extrémité supérieure droite) représente la glace de neige, Rivière Saint-François, QC (Source : Gherboudj et al., 2007)	7
Figure 3 :	Radeaux de frasil à la dérive, Rivière Saint-François, Qc	9
Figure 4 :	Exemples d'arrangements physiques des glaces (A : frasil juxtaposé; B : frasil aggloméré; C : amas de glaces consolidées).....	10
Figure 5 :	Spectre électromagnétique (gauche) et bandes radars (droite)	12
Figure 6 :	Composition d'une onde électromagnétique	13
Figure 7 :	Angles d'incidence et brillance du pixel (Source : CCT, 2003).....	14
Figure 8 :	Faisceaux pour les différents modes d'imageries de RADARSAT-1	15
Figure 9 :	Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSR	21
Figure 10 :	Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSTR	24
Figure 11 :	Schéma des différentes étapes de classification OO (Source : El Battay, 2006)	27
Figure 12 :	Organigramme des différentes règles de la classification orientée-objet (Source : Tirée d'El Battay, 2006, p.205).....	28
Figure 13 :	Localisation de la rivière Saint-François, Québec	30
Figure 14 :	Localisation de la rivière Peace, Alberta	31
Figure 15 :	Modèle de pré-traitement des images satellitaires conçu avec l'utilitaire Modeler dans Geomatica V.10 (PCI Geomatics)	32
Figure 16 :	Photo aérienne orthorectifiée du couvert de glace, Km 390,.....	34
Figure 17 :	Carte de vérité-terrain du couvert de glace, Km 390, Peace River, 16 mars 2006.....	36
Figure 18 :	Carte et croquis du couvert de glace lors de la visite sur le terrain, Km 87, Rivière Saint-François, 7 février 2007.....	38
Figure 19 :	Photo prise de la rive, Km 87, Rivière Saint-François, 7 février 2007.....	38
Figure 20 :	Exemple de vérité-terrain au site géoréférencé # 22 sur la rivière Saint-François, 7 février 2007	39

Figure 21 : Amplitude moyenne pour quatre images de la Rivière Saint-François pour le secteur à l'étude	43
Figure 22 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSTR16....	45
Figure 23 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSNG	46
Figure 24 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode SSG.....	47
Figure 25 : Exemple d'une matrice de confusion (Image tirée de Short, 2007)	50
Figure 26 : Schéma récapitulatif de la méthodologie pour obtenir une validation quantitative.....	51
Figure 27 : Pourcentage global de précision pour les six méthodes.....	70
Tableau 1 : Caractéristiques des modes d'imageries de RADARSAT-1	16
Tableau 2 : Images acquises en 2006 & 2007.....	33
Tableau 3 : Seuils d'amplitudes modifiés pour les catégories de classification de l'OO	44
Tableau 4 : Degré d'accord et coefficient de Kappa (Source : Landis et Koch, 1977)...	49
Tableau 5 : Exemple de regroupement de matrice.....	55
Tableau 6 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),	56
Tableau 7 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006	56
Tableau 8 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),	57
Tableau 9 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006.....	57
Tableau 10 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006.....	57
Tableau 11 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006	58
Tableau 12 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),	59

Tableau 13: Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 12 février 2006.....	60
Tableau 14 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),	60
Tableau 15 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 12 février 2006.....	60
Tableau 16 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Saint-François, 12 février 2006	61
Tableau 17 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG), Rivière Saint-François, 12 février 2006	61
Tableau 18 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),	62
Tableau 19 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 7 février 2007.....	63
Tableau 20 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),	63
Tableau 21 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 7 février 2007.....	64
Tableau 22 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Saint-François, 7 février 2007	64
Tableau 23 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG), Rivière Saint-François, 7 février 2007	65
Tableau 24 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),	66
Tableau 25 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Peace, 16 mars 2006.....	67
Tableau 26 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO), Rivière Peace, 16 mars 2006	67
Tableau 27 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Peace, 16 mars 2006.....	68

Tableau 28 : Matrice de confusion** pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Peace, 16 mars 2006	68
Tableau 29 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG), Rivière Peace, 16 mars 2006	69
Tableau 30 : Précision globale et statistique de kappa pour chacune des méthodes de classification pour les rivières à l'étude et pour les dates d'acquisition d'images.....	70

1. Introduction et objectifs

1.1 Mise en contexte

La gestion hydrologique en période hivernale s'avère d'une grande importance pour les pays nordiques. Il est donc primordial de comprendre en profondeur les mécanismes de formation et d'évolution des glaces qui couvrent les rivières, les lacs et les océans durant ces périodes de froids intenses. Depuis quelques décennies, les études sur les glaces de rivières sont de plus en plus nombreuses, ce qui contribue fortement à l'avancement de la compréhension sur le sujet (Morse et Hicks, 2005). Un des principaux thèmes qui revient dans la plupart de ces études est l'impact que peuvent avoir les glaces de rivières sur l'environnement, tant naturel qu'humain. En effet, de nombreuses inondations au Canada ne sont pas seulement résultantes de précipitations torrentielles, mais elles sont aussi causées par les glaces de rivières. Les impacts de ces événements majeurs peuvent être catastrophiques et causer de dégâts très importants. Parmi eux, les infrastructures humaines telles les ponts, les barrages, les routes, les quais, les prises d'eau, etc. peuvent être détruites ou endommagées par la force des glaces de rivières lors d'embâcles et de débâcles. Sans oublier la navigation qui peut être perturbée, la production d'hydroélectricité qui peut être affectée et la sécurité des riverains qui peut être menacée (Ice Engineering, 1999).

D'autre part, en essor constant depuis les dernières décennies, la télédétection est une technologie qui ne cesse d'amener de nouvelles solutions aux sociétés actuelles. Ainsi, par son avancement, elle ne cesse d'accroître l'utilisation d'images satellitaires dans divers domaines. À l'instar de ce que nous venons de voir dans le paragraphe précédent, des outils se doivent d'être développés pour tenter de maîtriser les problèmes que peuvent causer les glaces de rivières. Un de ceux-ci est l'utilisation de la télédétection pour tenter d'obtenir de l'information sur les différents types de glaces qui forment le couvert. Plus précisément, l'utilisation d'imagerie radar, aéroportée ou satellitaire, permet depuis quelques années de fournir de l'information pertinente sur le sujet (Leconte et Klassen, 1991). Un des avantages notables de ces systèmes est sa propriété active, ce qui permet

au radar de prendre des images sous toutes conditions climatiques et à tout moment de la journée. Cet aspect est très utile pour le suivi des glaces de rivières car nous savons que le couvert de glace peut varier très rapidement.

1.2 Problématique

Le projet de recherche FRAZIL, dans lequel s'insère ce travail, vise le développement d'un système d'informations géographiques (SIG) dans le but d'améliorer la gestion et la modélisation hydrologique hivernale. Ainsi, à l'aide de ce système, la prévision des inondations reliées aux embâcles, l'optimisation de la gestion des infrastructures hydroélectriques et la navigation fluviale d'hiver pourront être améliorées. Pour accomplir ce vaste projet, plusieurs caractéristiques de la rivière ou de son environnement se devront d'être étudiées et intégrées au SIG. Parmi celles-ci se trouvent l'hydrologie de la rivière, sa morphologie, les conditions climatiques, les caractéristiques du couvert de glace et une évaluation du risque (dommages potentiels d'inondations causées par des embâcles). Le SIG permet entre autres de gérer, manipuler, analyser, saisir et interroger l'information géographique qui est présente sur ces différentes couches (topographie, réseau hydrique, réseau routier, climatologie, couvert de glace, etc.) et qui possède une référence spatiale (ESRI, 2007). À partir des résultats du SIG, les données spatiales pourront servir à étalonner et à valider les modèles climatiques, hydrologiques, de risques et de glaces pour estimer les conditions futures de la rivière (Gauthier et al., 2007).

Une étape jalon de ce projet est la caractérisation du couvert de glace à l'aide d'imagerie satellite radar. L'objectif principal est d'étudier l'interaction entre le signal radar en bande C et le couvert de glace sur une rivière. Tel que mentionné auparavant, plusieurs études se sont déjà penchées sur l'utilisation de l'imagerie radar pour la caractérisation du couvert de glace, ce qui a engendré des résultats très encourageants. Certains auteurs tels Jasek et Weber (2003), Tracy et Daly (2003), El Battay (2006) et Gauthier et *al* (2006) ont utilisé différentes méthodologies pour réaliser la classification des différents types de glaces de rivière. D'après ces analyses, les types de glaces produisant de fortes valeurs de rétrodiffusion sont plus facilement détectables que ceux ayant de faibles valeurs de rétrodiffusion (Weber et *al.*, 2003). De plus, l'ajout de la texture (moyenne) dans la

méthodologie de classification améliore la distinction des faibles valeurs de rétrodiffusion, sans toutefois réduire la discrimination des hautes valeurs de rétrodiffusion (Gauthier et *al.*, 2006). D'autre part, selon El Battay (2006), la classification des glaces de rivières se doit d'ajouter des intrants autres que l'information tirée de l'image radar. Ainsi, le contexte dans lequel se trouvent les pixels de l'image est primordial et amène une valeur ajoutée à la classification.

Toutes ces études ont été validées par certaines campagnes de reconnaissance-terrain, ce qui a permis de fournir une validation visuelle / qualitative des classifications de glaces de rivière. Il a toutefois été impossible pour ces auteurs d'en mesurer le niveau d'exactitude. Ainsi, à l'aide de campagnes de terrain exhaustives et précises, nous prévoyons produire une validation quantitative de ces méthodologies. Néanmoins, les données de validation (vérité-terrain) constituées par photo-interprétation contiennent inévitablement des incertitudes. Malgré cet aspect, nous pourrons avoir une valeur de référence qui nous permettra de comparer les classifications et de pouvoir juger d'une manière objective les futurs ajustements nécessaires aux différentes méthodologies.

1.3 Objectifs de recherche et hypothèse

De façon globale, le but premier de ce travail est de *fournir une validation quantitative des cartes de glaces de rivière RADARSAT-1*. Plus précisément, nous pouvons diviser l'objectif principal de ce travail en quatre sous-objectifs spécifiques, soit :

- 1) Constituer une vérité-terrain représentant l'état du couvert de glace des rivières à l'étude au même moment où les images satellites sont acquises;
- 2) Procéder à la classification des images satellites à l'aide de méthodes sélectionnées ;
- 3) Estimer la précision de chacune des méthodes de classification à partir de la vérité-terrain;

- 4) Comparer les différentes méthodes de classification et mieux comprendre l'effet des types de glaces de rivière sur le signal radar.

Nous croyons qu'en développant une méthodologie de vérité-terrain basée sur la photo-interprétation des différents types de glaces de rivière, nous serons en mesure d'établir une référence quantitative de précision des classifications à partir d'images RADARSAT-1. Néanmoins, nous considérons aussi que les résultats obtenus seront représentatifs de la réalité, mais que certaines incertitudes seront présentes dans la classification et dans la vérité-terrain.

1.4 Plan du document

La présentation de ce mémoire de recherche est divisée en cinq chapitres. Premièrement, le chapitre 1 introduit la mise en contexte du sujet de recherche, la problématique et les objectifs du présent travail. Le chapitre 2 se penche sur la théorie reliée à la cartographie des glaces de rivière par télédétection. Au cours de ce chapitre, les différents types de glace de rivière, la théorie sur le radar et l'explication de différentes méthodes de classification sont présentés. Le chapitre 3 décrit les sites d'étude et explique la méthodologie prise pour réaliser les différents objectifs de recherche, telle que la procédure pour obtenir la vérité-terrain, les traitements effectués sur les images radar et le procédé pour évaluer la précision des classifications. Au cours du chapitre 4, les résultats des classifications, de la vérité-terrain et des validations quantitatives sont démontrés. De plus, une discussion de ces résultats est abordée. Pour terminer, le chapitre 5 sert de conclusion pour ce mémoire.

2. Cartographie des glaces de rivière par télédétection

Ce chapitre présente les principaux concepts théoriques liés à ce mémoire. Deux grands thèmes sont abordés, soit la glace de rivière et la télédétection radar. En premier lieu, une brève rétrospective du processus de formation de la glace de rivière, ses caractéristiques et les différents types de glace qui peuvent être retrouvés sur une rivière. Par la suite, certains principes de base reliés à la télédétection, les concepts du radar et l'interaction glace de rivière-signal radar sont expliqués. Pour terminer ce chapitre, le fonctionnement de trois méthodes de classification des glaces de rivière à partir d'images satellites est abordé.

2.1 Formation de la glace de rivière

La glace de rivière est une composante majeure de l'hydrologie des rivières nordiques. Par conséquent, de nombreux phénomènes doivent être pris en compte dans la compréhension de la formation de la glace de rivière. Premièrement, celle-ci est composée d'eau douce qui cristallise sous l'effet du processus de la nucléation hétérogène à des températures au-dessous de 0°C (Michel, 1978). À l'état pur, la glace possède une densité de 0,9166 g/cm³, ce qui diffère quelque peu d'une glace qu'on retrouve en rivière (El Battay, 2006). Cette différence peut provenir du fait que les processus de formation dépendent de l'hydraulique de la rivière, des conditions climatiques au cours de son évolution et des particules présentes dans l'eau. En effet, une rivière turbulente sera beaucoup plus favorable à produire du frasil tandis que pour une rivière calme, c'est généralement la glace colonnaire qui sera formée. Une des principales caractéristiques qui va distinguer les différents types de glaces de rivière est la densité d'inclusions d'air (Gherboudj et *al.*, 2007).

Dans les prochaines sous-sections, les trois principaux types de glace, soit la glace colonnaire, la glace de neige et la glace de frasil, sont expliqués. De plus, un survol est fait sur les différents arrangements physiques que peuvent prendre les glaces de rivière.

2.1.1 Glace colonnaire

Ce type de glace est considéré comme une glace primaire car elle se forme souvent en premier lieu. Dans la littérature, elle est aussi nommée glace de rive, glace standard ou glace thermique selon les différents auteurs. D'apparence claire, elle est assez solide pour supporter le poids d'une motoneige dès qu'elle atteint 10-15 cm d'épaisseur (Secrétariat du Conseil du Trésor Canadien, 1993). Cette glace se fixe souvent aux rives en premier, mais peut aussi se fixer aux roches, aux ponts et aux obstacles dans la rivière. Sa formation dépend de certains facteurs tels que la température externe de l'air, la vitesse du vent et l'écoulement de la rivière qui se doit d'être laminaire (Michel, 1978). À cet effet, si la température externe s'abaisse, cela provoque un refroidissement des masses d'eaux supérieures de la rivière jusqu'au point de congélation, ce qui engendre une cristallisation et ainsi un début de couvert de glace (Gherboudj, 2005).

La glace colonnaire (

Figure 1) comporte peu d'inclusions d'air, en raison du lent processus de sa formation. Celles retrouvées dans ce type de glace sont de forme sphérique ou tubulaire, distribuées de façon homogène et peu abondantes (Gherboudj et al. 2007).



Figure 1 : Glace colonnaire, Rivière Saint-François, QC, 12 février 2006

2.1.2 Glace de neige

La glace de neige (Figure 2) se forme de deux manières différentes. Premièrement, si les conditions de l'eau sont propices et près du point de congélation, une averse de neige, au contact entre l'eau et la neige (Ashton, 1986), peut provoquer la formation d'un couvert de glace (slush en premier lieu et couvert de glace par la suite). Par ailleurs, si le couvert de glace est déjà en place et qu'une certaine accumulation de neige est présente sur le dessus, il peut se former de la glace de neige. Pour cela, il doit y avoir une infiltration d'eau à travers le couvert de glace qui entre en contact avec la couche de neige ou une fluctuation du niveau d'eau de la rivière (couvert de glace et couche de neige sont inondés). La couche de neige est ainsi saturée en eau et se change en glace.

Ce type de glace contient beaucoup d'inclusions air, de formes sphériques (0,01 à 1cm), petites, rapprochées et distribuées de façon homogène (Gherboudj et al., 2007). La porosité de ce type de glace est aussi assez élevée.

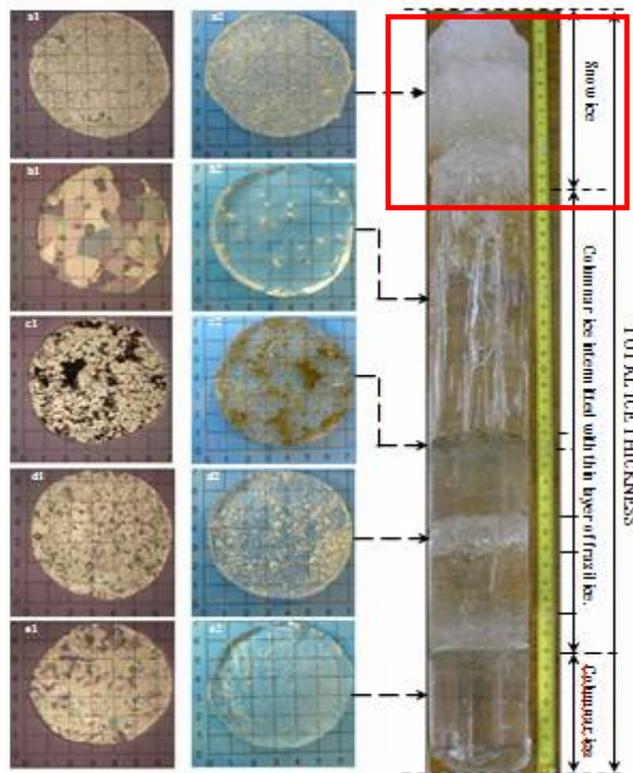


Figure 2 : Carotte de glace, le carré rouge (extrémité supérieure droite) représente la glace de neige, Rivière Saint-François, QC (Source : Gherboudj et al., 2007)

2.1.3 Glace de frasil

Le frasil se forme toujours dans un milieu turbulent. Ce milieu est propice car la colonne d'eau de la rivière est mélangée sur toute sa profondeur en raison du brassage continu, ce qui empêche la stratification de la rivière (Beltaos, 1995). Pour produire du frasil, la température de l'air doit être inférieure à -8°C , la température de l'eau doit être sous le niveau critique (en surfusion) et des impuretés (sédiments, végétation, neige, éclaboussure d'eau, etc) doivent être introduites dans la rivière (Yapa et Shen, 1986). Cette combinaison de conditions produit, dans un milieu turbulent, des particules qui constituent les catalyseurs de la formation des cristaux de glaces (frasil). Par la suite, ces cristaux vont croître très rapidement et se joindront à d'autres particules jusqu'au moment où leur dimension est moins influencée par la turbulence ou, si l'écoulement de la rivière devient moins turbulent et que la température de l'eau se réchauffe (Michel, 1978). À partir de ce moment, les plaques de frasil remontent à la surface et forment des radeaux de frasil (Figure 3) visibles à l'œil nu. Finalement, les radeaux de frasil s'agglomèrent les uns aux autres pour constituer un couvert de glace.

En général, les inclusions d'air contenues à l'intérieur de la glace de frasil ont des formes irrégulières et sont distribuées de façon hétérogène, ce qui dépend fortement de la température au moment de la formation et de la morphologie de la rivière. Lorsque le niveau de refroidissement de la température se fait de façon peu rapide, les inclusions d'air sont plus petites, de formes sphériques et distribuées de façon hétérogène et rapprochée (Gherboudj et *al*, 2007). À l'inverse, lorsque le refroidissement est expéditif, les inclusions d'air sont plus importantes, de formes sphériques ou irrégulières et distribuées de façon rapprochée (Gherboudj et *al*, 2007).



Figure 3 : Radeaux de frasil à la dérive, Rivière Saint-François, Qc

2.1.4 Arrangements physiques des glaces

Précédemment, les caractéristiques des trois grandes classes de types de glaces de rivière ont été brièvement abordées. Il faut toutefois comprendre que la formation du couvert de glace est en évolution tout au long de la saison hivernale et que le régime d'écoulement et la température vont influencer sur la mise en disposition de celui-ci. En effet, cela provoque des combinaisons de ces types de glace à un même endroit, mais aussi des arrangements physiques différents. Il est important de prendre en note que les glaces de frasil peuvent s'agglomérer (courant fort qui compressent les radeaux de frasil, Figure 4 B), ou se juxtaposer (les radeaux de frasil se collent doucement, Figure 4 A) sur le couvert en place (Ashton, 1986). De plus, une glace colonnaire peut être brisée par une hausse ou une baisse du niveau de l'eau, ce qui va former des gros morceaux de glace qui vont dériver jusqu'à un obstacle ou une partie plus étroite de la rivière. À ce moment, le couvert de glace créé par cet amas de morceaux de glace accumulés peut être considéré comme un couvert de glace fortement consolidé (Figure 4 C).

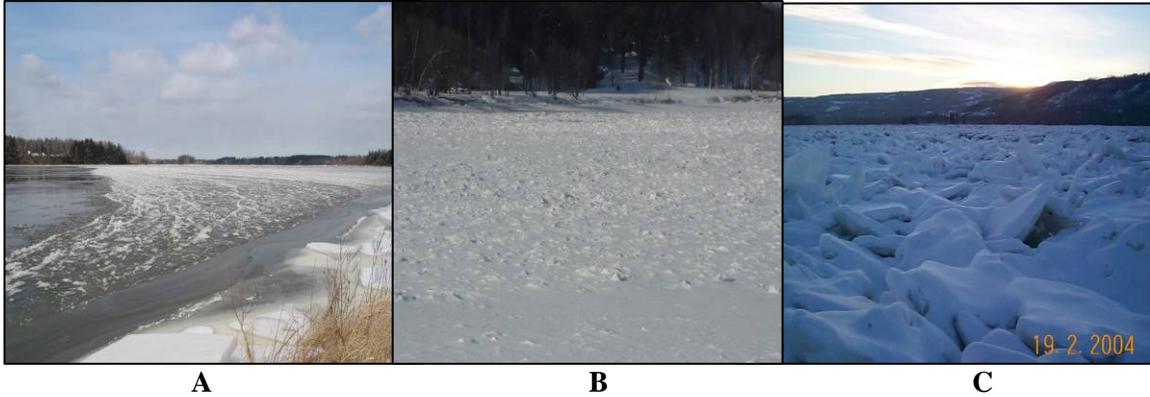


Figure 4 : Exemples d'arrangements physiques des glaces (A : frasil juxtaposé; B : frasil aggloméré; C : amas de glaces consolidées)

Les différentes caractéristiques des glaces de rivière, les différents arrangements et les différentes combinaisons de types de glaces de rivière vont grandement influencer le retour du signal radar. De plus, la rugosité de la surface du couvert de glace est un aspect à considérer dans l'analyse des images satellitaires et des glaces de rivière (Leconte et Klassen, 1991). Il faut aussi signaler que l'interface glace-eau joue un rôle dans le retour du signal. Au cours de la section suivante, l'effet des différents couverts de glace sur le signal sera abordé plus en profondeur.

2.2 La télédétection radar

La terre peut être visualisée et analysée de nombreuses manières par différents outils. Un de ceux-ci est l'exploitation d'images qui représentent les phénomènes sur terre. Qu'elle soit aéroportée ou satellitaire, lorsque qu'une image est prise à distance d'un objet, d'un endroit ou d'un quelconque phénomène, cette technique est nommée la télédétection. Dans ce mémoire, la télédétection figure parmi un des aspects majeurs du travail réalisé, il est donc primordial de présenter les concepts de base reliés à ce sujet.

La télédétection est une discipline en constante évolution et croissance, ce qui fait que le sujet est très vaste à couvrir. Ainsi, au cours de la prochaine section, seulement une présentation de la théorie sur l'imagerie radar sera présentée. Premièrement, une description générale des principales caractéristiques d'un capteur radar sera abordée (polarisation, résolution, angles d'incidences), suivi de l'explication de l'effet des glaces

de rivière sur le signal. Les caractéristiques du satellite canadien RADARSAT-1 seront aussi décrites. Finalement, la notion de texture dans les images sera expliquée.

2.2.1 Le radar

En premier lieu, c'est l'interaction entre le signal incident et une cible qui est à la base d'une image satellitaire. En effet, le capteur mesure la quantité d'énergie transmise par celui-ci et rétrodiffusée par la cible. Lorsque le capteur produit sa propre énergie, il est considéré comme un capteur actif, tel le radar (CCT, 2003). À l'inverse, si le capteur se sert de l'énergie produite par une source externe, tel le soleil, il est nommé passif (CCT, 2003). Cette énergie est produite sous forme de rayonnement électromagnétique. Par conséquent, la télédétection utilise une grande partie du spectre électromagnétique (Figure 5). Les différentes longueurs d'ondes utilisées possèdent leurs propres avantages dans les applications de la télédétection. Par exemple, à l'inverse des images acquises dans le visible, les images radars (longueurs d'ondes plus longues que les particules de l'atmosphère) sont indépendantes des conditions météorologiques. Cette propriété, couplée au fait qu'il s'agit d'un capteur actif (produit son propre rayonnement), permet l'acquisition d'images à n'importe quel moment du jour et de la nuit, peu importe l'état des conditions atmosphériques. De cette façon, les images radars peuvent être utiles dans les situations d'urgences car l'acquisition de l'image est assurée et analysable (problèmes techniques exclus).

2.2.2 Longueur d'onde, fréquence et polarisation

L'onde d'un rayonnement électromagnétique est caractérisée par deux variables très importantes. La première est sa *longueur d'onde*, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes d'ondes successives (Fischer, 1992). Deuxièmement, la *fréquence* de l'onde équivaut aux nombres d'oscillations par unité de temps (CCT, 2003). Ces deux variables sont inversement proportionnelles, ce qui signifie que plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence sera basse et vice versa (Fischer, 1992). La relation entre longueur d'onde et fréquence s'exprime comme suit :

$$C = \lambda V \quad (1)$$

Où :

C = vitesse de la lumière;

λ = longueur d'onde et;

V = fréquence

La partie radar du spectre électromagnétique fait partie des longueurs d'ondes des hyperfréquences. Celles-ci sont divisées en plusieurs bandes de longueurs d'ondes différentes (Figure 5). Le rayonnement émis par le satellite RADARSAT-1 se trouve dans la bande C ($\lambda = 3,75$ à $7,5$ cm).

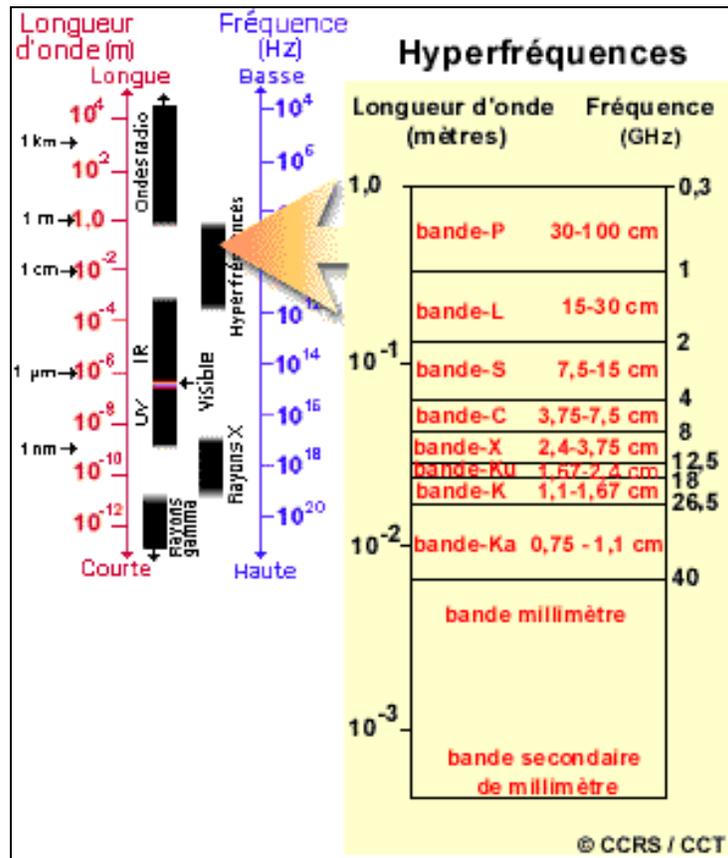


Figure 5 : Spectre électromagnétique (gauche) et bandes radars (droite)
(Source : C.C.T., 2003)

L'onde électromagnétique peut être représentée par trois vecteurs perpendiculaires : le champ électrique, le champ magnétique et la direction de propagation (Figure 6). La polarisation de l'onde électromagnétique est déterminée par la direction du champ électrique lors de la propagation de l'onde (Bonn et Rochon, 1996). La polarisation

linéaire peut être verticale (V) ou horizontale (H), ce qui est déterminé par le parallélisme du champ électrique avec l'axe horizontal ou vertical. Le capteur radar peut fonctionner en mode HH (transmission et réception horizontale) ou VV (transmission et réception verticale). À l'inverse de ces derniers modes qui sont considérées comme parallèles, la polarisation peut aussi être en mode croisé, ce qui signifie des ondes HV ou VH (Henderson et Lewis, 1998)

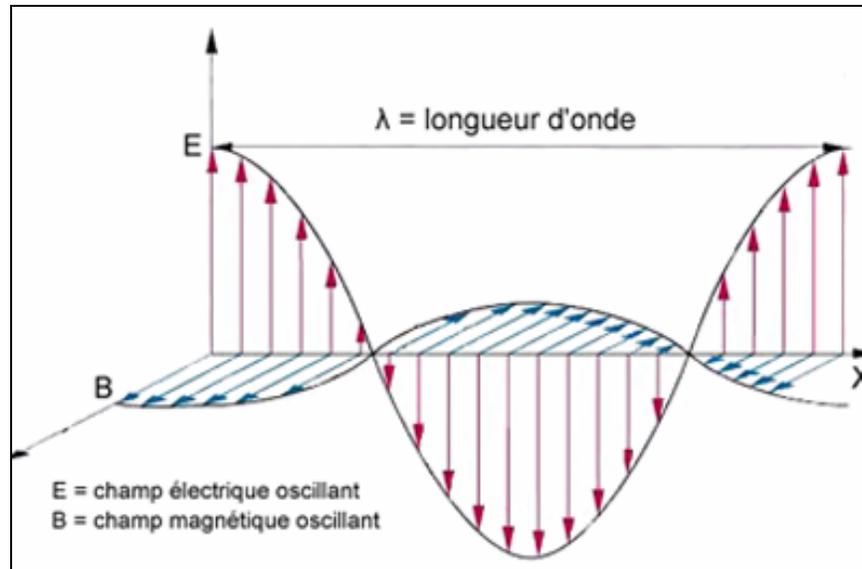


Figure 6 : Composition d'une onde électromagnétique
(Source : Lekhal et Ellefsen, 2002)

2.2.3 Résolution & angle d'incidence

La géométrie de l'acquisition de l'image radar est d'une grande importance pour l'analyse et le traitement de données satellitaires. Il faut premièrement tenir compte de la résolution de l'image qui est la plus petite mesure de séparation entre deux objets (CCT, 2003). Pour cela, les objectifs de l'analyse et les caractéristiques de la cible à étudier doivent être connus si nous voulons optimiser l'information extraite de l'image. Par exemple, si on veut cartographier les types de forêts de la région du Saguenay - Lac Saint-Jean ($>100\ 000\ \text{km}^2$), l'utilisation d'images de haute résolution (plus petit que 10m) peut s'avérer dispendieuse et superflue. À l'inverse, si nous voulons analyser une zone urbaine, il est plus pertinent d'utiliser des images à très haute résolution ($< 5\text{m}$).

De plus, l'angle d'incidence va aussi jouer un rôle majeur dans le traitement d'une image satellite. Il représente l'angle entre le faisceau radar incident et l'axe perpendiculaire vertical de la cible (Figure 7). À cet effet, plus l'angle d'incidence va augmenter, pour le cas d'une image radar, plus le signal radar de retour sera faible. (Ulaby et al., 1986)

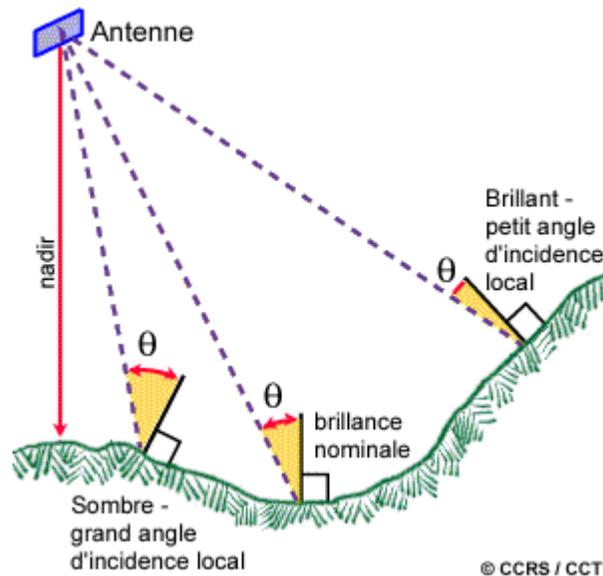


Figure 7 : Angles d'incidence et brillance du pixel (Source : CCT, 2003)

2.2.4 Le satellite RADARSAT-1

Le satellite canadien RADARSAT-1 est en orbite depuis novembre 1995. Il émet des hyperfréquences en bande C (longueur d'onde de 5,6 cm) avec une polarisation HH (Agence spatiale canadienne, 2006). RADARSAT-1 possède un radar à synthèse d'ouverture (RSO)¹, ce qui permet d'obtenir des images à haute résolution. Ce capteur suit une orbite héliosynchrone survolant les deux pôles. Avec une fréquence de 14 orbites par jour, n'importe quelle partie du Canada peut être prise en image dans un délai de 3 jours (Agence spatiale canadienne, 2006). Les régions nordiques sont survolées avec une

¹ Les images captées à l'aide de radars à antennes réelles produisent une résolution qui est proportionnelle à la distance antenne-cible. Il serait plutôt improbable de penser qu'un satellite puisse posséder un radar à antennes réelles due à sa distance de la terre. À l'inverse, le RSO simule une grande antenne grâce à la fréquence de Doppler et en visant latéralement son azimuth de déplacement (Oliver et Quegan, 1998).

plus grande fréquence. Cette caractéristique est notamment intéressante dans le cas d'un suivi d'une catastrophe, tel un embâcle ou une inondation.

RADARSAT-1 dispose d'une grande panoplie de largeurs de faisceaux (Figure 8). Ces modes d'imageries (Tableau 1) peuvent produire des images de 8 à 100 mètres de résolution spatiale avec des angles d'incidences très flexibles, variant de 10° à 59° (Agence spatiale canadienne, 2006). Pour cette étude, les images en mode haute résolution (8 m) ont été retenues. Ce mode d'images (F1 à F3) est mieux adapté au suivi de la glace de rivière en raison de l'étroitesse des rivières et il permet une meilleure distinction de l'hétérogénéité de la glace et de l'eau libre qui peuvent varier rapidement sur de petites étendues spatiales. De plus, les angles d'incidences en mode fin (37° - 47°), produisent une meilleure discrimination de la nature de la glace (plus de diffusion de volume à 45° qu'à 20°) (Leconte et Klassen, 1991). Toutefois, il faut généralement plusieurs images en mode fin pour couvrir l'ensemble d'une rivière, puisque que chaque image s'étend sur environ 45×45 km.

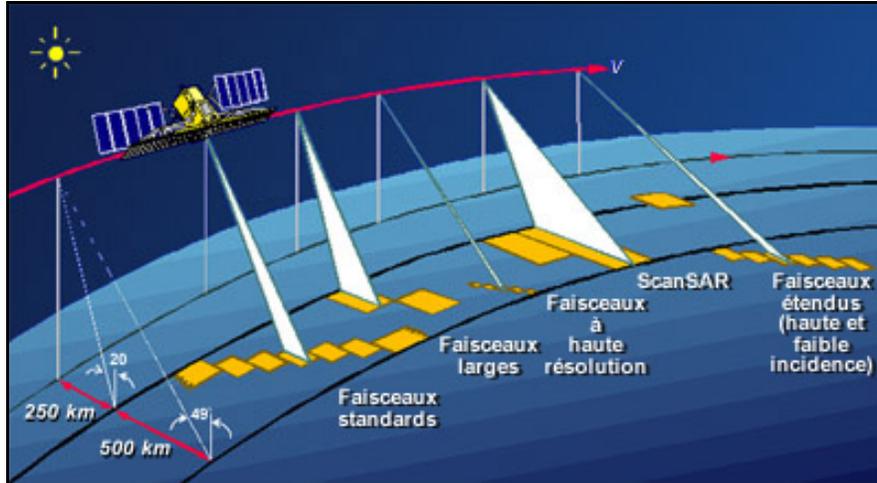


Figure 8 : Faisceaux pour les différents modes d'imageries de RADARSAT-1
(Source : Agence spatiale canadienne, 2006)

Tableau 1 : Caractéristiques des modes d'imageries de RADARSAT-1
(Source : Agence spatiale canadienne, 2006)

Modes d'imagerie				
Mode	Résolution nominale (m)	Nombre de positions / faisceaux	Largeur de fauchée (km)	Angles d'incidence (degrés)
Haute résolution	8-9	15	45	37 – 47
Standard	30	7	100	20 – 49
Large	30	3	150	20 – 45
ScanSAR étroit	50	2	300	20 – 49
ScanSAR large	100	2	500	20 – 49
Faisceau étendu haute incidence	18 - 27	3	75	52 – 58
Faisceau étendu faible incidence	30	1	170	10 – 22

2.2.5 Interaction du signal avec la surface

En plus de la rugosité de surface, les propriétés diélectriques et l'angle d'incidence ont une influence sur la rétrodiffusion du signal radar (Peake et Olover, 1971).

La constante diélectrique aussi appelée permittivité relative (ϵ_r) est une propriété électrique de la cible qui fait varier le retour du signal radar. Lorsque le contraste diélectrique entre deux milieux est grand, tel le cas de l'air ($\epsilon_r = 1$) et de l'eau ($\epsilon_r = 80$), le signal radar ne pénétrera pas dans le second milieu, ce qui se nomme diffusion de surface. À l'opposé, si le contraste diélectrique est petit, tel le cas de l'air ($\epsilon_r = 1$) et de la glace ($\epsilon_r = 3$), le signal pénétrera dans le second milieu et la rétrodiffusion sera influencée par les diffuseurs hétérogènes du second milieu et non seulement par la couche supérieure. Ce second phénomène se nomme diffusion de volume (Bernier et al., 1996).

Dans le cas d'une rétrodiffusion de surface, la rugosité de surface de la cible affecte grandement le retour du signal. Ainsi, si l'interface glace-eau est très rugueuse, il y aura *diffusion* du signal dans toutes les directions et une partie significative retournera au capteur. Cette zone sera plus claire sur une image radar. À l'inverse, si l'interface glace-eau est très lisse, tel une glace lisse colonnaire, la diffusion de surface se fera de façon spéculaire (dans la direction opposée au capteur) et une faible quantité retournera au capteur (CCT, 2003). Dans ce cas, cette partie de l'image sera beaucoup plus sombre.

Dans le contexte des glaces de rivières, selon Hall (1998), des facteurs tel l'épaisseur de la glace, les inclusions d'air et leurs formes, la couche de glace de neige et l'interface glace-eau/glace-fond vont influencer le signal rétrodiffusé. Selon une étude publiée par Hydro-Québec (1996), certaines caractéristiques de l'interaction entre les glaces de rivière et le signal radar furent notées. Premièrement, la glace lisse (ou glace colonnaire) produit une réflexion spéculaire du signal, la glace mouillée absorbe le signal et la glace sans inclusions d'air ne produit aucune diffusion volumique. Ces trois caractéristiques vont influencer à la baisse le retour du signal. Au contraire, la rétrodiffusion est forte si la glace est épaisse ou bien agglomérée et quelle contient des inclusions d'air (diffusion de volume), ou si l'interface glace-eau est rugueuse provoquant de la réflexion diffuse.

2.2.6 La texture

L'intensité du signal rétrodiffusé nous fournit habituellement beaucoup d'informations sur une cible. Toutefois, nous pouvons tenter d'aller plus loin dans l'utilisation de l'information extraite de l'image. Une des façons de le faire se trouve dans l'utilisation de la texture.

Selon Hall-Beyer (2000), la texture dans une image quantifie la différence des niveaux de gris entre pixels, l'étendue spatiale sur laquelle se produit ces changements et la direction préférentielle (ou non) de ces changements. Elle est communément calculée statistiquement sur la base de la matrice de co-occurrence des niveaux de gris (GLCM), qui établit à quelle fréquence se produisent différentes combinaisons de niveaux de gris dans une image. Dans son utilisation la plus courante, la GLCM calcule des texture de

second ordre, c'est-à-dire qu'elle considère la relation entre des groupes de deux pixels dans l'image originale. La GLCM est une matrice carrée et symétrique qui est exprimée sous forme de probabilités. On dit ainsi qu'elle est normalisée. La plupart des mesures de texture sont des moyennes pondérées du contenu de la matrice normalisée.

Nous pouvons regrouper ces mesures de texture selon leur objectif. Par exemple, pour exprimer le niveau de contraste d'une image, on utilisera les mesures de contraste, d'homogénéité ou de dissimilitude. Pour exprimer le niveau d'arrangement dans une image on pourra utiliser les mesures d'entropie ou de second moment angulaire. Finalement, pour une description statistique, on pourra utiliser la moyenne, la variance ou la corrélation. À noter que la moyenne par exemple, n'exprime pas la moyenne des valeurs originales de l'image. Elle est exprimée en termes de GLCM, donc la valeur est pondérée par la fréquence d'occurrence du niveau de gris en combinaison avec un voisin d'un certain autre niveau de gris et se calcule selon :

$$\mu_i = \sum_{i,j=0}^{N-1} i(P_{i,j}) \quad \mu_j = \sum_{i,j=0}^{N-1} j(P_{i,j}) \quad (2)$$

Où :

$P_{i,j}$ est la probabilité de cooccurrence à la cellule (i, j) de la matrice de cooccurrence de niveau de gris symétrique;

μ_i = Équation de gauche est calculée en fonction du pixel de référence (i);

μ_j = Équation de droite est calculée en fonction du pixel voisin (j);

i = Valeur de niveau de gris du pixel de référence ;

j = Valeur de niveau de gris du pixel voisin.

Nous devons mentionner que les deux équations ci-haut présentées sont égales car la GLCM est symétrique. En réalité, tel que mentionné précédemment, le pixel de référence et le pixel voisin forment le groupe de deux pixels qui sert pour calculer la texture de

second ordre dans une fenêtre de taille définie, ce qui signifie que les deux équations sont identiques.

2.3 Classification des glaces de rivière

Au début des années 1990, l'utilisation potentielle des données RSO aéroportées pour la cartographie des glaces de rivière fut démontrée par Leconte et Klassen (1991). Depuis 1995, l'arrivée du satellite RADARSAT-1 a permis de faire progresser cette application. Ainsi, Weber et al. (2003) ont proposé une approche non-supervisée simple qui a fournit des résultats prometteurs. Nous avons donc choisi cette méthode comme référence de base car elle est la première étude publiée sur la classification de glaces de rivière utilisant RADARSAT-1. Par la suite, Gauthier et al (2006) ont tenté d'améliorer cette méthodologie à l'aide de l'introduction de la texture moyenne dans la classification. Finalement, dans la foulée du développement d'un système SIG pour le projet FRAZIL, un autre type de classification fut développé toujours à partir d'images radar, mais basé sur un contexte de discrimination d'objets par rapport à leurs caractéristiques, leurs environnements immédiats et leur interaction avec leurs voisins. Celle-ci est l'approche orientée-objets.

D'autres travaux ont été réalisés sur l'utilisation de l'imagerie radar pour la cartographie des glaces de rivière. En effet, des auteurs tels Puestow et al. (2004), Pelletier et al. (2005) et Tracy et Daly (2003) ont travaillé sur le sujet. La majorité de ces études utilisent des photos aériennes et des données terrain pour valider qualitativement la classification du couvert de glace. D'ailleurs, les résultats cartographiques extraits à partir des images satellitaires permettent de distinguer des caractéristiques précises du couvert de glace telles des embâcles, de la glace lisse, de l'eau libre, etc. De façon générale, tous ces auteurs arrivent à une conclusion similaire. L'utilisation de l'imagerie RADARSAT-1 pour la classification des glaces de rivière est fonctionnelle, mais celle-ci se doit d'être approfondie et développée davantage afin de devenir complément efficace et fiable à 100%. Toutefois, ces méthodes de classifications utilisées sont uniquement basées sur l'intensité du signal et se comparent donc à notre méthode de référence (Weber et al,

2003). Nous avons donc jugé qu'il n'était pas nécessaire de procéder à la validation quantitative de ces méthodes.

Pour répondre aux objectifs de recherche de ce mémoire de maîtrise, trois méthodes de classification des glaces de rivière furent retenues. Tel que mentionné précédemment, l'efficacité de ces méthodes pour la caractérisation des couverts de glaces de rivière fut démontrée qualitativement, mais aucune validation quantitative à l'aide de données de terrain ne fut effectuée. Deux de ces méthodes sont non-supervisées, ce qui requiert peu de temps et procure un bon résultat indépendamment du niveau de connaissance de l'analyste qui traite l'image. Nous appellerons ces méthodes : non-supervisée à l'aide de la rétrodiffusion (NSR) et non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion (NSTR). Finalement, la troisième méthode utilisée est une classification orientée-objets (OO), qui est automatisée, mais qui requiert l'intervention d'un spécialiste pour le choix de certains paramètres. Ces trois approches sont discutées ci-dessous.

2.3.1 Classification non-supervisée à l'aide de la rétrodiffusion (NSR)

Cette méthode de classification des images radar pour la cartographie des glaces de rivières fut développée par Weber et al (2003). Les différentes étapes méthodologiques sont illustrées dans la Figure 9. Après une série de traitements initiaux appliqués à l'image pour réduire son taille, accélérer la vitesse d'analyse et transformer les valeurs d'amplitude en puissance, l'image satellite en mode fin est filtrée. En effet, en raison de leur fine résolution (8 m) qui réduit le nombre de visées du secteur à l'étude, les images RADARSAT-1 en mode fin contiennent beaucoup de chatoiement. Pour contrer ce désagrément, un filtre de Kuan (eq. 3) est d'abord utilisé, ce qui permet de conserver les contours et le format des objets (Shi et Fung, 1994). La dimension de la fenêtre est de 5 pixels par 5 pixels. La grandeur de la fenêtre peut influencer le résultat par la perte de détails si la dimension est trop grande, mais à l'inverse, si elle est trop petite, le filtre ne sera pas efficace.

$$R = CP*W + I*(I-W) \quad (3)$$

Où :

- R = La nouvelle valeur du niveau de gris du pixel en question;
- CP = La valeur initial du niveau de gris du pixel central dans la fenêtre de filtre;
- W = $(1-Cu/Ci)/(1+Cu)$;
- I = Niveau de gris moyen dans la fenêtre de filtre;
- Cu = $1/NLOOK$;
- Ci = VAR/I ;
- VAR = Variance dans la fenêtre de filtre;
- $NLOOK$ = Nombre de visées (Looks) spécifique à chaque mode d'acquisition.

De plus, afin de lisser encore plus l'image pour faciliter la classification automatique (Caloz et Colet, 2001), l'emploi d'un filtre médian est ajouté à la méthode (Weber et al., 2003).

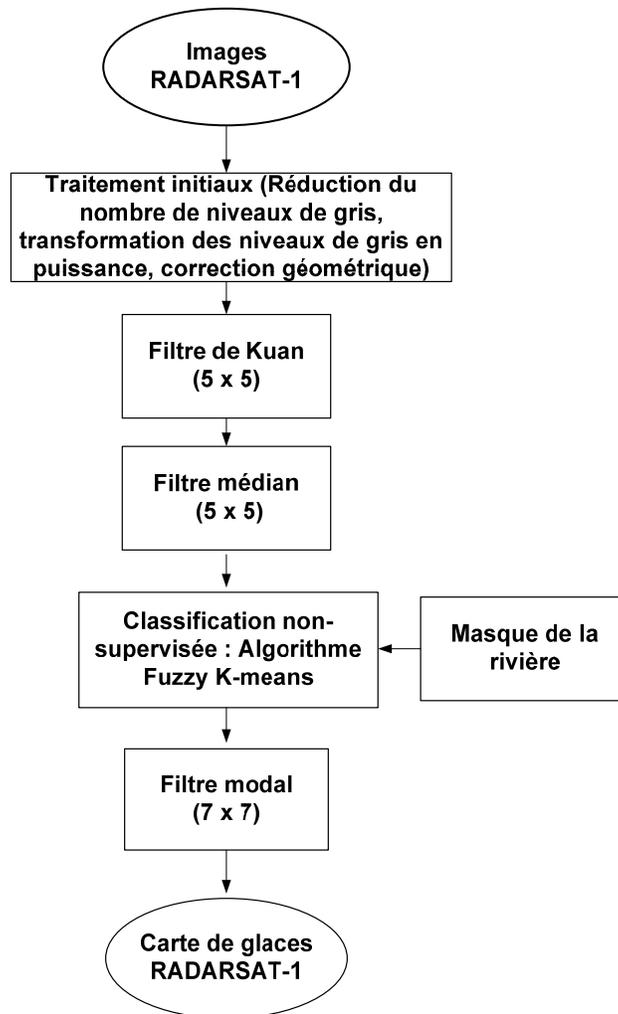


Figure 9 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSR (Source : modifié de Weber et al, 2003)

Subséquentement, l'image filtrée est classifiée sous le masque de la rivière, à l'aide de l'algorithme non-supervisé Fuzzy K-Means. Ce dernier considère d'abord toutes les valeurs de rétrodiffusion comme appartenant à tous les regroupements et associe une probabilité d'appartenance à ces classes (Caloz et Colet, 2001). Ainsi, la valeur moyenne des centres de classes varie au fur et à mesure que de nouveaux pixels sont associés à une certaine classe (Weber et al, 2003). Le nombre de classes doit être prédéterminé par l'utilisateur avant de lancer l'analyse de l'algorithme sur l'image. Weber et al. (2003) fixent ce nombre à 7, soit le nombre de types de glace observables à l'œil nu sur la rivière.

Suite au processus itératif de l'algorithme Fuzzy K-Means, tous les pixels se retrouvent classifiés. Pour permettre une meilleure uniformité spatiale du résultat thématique, un filtre modal est appliqué aux valeurs résultantes de la classification (Weber et al, 2003).

2.3.2 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion (NSTR)

Suite aux résultats dérivés des classifications effectuées à l'aide de la méthode présentée ci-précédemment (NSR), une des conclusions majeures fut que les pixels ayant de fortes valeurs de rétrodiffusion sont plus facilement discriminable par cette méthodologie de classification que les valeurs de faible rétrodiffusion. Ainsi, la majorité des pixels de basse rétrodiffusion se retrouvent dans une même classe. À partir de ce point, une nouvelle méthode de classification fut développée en intégrant la matrice de co-occurrence des niveaux-gris (texture moyenne) pour mieux distinguer les couverts de glaces ayant de faibles valeurs de rétrodiffusion (Gauthier et al., 2006).

Après la transformation des niveaux de gris en puissance, l'image entière est soumise à l'étape de la production des matrices de co-occurrence des niveaux de gris pour obtenir la texture moyenne (équation 2) sur une fenêtre 7×7 .

Une première classification non-supervisée des valeurs de texture est ensuite effectuée à l'aide de l'algorithme Fuzzy K-Means sous le masque qui couvre la rivière à l'étude. Un filtre modal est aussi appliqué pour uniformiser le résultat thématique des classes et éviter

les pixels orphelins (PCI Geomatics, 2007). Suite à cette première classification, un masque spatial est effectué sur la classe ayant la valeur de texture moyenne la plus élevée. Cette classe est particulièrement sélectionnée car selon les conclusions de Weber et al (2003), les plus fortes valeurs de rétrodiffusion sont plus aisément séparables que les faibles valeurs de rétrodiffusion. Ainsi, sous ce masque spatial, la méthode NSR est appliquée intégralement sur l'image d'intensités, afin de discriminer deux nouvelles classes. Par la suite, ces deux classes vont porter l'attribut 0 pour la classe ayant la valeur moyenne de rétrodiffusion la plus faible et 1 pour la plus forte. Les deux classifications sont ensuite regroupées pour en former une seule qui rallie la texture et la rétrodiffusion (Gauthier et al. 2006). Cette opération de regroupement des deux résultats de classifications s'effectue à l'aide d'un utilitaire arithmétique qui additionne les valeurs d'attribut 0 et 1 à la valeur d'attribut initiale de la classe avec la valeur de texture moyenne la plus élevée. Finalement, un filtre modal est employé sur la classification finale regroupée. (Figure 10).

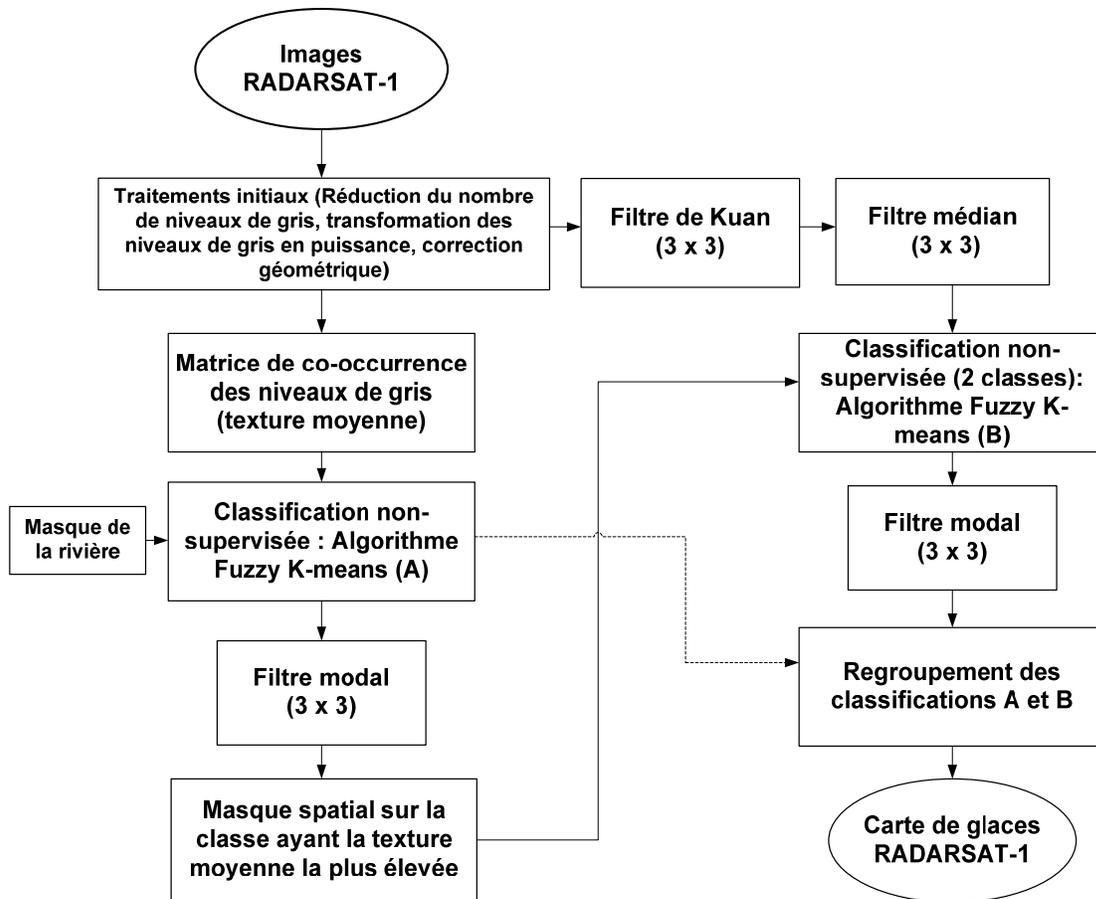


Figure 10 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSTR (Source : Gauthier et al., 2006)

2.3.3 Classification orientée-objets (OO)

La méthode de classification orientée-objets établie par El Battay (2006) est très différente des deux méthodes précédentes. Ces dernières constituent une approche qui est basée sur le niveau de gris du pixel tandis que l'OO possède une approche basée sur une connaissance approfondie des mécanismes et caractéristiques des glaces de rivière et aussi sur le contexte et le voisinage dans lequel se trouve le pixel. Celle-ci requiert initialement plus de temps et d'analyse de la part de l'utilisateur (Figure 11).

Deux grandes étapes générales forment la méthode de classification orientée-objets (eCognition professional, 2004). Premièrement, la segmentation de l'image en objets et par la suite, la classification hiérarchique orientée-objets. Avant d'entreprendre ces deux

étapes importantes, El Battay applique quelques transformations aux images, telles la réduction du nombre de niveaux de gris, la transformation des niveaux de gris en amplitude et la correction géométrique. Les valeurs d'amplitude équivalent à la racine carrée des valeurs de rétrodiffusion radar et sont toujours positives.

La segmentation de l'image est un élément clé dans la méthode OO. Celle-ci délimite les objets constitués de pixels adjacents ayant une homogénéité au niveau de différents paramètres. Ceux-ci sont l'information spectrale des pixels, la taille, la forme, le lissage et la compacité des objets (eCognition Professional, 2004).

Postérieurement à la segmentation, la classification orientée-objets d'El Battay (2006) se base sur une hiérarchie de règles, prédéterminées par l'utilisateur, concernant les caractéristiques uniques à chacun des types/arrangements de glaces de rivière. Les objets sont classifiés selon le contexte où se trouve l'objet spatialement, selon une logique de présence d'un tel type de glace ou non (par exemple : la glace de rive ne peut se trouver au milieu de la rivière) et aussi en s'appuyant sur différentes couches d'informations géographiques (sinuosité et largeur du chenal, pente de la surface, profondeur de l'eau et présence d'îles et des rives (El Battay, 2006).

Le système de classification orientée-objets utilise un algorithme de logique floue qui permet une analyse des différentes caractéristiques d'un objet et des différentes règles préétablies, ce qui permet de classifier un objet selon une probabilité d'appartenir à une classe ou non (eCognition professional, 2004). La Figure 12 représente un organigramme des différentes règles logiques sur laquelle se base la classification. Initialement, cet organigramme de classification comporte 12 catégories de résultats. Par exemple, pour qu'un objet soit classifié glace colonnaire (thermique), il doit avoir une amplitude entre 0,09 et 0,16. Par la suite, le paramètre de largeur de l'objet en question et la largeur de la rivière sont calculés et si les deux dimensions sont égales, le couvert est considéré comme complet. À l'inverse, si les largeurs ne correspondent pas et que l'objet touche à une rive, il va être considéré comme une glace de rive colonnaire (thermique). Explicitement, un autre exemple de règle est pour la glace agglomérée. Pour entrer dans cette catégorie, un

objet doit avoir une amplitude entre 0,30 et 0,50. Subséquemment, si la largeur de la rivière est plus grande que l'objet, celui-ci est considéré comme glace fortement agglomérée. Au contraire, si l'objet couvre la largeur de la rivière, celui-ci sera considéré comme un embâcle potentiel. Deux niveaux d'embâcle sont par la suite à considérer, tout dépendamment de la profondeur moyenne à cet endroit. Ainsi, si le niveau d'eau est en moyenne plus bas que trois mètres, le risque d'embâcle est très élevé tandis que si la profondeur est élevée (> 3 m), l'objet sera classifié comme risque d'embâcle modéré.

En conclusion, les trois différentes méthodes de classification ci-précédemment expliquées sont les méthodes de base à partir desquelles les tests de validation quantitative seront effectués à l'aide d'une carte de la vérité-terrain. À l'intérieur du chapitre méthodologique, les différents changements de paramètres et d'algorithmes qui seront apportés à ces trois méthodes pour les adapter à nos données sont expliqués plus en détails.

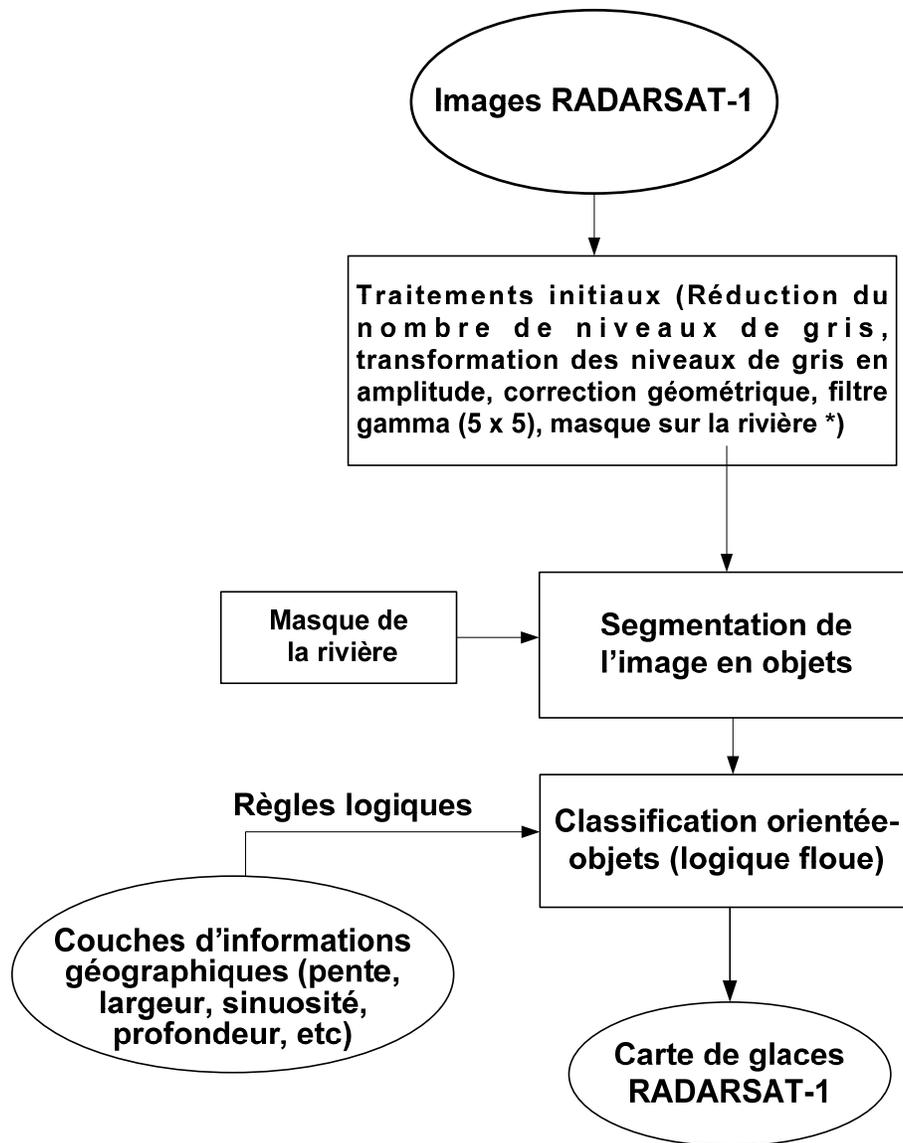


Figure 11 : Schéma des différentes étapes de classification OO (Source : El Battay, 2006)

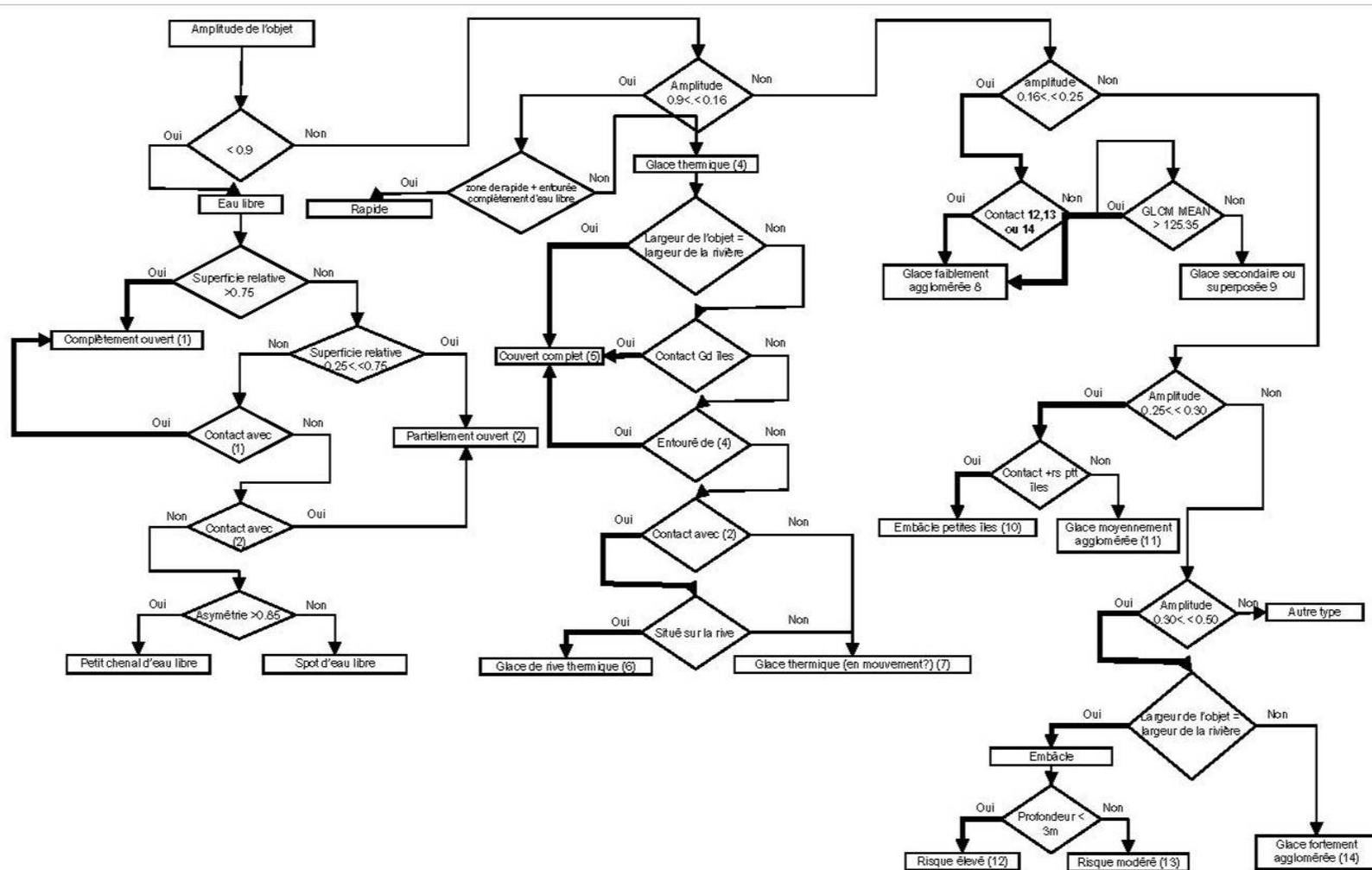


Figure 12 : Organigramme des différentes règles de la classification orientée-objet (Source : Tirée d'El Battay, 2006, p.205)

3. Méthodologie

Pour réaliser ce projet d'étude, il est impératif de suivre une méthodologie précise et concrète qui nous permet de comparer les différentes classifications des glaces de rivière. Dans le but d'atteindre ces objectifs, le présent chapitre décrit l'approche méthodologique suivie au cours de ce travail. Premièrement, les sites d'étude et les images acquises sont exposés. Par la suite, les procédures pour obtenir la vérité-terrain et pour classer les glaces de rivière sont expliquées. Finalement, la méthodologie pour valider les résultats obtenus est commentée.

3.1 Sites d'étude

Les sites d'études pour ce travail sont les rivières Saint-François et Peace, se trouvant respectivement dans le Sud-est (Québec) et dans le Nord-ouest (Alberta) du Canada. Ces deux rivières présentent des régimes hydriques très différents et sont soumises à des conditions climatiques permettant la formation de glace. Elles font toutes deux partie du projet FRAZIL.

La rivière Saint-François est localisée dans la province de Québec (Figure 13). Elle prend sa source dans le lac Saint-François, dans la partie sud de la région Chaudière-Appalaches, et coule sur une distance de 280 km pour terminer son périple dans le fleuve Saint-Laurent au niveau du lac Saint-Pierre. La largeur de la Saint-François est très variée, allant de 80 à plus de 850 mètres de largeur (COGESAF, 2006). Pour les fins de cette étude, le secteur étudié se trouve approximativement entre les villes de Drummondville et de Richmond, un tronçon d'environ 70 kilomètres et dont la largeur moyenne est de 260 mètres. Ce site d'étude possède des caractéristiques morphologiques très hétérogènes, passant de zones de rapides très sinueuses à des sections très calmes et non sinueuses. Cela engendre la formation de plusieurs types de glace différents. À cet égard, la rivière Saint-François est aussi très large pour certaines sections tandis qu'elle peut devenir très étroite par endroit. De plus, l'absence et la présence d'îles, pour ce tronçon d'étude, vient influencer l'écoulement et la formation du couvert de glace (El

Battay, 2006). Finalement, le débit moyen de la rivière Saint-François est de 192 m³/sec en amont de Richmond (M.E.Q., 1995) et le bassin versant de celle-ci couvre 10 298 km² (COGESAF, 2006).

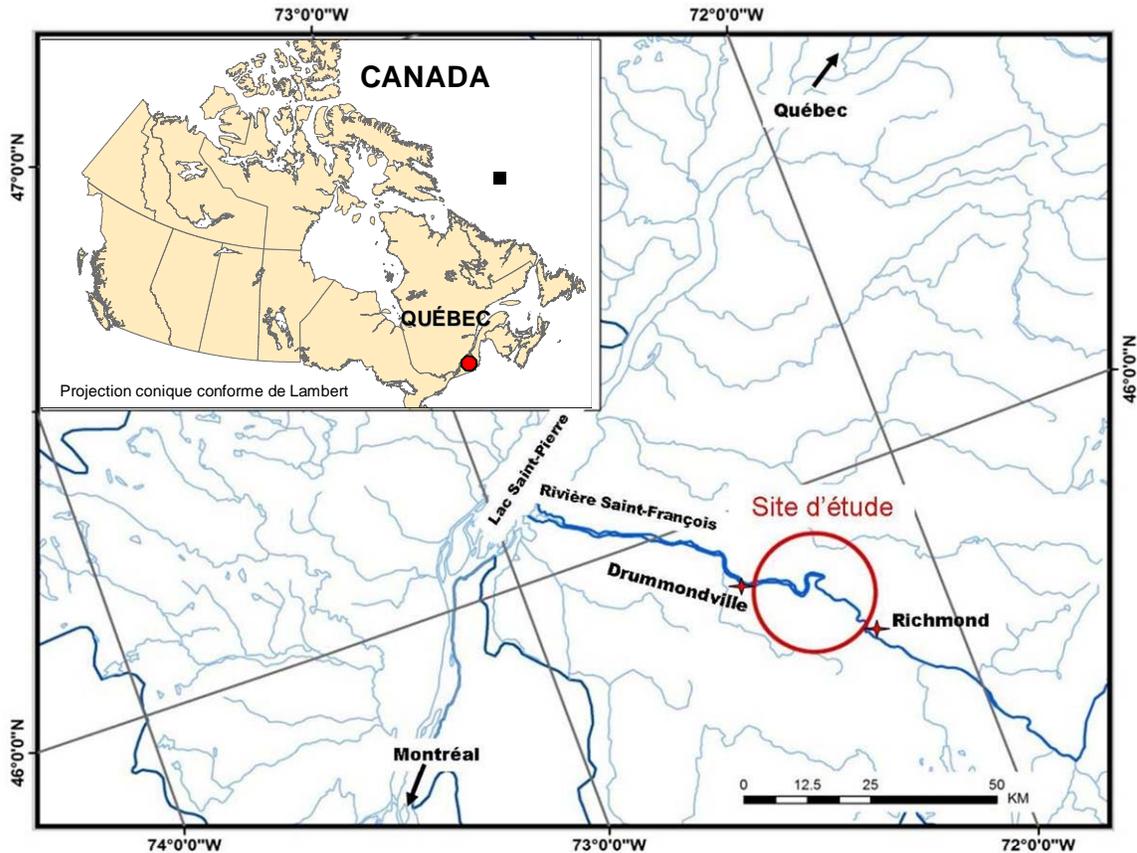


Figure 13 : Localisation de la rivière Saint-François, Québec

La rivière Peace est principalement située en Alberta, mais elle prend sa source en Colombie-Britannique, dans le Lac Williston, un lac artificiel créé pour des fins hydro-électriques (figure 14). Elle s'écoule sur plus de 1300 km pour se jeter dans la rivière Slave, à quelques dizaines de kilomètres du lac Athabasca (Weber et al, 2003). Le bassin versant de la rivière couvre environ 293 000 km², dont 183 000 km² qui draine vers celle-ci lorsqu'elle croise la ville de Peace River (Alberta Environment, 2006). Les photos aériennes ont été acquises à proximité de Peace River. En moyenne, le débit moyen de la rivière Peace équivaut 2 161 m³/sec en amont du lac Athabasca (Alberta Environment, 2006). Le secteur à l'étude sur cette rivière est la partie en amont et en aval de la ville de

Peace River sur une distance d'environ 80 km et dont la largeur moyenne est d'environ 700 mètres. Pour ce tronçon, la rivière Peace coule dans une vallée escarpée qui se trouve à plus de 300 m. plus bas que le terrain avoisinant.

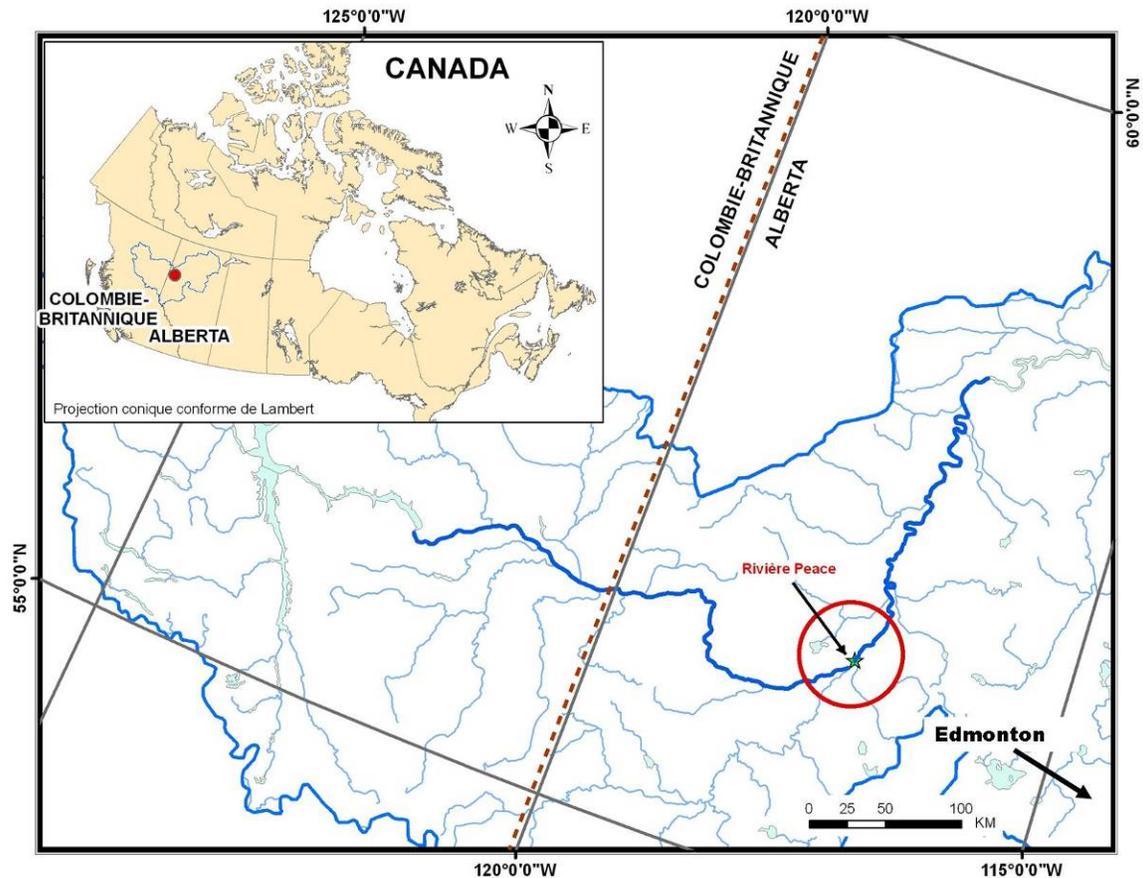


Figure 14 : Localisation de la rivière Peace, Alberta

3.2 Images utilisées

Les images utilisées ont été acquises lors des hivers 2006 et 2007 par le satellite canadien RADARSAT-1 (C – HH). Les angles d'incidence des images, tel que montré au Tableau 2, varient de $36,4^{\circ}$ à $43,7^{\circ}$. La résolution nominale des images est d'environ 8 mètres (mode fin) et celle-ci couvrent approximativement une superficie au sol de 50 km x 50 km (Agence spatiale canadienne 2006). La dimension des pixels est de 6.25 m X 6.25 m.

La lecture et le traitement initial (Figure 15) des images radar à synthèse d'ouverture (RSO) ont été effectués à l'aide du logiciel Geomatica V.10 (PCI Geomatics). Premièrement, la lecture de l'image RADARSAT-1 (en amplitude) se fait à l'aide de l'utilitaire *CDSAR* afin d'en extraire les informations sur l'orbite et la calibration lors de l'acquisition. L'angle d'incidence est par la suite extraite (*SARINCD*) pour permettre une conversion des valeurs de pixels en rétrodiffusion radar à l'aide de l'utilitaire *SARSIGM*. Lors de cette dernière étape, les images de rétrodiffusion sont calculées en puissance. Pour accélérer le traitement des images satellitaires, ces dernières ont été transformées de 32 bits à 16 bits à l'aide *ARICONST* et de *SCALE*, ce qui réduit aussi fortement la taille des fichiers.

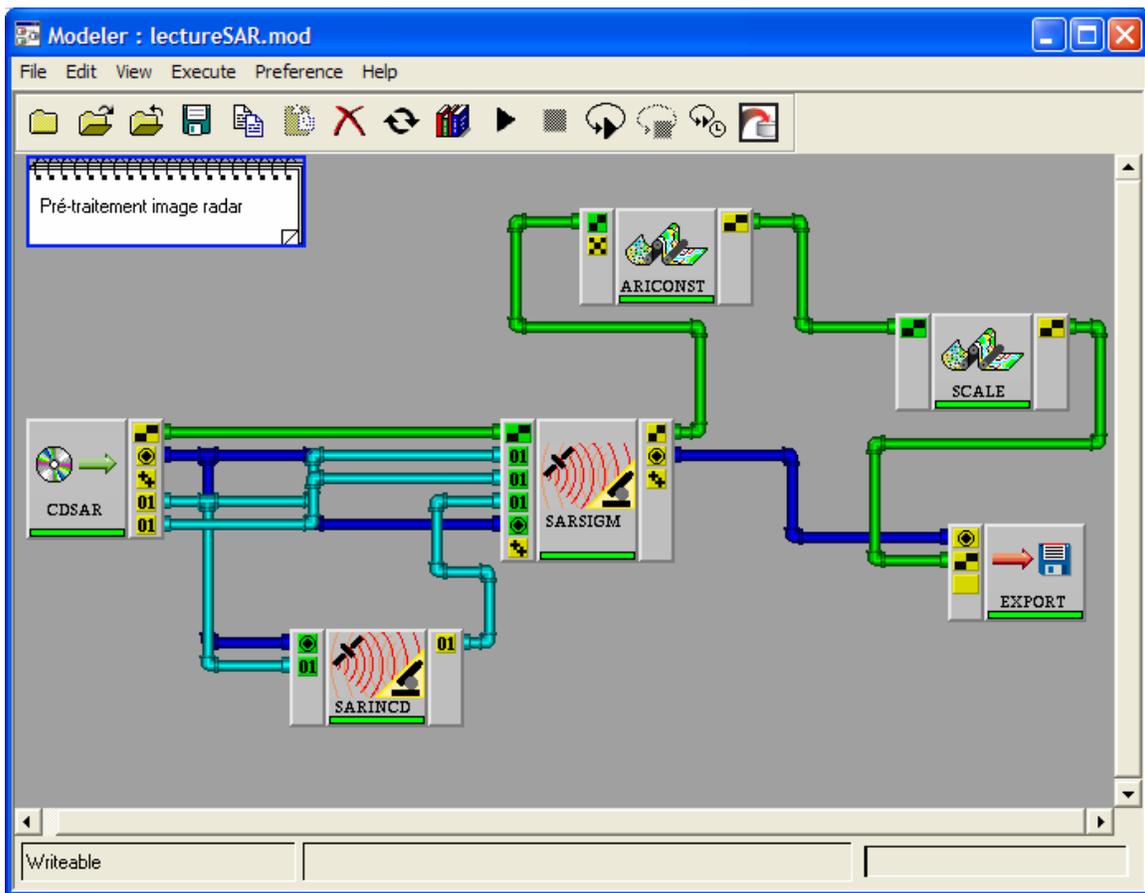


Figure 15 : Modèle de pré-traitement des images satellitaires conçu avec l'utilitaire Modeler dans Geomatica V.10 (PCI Geomatics) (Source : Gauthier et al, 2006)

Pour les fins de cette étude, une bonne correction géométrique a été nécessaire afin de pouvoir appliquer un masque sur la rivière et de bien superposer l'image et la vérité-terrain. Ainsi, à l'aide de nombreux points de contrôle, basés sur des vecteurs (routes, voie ferrée, lignes de transmissions, etc.) ou des images orthorectifiées, l'erreur quadratique moyenne cumulative obtenue est approximativement d'un pixel. Toutes les images ont été corrigées géométriquement à l'aide de la méthode photogrammétrique pour régler les problèmes de distorsions causées par le capteur et le relief du terrain. La projection des images pour le secteur de la Saint-François est MTM Zone 8 et de UTM Zone 11 pour le secteur de la Peace. L'outil OrthoEngine (PCI geomatics) a été utilisé pour accomplir la correction géométrique.

Tableau 2 : Images acquises en 2006 & 2007

Images RADARSAT-1 (Bande C, Polarisation HH)			
Date	Angle d'incidence	Endroit	Orbite
26 Janvier 2006	F3N (41,1°-43,7°)	Rivière Saint-François, Qc	Descendante
12 Février 2006	F1F (37,2°-40,3°)	Rivière Saint-François, Qc	Descendante
7 Février 2007	F1 (36,8°-39,9°)	Rivière Saint-François, Qc	Descendante
16 mars 2006	F2 (39,2°-42,1°)	Rivière Peace, Ab.	Ascendante

3.3 Procédure pour établir la vérité-terrain

Lorsque les images satellitaires ont été acquises pour une des deux rivières à l'étude, nous avons tenté d'obtenir le plus d'informations possible concernant le couvert de glace en place au même moment. Cette vérité-terrain sert à valider les résultats des algorithmes de classification. Ainsi, lorsque nous possédons des données de références (vérité-terrain), il est plus facile d'analyser le retour du signal radar lorsque que nous connaissons l'état de la rivière, les différents types de glace présents et leur position spatiale. Lors de cette étude, deux méthodes ont été utilisées pour établir une vérité-terrain. La première est basée sur un survol aérien (dans le cas de la rivière Peace) tandis que la deuxième est basée sur une reconnaissance au sol (dans le cas de la rivière Saint-François).

3.3.1 Survol aérien (Rivière Peace)

La vérité-terrain a été produite par nos collaborateurs de B.C. Hydro (Generation Operations) sur la base d'un survol aéroporté effectué le même jour que celui de l'acquisition de l'image RADARSAT-1, le 16 mars 2006. Au cours de ce survol, 4 photos aériennes à visée quasi perpendiculaire furent acquises à des fins de photo-interprétation. Chaque photo couvre une section d'une longueur approximative de 1 kilomètre. Elles sont localisées aux km 390 (Figure 16), 397, 411 et 486. Voir également la carte de localisation à l'annexe A.

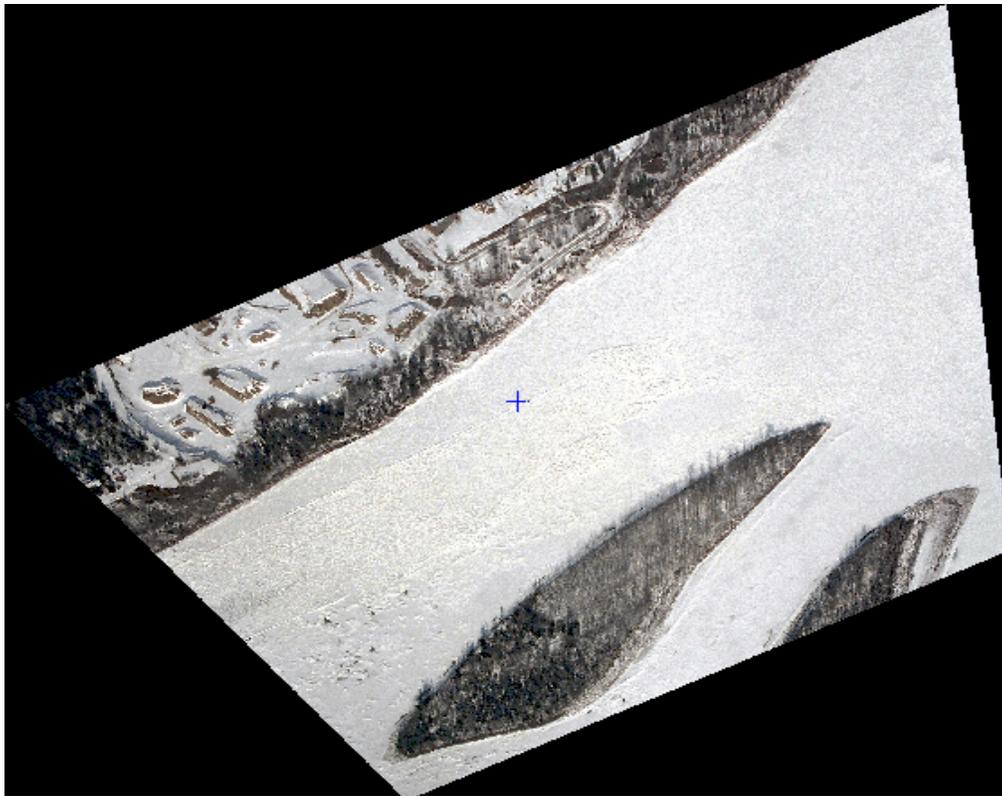


Figure 16 : Photo aérienne orthorectifiée du couvert de glace, Km 390, Peace River, 16 mars 2006

Le géoréférence des photos fut établie à l'aide de point GPS récoltés au sol et de coordonnées extraites de fichiers d'informations géographiques dans le logiciel ER Mapper V.7 (Penner, 2006). Dans le but de pouvoir superposer les photos-aériennes

(vérité terrain) et les résultats de classification, ces photos ont été projetées en UTM Zone 11 D-04. La précision géométrique obtenue pour le km 390 est adéquate.

Pour les km 397 et km 411, en raison de problèmes de précision, l'utilisation du logiciel Microstation 8 (Version Descartes) a été nécessaire. Un procédé (*warping process*) permet de forcer les photos aériennes à concorder avec les points de contrôles, ce qui produit une très bonne précision à l'intérieur du polygone de ces derniers, mais qui produit une forte erreur à l'extérieur de celui-ci (Penner, 2006). De plus, l'utilisation de points de contrôle facilement détectables sur l'image RADARSAT-1 ont permis d'améliorer la superposition de ces deux photos aériennes avec l'image.

Pour le km 486, en raison de l'insuffisance de points de contrôle due à la nature de l'endroit, la photo aérienne a été écartée pour cette étude (Penner, 2006).

Subséquemment, la photo-interprétation peut être réalisée à partir des photos aériennes des kilomètres 390, 397 et 411. Selon l'expérience des spécialistes des glaces de rivière de B.C. Hydro, 7 types de glaces et l'eau libre ont été reconnaissables visuellement et délimités manuellement sur les photos aériennes pour la date du 16 mars 2006 (Penner, 2006). Ceux-ci sont les suivants :

1. **Eau libre** (*open water*);
2. **Glace de rive stable** (*static border ice*) : située à l'extérieur du chenal principal;
3. **Glace de rive en mouvement** (*Dynamic border ice*) : située à l'extérieur du chenal principal, constitué de morceaux de glace consolidés;
4. **Couvert de glace légèrement-consolidé 1** (*Slightly consolidated ice, smoother*) : texture de faible rugosité;
5. **Couvert de glace légèrement-consolidé 2** (*Slightly consolidated ice, rougher*) : texture de forte rugosité;
6. **Couvert de glace consolidé** (*Consolidated ice*);
7. **Couvert de glace fortement consolidé** (*Heavily consolidated ice*);

8. **Couvert de glace consolidé mixte** (*Expanded consolidated ice*) : représente un couvert avec des morceaux de glaces consolidés qui se sont brisés et fusionnés avec le couvert en place, ce qui résulte en un couvert de forte et de faible rugosité;

La Figure 17 nous démontre un exemple de vérité-terrain pour le km 390. À l'annexe A, nous retrouvons tous les cartes (Km 390, 397 & 411) de vérité-terrain pour la Rivière Peace.

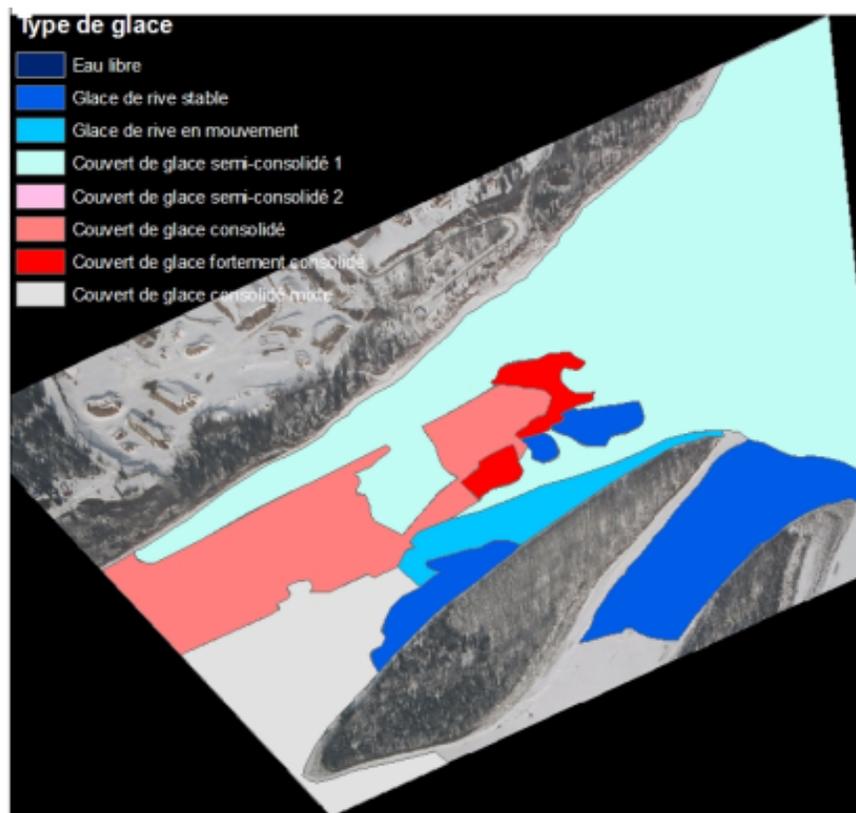


Figure 17 : Carte de vérité-terrain du couvert de glace, Km 390, Peace River, 16 mars 2006

Au moment de la superposition à la classification, il est possible que certaines de ces classes doivent être regroupées à cause de la similitude entre deux types de glaces (par exemple, couvert de glace semi-consolidé 1 vs. couvert de glace semi-consolidé 2). Les photos-interprètes ont une connaissance du territoire et appréhendent la dynamique de la rivière, ce que la classification non-supervisée ne fait pas a priori. Par conséquent, l'imagerie radar ne permet pas une distinction entre ces deux classes de vérité-terrain qui possèdent des caractéristiques très similaires.

Par ailleurs, il est aussi très important de comprendre que cette photo-interprétation ne représente pas la réalité absolue puisqu'elle donne une image de la surface seulement. Néanmoins, même si elle contient une part de subjectivité, la vérité-terrain du 16 mars 2006 de la rivière Peace représente une excellente source d'information pour valider quantitativement la classification des glaces de rivière à partir de l'image RADARSAT-1.

3.3.2 Reconnaissance au sol (Rivière Saint-François)

Lors des dates d'acquisition d'images sur la rivière Saint-François (Tableau 2), la vérité-terrain a été constituée à partir d'observations faites au sol par une équipe de l'INRS-ETE et d'Hydro-Québec. Ainsi, plusieurs sites (prédéterminés et géoréférencés) en bordure de la rivière ont été visités pour établir une description visuelle du couvert de glace. Pour cette étape, des croquis ont été effectués sur une carte de la rivière, en respectant le plus possible la localisation géographique des limites des zones de glace (Figure 18). La prise de notes est aussi très importante afin de mieux caractériser le couvert de glace en place. L'existence de conditions particulières sur la rivière, tel que des zones d'eau libre, se doit d'être prise en considération pour localiser les différents types de glace qui pourraient se retrouver à proximité. Par la suite, une photographie a été prise à partir de la rive (Figure 19). L'ensemble de ces observations ont permis alors de créer les sites de vérité-terrain (Figure 20).

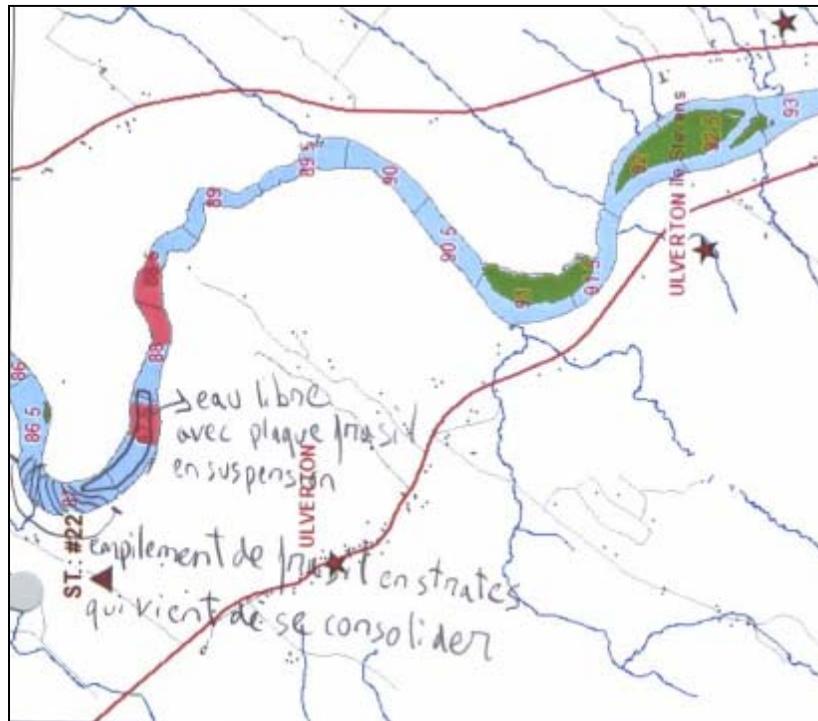


Figure 18 : Carte et croquis du couvert de glace lors de la visite sur le terrain, Km 87, Rivière Saint-François, 7 février 2007



Figure 19 : Photo prise de la rive, Km 87, Rivière Saint-François, 7 février 2007

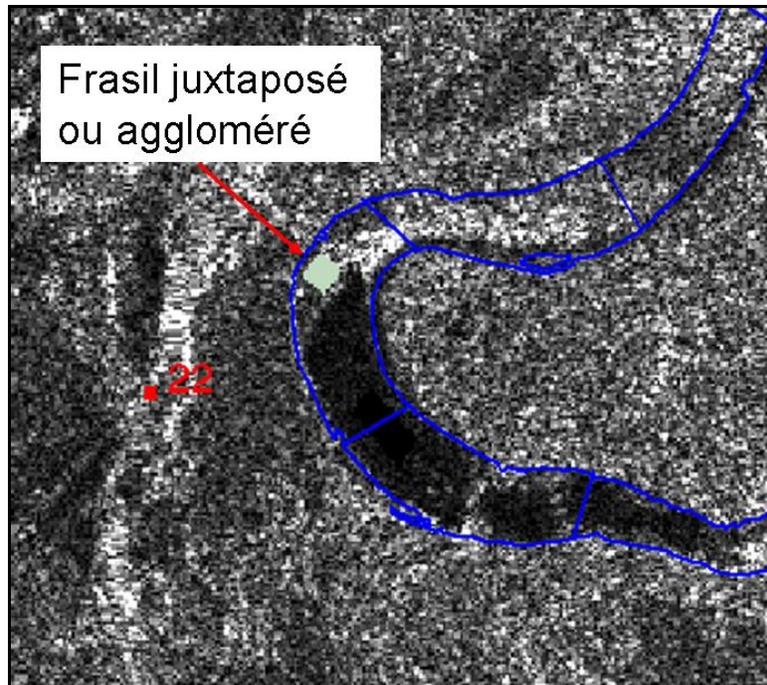


Figure 20 : Exemple de vérité-terrain au site géoréférencé # 22 sur la rivière Saint-François, 7 février 2007

Selon cette vérité-terrain, plusieurs types de glaces et l'eau libre ont été reconnaissables visuellement à partir des photos prises des rives pour les différentes dates à l'étude. L'interprétation des observations a été également appuyée par une connaissance des conditions climatiques précédant l'acquisition des images. Les cartes de vérité-terrain du couvert de glace obtenues à partir de photo-interprétation se retrouvent à l'annexe A.

Au cours de l'hiver 2005-2006, le couvert de glace a rapidement pris place. Cependant, de fortes pluies au mois de janvier ont provoqué un détachement du couvert en place sur la section amont de la rivière. Lors de l'acquisition de l'image du 26 janvier 2006, la visite sur le terrain nous a permis de remarquer que le couvert de glace en place sur la section aval était peu rugueux car il n'avait pas cédé lors de fortes pluies. À l'inverse, dans la section plus en amont, de nombreux amas de glaces furent notés. Les différents types de glaces retrouvés le 26 janvier sont les suivants :

1. **Eau libre** ;
2. **Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)**;
3. **Amas de glace ou glace fortement consolidée** : empilement de glace.

Les jours suivants, d'autres fortes pluies sont tombées, ce qui a causé la désintégration de la majorité des amas de glace. Par la suite, des conditions climatiques froides ont été maintenues pendant plusieurs jours, ce qui a engendré une forte production de frasil. Cette température perdurait le 12 février 2006, date d'une acquisition d'image satellite. Voici les types de glaces notés lors de la visite sur le terrain :

1. **Eau libre** ;
2. **Frasil en suspension (panneaux de frasil)**;
3. **Couvert peu rugueux (Glace colonnaire)**;
4. **Frasil juxtaposé ou aggloméré** : texture de faible rugosité;
5. **Frasil consolidé** : texture de moyenne rugosité;
6. **Frasil fortement consolidé ou frasil consolidé rugueux** : texture de forte rugosité;
7. **Amas de glace ou glace fortement consolidée** : empilement de glace.

Au cours de l'hiver 2006-2007, le refroidissement des températures fut très tardif et peu accentué dans la région de la rivière Saint-François. Le 7 février 2007, date de la première acquisition d'image pour l'hiver 2007, quatre types de glace et l'eau libre furent identifiés lors de la prise de photos sur les rives de la Saint-François.

1. **Eau libre** ;
2. **Couvert peu rugueux (Glace colonnaire)**;
3. **Frasil juxtaposé ou aggloméré** : texture de faible rugosité;
4. **Frasil consolidé** : texture de moyenne rugosité;
5. **Frasil fortement consolidé ou frasil consolidé rugueux** : texture de forte rugosité;

3.4 Classification du couvert de glace

Après avoir procédé à tous les traitements initiaux (section 3.2) sur les images satellites, nous étions en mesure de débiter les classifications à l'aide des différentes méthodes expliquées au cours du chapitre 2. Dans les prochains paragraphes, les différents paramètres et ajustements effectués sur chacune des méthodes sont expliqués. Nous devons expliquer que lorsque le nombre de classe n'est pas fixé d'avance par la méthode

de classification, le choix du nombre de classes pour cette méthode est basé sur le nombre de classes de la vérité-terrain. À l'opposé, dans l'éventualité que nous ne disposerions pas de vérité-terrain pour établir le nombre de classes, celui-ci serait établi à 7 ou 8 classes. Ce nombre de classes serait utilisé car il est très fréquent de voir 7 ou 8 types de glaces composés le couvert de glace. Par conséquent, même si le couvert de glace ne comporte que 3 ou 4 types de glaces, nous prévoyons qu'une méthode de classification à 7 ou 8 classes devrait distinguer 3 ou 4 types de glaces tandis que les autres classes seront nulles (pas ou très peu de pixels).

3.4.1 Classification non-supervisée à l'aide la rétrodiffusion (NSR)

Cette méthode fut appliquée sur les différentes images acquises au cours des hivers 2006 et 2007. Tel qu'expliqué dans la section 2.3.1, elle permet de classifier les valeurs d'intensité de l'image (coefficients de rétrodiffusion). La classification est effectuée sous le masque de la rivière seulement. Ce dernier est fait à partir de vecteurs des rives au 1 :20 000. Pour un site d'étude où 7 types de glaces de rivières et de l'eau libre furent reconnus, une classification à huit classes est effectuée. Nous avons procédé de la sorte pour évaluer si le classificateur pouvait distinguer le même nombre de classes que la vérité-terrain.

3.4.2 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion (NSTR)

La méthode décrite dans la section 2.3.2 a été suivie intégralement pour classifier les images RADARSAT-1. De plus, le nombre de classes est également calqué sur la vérité-terrain.

3.4.3 Classification orientée-objets (OO)

Cette troisième méthode de classification fut quelque peu modifiée par rapport à la version initiale développée par El Battay (2006). Premièrement, nous avons réduit le nombre de catégories de résultats que pouvait prendre un objet, afin de mieux se conformer aux classes de la vérité-terrain. Pour cela, nous avons regroupé certaines catégories et changé leurs noms par des synonymes ou des regroupements plus grossiers. Par exemple, la glace de rive thermique et la glace thermique en mouvement forment une

seule catégorie qui s'appelle maintenant glace colonnaire. De plus, des distinctions entre spot d'eau libre et petit chenal d'eau libre sont englobées dans la catégorie eau libre. Nous avons aussi regroupé les différents risques d'embâcles et les glaces fortement agglomérées dans une catégorie commune d'amas de glace fortement consolidées.

La segmentation de l'image a été effectuée pour que les objets soient le plus représentatifs du couvert de glace en place. Pour cela, nous avons évalué le résultat des segmentations par rapport à certaines zones de vérité-terrain. Nous avons donc testé plusieurs combinaisons de segmentation pour obtenir le résultat le plus semblable aux zones de vérité-terrain. Par la suite, nous avons conservé ces paramètres de segmentation pour toutes les images.

La classification de ces objets a été effectuée sur la base de l'organigramme hiérarchique présenté à la Figure 12 et selon les regroupements tel qu'expliqués ci-précédemment. Par ailleurs, les seuils d'amplitude employés par El Battay (2006) ont dû être adaptés puisqu'ils n'étaient basés que sur les couverts de glace des hivers 2001 et 2002, ceux-ci étant très différents des hivers 2006 et 2007. La Figure 21 démontre en effet que les rétrodiffusions de 2006 et 2007 sont significativement plus élevées qu'en 2001 et 2002. Notez que les toutes les images ont subies les mêmes traitements initiaux.

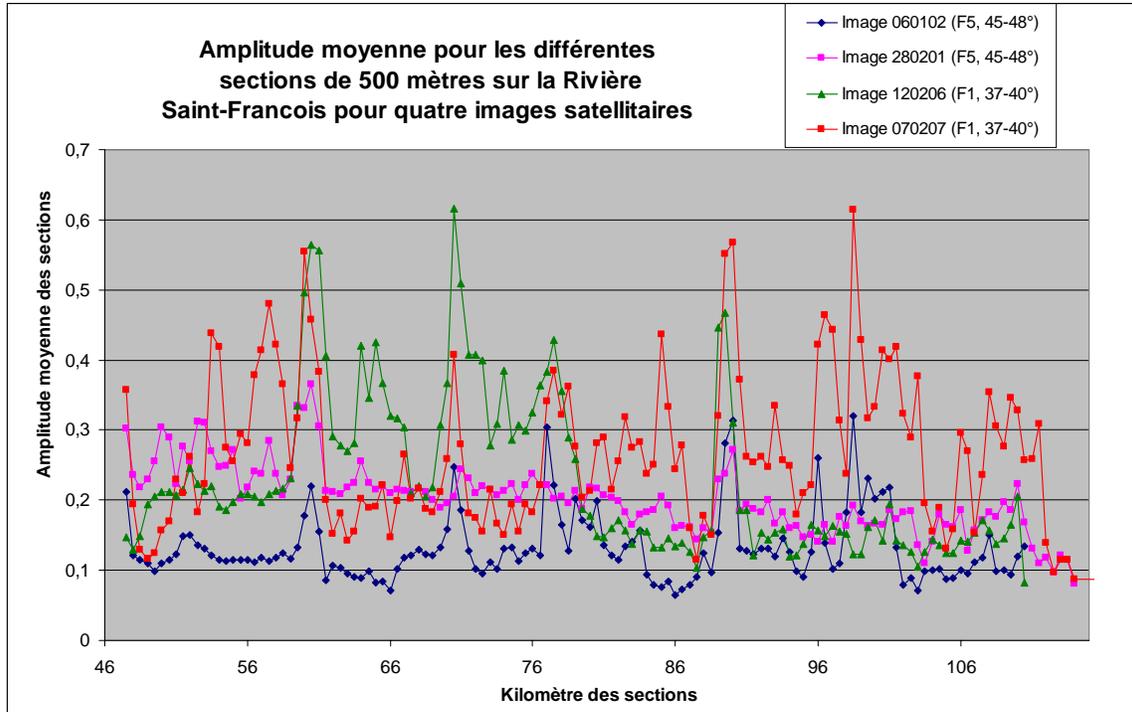


Figure 21 : Amplitude moyenne pour quatre images de la Rivière Saint-François pour le secteur à l'étude

Les nouveaux seuils d'amplitude pour les différentes catégories de couverts de glace ont été établis à l'aide des vérités-terrain disponibles pour l'année 2006. Premièrement, nous avons procédé à la segmentation de l'image pour obtenir des objets sous le masque de la rivière. Par la suite, nous avons compilé les valeurs moyennes de l'amplitude pour ces objets, dans les zones de vérité-terrain (Tableau3). Il faut noter que les seuils des catégories ayant de faibles valeurs d'amplitudes ont peu changé tandis que les catégories de plus fortes valeurs ont subi les plus fortes variations. Nous pouvons associer cette hausse au couvert très rugueux et consolidé, plus présent sur les images 2006 et 2007.

Tableau 3 : Seuils d'amplitudes modifiés pour les catégories de classification de l'OO

A - Rivière Saint-François	
Type de glace	Seuil d'amplitude
Eau libre	0 à 0,099
Frasil en suspension	0,1 à 0,1499
Glace colonnaire	0,15 à 0,2999
Frasil juxtaposé	0,20 à 0,4299 *
Frasil consolidé	0,43 à 0,5699
Frasil fortement consolidé	0,57 à ∞

B - Rivière Peace	
Type de glace	Seuil d'amplitude
Eau libre	0 à 0,1499
Glace colonnaire	0,15 à 0,3499 *
Frasil juxtaposé	0,25 à 0,4299
Frasil consolidé	0,43 à 0,5699
Frasil fortement consolidé	0,57 à ∞

* Sur la St-François, les catégories de glace colonnaire et de frasil juxtaposé possèdent des valeurs similaires. Pour les séparer, nous avons ajouté dans le processus de l'organigramme de la classification OO, un seuil sur les valeurs de texture moyenne des objets. Le même principe fut appliqué pour la rivière Peace entre les catégories de glace colonnaire et de frasil juxtaposé.

3.4.4 Autres méthodes de classifications

En supplément aux méthodes de classification de la glace de rivière qui ont été validées, certaines variantes furent testées pour améliorer les cartes de glace. Par l'ajout de ces méthodes de classification, nous voulions tester l'impact qu'avait le choix d'un algorithme ou de certains paramètres (le nombre de classes par exemple) sur la qualité de la carte de glace. Pour les fins de ce mémoire, seulement quelques uns de ces résultats quantitatifs seront exposés. Les tests sur différents algorithmes et sur le choix de certains paramètres ont produit des résultats visuels qui nous permettaient de juger ces tests non-concluants sans même procéder aux validations quantitatives.

3.4.4.1 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de la rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16)

Un des tests les plus concluants fut une classification à seize classes de la rétrodiffusion et de la texture moyenne comme deux intrants à l'algorithme (Figure 22). Premièrement, l'image de rétrodiffusion est filtrée par le filtre de Kuan (3 x 3) et par le filtre médian (3 x 3), puis réduite à un format 8 bit. Parallèlement, pour ce qui est de la texture, l'application de la méthodologie de la section 2.3.2 est utilisée. La classification est ensuite effectuée à l'aide de l'algorithme Fuzzy K-Means avec ces deux intrants. Finalement, le résultat est filtré à l'aide d'un filtre modale (3 x 3). Par la suite, pour les fins de comparaisons quantitatives, les seize classes sont regroupées selon le nombre de classes de la vérité-terrain. Tout au long du processus, nous avons tenté de procéder au même regroupement des classes pour que la méthode soit la plus automatisée possible.

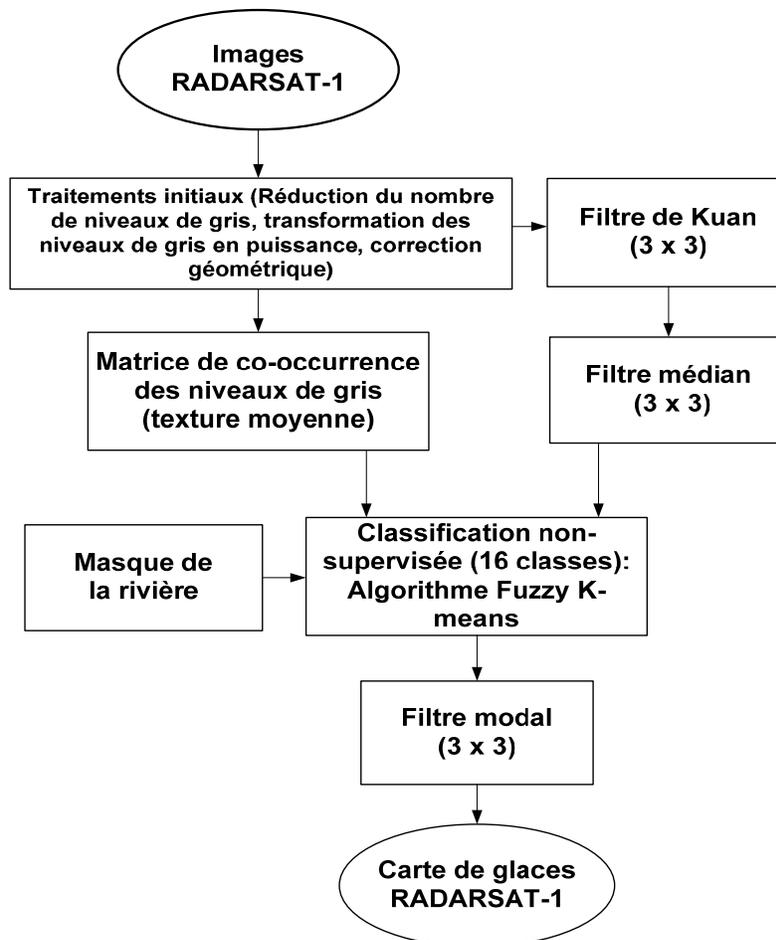


Figure 22 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSTR16

3.4.4.2 Classification non-supervisée à l'aide de la texture et de l'algorithme Narendra-Goldberg (NSNG)

Par ailleurs, nous avons aussi testé l'algorithme Narendra-Goldberg (Narendra et Goldberg, 1977), classificateur qui permet d'isoler les vecteurs unimodales dans l'histogramme des niveaux de gris pour former des classes. De plus, à l'inverse de plusieurs algorithmes de classification non-supervisée, cet algorithme est paramétrique et non-itératif. Pour cela, nous avons sensiblement utilisé la même méthodologie que pour la classification NSTR (Figure 10), sans toutefois y inclure la partie qui classifie la rétrodiffusion. Ainsi, l'image de rétrodiffusion en 16 bits est transformée en texture moyenne (7 x 7) avant d'être introduite dans l'algorithme de classification Narendra-Goldberg. Finalement, un filtre modal (3 x 3) est appliqué pour lisser la classification (Figure 23). Le nombre de classes est produit par le classificateur selon l'histogramme des valeurs.

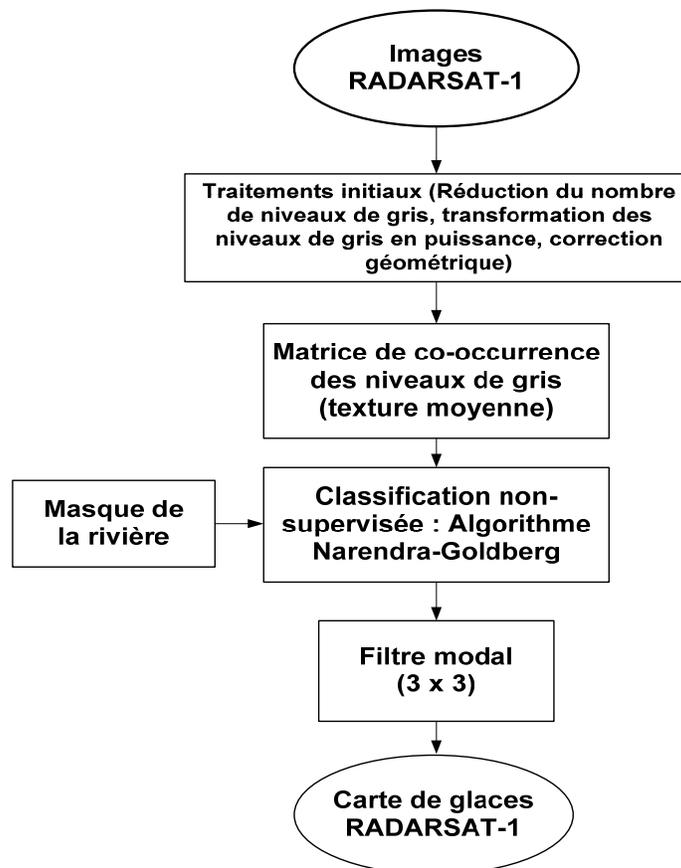


Figure 23 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode NSNG

3.4.4.3 Classification supervisée par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG)

Finalement, nous avons aussi utilisé le module SARSEG dans PCI Geomatica V.10 pour segmenter les images en objets. Pour cela, les images satellites doivent être en 32 bits pour procéder à la segmentation. Par la suite, ce module produit des objets possédant une valeur moyenne et un identificateur unique. Ces derniers sont subséquentement utilisés dans le module SARCLASS. Pour permettre une classification des objets, ce module nécessite aussi des zones d'entraînements. L'étalonnage a été effectué à partir d'une partie des zones de vérité-terrain que nous disposons pour les différentes dates d'acquisition d'images. À l'inverse de l'étalonnage, toutes les zones de vérité-terrain ont été utilisées pour la validation quantitative. Le nombre de classes est établi à partir du nombre de catégories définies dans les zones d'entraînements. Par la suite, les objets sont classifiés en se basant sur les zones d'entraînements à l'aide d'un classificateur de maximum de vraisemblance. La Figure 24 schématise la méthode SSG.

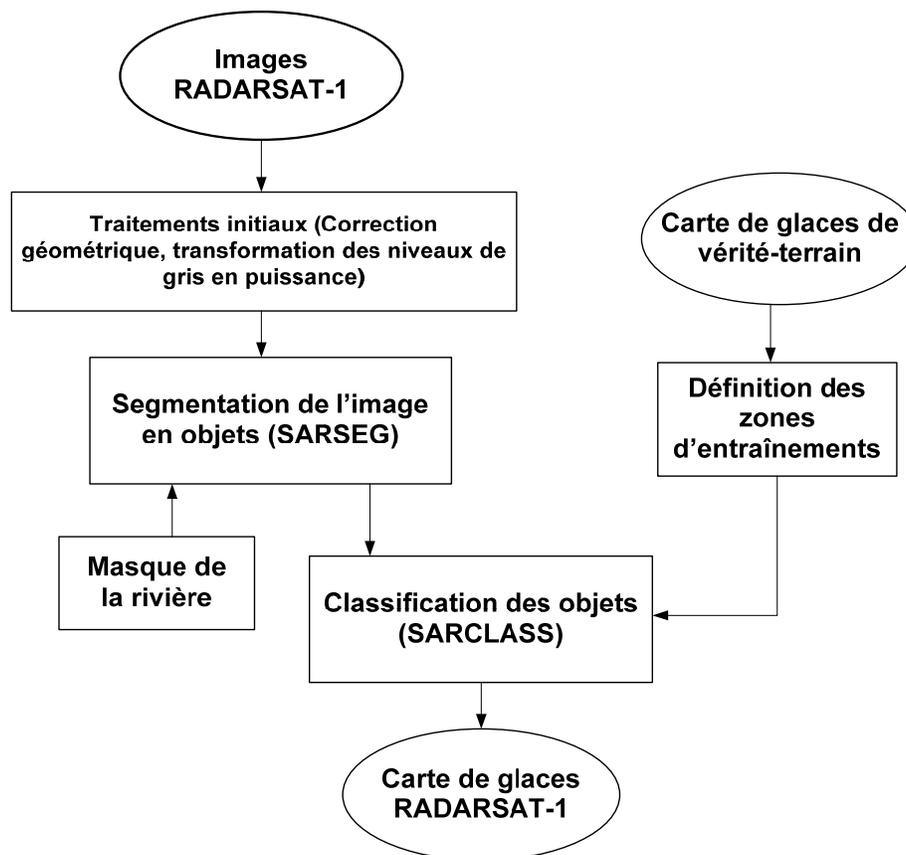


Figure 24 : Schéma des différentes étapes de classification de la méthode SSG

3.5 Validation des classifications

Pour évaluer quantitativement la précision et l'exactitude des différentes méthodes expliquées au chapitre 2 et 3, nous avons opté pour la matrice de confusion.

3.5.1 Matrice de confusion

L'utilité première des matrices de confusion est d'évaluer la qualité d'une classification de façon quantitative. La matrice de confusion est un tableau à deux entrées, soit la classification et les zones de références. Ces deux intrants doivent représenter spatialement le même territoire afin de procéder à la comparaison entre eux. Par exemple, lors du calcul d'une matrice de confusion, nous cherchons à savoir si un pixel classifié a correspond à une zone de référence (pixel) a . Le cas échéant, les pixels correctement classifiés se retrouvent sur la diagonale de la matrice. Dans le cas contraire, ceux-ci se retrouveront dans les autres cellules de la matrice. La matrice de confusion (Figure 25) permet ainsi de comparer une classification à une carte de référence (vérité-terrain) en calculant statistiquement la précision des diverses classes à l'intérieur d'une matrice carré (Centre canadien de télédétection, 2003). La matrice de confusion est une étape déterminante qui permet à l'utilisateur de mesurer la qualité de la classification obtenue.

Ces matrices de confusion permettent de calculer les différentes erreurs de commissions, C_e (eq. 4), d'omissions, O_e (eq. 5), le coefficient de kappa, K (eq. 6), la précision de chaque classe, MA (eq. 7) et la précision globale de la classification, OA (eq. 8). L'erreur de commission se produit lorsqu'un pixel est assigné incorrectement à une classe et qui appartient en fait à une autre classe. À l'inverse, l'erreur d'omission se produit lorsqu'un pixel est incorrectement exclu d'une classe. De plus, la précision d'une classe correspond au nombre de pixels bien classifiés divisé par la somme des pixels bien classifiés, des pixels d'omissions et des pixels de commissions (Short, 2007). La précision globale de la classification représente le nombre de pixels bien classifiés divisé par le nombre total de pixels. Pour terminer, le coefficient de kappa (K) représente la statistique de reproductibilité et d'accord entre deux cartes (Centre canadien de télédétection, 2003). Le Tableau 4 représente les différentes significations pour les valeurs de Kappa.

$$C_e = \Sigma P_{iv} / P_{tc} \quad (4)$$

$$O_e = \Sigma P_{ih} / P_{tc} \quad (5)$$

Où

P_{iv} est le nombre de pixels incorrectement classifiés pour une classe;

P_{ih} est le nombre de pixels classifiés dans une classe, mais qui ne devrait pas l'être;

P_{tc} est le nombre total de pixels pour une classe. (Short, 2007)

$$K = (P_o - P_e) / (1 - P_e) \quad (6)$$

Où

P_o est la proportion d'accord observé;

P_e est la proportion d'accord aléatoire ou concordance attendue sous l'hypothèse d'indépendance des jugements. (Centre canadien de télédétection, 2003)

$$MA = P_c / (P_c + P_o + P_{cm}) \quad (7)$$

$$OA = \Sigma (PR_c \times P_{tc}) / P_t \quad (8)$$

Où

P_c est le nombre de pixels correctement classifiés pour une classe;

P_o est le nombre de pixels d'omissions pour une classe;

P_{cm} est le nombre de pixels de commissions pour une classe;

P_t est le nombre total de pixels;

P_{tc} est le nombre total de pixels pour une classe;

PR_c est le pourcentage total de pixels correctement classifiés. (Short, 2007)

Tableau 4 : Degré d'accord et coefficient de Kappa (Source : Landis et Koch, 1977)

Accord	Kappa
Excellent	$\geq 0,81$
Bon	0,80 - 0,61
Modéré	0,60 - 0,41
Médiocre	0,40 - 0,21
Mauvais	0,20 - 0,0
Très mauvais	$< 0,0$

Landsat Accuracy Assessment								
Photo/Ground Classes	Landsat Classes				Total Possible	Omissions	Commissions	Mapping Accuracy*
	Corn	Soybeans	Forest	Other				
Corn	25	5	10	3	43	$\frac{18}{43} = 42\%$	$\frac{7}{43} = 16\%$	$\frac{25}{25 + 18 + 7} = 50\%$
Soybeans	2	50	6	5	63	$\frac{13}{63} = 21\%$	$\frac{11}{63} = 17\%$	$\frac{50}{50 + 13 + 11} = 68\%$
Forest	3	4	60	5	72	$\frac{12}{72} = 17\%$	$\frac{18}{72} = 25\%$	$\frac{60}{60 + 12 + 18} = 67\%$
Other	2	2	2	100	106	$\frac{6}{106} = 6\%$	$\frac{13}{106} = 12\%$	$\frac{100}{100 + 6 + 13} = 84\%$
Total	32	61	78	113	284			

Overall Landsat Classification Accuracy = $\frac{25 + 50 + 60 + 100}{284} = 83\%$

*Mapping Accuracy (MA) for any Class X:

COMMISSIONS

OMISSIONS

→

$$MA = \frac{\text{Pixels of } X_{\text{correct}}}{\text{Pixels of } X_{\text{correct}} + \text{Pixels of } X_{\text{omission}} + \text{Pixels of } X_{\text{commission}}}$$

Pixels of X_{omission} = All other classes in X Row
 Pixels of $X_{\text{commission}}$ = All other pixels in X Column

Figure 25 : Exemple d'une matrice de confusion (Image tirée de Short, 2007)

Dans la présente étude, les deux couches d'informations à comparer sont : 1) l'image classifiée et 2) la vérité-terrain. Celle-ci a été géoréférencée et ré-échantillonnée à la même résolution (6.25m) que les images classifiées. Pour obtenir une matrice carrée et calculer sa précision, on doit aussi comparer le même nombre de classes. Des regroupements peuvent alors être effectués. Toutefois, nous avons d'abord comparé l'ensemble des classes, afin de détecter les séparations claires ou de cerner les problèmes de confusion. En fonction de cette analyse, un regroupement de certaines classes est exécuté et une matrice carrée est obtenue.

La figure 26 représente un schéma récapitulatif de la méthode globale pour obtenir les validations quantitatives à partir des données terrains et de l'image RADARSAT-1.

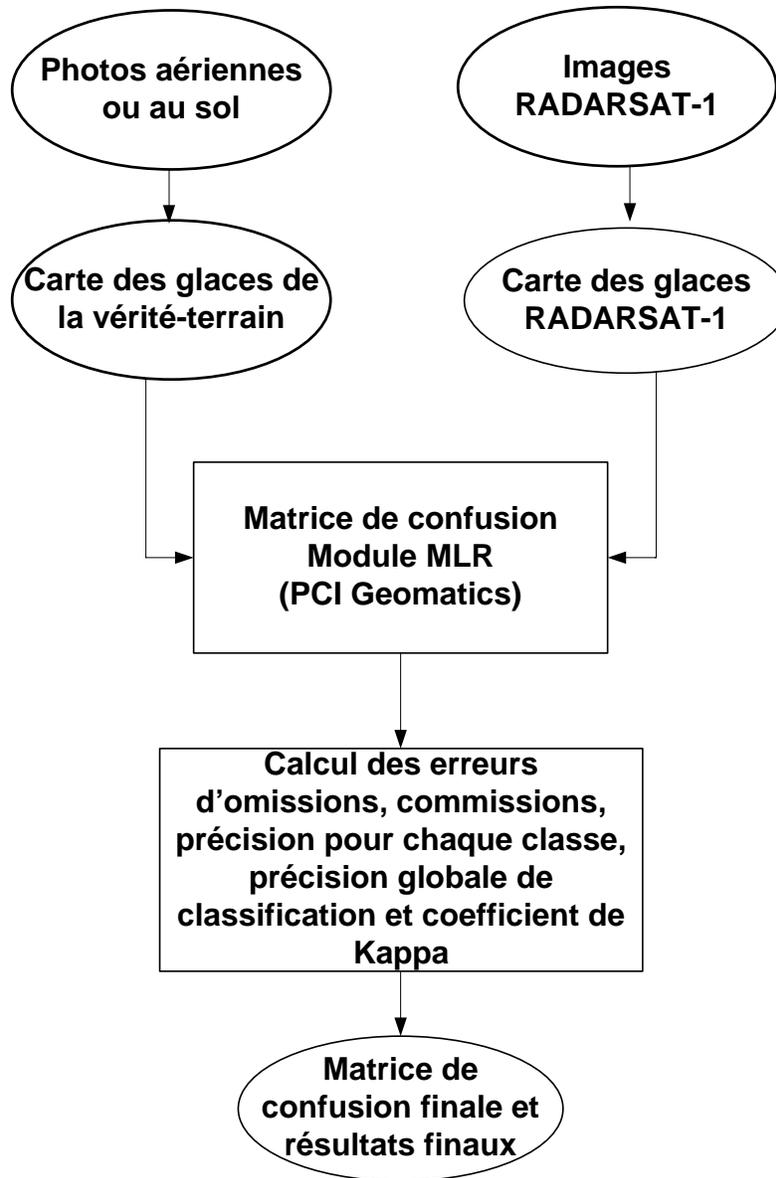


Figure 26 : Schéma récapitulatif de la méthodologie pour obtenir une validation quantitative

4. Résultats

Cette section du mémoire fait état des résultats quantitatifs de la validation des classifications des glaces de rivière à partir d'images RADARSAT-1. Ainsi, au cours de ce chapitre, les résultats de la comparaison entre la vérité-terrain et les classifications selon les différentes méthodes sont discutés. Pour illustrer la validation quantitative, les matrices de confusion sont présentées pour chacune des méthodes et pour chaque image traitée. Les résultats sont par la suite analysés et discutés.

Dans le but d'alléger le mémoire, nous ne présenterons pas tous les résultats cartographiques des classifications effectuées à l'aide des différentes méthodes pour chacune des dates. Nous avons inséré un exemple de classification pour chacune des six méthodes à l'annexe B.

4.1 Matrices de confusion et analyse des résultats

Les matrices de confusion représentent l'étape finale qui nous permet de répondre à l'objectif de départ de ce travail de maîtrise. Ainsi, la validation quantitative des classifications des glaces de rivière nous fournit une référence numérique sur la précision des méthodes à distinguer les différents types de glaces de rivière.

Généralement, le résultat de la photo-interprétation de la vérité-terrain représentant le couvert de glace se composait de 7 types de glaces ou moins et de l'eau libre. Ainsi, lorsque nous avons appliqué les méthodes NSR et NSTR, nous avons fixé le nombre de classes à 7 ou 8 afin de pouvoir constater si les méthodes de classifications pouvaient distinguer autant de classes que la vérité-terrain. Le nombre de classe pour la méthode SSG a été fixé selon le nombre de classe de la vérité-terrain. Comme son nom l'indique, la classification NSTR16 a été effectuée à l'aide de 16 classes. Pour la méthode OO, le nombre de classe a été fixé à 5 ou 6, à cause du regroupement des différents types de glaces de rivière en catégories plus globales dans l'organigramme orienté-objet (section 3.4.3). Finalement le nombre de classes obtenu avec la méthode NSNG est variable, étant

déterminé par l'algorithme de classification qui se base sur l'histogramme des valeurs de niveaux de gris.

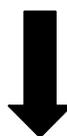
Il faut d'abord se pencher sur l'aspect de la taille de la matrice pour bien comprendre les résultats présentés ci-dessous. Tel que mentionné précédemment, la première matrice de confusion produite inclut toutes les classes. Ainsi, au départ nous obtenons une matrice qui correspond à toutes les classes de la vérité-terrain (3 à 8 dépendamment de la date d'acquisition) et aux 7 ou 8 classes de la classification, par exemple. À partir de ces résultats, nous pouvons facilement distinguer les confusions principales et les bonnes correspondances. Nous pouvons alors procéder aux regroupements des différentes classes de vérité-terrain qui sont similaires et qui produisent le même effet sur la rétrodiffusion du signal radar. Ainsi, nous obtenons un nombre réduit de grandes classes de vérité-terrain. Nous procédons de même en regroupant les classes résultantes de la classification, afin d'obtenir une matrice carrée. Cet exercice itératif est effectué pour toutes les méthodes et pour toutes les images. Nous avons inséré au tableau 5 un exemple de matrice de confusion (classes non-regroupées) et la matrice de confusion réduite (classes regroupées).

Dernièrement, le total des pixels pour une classe de la vérité-terrain peut varier faiblement d'une classification à une autre. Cela se produit fréquemment lorsque les classifications effectuées à l'aide du logiciel eCognition Professional sont transférées vers Geomatica V.10 (PCIGeomatics) pour compléter les analyses. Des pixels isolés sans valeur résultent de ces manipulations. Nous ne considérons pas ces pixels dans les analyses. Par conséquent, le nombre total de pixels est très faiblement différent pour une même classe de vérité-terrain d'une classification à une autre.

Tableau 5 : Exemple de regroupement de matrice

Matrice de confusion (classes non-regroupées) pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 7 février 2007

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Eau libre	1089	1077	12	0	0	0	0	0
Glace colonnaire	1071	574	338	148	11	0	0	0
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	127	491	995	719	149	0	0
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	0	110	1098	431	58
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	0	14	284	1652	394



Matrice de confusion (classes regroupées) pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 7 février 2007

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3 & 4	Classe 5	Classe 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1089	1077	12	0	0	0	1,1%	64,3%	60,2%
Glace colonnaire	1071	574	338	159	0	0	68,4%	47,0%	21,5%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	127	491	1714	149	0	30,9%	11,4%	62,0%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	110	1098	489	35,3%	25,5%	51,6%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	14	284	2046	12,7%	20,8%	72,2%

4.1.1 Rivière Saint-François, 26 janvier 2006

Les tableaux 6 à 11 représentent les matrices de confusion obtenues pour l'image du 26 janvier 2006 pour le site d'étude de la rivière Saint-François et ce, pour les six méthodes de classifications des glaces de rivière à partir d'images RADARSAT-1. L'image du 26 janvier 2006 permet d'abord d'appliquer la méthode de validation sur un cas très simple. Trois classes ont été identifiées à partir des informations récoltées sur le terrain et celles-ci présentent des caractéristiques forts différentes (eau libre, couvert de glace colonnaire lisse et couvert de glace fortement consolidé) tout en étant réparties en secteurs homogènes. La matrice de confusion montre alors de fortes concordances pour chaque classe (entre 83% et 100%), peu importe la méthode de classification. Notons pour l'instant que la méthode NSR arrive plus difficilement à discriminer les pixels de faible rétrodiffusion et que la classe d'eau est celle qui présente généralement le moins de confusion.

Tableau 6 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3, 4, 5, 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	725	725	0	0	0,0%	17,2%	85,3%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	849	125	724	0	14,7%	2,5%	83,3%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	21	513	3,9%	0,0%	96,1%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

Tableau 7 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2, 3 & 4	Classe 5, 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	725	725	0	0	0,0%	0,0%	100,0%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	849	0	844	5	0,6%	4,0%	95,6%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	34	500	6,4%	5,1%	92,7%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

**Tableau 8 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),
Rivière Saint-François, 26 janvier 2006**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3, 4 & 5	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	712	707	5	0	0,7%	0,0%	99,3%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	848	0	830	18	2,1%	0,6%	97,3%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	0	534	0,0%	17,8%	96,8%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

**Tableau 9 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16
classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 26 janvier 2006**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3, 4, 5, 6, 7, 8 & 9	Classe 10, 11, 12, 13, 14, 15 & 16	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	725	725	0	0	0,0%	0,0%	100,0%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	849	0	823	26	3,1%	1,9%	95,1%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	16	518	3,0%	26,3%	92,4%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

**Tableau 10 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG),
Rivière Saint-François, 26 janvier 2006**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 4, 5, 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	725	725	0	0	0,0%	0,0%	100,0%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	849	0	848	1	0,1%	6,2%	94,0%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	53	481	9,9%	0,8%	90,0%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

**Tableau 11 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG),
Rivière Saint-François, 26 janvier 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	725	710	15	0	2,1%	2,5%	95,6%
Couvert peu rugueux (Glace colonnaire et/ou frasil consolidé)	849	18	815	16	4,0%	4,1%	92,3%
Amas de glace ou glace fortement consolidé	534	0	19	515	3,6%	16,1%	93,6%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

4.1.2 Rivière Saint-François, 12 février 2006

L'image du 12 février 2006 présente un plus grand défi puisque 6 types de glace et l'eau libre ont été identifiés à partir des informations récoltées sur le terrain. Suite à la première itération des matrices de confusion, les classes d'eau libre et de frasil en suspension ont été regroupées. Dans ce cas, les panneaux de frasil en suspension sont entourés d'eau libre, ce qui crée la forte confusion. Également, les classes de glace colonnaire et de frasil juxtaposé sont regroupés puisqu'elles ne se distinguent pratiquement pas. Dans les faits, la glace colonnaire s'est formée ici entre les panneaux de frasil, ce qui produit la confusion. La matrice de confusion finale est donc de 5X5.

L'analyse de ces matrices (tableaux 12 à 17) nous permet de constater encore de bonnes précisions pour les classes déjà observées le 26 janvier. Par contre, lorsque l'on tente de discriminer plus en détail la glace consolidée, la précision baisse. La classification confond partiellement le frasil juxtaposé, la glace consolidée et la glace fortement consolidée. Les erreurs de commissions sont très élevées pour ces classes, variant souvent entre 100 % et 200%. Or, il est important de comprendre que ces erreurs influencent directement la précision de classification de ces classes. Par exemple, pour la NSTR, même si pour les pixels de la classe frasil fortement consolidé (2160 pixels), 1741 ont été bien classifiés (classe 5), nous pouvons noter que 4270 pixels furent aussi classifiés dans la classe 5 tandis qu'ils auraient dû être classifiés autrement. Par conséquent, la précision de classification de cette classe est faible malgré que 1741 pixels sur 2160 pixels furent bien classifiés. Ces faibles résultats peuvent résulter d'une limite spatiale qui

est très difficile à poser entre une glace de type frasil consolidé et fortement consolidé. À l'inverse de la limite spatiale entre l'eau libre et d'un amas de glace qui est facilement distinguable par le photo-interprète, la limite spatiale entre le frasil consolidé et fortement consolidé est plutôt continue et graduelle. Par conséquent, les limites entre les classes peuvent être quelque peu biaisées par le jugement du photo-interprète. De plus, la classe frasil fortement consolidé ne comprend qu'une petite zone de vérité-terrain (2160 pixels) par rapport à celle des autres classes. Cela peut aussi influencer le résultat de la comparaison avec la classification.

Au niveau de la performance des méthodes, elles sont assez comparables. On remarque toutefois un taux de succès plus élevé avec l'OO et un taux plus faible avec la NSR. Encore une fois, son incapacité à discriminer les classes de faible rétrodiffusion la rend moins performante, obligeant même la création d'une matrice de 4X4.

**Tableau 12 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),
Rivière Saint-François, 12 février 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classes 4,5,6,7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension, Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	122473	106429	15921	0	0	13,0%	0,6%	86,5%
Frasil consolidé	12497	675	10460	1350	12	16,3%	129,1%	36,5%
Frasil fortement consolidé	2160	0	214	1912	35	11,5%	93,0%	45,9%
Amas de glace	11353	0	0	658	10695	5,8%	0,4%	93,8%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 13 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR),
Rivière Saint-François, 12 février 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2 & 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension	24443	20385	3984	98	0	0	16,7%	2,1%	81,6%
Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	98034	490	84211	13039	392	0	14,2%	5,8%	81,1%
Frasil consolidé	12498	12	1662	7411	3299	112	40,7%	106,0%	28,8%
Frasil fortement consolidé	2160	0	0	104	1741	315	19,4%	197,7%	27,1%
Amas de glace	11353	0	0	11	579	10763	5,2%	3,8%	91,4%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

**Tableau 14 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),
Rivière Saint-François, 12 février 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension	24394	22903	1467	24	0	0	6,1%	15,3%	81,4%
Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	98034	3725	92544	1765	0	0	5,6%	2,5%	92,1%
Frasil consolidé	12510	0	950	11186	312	62	10,6%	23,5%	72,4%
Frasil fortement consolidé	2160	0	2	905	1253	0	42,0%	120,1%	26,4%
Amas de glace	11342	0	0	238	2282	8821	22,2%	0,6%	77,4%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

Tableau 15 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 12 février 2006

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1, 2 & 3	Classe 4, 5, 6, 7 & 8	Classe 9 & 10	Classe 11, 12 & 13	Classe 14, 15 & 16	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension	24437	21382	3030	24	0	0	12,5%	3,7%	84,4%
Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	98026	882	90380	6372	294	0	7,7%	6,0%	87,1%
Frasil consolidé	12499	25	2837	6549	3050	37	47,6%	52,4%	34,4%
Frasil fortement consolidé	2160	0	0	147	1894	119	12,3%	203,7%	28,9%
Amas de glace	11353	0	0	11	1056	10286	9,4%	1,4%	89,4%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 16 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG),
Rivière Saint-François, 12 février 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3 & 4	Classe 5	Classe 6 & 7	Classe 8	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension	24437	20063	4350	0	0	0	17,8%	2,1%	80,5%
Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	98026	490	96164	1176	196	0	1,9%	11,5%	88,0%
Frasil consolidé	12499	12	6924	3312	2237	0	73,4%	11,8%	23,7%
Frasil fortement consolidé	2160	0	26	257	1862	13	13,7%	267,2%	23,5%
Amas de glace	11353	0	0	45	3338	7970	29,8%	0,1%	70,1%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 17 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG),
Rivière Saint-François, 12 février 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3 & 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Frasil en suspension	24437	22164	1931	220	24	98	9,3%	14,2%	79,4%
Glace colonnaire & Frasil juxtaposé	93988	3102	79890	9117	1974	0	15,1%	3,1%	82,3%
Frasil consolidé	12494	337	2049	6160	3173	775	50,7%	76,9%	27,9%
Frasil fortement consolidé	2160	15	32	225	1369	518	36,6%	275,6%	16,9%
Amas de glace	11353	11	34	170	795	10331	8,9%	11,8%	81,5%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

4.1.3 Rivière Saint-François, 7 février 2007

La vérité-terrain du 7 février 2007 identifie des types de glace assez similaires à février 2006 et permettent de créer des matrices de confusion de 5 par 5 (tableaux 18 à 23), sans regroupement. Une seule exception est à noter pour la méthode NSR, où l'eau libre et la glace colonnaire furent combinées comme aux autres dates.

L'analyse des matrices nous permet d'abord de remarquer que la précision de la classification pour la glace colonnaire est plus faible qu'en 2006, due à une forte

confusion avec l'eau libre. Cela peut être expliqué par un refroidissement de l'air très lent en 2007, contribuant à la formation lente et graduelle d'un couvert de glace colonnaire avec peu d'inclusions d'air (Gherboudj et al., 2007). Le signal rétrodiffusé de la glace colonnaire et de l'eau libre sont donc tous deux assez faibles, ce qui cause la confusion. Les différentes classes de glace consolidées se distinguent pour leur part de façon bonne à modérée, avec une certaine confusion entre les classes adjacentes. Cela s'explique encore par la transition souvent graduelle entre les niveaux de consolidation et par le fait qu'on ne retrouve pas de consolidation extrême facilement observable comme en 2006.

C'est la méthode SSG qui produit les meilleurs résultats, avec des précisions de classifications élevées, de 79 % à 87 %, à l'opposé de 21,5 % à 78 % pour les autres méthodes. À l'opposé, la NSR performe la moins bien, même avec une matrice de 3X3.

**Tableau 18 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),
Rivière Saint-François, 7 février 2007**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3 & 4	Classe 5, 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre & Glace colonnaire	2160	2144	16	0	0	0,7%	67,5%	59,2%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	1454	950	74	0	61,6%	5,1%	36,5%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	102	1456	137	14,1%	55,0%	55,4%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	5	9	859	1473	37,2%	5,9%	59,3%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 19 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR),
Rivière Saint-François, 7 février 2007**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3 & 4	Classe 5	Classe 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1089	1077	12	0	0	0	1,1%	64,3%	60,2%
Glace colonnaire	1071	574	338	159	0	0	68,4%	47,0%	21,5%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	127	491	1714	149	0	30,9%	11,4%	62,0%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	110	1098	489	35,3%	25,5%	51,6%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	14	284	2046	12,7%	20,8%	72,2%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 20 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO),
Rivière Saint-François, 7 février 2007**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5 & 6	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1001	876	91	34	0	0	12,5%	37,4%	63,7%
Glace colonnaire	1067	375	654	38	0	0	38,7%	46,8%	41,8%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2475	0	408	1864	203	0	24,7%	7,5%	70,1%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	63	1268	368	25,4%	35,3%	55,2%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	49	396	1900	19,0%	15,7%	70,0%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

Tableau 21 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Saint-François, 7 février 2007

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2, 3, 4 & 5	Classe 6, 7, 8, 9 & 10	Classe 11, 12 & 13	Classe 14, 15 & 16	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1089	766	323	0	0	0	29,7%	0,0%	70,3%
Glace colonnaire	1071	0	840	231	0	0	21,6%	73,1%	45,3%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	0	459	1843	179	0	25,7%	13,4%	65,5%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	88	1137	472	33,0%	27,9%	52,4%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	14	296	2039	13,2%	20,1%	72,3%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

Tableau 22 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Saint-François, 7 février 2007

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1 & 2	Classe 3, 4 & 5	Classe 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,	Classe 14, 15 & 16	Classe 17	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1089	880	209	0	0	0	19,2%	3,9%	77,7%
Glace colonnaire	1071	43	858	170	0	0	19,9%	76,0%	45,5%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	0	605	1702	171	0	31,3%	12,0%	61,3%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	0	114	1140	445	32,9%	33,7%	50,2%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	0	0	14	401	1931	17,7%	19,0%	69,2%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

**Tableau 23 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG),
Rivière Saint-François, 7 février 2007**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	1089	1075	0	0	14	0	1,3%	19,5%	82,6%
Glace colonnaire	1071	81	990	0	0	0	7,6%	12,2%	82,3%
Frasil juxtaposé – texture lisse	2481	114	87	2191	87	2	11,7%	8,1%	81,7%
Frasil juxtaposé ou consolidé – texture moyenne	1697	0	7	122	1478	92	13,0%	10,4%	78,8%
Frasil fortement consolidé – texture forte	2346	16	38	80	75	2140	8,9%	4,0%	87,6%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes

4.1.4 Rivière Peace, 16 mars 2006

Comme nous le verrons dans les tableaux 24 à 29, les résultats obtenus avec la classification de l'image de la rivière Peace du 16 mars 2006 sont significativement différents de ceux obtenus sur la Saint-François. Les plus faibles précisions sont directement liées aux types de glace en présence et surtout, à la méthode employée pour établir la vérité-terrain. En effet, les glaces consolidées sont prédominantes par rapport aux zones d'eau libre ou de glace colonnaire. Il y a donc moins de contrastes et plus de confusion entre les classes adjacentes. Également, les frontières établies par le photo-interprète sont basées sur l'apparence en surface et peuvent différer de la façon dont le signal radar est rétrodiffusé en pénétrant le couvert (diffusion volumique). Elles englobent aussi des zones plus grandes et potentiellement plus hétérogènes.

Dans ce contexte, et comme pour la St-François, des regroupements de classes ont été effectués. Par exemple, les classes de glace consolidée et de glace fortement consolidée sont regroupées car elles possèdent un comportement similaire par rapport à la rétrodiffusion du signal radar. La classe de l'eau libre n'a pas été regroupée malgré que son comportement soit similaire à la glace colonnaire (glace de rive) par rapport à la rétrodiffusion du signal radar. Nous avons procédé de la sorte pour tenter de bien cerner l'efficacité des méthodes de classification à distinguer l'eau libre de la glace (tous types

confondus). Par la suite, nous pourrions alors travailler avec des matrices de 4X4, sauf dans le cas de la méthode NSR. Tel que mentionné précédemment, cette méthode de classification ne permet pas de faire la distinction entre les faibles valeurs de rétrodiffusion, ce qui engendrait une situation où la majorité des pixels ayant de faibles valeurs de niveaux de gris se retrouvaient dans la classe 1.

En revenant aux tableaux 24 à 29, il ressort que la classe d'eau libre est difficilement discriminée, peu importe la méthode (entre 0,5 % et 21%). C'est probablement dû au fait que dans la majorité des cas, la taille de ces zones est à peine de l'ordre de la résolution du capteur. De plus, le nombre de pixels couvrant les zones d'eau libre est beaucoup plus faible par rapport aux autres classes (eau libre = 850 pixels VS Glace de rive en mouvement et glace semi-consolidée 1 & 2 = 29 700 pixels). D'ailleurs, il est à noter que les erreurs de commissions de l'eau libre sont énormes pour la NSTR16 et la SSG, soit 387 % et 376 %. Pour les autres classes, on retrouve en général des précisions de 45 à 65%, avec erreurs d'omission et de commission surtout avec les classes adjacentes. La méthode OO présente les meilleurs résultats pour la majorité des classes, mais sans se démarquer de façon convaincante.

**Tableau 24 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée rétrodiffusion (NSR),
Rivière Peace, 16 mars 2006**

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classes 2 & 3	Classes 4, 5, 6, 7 & 8	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre, Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	8142	5268	2402	464	35,2%	14,8%	56,4%
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidé 1 & 2	29726	1189	23484	5053	21,0%	23,9%	63,8%
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15529	16	4705	10824	30,4%	35,5%	51,4%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

Tableau 25 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), Rivière Peace, 16 mars 2006

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classes 2, 3 & 4	Classes 5 & 6	Classes 7 & 8	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	850	5	607	182	56	99,4%	26,2%	0,5%
Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	7275	223	4058	2550	444	44,3%	24,3%	44,9%
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidée 1 & 2	29640	0	1121	20317	8202	31,5%	24,1%	55,2%
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15519	0	42	4402	11075	28,6%	56,1%	45,7%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

Tableau 26 : Matrice de confusion pour la méthode orientée-objets (OO), Rivière Peace, 16 mars 2006

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classes 3 & 4	Classe 5	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	845	335	145	280	85	60,4%	87,9%	21,1%
Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	7275	713	3710	2233	618	49,0%	11,6%	45,7%
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidé 1 & 2	29715	30	654	23980	5052	19,3%	21,7%	66,3%
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15526	0	47	3944	11536	25,7%	37,1%	54,2%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

Tableau 27 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), Rivière Peace, 16 mars 2006

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classes 1, 2, 3, 4 & 5	Classes 6, 7 & 8	Classes 9, 10, 11 & 12	Classes 13, 14, 15 & 16	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	850	469	201	112	68	44,8%	387,4%	11,3%
Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	7241	3041	2462	1238	500	66,0%	64,8%	20,6%
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidé 1 & 2	29490	236	4335	15807	9112	46,4%	17,7%	45,5%
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15522	16	155	3865	11502	26,0%	62,4%	45,6%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

Tableau 28 : Matrice de confusion pour la méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), Rivière Peace, 16 mars 2006**

Carte de glace \ Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	853	0 %	13,5 %	4 %	21,4 %	16,2 %	45 %	ND	ND	ND
Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	7289	0 %	11,9 %	4,7 %	18,2 %	11,1 %	54,1 %	ND	ND	ND
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidé 1 & 2	29726	0 %	0 %	0 %	0,5 %	0,7 %	98,7 %	ND	ND	ND
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15529	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	ND	ND	ND

Note : ** Les pourcentages représentent les résultats de la comparaison entre les classes de la vérité-terrain et des classes de la classification. ND = Non disponible.

Tableau 29 : Matrice de confusion pour la méthode par segmentation à l'aide de SARSEG (SSG), Rivière Peace, 16 mars 2006

Carte de glace Vérité-terrain	Total des pixels (V.T.)	Classe 1	Classes 2 & 8	Classes 3, 4 & 5	Classes 6 & 7	Omissions	Commissions	Précision de la classe
Eau libre	850	639	36	122	54	24,8%	376,0%	15,8%
Glace de rive stable & Couvert de glace consolidé mixte	7267	349	5341	1228	342	26,4%	126,2%	32,5%
Glace de rive en mouvement, Couvert de glace semi-consolidé 1 & 2	29073	1483	7123	15961	4477	45,0%	15,6%	47,5%
Couvert de glace consolidé & Couvert de glace fortement consolidé	15156	1364	2016	3198	8578	43,4%	32,1%	42,8%

Note : Les erreurs et la précision sont calculées pour les cellules jaunes.

4.1.5 Précision globale des méthodes de classifications

Les matrices de confusion précédentes nous ont permis d'établir la précision de chaque méthode pour la classification de chaque type de glace particulier. Toutefois, il est aussi important d'obtenir une précision d'ensemble pour chaque méthode. La précision globale nous permet aussi de dégager certains patrons sur la manière dont les classifications du couvert de glace réagissent d'une date à l'autre. Le tableau 30 présente un aperçu de la précision globale et du coefficient de Kappa pour chacune des méthodes de classification d'images RADARSAT-1. Rappelons que le coefficient Kappa représente la statistique de reproductibilité et d'accord entre deux cartes. La figure 27 nous démontre graphiquement les précisions globales de classification pour chacune des méthodes.

Tableau 30 : Précision globale et statistique de kappa pour chacune des méthodes de classification pour les rivières à l'étude et pour les dates d'acquisition d'images

Image & date	Rivière Peace [16 mars 2006] Matrice finale (4 x 4)	Rivière Saint-François [26 janvier 2006] Matrice finale (3 x 3)	Rivière Saint-François [12 février 2006] Matrice finale (5 x 5)	Rivière Saint-François [7 février 2007] Matrice finale (5 x 5)
Méthode de Classification				
NSR	73% (3x3) (k=0.54)	93% (k=0.92)	87 % (4x4) (k=0.66)	69% (4x4) (k=0.595)
NSTR	66.5 % (k=0.44)	98% (k=0.97)	84% (k=0.71)	72.5 % (k=0.65)
OO	75% (k=0.55)	99% (k=0.98)	92% (k=0.85)	76.5% (k=0.70)
NSTR16	57% (k=0.33)	98% (k=0.97)	88% (k=0.77)	76% (k=0.70)
NSNG	ND	97,5% (k=0.96)	87% (k=0.74)	75% (k=0.68)
SSG	57,5% (k=0.37)	96,5% (k=0.95)	82% (k=0.65)	90,5% (k=0.88)

Note : Les cellules en jaune représentent des matrices réduites. * k = Kappa, ND = Non disponible.

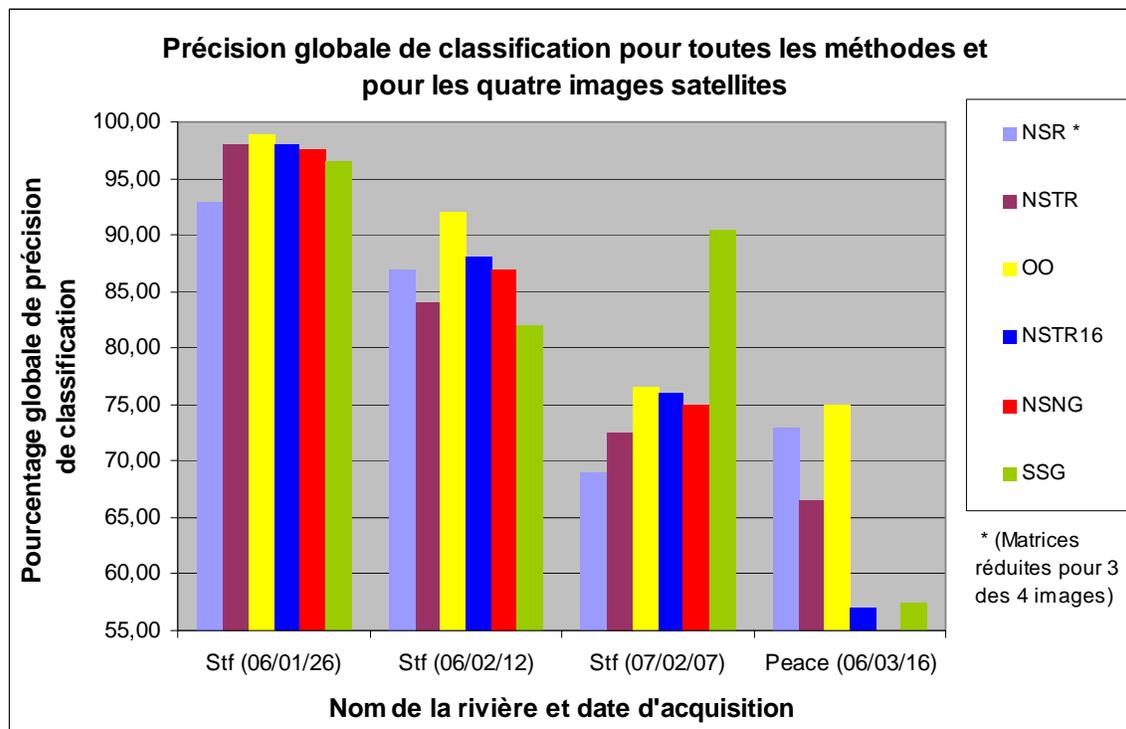


Figure 27 : Pourcentage global de précision pour les six méthodes et pour les quatre images satellites

Le tableau 30 et la figure 27 démontrent que la méthode de classification orientée-objets (OO) est la plus performante, avec des précisions globales de 75 % à 99%. C'est également la seule à bien performer sur l'image de la rivière Peace du 16 mars 2006, pour une matrice de 4X4. Il est aussi intéressant de noter que la seule méthode qui arrive, en une occasion (7 février 2007), à dépasser l'OO est la SSG, une méthode similaire basée sur une étape de segmentation suivie par une classification. Il s'agit donc certainement d'une voie à privilégier dans de futurs travaux. À l'opposé, la méthode NSR donne les résultats les moins satisfaisants et ce malgré la réduction de la dimension des matrices de confusion. La faible discrimination des pixels de faible rétrodiffusion par la méthode de classification explique majoritairement ces précisions moins élevées. Cela confirme donc l'avantage d'utiliser aussi la texture de l'image. Les trois autres méthodes (NSTR, NSTR16 et NSNG) donnent des résultats généralement satisfaisants (>75%), sans qu'aucune ne se démarque des autres. Elles sont également plus simples à automatiser, ce qui représente un certain avantage.

4.2 Discussion

Suite à la présentation des résultats, nous pouvons confirmer la sensibilité de RADARSAT-1 face à différents types de couverts de glace de rivière. En général, les méthodes étudiées ici, permettent de distinguer de façon satisfaisante, 3 à 4 couverts de glace et l'eau libre. Notons toutefois que :

- l'eau libre et la glace colonnaire obtiennent des résultats médiocres à l'aide de la méthode NSR. À l'opposé, les amas de glace produisent une précision de classification très élevée avec cette méthode;
- les classes d'eau libre et de glace colonnaire sont facilement distinguées par la méthode NSNG. À l'opposé, les glaces consolidées et les amas de glace sont plus difficilement distinguables par cette méthode. Il faut noter que lorsque la classification est effectuée, de nombreux pixels sont classifiés dans les classes supérieures (valeur moyenne de rétrodiffusion élevée);
- la méthode NSTR engendre des bons résultats de classification pour la majorité des classes de vérité-terrain. Il faut toutefois prendre note qu'il y a une grande confusion entre les classes de glace semi-consolidée et consolidée tandis que l'eau libre est très

mal discriminée si la zone correspondante est trop étroite. Nous devons par contre noter la régularité de la précision de la classification sur l'ensemble des images traitées, ce qui est un signe de fiabilité;

- la méthode NSTR16 réagit de manière similaire à la méthode NSTR. En effet, les surfaces d'eau libre sont facilement distinguables lorsque l'étendue de la zone est grande tandis que des erreurs de commissions et d'omissions sont présentes entre les différentes classes de glace consolidée;
- la performance de chaque méthode est variable mais cinq des six méthodes utilisées nous fournissent des résultats satisfaisants. Ainsi, ces validations quantitatives nous permettent d'établir une référence nominale qui va servir à évaluer les futures classifications ou à orienter les améliorations à effectuer;
- la méthode OO a démontré sa grande habileté à classifier de manière efficiente les glaces de rivière à partir d'images RADARSAT-1. Ces chiffres nous témoignent que l'approche basée sur la segmentation de l'image en objets apporte une valeur ajoutée comparativement à l'analyse pixel par pixel. Toutefois, il faut aussi prendre en considération que la méthode OO n'est pas encore complètement automatisée et qu'elle implique une plus grande participation de l'utilisateur. L'établissement des seuils pour les différentes classes nécessite également une analyse multi-images, pour être applicables à tous les images. Finalement, la méthode OO requiert aussi l'utilisation d'un logiciel spécialisé supplémentaire (eCognition Professional), ce qui engendre des coûts additionnels.

Les résultats obtenus sur la rivière Peace, par toutes les méthodes, sont plus faibles comparativement aux résultats de la rivière Saint-François. Tel que mentionné auparavant, la vérité-terrain à partir des photos aériennes est très détaillée. Par conséquent, il peut être pensable qu'elle soit trop précise par rapport à la résolution du satellite. De plus, la différence entre certaines classes de vérité-terrain est très subtile et ne peut être égalée par une méthode de classification non-supervisée. Finalement, sans avoir présenté ces matrices de confusion dans le chapitre 4, nous obtenons des résultats forts divergents d'une photo aérienne à une autre lorsqu'elles sont comparées individuellement. Par exemple, la vérité-terrain de la photo aérienne du Km 411 produit

des résultats beaucoup plus faibles que les deux autres, ce qui va logiquement venir affecter les résultats globaux. Cela ne peut dépendre que du type de glace en présence ou de l'interprétation qui en est faite.

Par ailleurs, il est grandement important de discuter du fait que la nomenclature pour les types de glaces est un aspect complexe qui cause problème. En effet, nous pouvons constater que pour les quatre images satellites analysées, la vérité-terrain de chacune de celle-ci comporte des ressemblances au niveau des types de glaces, mais elle comporte aussi de grandes différences. Qu'elle soit produite par les spécialistes de chez BC Hydro ou de l'INRS-ETE, la vérité-terrain ne porte pas toujours les mêmes noms pour les types de glaces. Dans la littérature, nous pouvons ainsi trouver plusieurs noms pour un seul type de glace, tout dépendant de l'auteur. Il a donc été nécessaire de faire des équivalences entre les différents noms des glaces de rivière pour pouvoir les comparer entre elles.

Pour continuer dans la même lignée sur les différents types de glaces de rivières, une importance doit aussi être accordée à la limite spatiale des zones de vérité-terrain. Mentionné précédemment dans l'analyse des résultats, l'aspect spatial est un facteur qui peut venir influencer grandement les résultats de précision des classifications. La limite spatiale entre deux classes n'est pas toujours très nette et claire, mais parfois lente et graduelle. Il est donc normal que l'algorithme de classification ne délimite pas nécessairement les mêmes limites spatiales que le photo-interprète. De plus, comme la photo-interprétation est effectuée selon l'interface air-glace et que la rétrodiffusion peut être influencée par la diffusion volumique de toutes les couches de glace et l'interface glace / eau et même le lit de la rivière, la réalité de la vérité-terrain n'est pas complètement vérifiable pour le moment. Il faut aussi penser à la couche de neige à la surface qui peut influencer la photo-interprétation à l'interface air-glace. Par conséquent, il peut donc y exister certaines différences entre les deux sources de données.

Les deux approches utilisées pour obtenir la vérité-terrain dans cette étude produisent des résultats assez différents. Étonnamment, le survol aérien ne produit pas d'excellents

résultats de précisions de classifications. Probablement parce que les photos aériennes sont interprétées sur toutes leurs étendues, ce qui va certainement introduire de l'incertitude aux limites spatiales entre certaines classes de vérité-terrain. À l'opposé, la méthode de la reconnaissance au sol n'interprète pas des zones qui sont directement adjacentes, ce qui peut ainsi éviter la confusion aux limites spatiales entre les classes de vérité-terrain. Par contre, le positionnement des éléments à partir d'une vue au sol va aussi causer une certaine imprécision.

Pour terminer, un des buts de ce mémoire était de valider quantitativement les méthodes existantes de classification des glaces de rivière à partir d'images RADARSAT-1. Par ce processus, nous voulions évaluer ces trois méthodes fort différentes, soit une non-supervisée avec un intrant (NSR, Weber et al., 2003), une non-supervisée avec deux intrants (NSTR, Gauthier et Al, 2006) et une approche orientée-objets par segmentation (OO, EL Battay, 2006). Tel que démontré auparavant, notre approche nous a permis d'obtenir des résultats quantitatifs de précision. Subséquemment, l'ajout de nouvelles méthodes de classification, basées sur les méthodes existantes, nous a permis de constater les effets que produit la modification de certains paramètres. Ainsi, l'augmentation du nombre de classes (NSTR16), le changement d'algorithme (NSNG) et une approche différente de segmentation (SSG) furent les trois méthodes testées. Nous pouvons noter que les méthodes NSTR et NSTR16 produisent des résultats très similaires pour la majorité des classifications. Le changement d'algorithme de classification, de Fuzzy K-means à Narendra-Goldberg (NSNG), ne produit pas de meilleurs résultats et ne parvient pas du tout à classifier convenablement l'image du 16 mars 2006 de la rivière Peace. Finalement, l'approche SSG produit des bons résultats encourageants, généralement plus faible que l'OO, mais il faut garder en mémoire que la SSG fut appliquée de façon très rudimentaire.

5. Conclusion

La cartographie des glaces de rivière à l'aide d'images RADARSAT-1 est une application de la télédétection qui est de plus en plus maîtrisée par les spécialistes du domaine. Le présent mémoire est une étude complémentaire qui confirme la sensibilité du satellite RADARSAT-1 à classifier le couvert de glace de rivière. Réalisé dans l'optique d'obtenir une référence numérique sur la validité des différentes méthodes de classifications des glaces de rivière, ce travail a permis d'obtenir des résultats qui nous en démontrent la preuve. La méthodologie utilisée pour la comparaison entre les données de terrains *in-situ* et les images satellites RADARSAT-1 était primordiale pour parvenir à réaliser les objectifs préétablis.

Dans un premier temps, l'objectif global de ce mémoire qui est de *fournir une validation quantitative des cartes de glace de rivière au moyen d'images RADARSAT-1* a été réalisé par l'application d'une méthodologie bien précise constituée de quatre sous-objectifs. D'abord, l'obtention d'une vérité-terrain de l'état du couvert de glace fut accomplie par des reconnaissances visuelles *in-situ*, par la prise de photos des rives ou aériennes, par la description des caractéristiques du couvert en place et par la localisation géographique des éléments distinguables. Par la suite, à l'aide de ces sources de données, la photo-interprétation nous a permis de positionner spatialement les différents types de glace qui étaient présents le jour des acquisitions d'images satellites et de créer une vérité-terrain.

Une fois les images corrigées géométriquement, nous avons procédé à la classification des images RADARSAT-1 à l'aide de six méthodes. De celles-ci, trois méthodes étaient éprouvées, soit la méthode non-supervisée utilisant la rétrodiffusion (NSR, Weber et al., 2003), la non-supervisée utilisant la texture moyenne et la rétrodiffusion à 7 ou 8 classes (NSTR, Gauthier et Al, 2006) et finalement l'approche par segmentation orientée-objets (OO, EL Battay, 2006). Les trois dernières méthodes appliquées furent grandement inspirées par l'une ou l'autre des méthodes déjà existantes. Ces trois méthodes sont la non-supervisée utilisant la texture moyenne et la rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), la

non-supervisée utilisant l'algorithme Narendra-Goldberg (NSNG) et finalement l'approche par segmentation utilisant SARSEG (SSG).

À partir de ce moment, possédant une vérité-terrain la plus représentative du couvert de glace en place et des cartes de glaces RADARSAT-1, nous devons estimer la précision de chacune des méthodes de classification. La matrice de confusion, outil fort utilisé en télédétection pour la validation des classifications, nous a permis de réaliser cet objectif. L'analyse des résultats nous a démontré quelles classes des classifications se couplaient avec les classes de la vérité-terrain. Ensuite, les différentes méthodes de classification ont été comparées entre elles. Nous avons constaté que la méthode OO (El Battay, 2006) a démontré le meilleur taux de précision parmi les méthodes étudiées, soit de 75 % à 99 %. Il faut aussi noter que la méthode NSTR (Gauthier et al., 2006) a confirmé que son utilisation, par son approche automatisée est efficace pour distinguer les différents types de glaces avec des précisions de 66,5 % à 98 %. Une mention prometteuse doit aussi être signalée pour l'approche SSG qui, bien qu'elle soit peu développée et ait été appliquée de façon rudimentaire, a produit des précisions de classifications qui sont fort respectables (57,5 % à 96,5 %). L'ajout de certains traitements, tel un filtre, pourraient fort probablement améliorer la précision de la classification.

Pour terminer, nous avons aussi tenté de comprendre l'interaction entre les glaces de rivière et le signal radar. L'étude des résultats nous a illustré certaines tendances applicables à la plupart des méthodes de classification. D'abord, les amas de glace et la glace/frasil fortement consolidé, types de glace produisant une forte rétrodiffusion du signal, sont facilement reconnaissables par la majorité des méthodes. À l'exception de la méthode NSR, l'eau libre est aussi isolée de manière concluante lorsque les zones d'eau libre couvrent une vaste étendue. À l'opposé, malgré la séparation des classes de glaces/frasil faiblement et moyennement consolidées par le photo-interprète (vérité-terrain), la plupart des méthodes ne parviennent pas à distinguer clairement ces types de glace. Or, la confusion est très notable entre la glace colonnaire et la glace faiblement consolidée d'une part, ainsi qu'entre la glace moyennement consolidée et fortement consolidée d'autre part.

5.1 Perspectives de recherche

La réalisation de vérité-terrain du couvert de glace fut effectuée de deux manières (reconnaissance au sol et photos aériennes) pour les fins de ce travail. Il serait envisageable de combiner ces deux manières pour obtenir une vérité-terrain comportant moins d'incertitude. Ainsi, l'acquisition d'images aériennes numériques haute résolution verticales serait une approche à conserver tandis que pour l'aspect de la photo-interprétation, il serait plus intéressant de reproduire ce qui a été fait pour la reconnaissance au sol. Par conséquent, la photo-interprétation de l'image aérienne pourrait se faire directement sur l'ortho-image, mais seulement aux endroits où le type de glace est confirmé à 100 %, à l'inverse d'avoir 100 % de la photo aérienne qui est photo-interprétée. De cette manière, la précision des zones de vérité-terrain serait très bonne et l'incertitude pourrait être réduite. Malgré que l'idée soit peu réaliste en raison d'un manque de ressources matérielles, humaines et du temps pour accomplir la tâche, une campagne de terrain intensive serait très avantageuse pour obtenir une vérité-terrain qui serait très près de la réalité. De nombreux échantillons tels des carottes de glaces, une reconnaissance visuelle / photographique et des données géoradar pourraient être récoltés sur de petits intervalles spatiales afin de couvrir tout le couvert de glace, de façon horizontale (couverture spatiale) mais aussi verticale (sur toute la profondeur de la colonne de glace).

De plus, la validation quantitative serait davantage renforcée par l'addition d'autres sites d'études. Par exemple, à l'instar du régime hydrologique de la rivière Peace et de la rivière Saint-François qui sont très différents, engendrant la formation de couverts de glace différents. Ainsi, à l'aide de plusieurs rivières, nous pourrions couvrir toute la panoplie des différents types et arrangements physiques que peuvent prendre les glaces de rivières, ce qui permettrait d'avoir une classification qui est très performante pour toute rivière, peu importe le couvert de glace en place. D'ailleurs, dans le cadre du projet FRAZIL, des rivières telles l'Athabasca et la Fox ou la Koaksoak (projet API) ont été classifiées à l'aide de certaines de ces méthodes. Toutefois, la validation quantitative des classifications ne furent effectuées pour ces rivières.

Dans la même lignée, il serait très important dans l'avenir d'établir une nomenclature commune et fixe pour la description d'un couvert de glace par les différents acteurs de la glace de rivière. Cet accord sur les noms de types de glace permettrait de mieux évaluer et comparer les classifications sur les différentes rivières. Les trois principaux types de glaces, soit la glace colonnaire, la glace de neige et le frasil (Gherboudj et al., 2007), pourraient s'avérer les assises d'une nomenclature. Aussi, après avoir identifié l'origine présumée d'un type de glace, la rugosité et l'arrangement physique des glaces pourraient servir comme sous-niveaux pour caractériser une zone de glace.

Par ailleurs, une vaste étude multi-temporelle sur l'analyse des seuils de rétrodiffusion d'images RADARSAT-1 pour chacun des types de glaces de rivières permettrait d'avoir des caractéristiques propres pour chacun d'eux. De plus, au cours de ce travail, l'utilisation de la texture moyenne fut grandement utilisée et a produit d'excellents résultats. Il serait donc très à propos de se pencher plus en profondeur sur l'utilisation des autres paramètres de texture. Ainsi, une vaste étude pourrait permettre de caractériser sous plusieurs volets l'effet entre les glaces de rivières et le signal radar.

Finalement, la disponibilité prochaine des données du satellite allemand Terra SAR-X (DLR/ESA, 2007) et du satellite RADARSAT-2 (ASC,2006) devrait également permettre d'améliorer la classification des glaces de rivière à partir d'images satellites grâce à la polarimétrie (intensité et phase) et à l'amélioration de la résolution spatiale (1 à 3 m).

Liste des références

AGENCE SPATIALE CANADIENNE, 2006. «RADARSAT-1» Canada.
<http://www.space.gc.ca>.

ALBERTA ENVIRONMENT, 2006. «Alberta's River Basins», Alberta Government,
<http://www3.gov.ab.ca/env/water/basins/BasinForm.cfm>.

ASHTON, G.D., 1986. «River and Lake Ice Engineering». Water Resources Publications.
Littleton, Colorado, 485 p.

BELTAOS, S., 1995. «River Ice Jams» Water Resource Publication, LLC, ISBN Number
0-918334-87-X, 372 p.

BERNIER, M., Y. GAUTHIER, et J. P. DEDIEU, 1996. «Interprétation d'une image radar du
satellite ERS-1 prise en période de fonte au Québec : Illustration du phénomène de diffusion dans
les hyperfréquences». Revue Photo-Interprétation, France, Éditions Espa, Vol.34, pp. 3-11.

BONN, F., et G. ROCHON, 1996. Précis de télédétection, Principes et méthodes. Sainte-
Foy, Presses de L'Université du Québec, Vol. 1, 485 p.

CALOZ, R., and C. COLET, 2001. Précis de télédétection, Traitement numérique
d'image de télédétection. Sainte-Foy, Presses de L'Université du Québec / Agence
Universitaire De La Francophonie (Canada) Vol. 3, 386 p.

CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION, 2003. Notions fondamentales de
télédétection, Canada, <http://cct.rncan.gc.ca/>.

ECOGNITION PROFESSIONAL, 2004. User guide Vol. 4, Germany, [www.definiens-
imaging.com](http://www.definiens-imaging.com).

EL BATTAY, A., 2006. «Développement d'une approche de Classification Orientée Objet pour une meilleure caractérisation de la glace d'une rivière de taille moyenne à l'aide des images du satellite RADARSAT-1 et d'un Système d'Information Géographique : cas de la rivière Saint-François, Québec». Thèse de doctorat, Québec, Université du Québec, INRS-ETE, 303 p.

ESRI, 2007. «What is GIS ?» États-Unis / Canada, <http://www.esri.com>.

FISCHER, A., 1992. «Les bases physiques de la télédétection». Laboratoire d'études et de recherches en télédétection spatiale, Toulouse, France. <http://ceos.cnes.fr>.

GAUTHIER, Y., L.-M. PAQUET, A. GONZALEZ, F. HICKS, R. ANDRISHAK et M. BERNIER, 2007. «Using the FRAZIL system in support of winter river flow modelling.» Proceedings of the 14th workshop of the committee on river ice processes and the environment - CRIPE 2007, 17 p.

GAUTHIER, Y., F. WEBER, S. SAVARY, M. JASEK, L.-M. PAQUET et M. BERNIER, 2006. «A combined classification scheme to characterise river ice from SAR data.» EARSeL eProceedings, Vol 5 (1), pp. 77-88.

GERMAN AEROSPACE CENTER (DLR) / EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2007. «Terra-SAR-X», Allemagne, <http://www.spotimage.fr/web/683-terrasar-x.php>.

GHERBOUDJ, I., 2005. «Modélisation électromagnétique du signal radar de la glace de rivières en bande C» Examen doctorale, Québec, Université du Québec, INRS-ETE, 85 p.

GHERBOUDJ, I., M. BERNIER, F. HICKS et R. LECONTE, 2007. «Physical characterization of air inclusions in river ice.» Cold Regions Science and Technology, 29 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.02.008>.

GHERBOUDJ, I., M. BERNIER, et R. LECONTE, 2007. «Validation of a backscatter Model for a River Ice Covers Using RADARSAT-1 Images» Proceedings IGARSS 2007, 23-27 Juillet, Barcelona, Espagne.

HALL-BEYER, M., 2000. «GLCM Texture : A tutorial» University of Calgary, Canada, <http://www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm>.

HALL, D., 1998. «Remote sensing of Snow and Ice Using Imaging Radar.» Manual of Remote Sensing 2, 703 p.

HENDERSON, F. M., et A. J. LEWIS, 1998. « Principles & Applications of Imaging Radar» Manual of Remote Sensing, Third Edition Vol. 2, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 867 p.

HYDRO-QUÉBEC, 1996. «Suivi du couvert de glace à l'aide de l'imagerie satellitaire RADARSAT-1» Rapport No R1 2904 1996, Hydro-Québec, Montréal, 72 p.

ICE ENGINEERING, US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1999. «Ice Engineering», United States, <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1612/toc.htm>.

LANDIS, J.R., et G. G. KOCH, 1977. «The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data» Biometrics, Vol. 33, pp. 159-174.

LECONTE, R., et P. D. KLASSEN, 1991. «Lake and river ice investigations in northern Manitoba using airborne SAR imagery» Vol. 44, pp. 153-163.

LEKHAL, H., et P. E. ELLEFSEN, 2002. «La perception des couleurs par l'oeil», Lycée Jean Monet, 24 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (MEQ), 1995. «Portrait régional de l'eau, Estrie» Gouvernement du Québec, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region05/05-estrie.htm>.

MICHEL, B., 1978. «Ice Mechanics», Les presses de l'Université Laval, Québec, Canada, 499 p.

MORSE, B., et D. HICKS, 2005. «Advances in river ice hydrology 1999-2003» Hydrological Processes Vol. 19, no. 1, pp. 247-263.

NARENDRA, P.M. et M. GOLDBERG, 1977. «A Non-parametric clustering scheme for Landsat» Pattern Recognition, Vol. 9, pp. 207-215.

OLIVER, C., et S. QUEGAN, 1998. «Understanding Synthetic Aperture Radar Images» Artech House, Boston, 479 p.

PCI GEOMATICS, 2007. «Help section». Version 10.1, Canada, www.pcigeomatics.com.

PEAKE, W. H., et T. L. OLOVER, 1971. «The response of terrestrial surface at microwave frequencies» Technical report, AFAL-TR-70-301, Ohio State University Electroscience Laboratory.

PENNER, O., 2006. «River ice classification, aerial photo visual classification (Methodology and notes)», B.C. Hydro, Canada, 3 p.

PELLETIER, K., J. VAN DER SANDEN, Y. DU et F. HICKS, 2003. «Monitoring Breakup Development on the Athabasca River using RADARSAT-1 SAR imagery.» Proceedings 12th Workshop on Hydraulics of Ice Covered Rivers, June 19-20, 2003, Edmonton, Alberta.

PUESTOW, T. M., C. J. RANDELL, K W. ROLLINGS, A. A. KHAN, and R. PICCO, 2004. «Near real-time monitoring of river ice in support of flood forecasting in eastern Canada : towards the integration of Earth observation technology in flood hazard mitigation» IGARSS Proceedings Vol. 4, Sept. 2004, pp. 2268-2271.

SECRÉTARIAT DU CONSEIL DU TRÉSOR DU CANADA. 1993. «Guide de sécurité pour les opérations sur glace», Gouvernement du Canada, Canada, 13 p.

SHI, Z. et K. B. FUNG, 1994. «A Comparison of Digital Speckle Filters». IGARSS Proceedings, August 8-12, 1994.

SHORT, N. M., 2007. «Remote sensing tutorial» Section 13, NASA, États-Unis, <http://rst.gsfc.nasa.gov>.

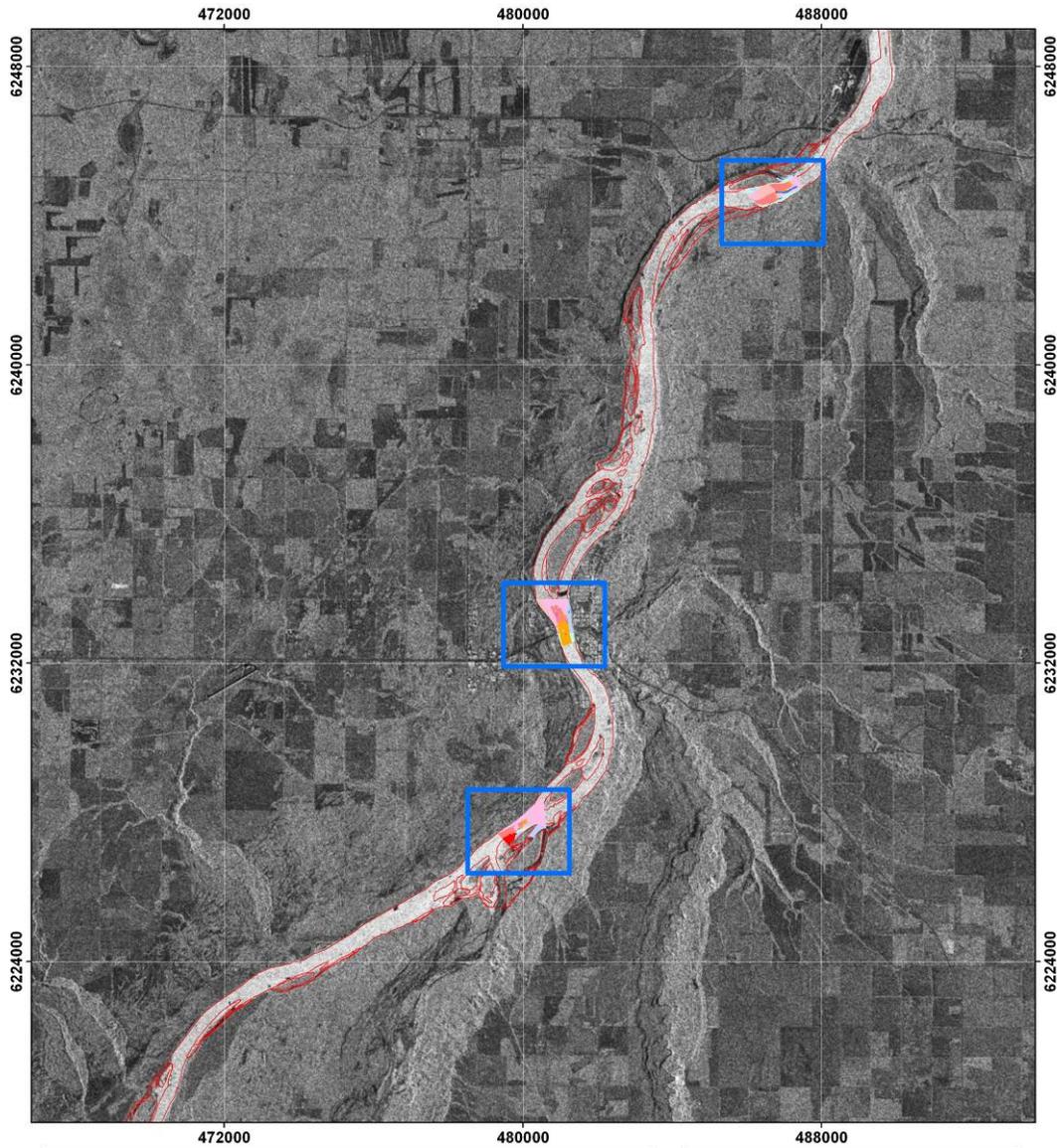
ULABY, F. T., R. K. MOORE et A. K. FUNG, 1986. «From Theory to Application». Microwave Remote Sensing, Active and Passive Vol. 3, Artech House, Dedham, 2162 p.

WEBER, F., D. NIXON, et J. HURLEY, 2003. «Semi-automated classification of river ice types on the Peace River using RADARSAT-1 synthetic aperture radar (SAR) imagery» Revue canadienne de génie civil, Vol. 30, pp. 11-27.

YAPA, P.D., et H.T. SHEN, 1986. «River Ice Processes» Hydraulics of River Ice. CRREL report 85-1. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1986.

**Annexe A - Cartes de la vérité-terrain
pour les quatre images à l'étude**

Image de texture moyenne et zones de vérité-terrain, Rivière Peace, 16 mars 2006



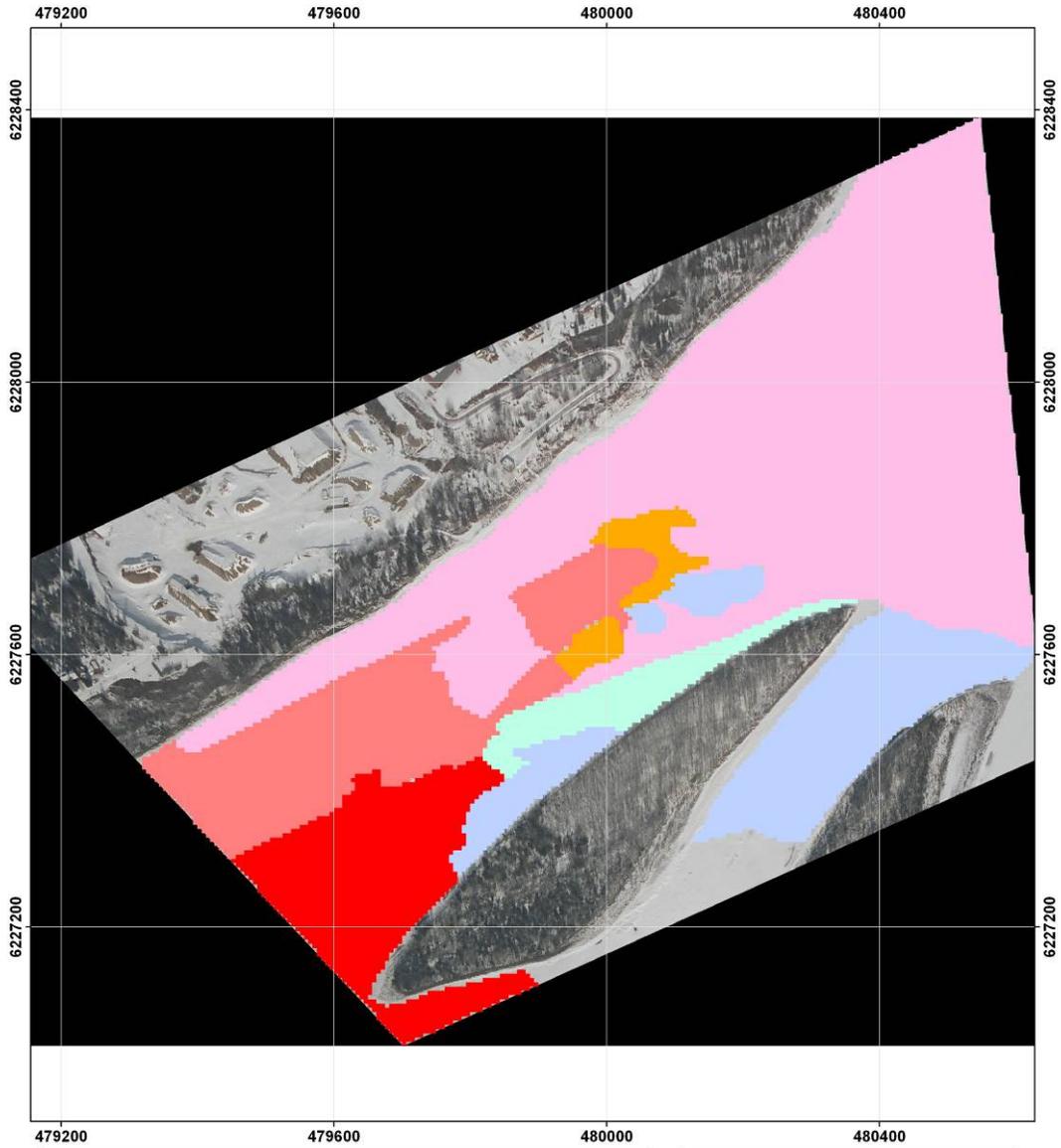
Légende

-  Rivière
-  Zones de vérité-terrain

Projection NAD_83
UTM Zone 11N



Photo aérienne et zone de vérité-terrain, Km 390, Rivière Peace, 16 mars 2006



Légende

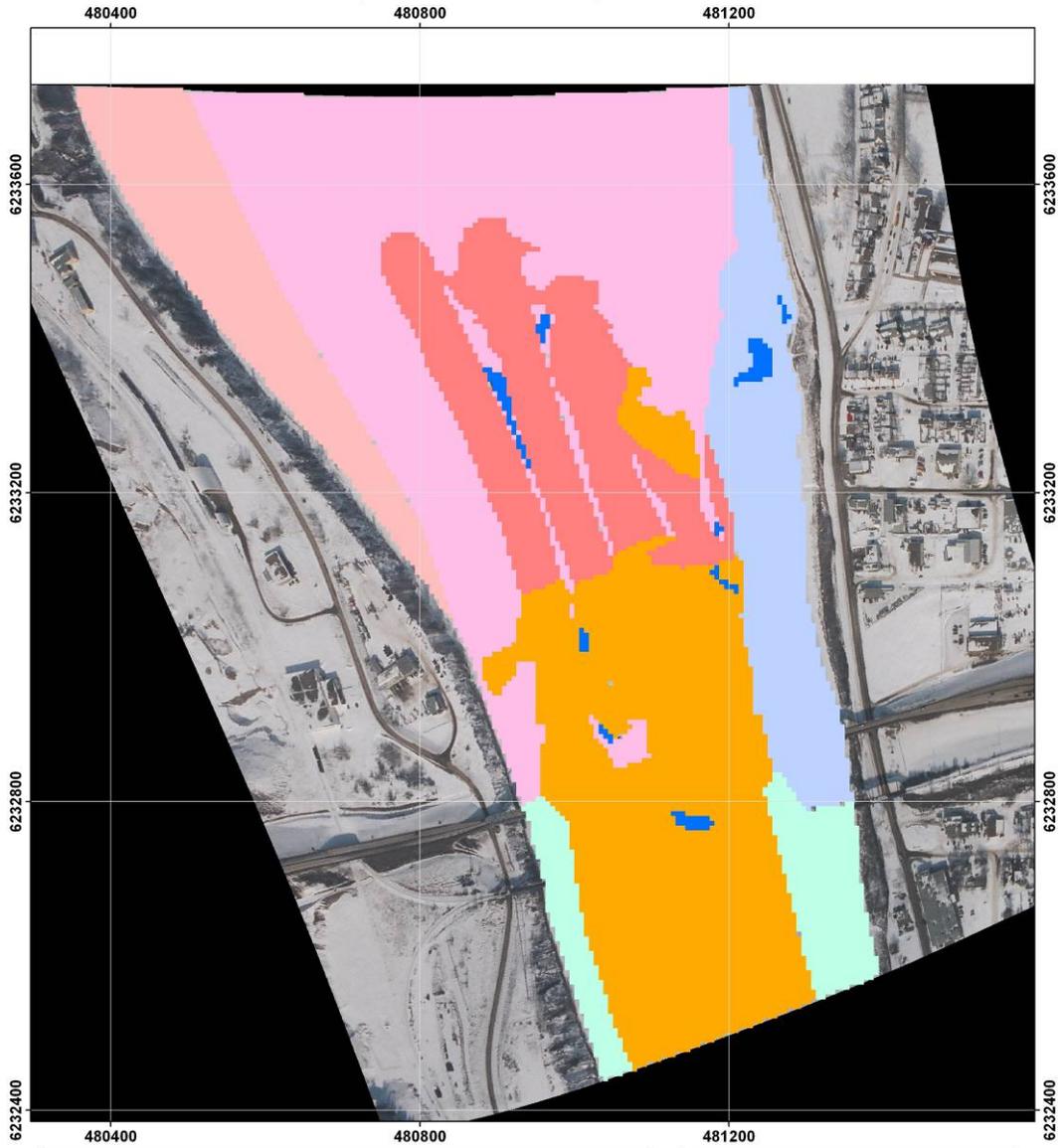
 Eau libre	 Couvert semi-consolidé 2
 Glace de rive stable	 Couvert consolidé
 Glace de rive en mouvement	 Couvert fortement consolidé
 Couvert semi-consolidé 1	 Couvert consolidé mixte

Projection NAD_83
UTM Zone 11N



0 0,05 0,1 0,2 0,3
Km

Photo aérienne et zone de vérité-terrain, Km 397, Rivière Peace, 16 mars 2006



Légende

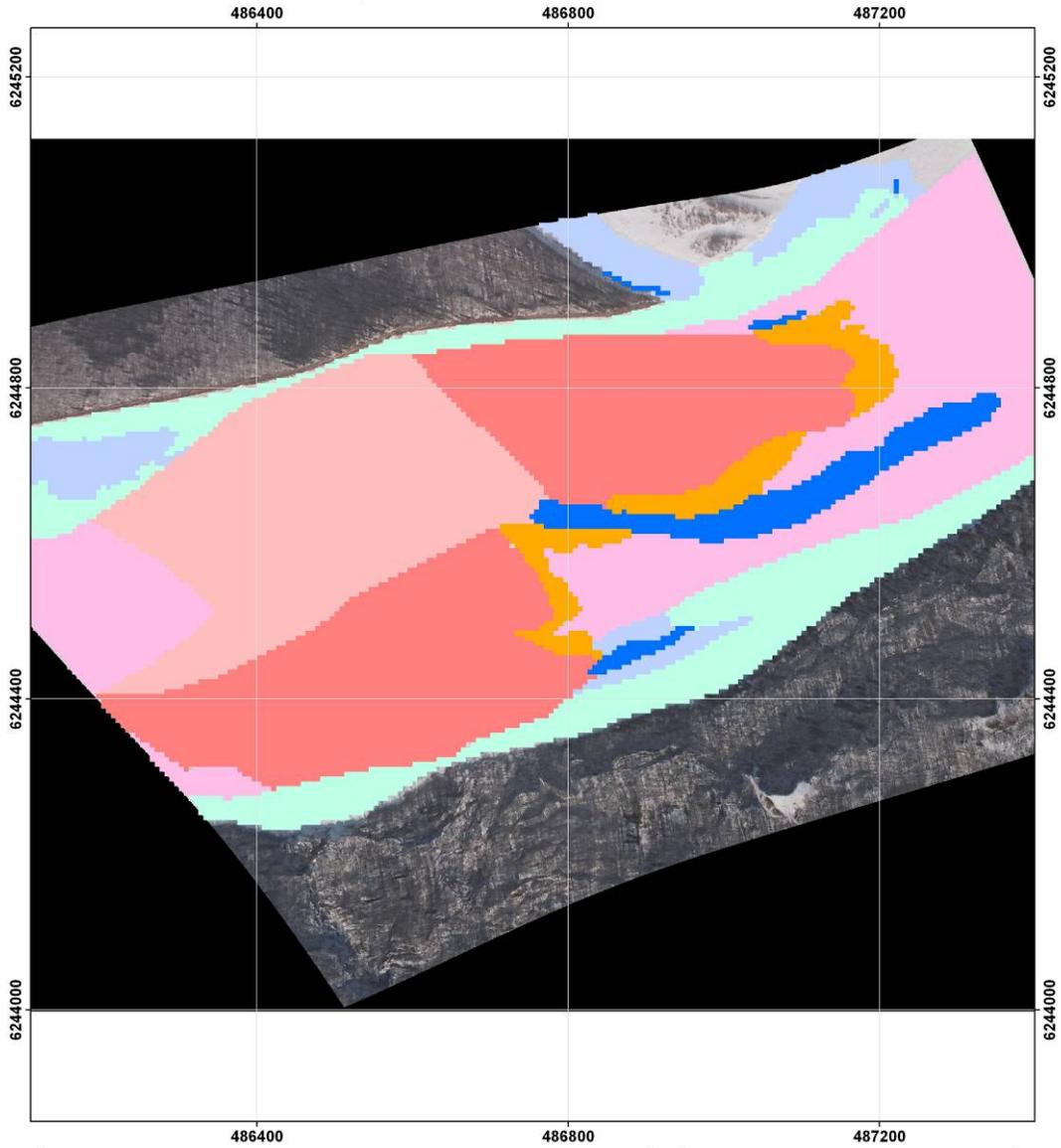
- | | |
|--|--|
| ■ Eau libre | ■ Couvert semi-consolidé 2 |
| ■ Glace de rive stable | ■ Couvert consolidé |
| ■ Glace de rive en mouvement | ■ Couvert fortement consolidé |
| ■ Couvert semi-consolidé 1 | ■ Couvert consolidé mixte |

Projection NAD_83
UTM Zone 11N



0 0,05 0,1 0,2 0,3
Km

Photo aérienne et zone de vérité-terrain, Km 411, Rivière Peace, 16 mars 2006



Légende

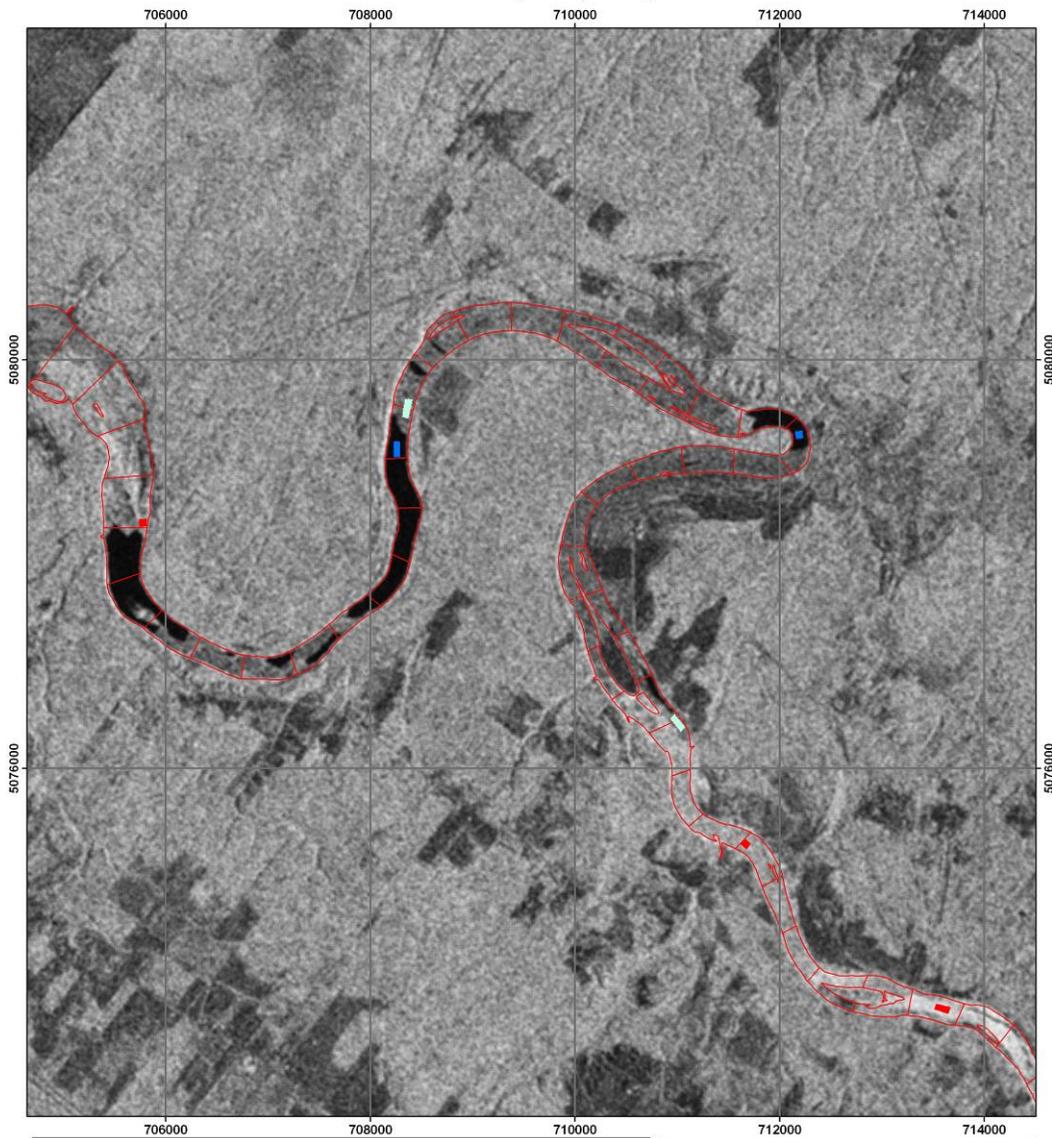
	Eau libre		Couvert semi-consolidé 2
	Glace de rive stable		Couvert consolidé
	Glace de rive en mouvement		Couvert fortement consolidé
	Couvert semi-consolidé 1		Couvert consolidé mixte

Projection NAD_83
UTM Zone 11N



0 0,05 0,1 0,2 0,3
Km

Image de la texture moyenne et de la vérité-terrain, Rivière Saint-François, 26 janvier 2006



Légende

Vérité-terrain

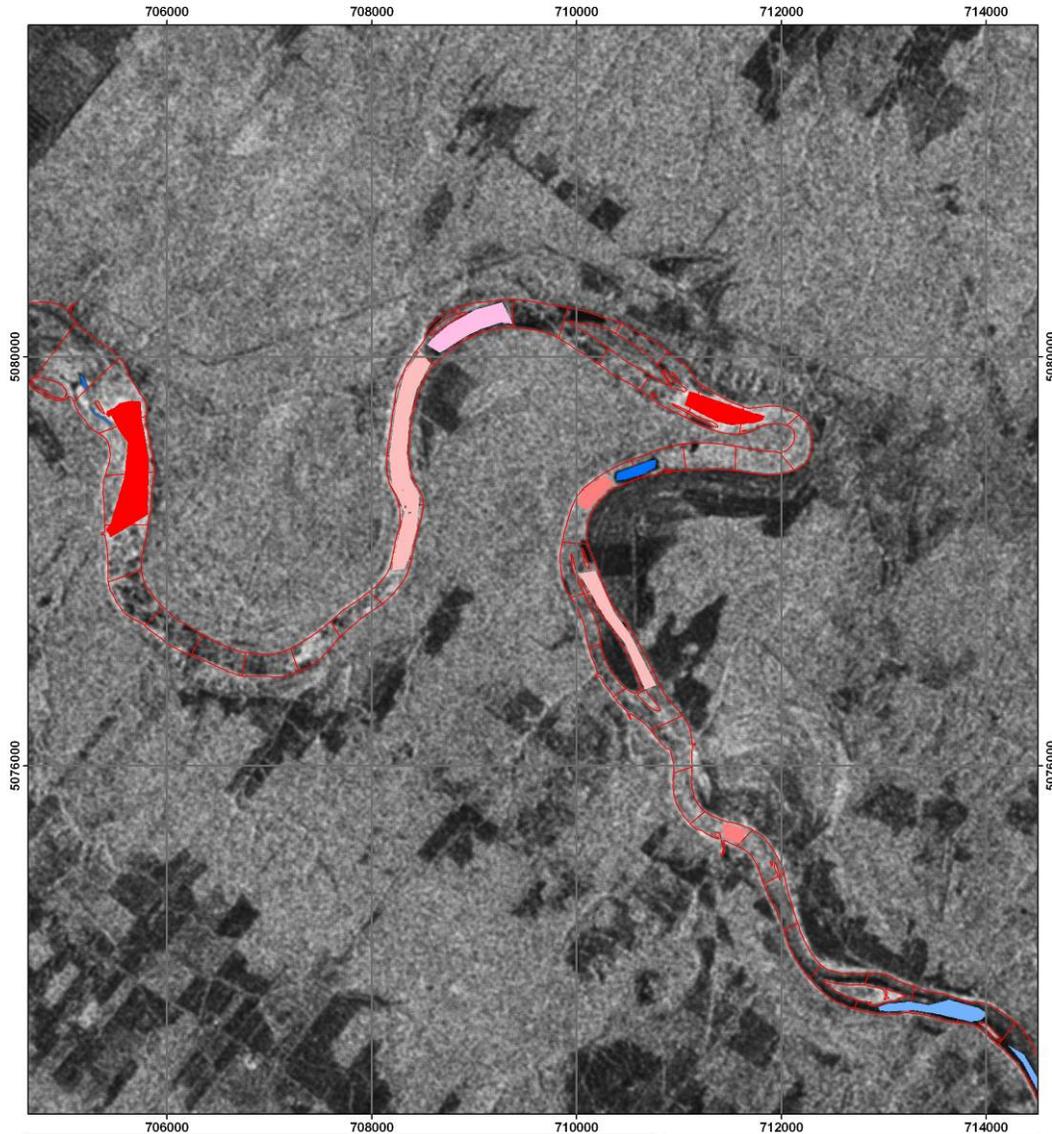
Type de glace

- | | |
|---|--|
| Eau libre | Section de rivière (500 m) |
| Couvert peu rugueux | |
| Amas de glace / fortement consolidé | |

Projection UTM NAD83



Image de la texture moyenne et de la vérité-terrain, Rivière Saint-François, 12 février 2006



Légende

 Eau libre	 Frasil consolidé
 Frasil en suspension	 Frasil fortement consolidé
 Couvert peu rugueux	 Amas de glace
 Frasil juxtaposé ou aggloméré	 Section de rivière (500 m)

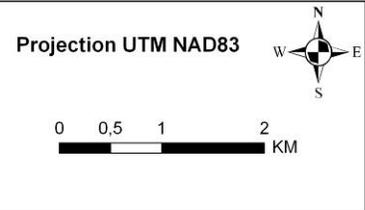
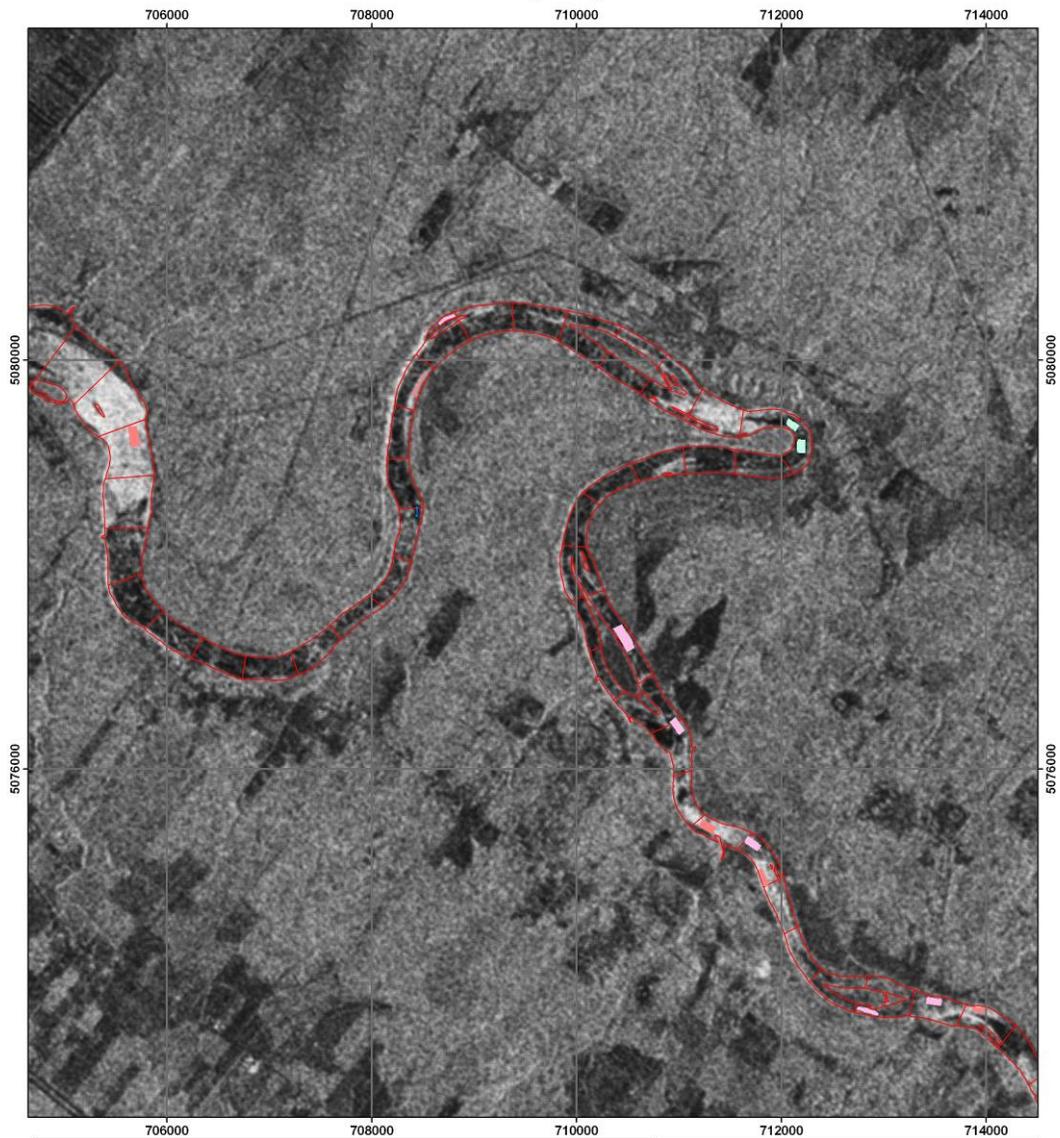


Image de la texture moyenne et de la vérité-terrain, Rivière Saint-François, 7 février 2007



Légende

- Eau libre
 - Couvert peu rugueux
 - Frasil juxtaposé ou aggloméré
 - Frasil consolidé
 - Frasil fortement consolidé
- Section de rivière (500 m)

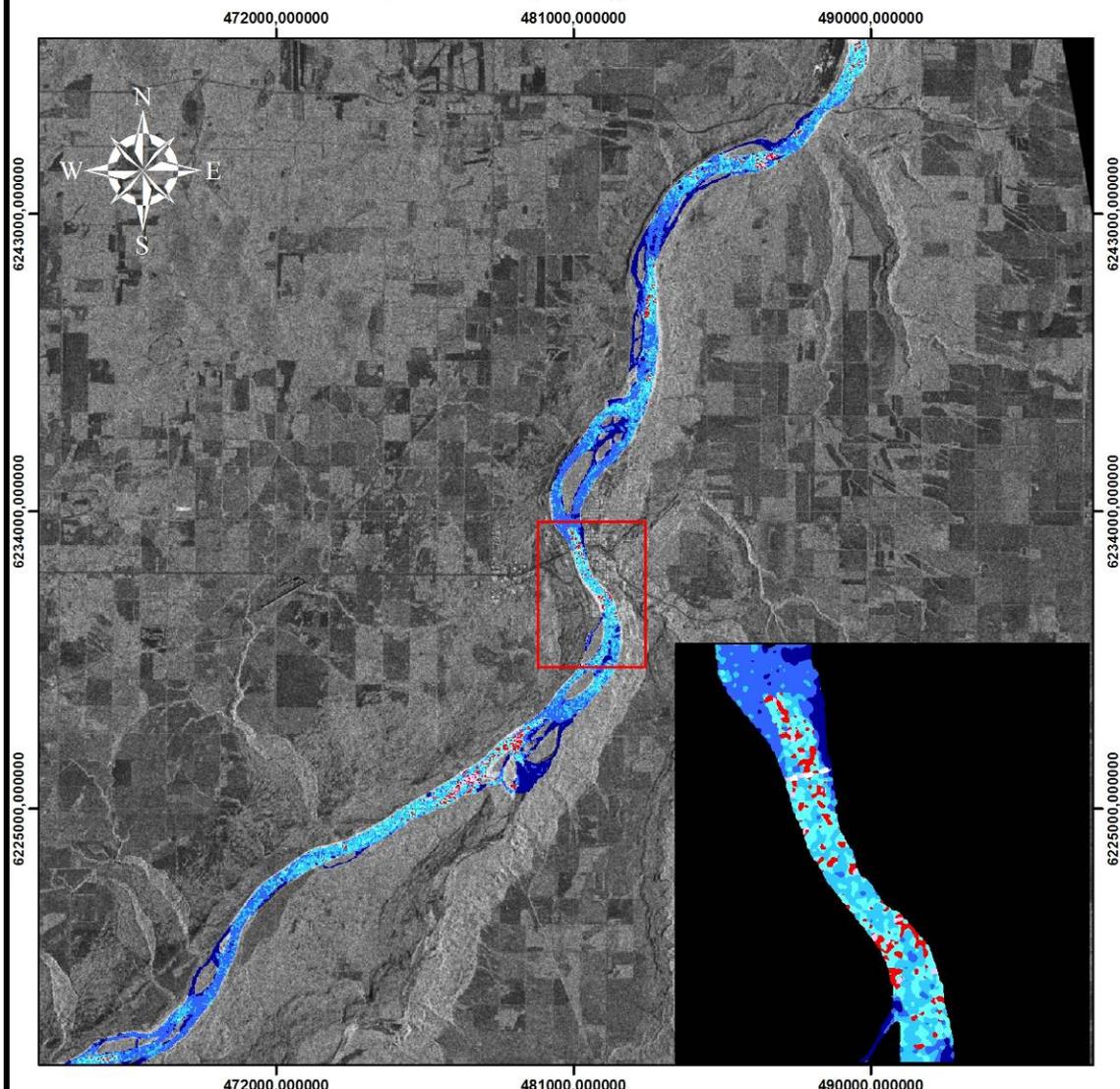
Projection UTM NAD83



0 0.5 1 2 KM

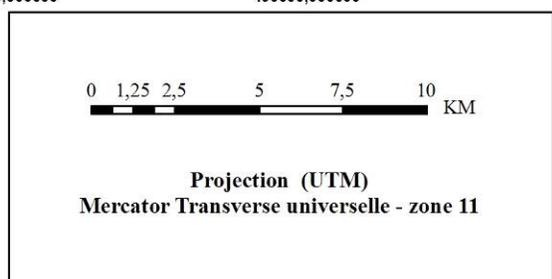
**Annexe B - Exemples des résultats cartographiques des
glaces de rivière
selon les 6 méthodes à l'étude**

Classification de la rivière Peace, méthode non-supervisée (NSR), 16 mars 2006

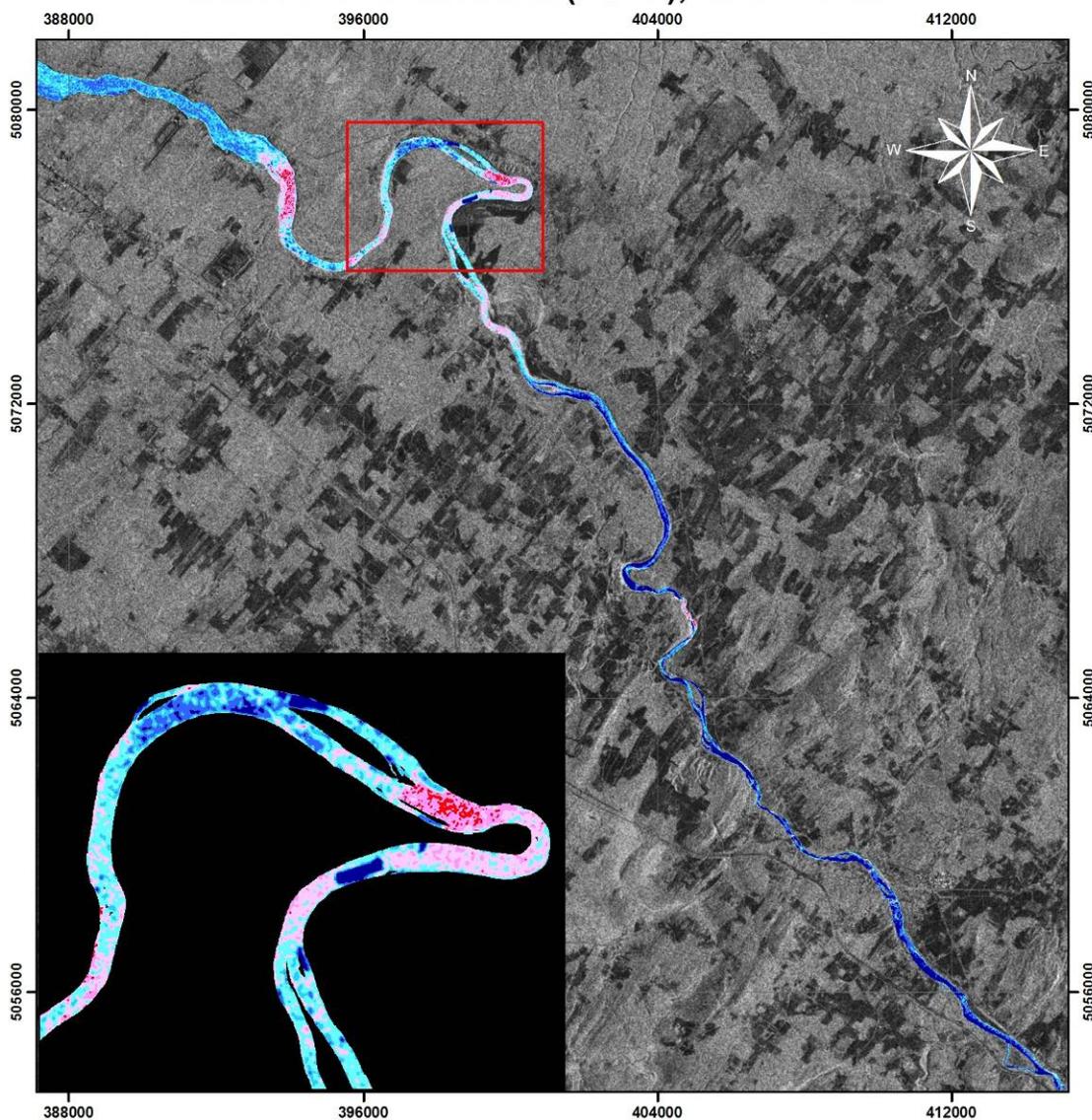


Légende

■	1 (eau libre, glace de rive stable & glace consolidée mixte)
■	2 (glace de rive en mouvement, glace semi-consolidée 1 & 2)
■	3 (glace de rive en mouvement, glace semi-consolidée 1 & 2)
■	4 (glace consolidée & glace fortement consolidée)
■	5 (glace consolidée & glace fortement consolidée)
■	6 (glace consolidée & glace fortement consolidée)
■	7 (glace consolidée & glace fortement consolidée)
■	8 (glace consolidée & glace fortement consolidée)



Classification de la rivière Saint-François, méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion (NSTR), 12 février 2006



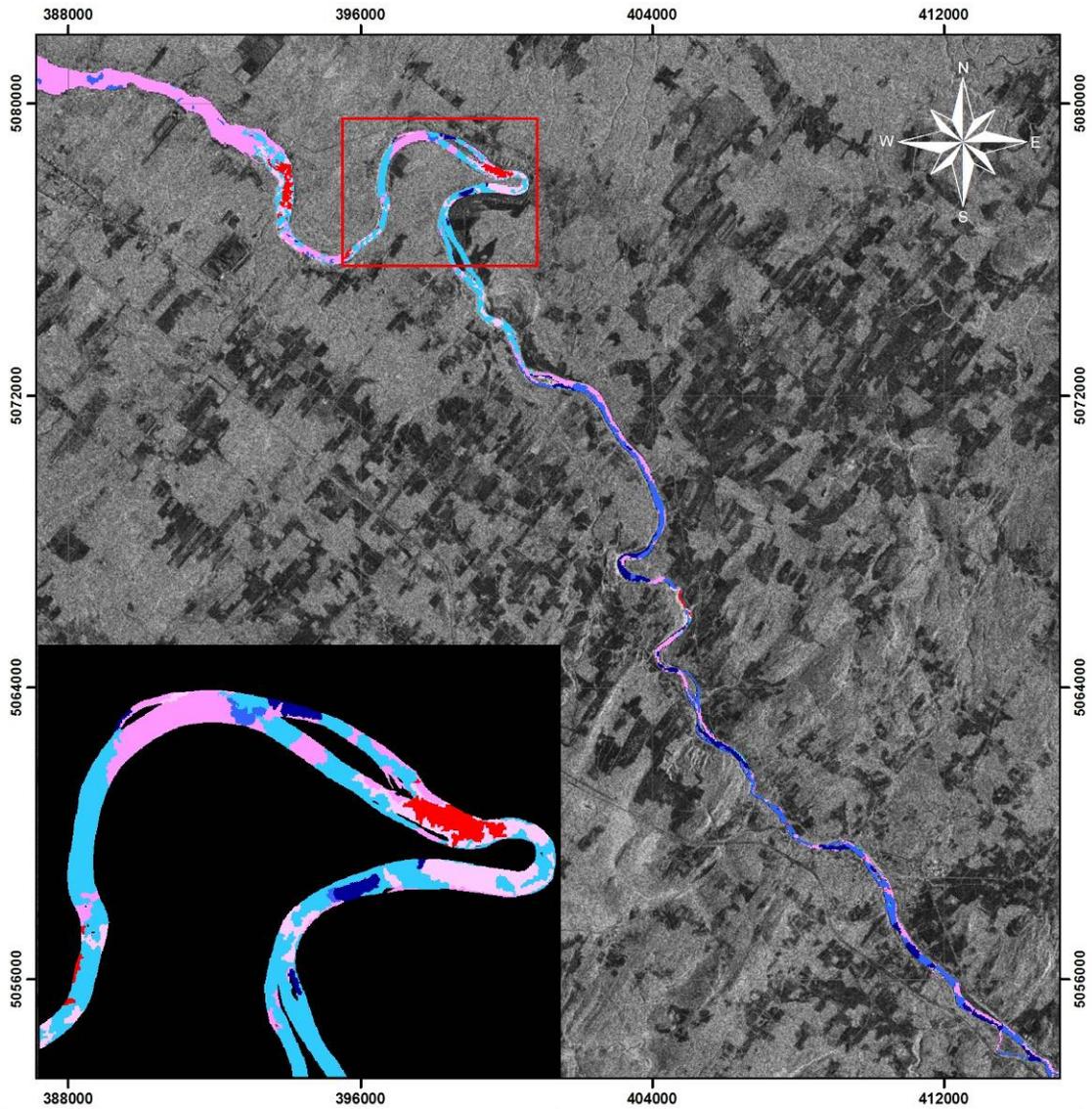
Légende

- 1 (eau libre & frazil en suspension)
- 2 (glace colonnaire & frazil juxtaposé)
- 3 (glace colonnaire & frazil juxtaposé)
- 4 (frazil consolidé)
- 5 (frazil fortement consolidé)
- 6 (amas de glace)
- 7 (amas de glace)

0 1,5 3 6 9 KM

Projection (MTM)
Mercator Transverse Modifiée - zone 8

Classification de la rivière Saint-François, méthode orientée-objets (OO), 12 février 2006



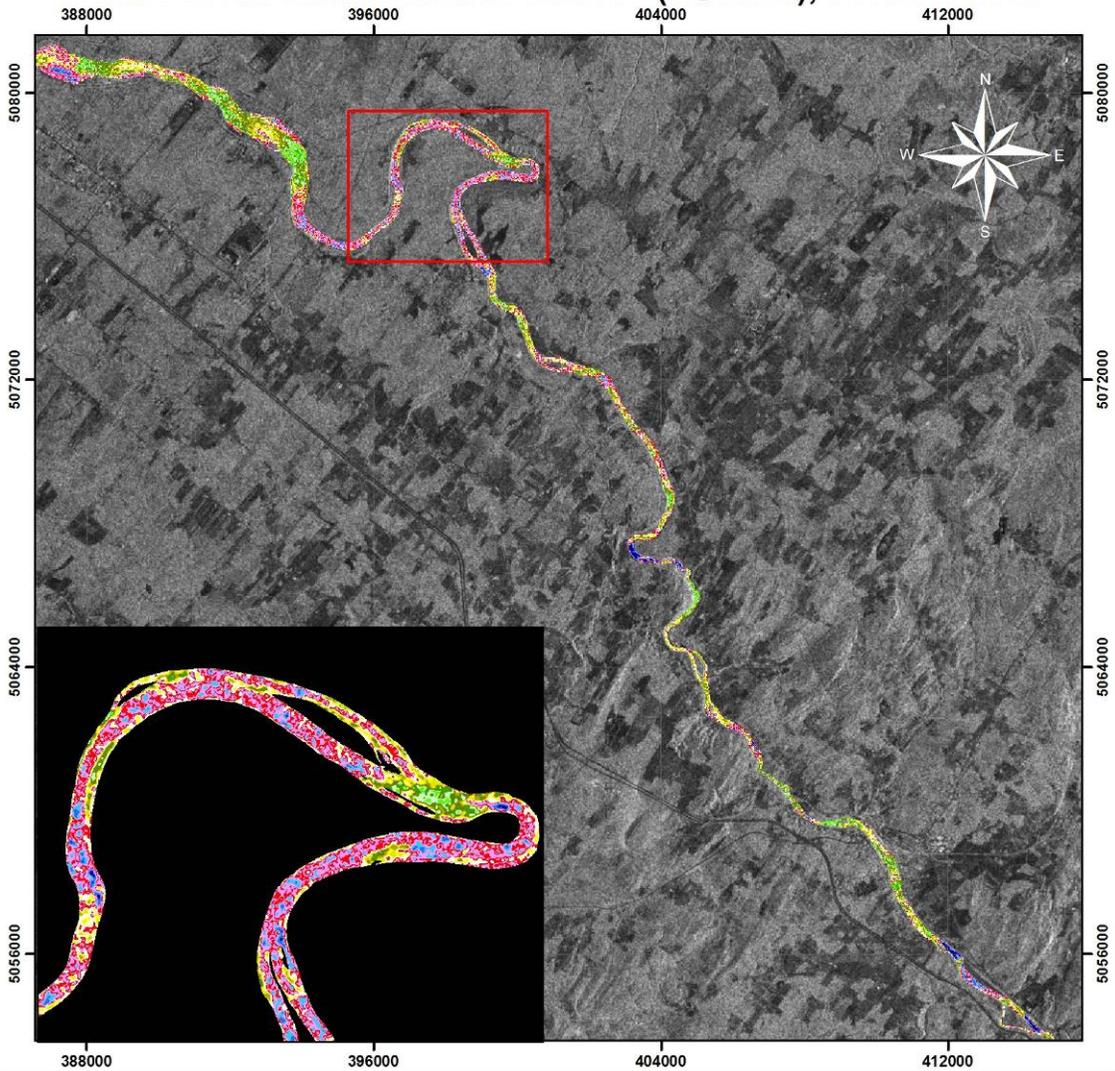
Légende

- 1 (eau libre & frazil en suspension)
- 2 (eau libre & frazil en suspension)
- 3 (glace colonnaire & frazil juxtaposé)
- 4 (frazil consolidé)
- 5 (frazil fortement consolidé)
- 6 (amas de glace)

0 1,5 3 6 9 KM

Projection (MTM)
Mercator Transverse Modifiée - zone 8

Classification de la rivière Saint-François, méthode non-supervisée texture et rétrodiffusion à 16 classes (NSTR16), 7 février 2007



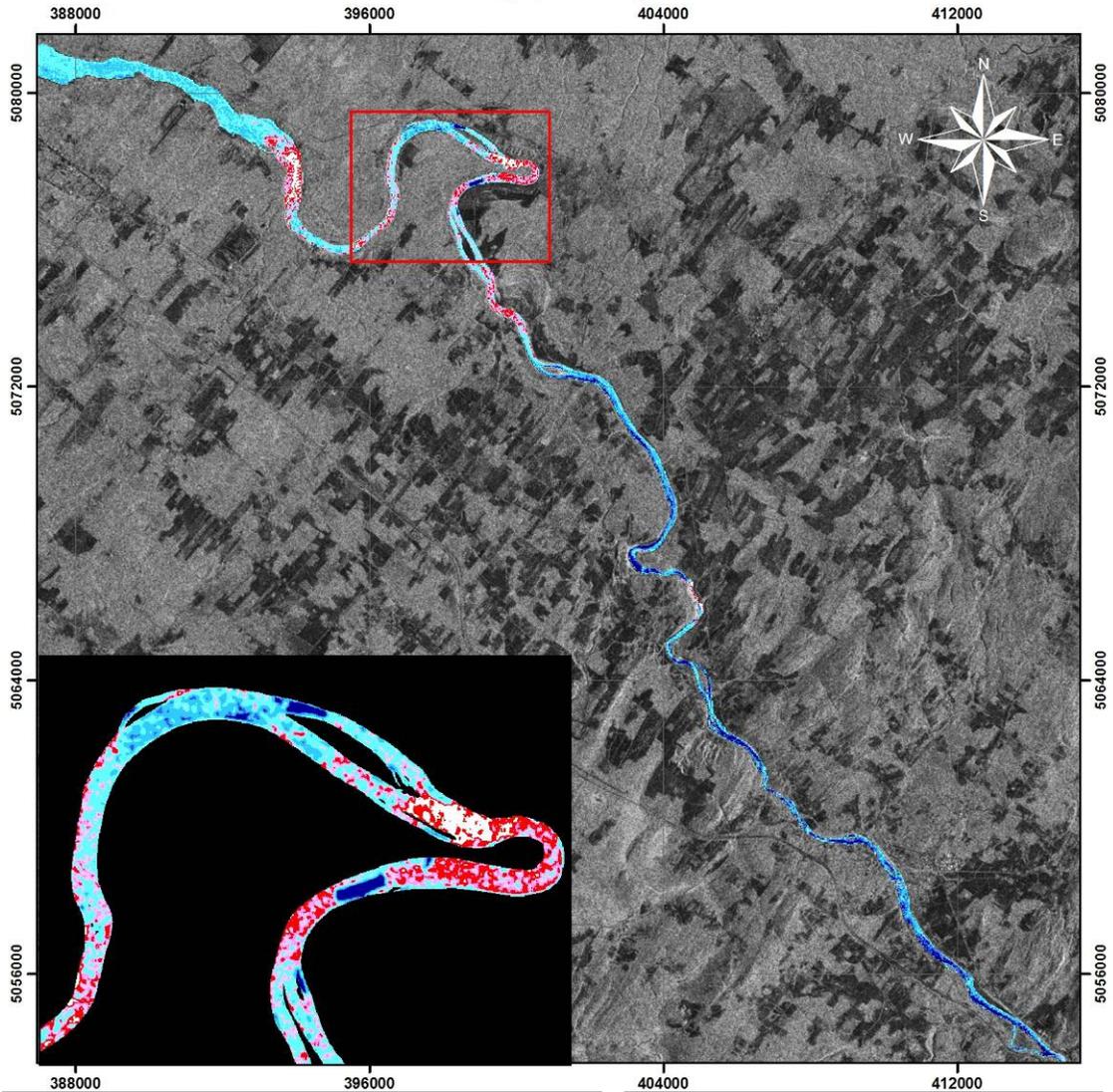
Légende

1 (eau libre)	7 (frasil juxtaposé-lisse)	13 (frasil juxtaposé ou consolidé-texture moyenne)
2 (glace colonnaire)	8 (frasil juxtaposé-lisse)	14 (frasil consolidé-texture forte)
3 (glace colonnaire)	9 (frasil juxtaposé-lisse)	15 (frasil consolidé-texture forte)
4 (glace colonnaire)	10 (frasil juxtaposé-lisse)	16 (frasil consolidé-texture forte)
5 (glace colonnaire)	11 (frasil juxtaposé ou consolidé-texture moyenne)	
6 (frasil juxtaposé-lisse)	12 (frasil juxtaposé ou consolidé-texture moyenne)	

0 1,5 3 6 9 KM

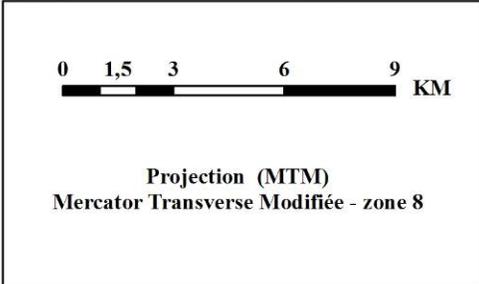
Projection (MTM)
Mercator Transverse Modifiée - zone 8

Classification de la rivière Saint-François, méthode non-supervisée Narendra-Goldberg (NSNG), 12 février 2006

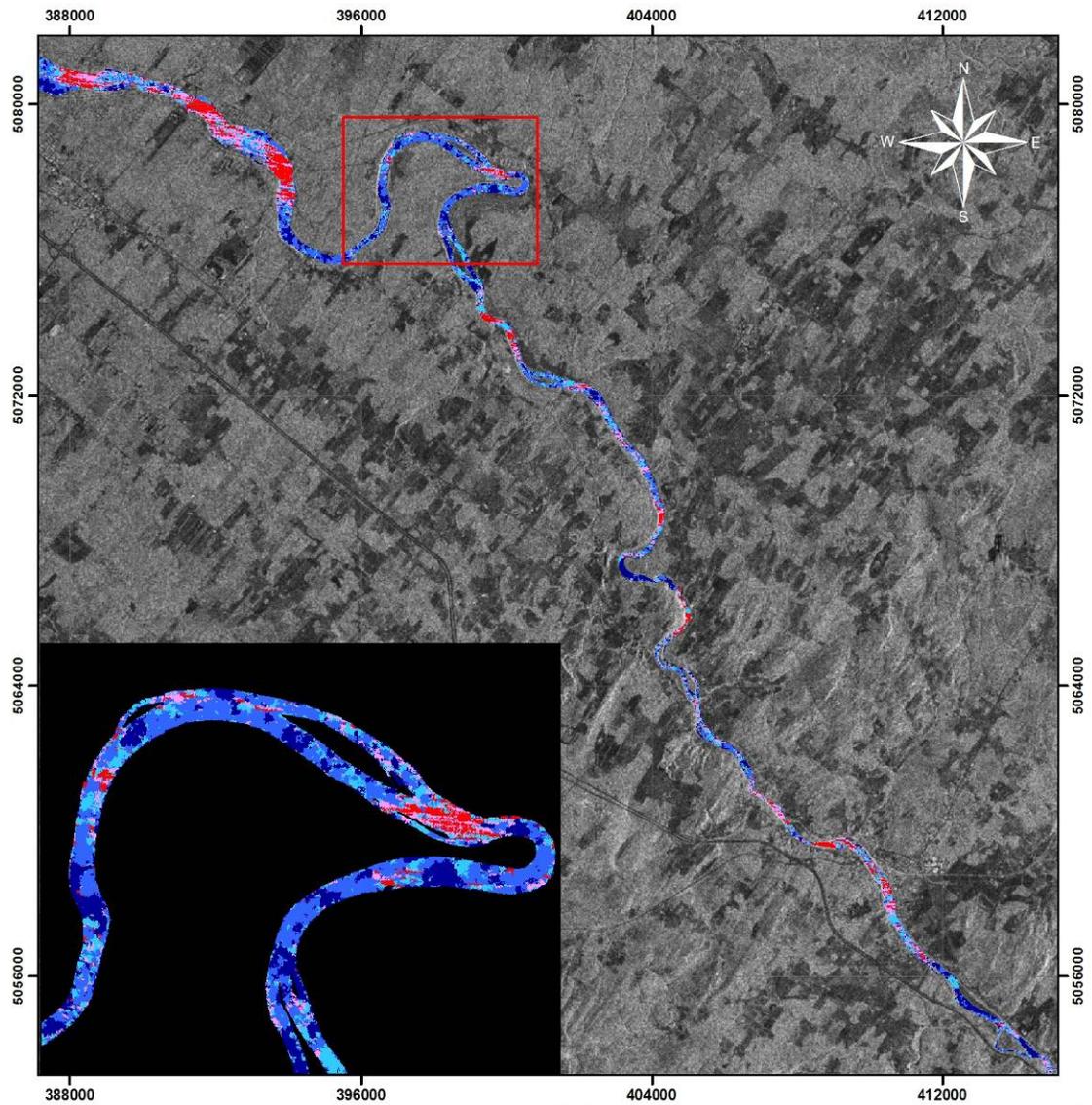


Légende

	1 (eau libre & frazil en suspension)		5 (frazil consolidé)
	2 (eau libre & frazil en suspension)		6 (frazil fortement consolidé)
	3 (glace colonnaire & frazil juxtaposé)		7 (frazil fortement consolidé)
	4 (glace colonnaire & frazil juxtaposé)		8 (amas de glace)



Classification de la rivière Saint-François, méthode de segmentation avec SARSEG (SSG), 7 février 2007



Légende	
	1 (eau libre)
	2 (glace colonnaire)
	3 (frasil juxtaposé-lisse)
	4 (frasil juxtaposé ou consolidé-texture moyenne)
	5 (frasil fortement consolidé-texture forte)

