

*Suivi du couvert de glace en rivière
et du gel du sol à l'aide du radar,
des SIG et de la modélisation*

Rapport de recherche No R-617-e7

Octobre 2005

Rapport d'étape

CRYSYS

**Suivi du couvert de glace en rivière et du gel du sol à l'aide du radar,
des SIG et de la modélisation**

Monique Bernier (PI)

Yves Gauthier, Jalal Khaldoune, Imen Gherboudj,

Ali El Battay, Taha Ouarda (INRS-ETE)

et Eric Van Bochove (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Rapport de recherche No-617-e7

Octobre 2005

TABLE DES MATIÈRES

1	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE LA RECHERCHE POUR 2005-2006.....	1
2	CONTRIBUTION AU PROGRAMME CRYSYS.....	2
3	BILAN DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE EN DATE DU 15 OCTOBRE 2005.....	3
	3.1 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #1 : GLACE DE RIVIÈRE	3
	3.2 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #2 : GLACE DE RIVIÈRE	10
	3.3 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #3 : GEL DU SOL.....	15
4	PUBLICATIONS 2005 DÉCOULANT DES ACTIVITÉS FINANCÉES PAR CRYSYS.....	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Classification finale de l'image polarimétrique.	14
Figure 2 : Relations entre le couvert nival, l'humidité du sol (5cm), la profondeur du gel et la température de l'air pour deux champs agricoles aux profils pédologiques différents.....	17
Figure 4 : Image Convair-580 (6m) de la zone d'étude acquise le : a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003. Visualisation par la décomposition de Pauli $S_{HH} + S_{VV}$, $S_{HH} - S_{VV}$, $2S_{HV}$	18
Figure 5: Signatures polarimétriques de la parcelle A pour l'image du a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003.	19
Figure 6 : Illustration d'une image ENVISAT acquise en mode APP. a) le 10 janvier 2004 (VV-HH). b) le 10 janvier 2005 (HV-HH).....	20
Figure 7 : Cartographie du gel/non gel de sol du bassin versant Bras d'Henri selon a) 08 novembre 2003, b) 02 décembre 2003 et c) 29 février 2003.....	21

1 Objectifs scientifiques de la recherche pour 2005-2006

Volet #1

Compléter le développement de l'approche contextuelle pour la caractérisation et le suivi du couvert de glace de rivière à partir d'images RADARSAT-1.

Volet #2

Développer une première version d'un modèle de rétrodiffusion pour caractériser la glace de rivière à partir des données radar monopolarisées, multipolarisées et polarimétrique.

Volet #3

Compléter le développement d'une méthode de mesure et de cartographie du gel du sol sous couvert de neige en milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images radar monopolarisées (RADARSAT-1), multipolarisées (ENVISAT) et polarimétriques (RADARSAT-2/Convair-580).

2 Contribution au programme CRYSYS

Le programme CRYSYS a été établi afin de reconnaître l'importance de la cryosphère dans les activités socio-économiques du Canada et le besoin de mieux comprendre les interactions cryosphère/climat. Il couvre cinq éléments de la cryosphère : la glace de mer, la neige, la glace de lac et de rivières, les glaciers et le pergélisol. Les activités de recherche menées par le programme CRYSYS utilisent la télédétection, la modélisation, les mesures de terrain et l'intégration de divers types de données ponctuelles (climatiques, hydrologiques, ...) afin de mieux suivre l'état de la cryosphère et de mieux comprendre les processus physiques et leur variabilité. Les trois principaux objectifs de CRYSYS (1999) sont :

- Développer le potentiel des capteurs satellitaires pour suivre et comprendre les variables de la cryosphère dans le temps et l'espace.
- Contribuer au développement et à la validation de modèles locaux, régionaux ou globaux afin de mieux comprendre le rôle de la cryosphère dans les changements climatiques.
- Assembler, maintenir et analyser des ensembles de données (historiques, expérimentales, ou autres) sur la cryosphère pour le développement et la validation de modèles et le suivi du climat.

Les trois volets proposés par notre équipe cette année, tout en s'inscrivant dans le programme de recherche de l'INRS-ETE sur le développement de nouveaux outils de télédétection en hydrologie, contribuent à ces trois principaux objectifs de CRYSYS. De plus, ils contribuent aux trois objectifs spécifiques suivants:

- L'amélioration des connaissances sur la variabilité spatiale et aussi temporelle des propriétés du couvert nival et leurs interactions avec le système climatique et la récupération de relevés *in situ* sur les propriétés du couvert nival (volet 3).
- Le développement et le raffinement d'algorithmes pour estimer les propriétés de la glace de rivière à partir des données micro-ondes actives (volets 1 et 2).

3 Bilan des activités de recherche en date du 15 octobre 2005

3.1 Activités tenues dans le cadre du volet #1 : Glace de rivière

Dans le contexte d'une ultime année de financement de CRYSYS, notre objectif est de compléter certains volets ou d'en préparer la transition.

Dans le cadre du **volet #1** (glace de rivière – approche contextuelle), Ali El Battay, étudiant au doctorat financé par CRYSYS (directrice : Monique Bernier, co-directeur : Taha Ouarda), devrait compléter son étude et soutenir sa thèse à l'hiver 2006. Ce volet vise à développer une approche contextuelle pour la caractérisation de la glace de la rivière Saint-François (Québec) en jumelant les données spatiales d'un système d'information géographique et les images RADARSAT en mode fin (résolution de 8 m). Les premières années du projet ont permis l'acquisition des images (18), la mise en place du SIG, la caractérisation de la rivière (largeur, sinuosité, pente, bathymétrie), l'analyse de texture des images radar et la préparation à une classification orientée objet (O-O).

Les objectifs spécifiques définis pour l'année 2005-2006 sont :

- Caractériser l'écoulement et le type de glace probable sur différents biefs de la rivière à partir du contexte physiographique défini dans le SIG. Cette étape vise donc à extraire les relations topologiques et sémantiques reliant chaque type de glace de rivière au régime d'écoulement en se basant sur le contexte physiographique;
- Intégrer les données météorologiques dans la détermination du contexte.

Pour la rivière Saint-François, les données en archive des années d'acquisition d'images (2001-2002-2003) seront utilisées. Il est toutefois essentiel de valider dans quelle mesure les données d'une station météorologique peuvent être directement reliées aux processus d'englacement. Pour ce faire, nous mettrons à profit notre station météorologique installée en

bordure d'un affluent de la rivière Chaudière, au sud de Québec (Bras d'Henri, volet 3). Des thermomètres seront donc installés dans le cours d'eau à différentes profondeurs. Le débit et l'épaisseur du couvert de glace seront mesurés périodiquement.

- Mettre ensemble toutes les informations (intrinsèques, topologiques et contextuelles) relatives à chaque type de glace de rivière. Ainsi, l'ensemble des règles spécifiques de chaque classe forme la structure hiérarchique de la classification orientée objet. Une fois, cette structure testée et validée elle servira à l'automatisation du processus de classification;
- Dépôt et soutenance de thèse de Monsieur Ali El Battay;

Les 4 premiers objectifs touchaient entièrement ou partiellement la période d'avril à octobre 2005. Les activités réalisées depuis avril 2005 sont donc les suivantes :

Caractérisation de l'écoulement

Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé à une analyse qualitative et une autre quantitative. Dans les lignes suivantes une brève description de la méthodologie adoptée pour les deux types d'analyse ainsi qu'un exemple de résultat obtenu.

L'analyse qualitative :

L'analyse qualitative est l'un des deux piliers fondamentaux, à côté de l'analyse quantitative, sur lesquels nous nous sommes basés pour monter la structure hiérarchique de la classification orientée objet. Comme son nom l'indique, dans cette analyse nous essayons de trouver des liens, des rapprochements et/ou des explications de nature qualitative entre les observations terrain et les connaissances théoriques d'un côté, et les images étudiées d'un autre. Évidemment, aucun processus statistique n'a été utilisé dans cette analyse. La Figure 1 schématise l'approche que nous avons suivie pour réaliser l'analyse qualitative. Les images utilisées dans cette étape sont celles de l'hiver 2002 ; les 6 et 30 janvier, ainsi que celle du 4 mars. Le choix de ces images est animé par le fait que nous disposons d'observation terrain et que le couvert de glace était dans une phase d'équilibre. Ceci dit, si nous remarquons qu'un phénomène particulier de glace s'observe dans le même endroit et dans les trois images, nous considérons ce fait comme une

observation ou un constat. À l'aide du système d'information géographique nous essayons de donner une explication au phénomène observé, une sorte d'interprétation. À ce stade, la comparaison entre images et SIG ne donne que des hypothèses d'explication. Dans la deuxième étape de l'analyse qualitative, nous essayons de valider les hypothèses émises lors de la phase précédente. Les observations terrain et/ou nos connaissances théoriques sur les processus de glace servent à ce stade comme outils de validation. Nous essayons d'aller chercher le maximum d'observations possible. Le plus d'observations nous cherchons, le plus de compréhension nous avons sur les types de glace et le mieux notre structure hiérarchique est définie.

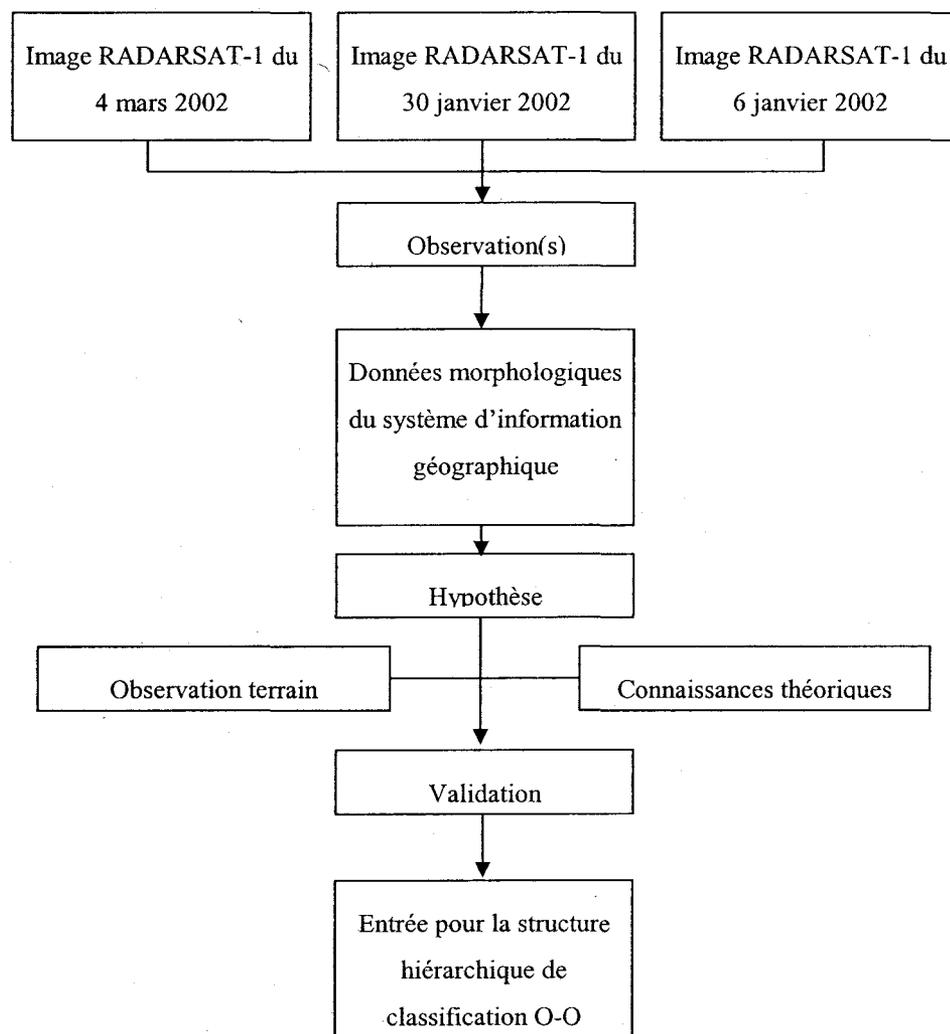


Figure 1 : Description des diverses étapes de l'analyse qualitative

Exemple de résultat de l'analyse qualitative:

La Figure 2 montre un tronçon de la rivière Saint-François dont la largeur est relativement constante, avec une faible sinuosité et une profondeur relativement stable.

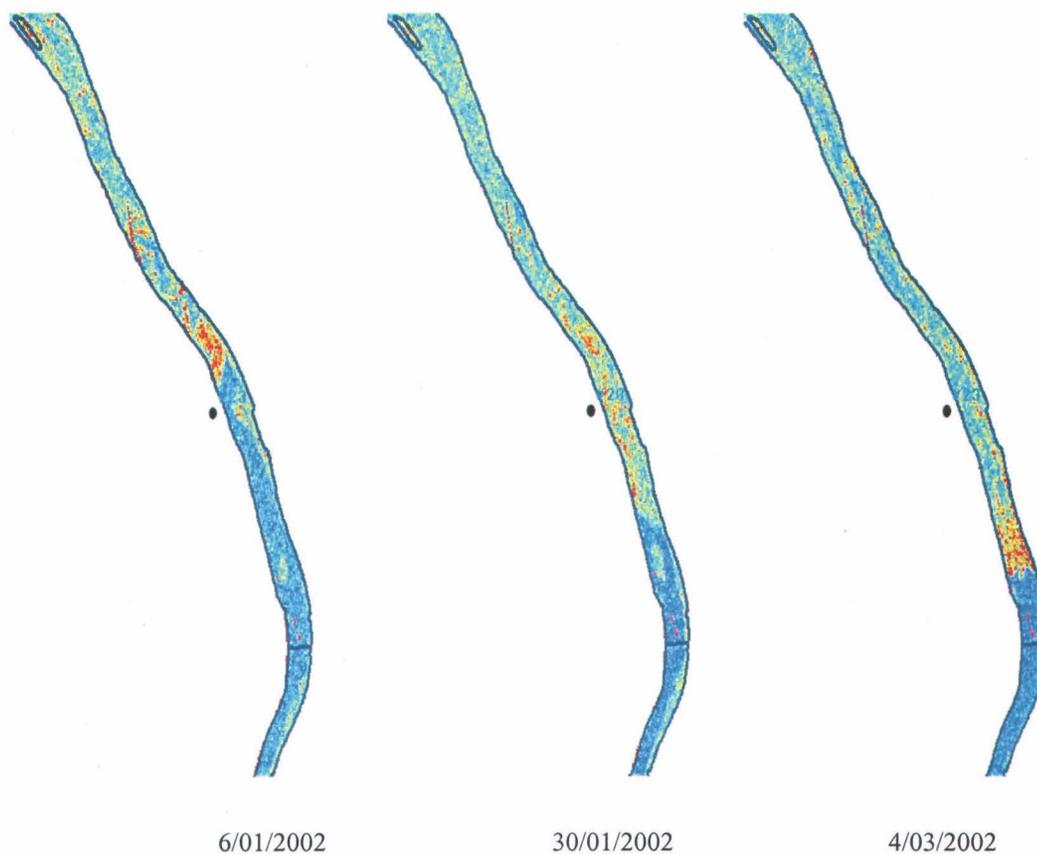


Figure 2 : Trois sous images RADARSAT en pseudocouleur de l'hiver 2002

Nous remarquons que le même état du couvert de glace s'observe dans les trois images. En effet :

- une partie sud avec une faible rétrodiffusion présentée par la couleur bleue marine,
- une partie nord, bleue pale, où la rétrodiffusion est moyenne,
- et finalement une section centrale, dont la rétrodiffusion est plus importante, couleur de verte à rouge dans les images.

L'hypothèse que nous pouvons émettre dans une telle situation et que la partie sud correspond à de l'eau libre, la partie nord est un couvert de glace complet et intact et que la partie centrale est une zone de formation d'embâcle. La Figure 3 vient consolider notre hypothèse et nous pouvons ainsi l'inclure, entre autres, dans la structuration O-O pour définir l'eau libre, le couvert de glace complet et la zone d'embâcle ou de glace agglomérée.

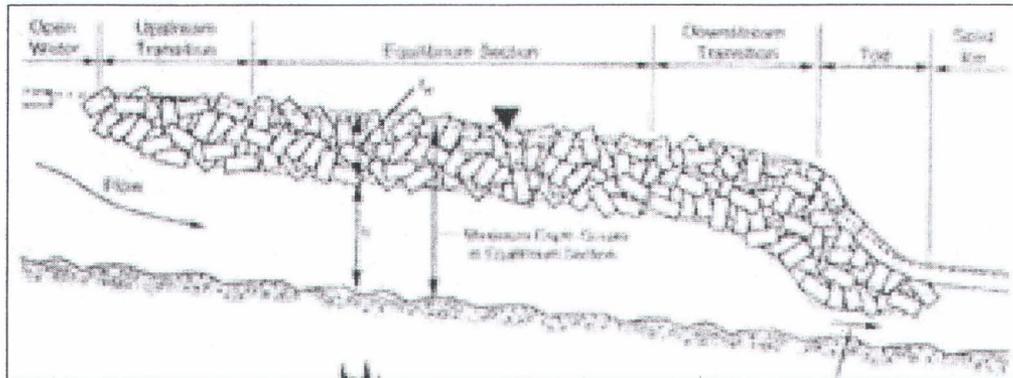


Figure 3 : Profil d'un embâcle

Analyse quantitative :

À l'encontre de l'analyse qualitative, celle dite quantitative est orientée vers des processus statistiques. Nous nous intéressons toujours à enrichir la structuration hiérarchique de la classification O-O. Les images utilisées dans cette étape sont les mêmes que dans l'analyse qualitative, pour la simple raison que (i) désormais nous les connaissons bien et (ii) les observations terrain sont nécessaire pour valider. Dans cette étape, nous allons aussi vérifier nos hypothèses de recherche. En fait, les paramètres que nous avons choisis d'attribuer à chaque objet d'une image sont de trois sortes :

- Paramètres tirés directement ou indirectement des images RADARSAT ;
- Paramètres tirés directement ou indirectement du système d'information géographique ; et
- Paramètres propres à l'objet et son voisinage.

Le Tableau 1 donne quelques exemples de ces trois sortes de paramètres pour chaque objet d'une image RADARSAT.

Tableau 1 : Paramètres des objets

Paramètres image	Paramètres SIG	Paramètres de l'objet
Amplitude	Largeur moyenne	Indice de forme
corrélation	Profondeur moyenne	Rapport longueur/largeur
moyenne	Sinuosité moyenne	Superficie
second moment angulaire	Pente	Périmètre
Entropie	Température de l'air	Indice de correspondance à une ellipse
Écart-Type	Vitesse d'écoulement	Indice de correspondance à un rectangle
Contraste	Zone de rapide	Distance de la rive
Homogénéité	Zone d'îles	Objet voisin

Ainsi, l'analyse quantitative doit nous montrer, s'il y a lieu, la limite des paramètres d'image et l'utilité des autres types de paramètres. La Figure 4 présente les diverses étapes de l'analyse quantitative. En premier lieu, après la segmentation en objets des images RADARSAT, les objets dont les observations terrain existent sont identifiés. Ainsi, nous connaissons quel objet appartient à quelle classe de glace de rivière. L'étape suivante consiste à extraire pour chaque objet les trois types de paramètres énumérés en haut. L'étape ultime est celle où l'analyse statistique est effectuée distinctement sur deux ensembles de types de paramètres : (i) en utilisant seulement les paramètres d'image (ii) en utilisant les trois types de paramètres. Une comparaison entre les résultats de l'analyse de séparation statistique nous permet de définir quel ensemble de paramètres distingue le mieux chaque type de glace. Encore une fois, le résultat de l'analyse quantitative vient enrichir la structuration de la classification O-O.

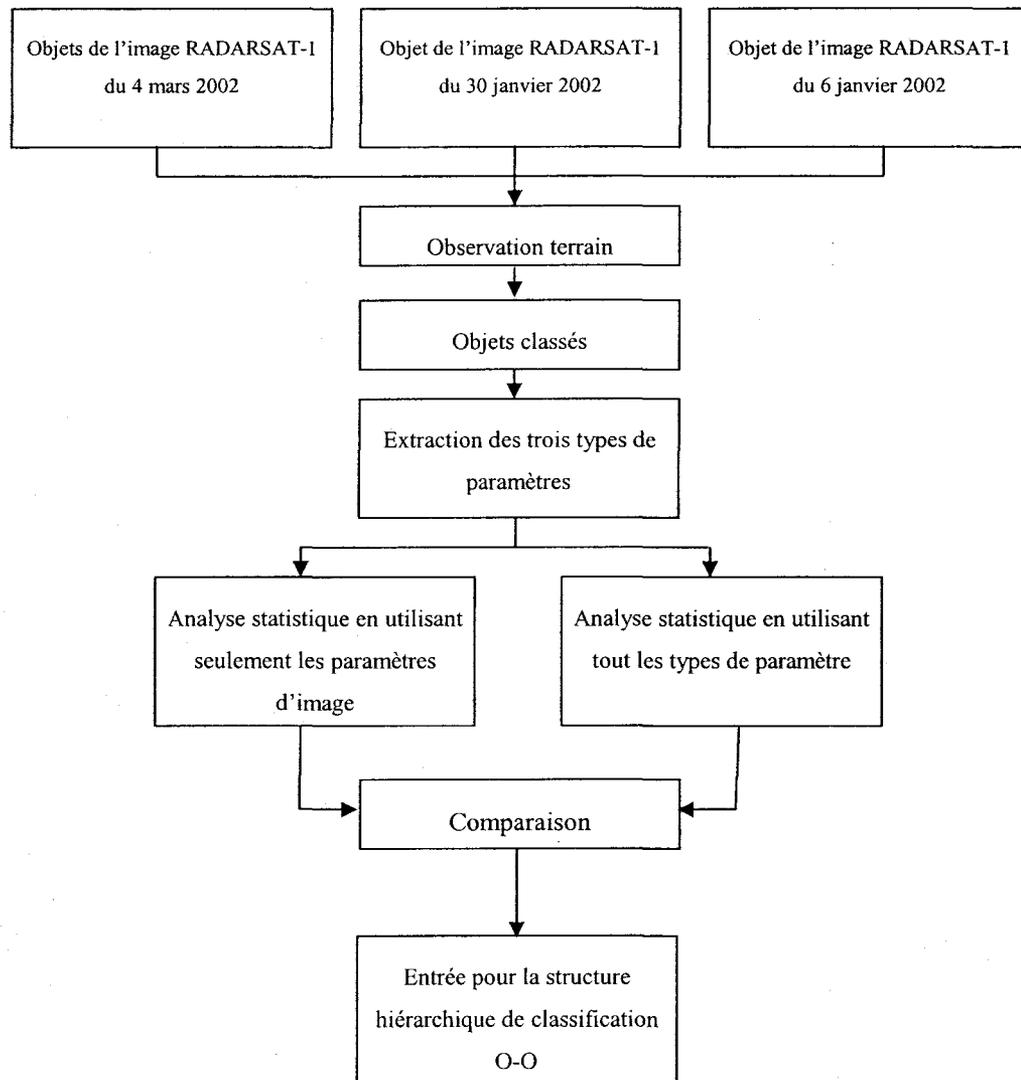


Figure 4 : Description des diverses étapes de l'analyse quantitative

Intégration des données météorologiques

Pour la rivière Saint-François, les données météorologiques en archive coorespondant aux années d'acquisition des images (2001-2002-2003) seront utilisées. Il est toutefois essentiel de valider dans quelle mesure les données d'une station météorologique peuvent être directement reliées aux processus d'englacement. Cet objectif sera poursuivi dorénavant dans le cadre du projet FRAZIL.

Structure hiérarchique de la classification O-O

Objectif en cours de réalisation.

Dépôt et soutenance de thèse

Prévu pour l'hiver 2006.

3.2 Activités tenues dans le cadre du volet #2 : Glace de rivière

Le **volet #2** (glace de rivière - modélisation radar), est réalisé par Imen Gherboudj, étudiante au doctorat financée par CRYSYS (directrice : Monique Bernier, co-directeur : Robert Leconte) et dont la soutenance est prévue pour l'automne 2007. Cette thèse s'intègre au projet FRAZIL¹, financé par le Réseau des Centres d'excellence GÉOIDE pour la période 2005-2009. Ce volet met l'accent sur l'étude théorique des mécanismes qui contrôlent l'interaction entre le signal radar et le couvert de glace. La rétrodiffusion du signal après sa pénétration dans le couvert de glace est liée à plusieurs mécanismes complexes de diffusion reliés à la présence d'air, d'eau, de glace, de neige et de sédiments, ainsi qu'aux paramètres du capteur. Nous proposons donc une étude sur le développement d'un modèle de rétrodiffusion pour caractériser la glace de rivière à partir des données radar monopolarisées, multipolarisées et polarimétriques. La première année du projet a permis de se familiariser avec le médium étudié et de mener une première analyse d'un paramètre radar, l'angle d'incidence.

Les objectifs spécifiques définis pour l'année 2005-2006 sont :

Objectifs spécifiques du volet #2 pour 2005-2006 :

- Examen doctoral prévu le 4 mai 2005

¹ FRAZIL : Integrated expertise towards the development of an ice jam related flood warning system (2005-2009)

- Communication au 12^{ème} Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection du 10 au 12 mai 2005.
- Formulation mathématique et programmation du modèle électromagnétique afin de modéliser et mieux comprendre l'interaction du signal radar avec la glace de rivière.
- Identification précise des données d'entrée de ce modèle afin de prévoir l'acquisition de certaines variables du couvert de glace (épaisseur, structure, densité) lors des campagnes de terrain de l'hiver 2006.
- Validation du modèle à l'aide des coefficients de rétrodiffusion extraits des images RADARSAT/ENVISAT/Convair-580.

Les 3 premiers objectifs touchaient entièrement ou partiellement la période d'avril à octobre 2005. Les activités réalisées depuis avril 2005 sont donc les suivantes :

Examen doctoral

La préparation de cet examen doctoral nécessitait la rédaction d'un rapport incluant les principales études effectuées sur la glace de rivière et qui ont été déjà recensées dans les objectifs précédents (types de glace, rétrodiffusion radar), l'étude des différents modèles de rétrodiffusion du signal radar et finalement la méthodologie proposée afin de bien mener la réalisation de ce travail de recherche d'ici l'automne 2007.

Ainsi, trois objectifs ont alors été présentés et acceptés par le jury:

- 1) Développer un modèle de rétrodiffusion capable de mieux estimer le coefficient de rétrodiffusion de la glace de rivière mesuré en bande C avec différentes polarisations (HH, VV, HV et VH) en prenant en considération les différents mécanismes de diffusion contribuant dans cette interaction, ce qui implique de caractériser de façon réaliste les couverts de glace de neige et de frazil.
- 2) Faire une analyse d'incertitude, incluant une analyse de sensibilité et de propagation d'erreur, du modèle développé afin de déterminer le paramètre (ou mécanisme) qui contribue le plus dans

l'interaction et les limites et les implications d'application du modèle en calculant le niveau d'incertitude dans ses sorties.

3) Confronter ce modèle à des données radar réelles acquises avec les capteurs RADARSAT-1, ASAR D'ENVISAT et CONVAIR-580.

Communication au 12ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection

Pour ce congrès une affiche et un article ont été préparés. Le travail, déjà réalisé durant la première année du doctorat, consistait à standardiser le signal radar de la glace de rivière acquis avec les capteurs Radarsat-1 et Envisat. Cependant, la rétrodiffusion du signal radar par la glace d'eau douce dépend des propriétés physiques et chimiques de la glace (constante diélectrique, rugosité, porosité, épaisseur, température et type) et aussi des paramètres de l'antenne (polarisation, fréquence, géométrie de vue). L'angle d'incidence est considéré comme le paramètre du capteur qui affecte le plus le signal radar. De plus, les images radar ne sont pas toutes acquises avec le même mode d'acquisition ce qui rend l'étude multi-temporelle difficile, surtout qu'on ignore l'effet de l'angle d'incidence sur le signal radar de la glace. Les images radar les plus adaptées pour l'étude de la glace de rivière sont celles acquises en mode fin avec le capteur RADARSAT-1. Ainsi et dans le but d'avoir plus de souplesse dans le choix du mode d'acquisition des images, une étude sur la standardisation du signal de la glace de rivière d'un mode à un autre (F1, F2, F3, F4, F5) a été proposée et cet algorithme a été appliqué.

Formulation et programmation du modèle

La formulation mathématique des modèles de rétrodiffusion est une étape cruciale qui précède leur programmation. La formulation mathématique des modèles de diffusion de surface et des diffuseurs sphériques et cylindrique est réalisée. Cependant, la formulation mathématique des diffuseurs liés aux glaces de neige et de frasil n'est pas encore réalisée (objectif 1 de la thèse). Les mesures terrain planifiées pour l'hiver 2006 aideront à mieux caractériser ces types de glace.

Étude et compréhension des images polarimétriques sur la glace de rivière

À l'été 2005, Mme Gherboudj a collaboré à une étude sur la classification non supervisée de Wishart d'une image polarimétrique acquise avec le capteur Convair-580 sur la rivière Saint-François durant l'hiver 2003. Cette étude a été réalisée dans le cadre du stage de DEA de Stéphane Mermoz, inscrit à l'Université de Rennes 1 (France). Le résultat de cette classification montre l'existence de plusieurs types de glace (Figure 1). Ainsi, et afin les identifier, l'analyse s'est surtout basé sur la théorie de formation de la glace d'eau douce et sur les données météo disponibles. On a pu identifié la glace noire (columnaire), le frasil, la glace de neige et la glace agglomérée.

L'identification de la glace noire est assez simple car elle se forme dans les zones étroites de la rivière à écoulement laminaire. On la trouve également sur les rives dans les sections larges. D'après la décomposition de Pauli, cette glace provoque principalement deux types de réflexion : réflexion surfacique et réflexion multiple. La présence d'inclusions tubulaires seuls entraîne une réflexion multiple. Le taux de gel élevé calculé cette année là confirme que cette glace contient réellement des inclusions d'air de forme tubulaire. Le frasil peut être identifié car il est formé uniquement dans les zones rapides et turbulentes de la rivière. Sur l'image, on le trouve juste avant le barrage, éparpillé après le barrage et dans les zones de rapides. La diffusion de volume engendrée par cette glace et sa structure éparpillée prouve réellement que c'est du frasil. Un autre type de glace est étroitement lié au frasil. D'après la théorie de la formation de glace, cette glace serait de type columnaire (noire) nucléée avec du frasil. L'identification de la glace de neige est plus difficile. La couleur pouvant être associée à cette glace est concentrée dans deux endroits uniquement. Le premier endroit est en haut de la rivière dans les sections fréquentées par les motos-neige. D'après la théorie cette glace est considérée comme une glace superposée, formée sur un couvert de glace déjà établi. Elle se forme après une précipitation de neige suivie d'une autre précipitation de pluie. Cependant, d'après les données météorologiques il n'a pas plu dans les 15 derniers jours précédant l'acquisition des images. De plus la température extérieure durant ce mois était trop basse pour qu'une neige humide se forme puis gèle. La présence de diffusion multiple prouve la présence d'inclusions tubulaires qui sont liées à la glace noire (columnaire). Cette glace était couverte de neige. La seule hypothèse possible est que les motos-neige ont écrasé

et condensé la neige à certains endroits de cette section. La diffusion de volume, qui est relativement faible, démontre la fine épaisseur de cette glace de neige. Le deuxième endroit est la zone de rapide. Cette zone de la rivière est la dernière à geler. Ainsi, la couche de neige présente est saturée d'eau de rivière. Avec le froid intense de cet hiver, cette neige a gelé pour former de la glace de neige dans ce tronçon de la glace agglomérée. Finalement on a identifié la glace agglomérée dans la zone de rapide. Cette zone est la dernière à geler dans une rivière. Elle contient plusieurs types de glace: soit du frasil ou de la glace de neige formés dans cette zone, soit de la glace détachée de d'autres sections comme la glace colonnaire.



Figure 5 : Classification finale de l'image polarimétrique

Cette étude sera présentée à ASAR 2005 (15 au 17 novembre 2005, Montréal): *Investigating Polarimetric SAR Data for River Ice Monitoring* par Monique Bernier, Yves Gauthier, Stéphane Mermoz et Imen Gherboudj.

Atelier polarimétrique

Mme Gherboudj a assisté à un atelier de formation sur la polarimétrie radar (RADARSAT-2) offert par l'Agence Spatiale Canadienne (Québec, 4 et 5 octobre 2005).

Planification de mesures de terrain et de laboratoire

Une campagne de mesure terrain et de laboratoire est planifiée pour mars 2006 sur la rivière Athabaska en Alberta, en collaboration avec le Dr Faye Hicks (UofA). Cette campagne permettra à Mme Gherboudj de se familiariser avec la réalité de la glace de rivière. Des carottes de glace seront extraites et transportées au laboratoire de génie civil de l'Université de l'Alberta. On y effectuera alors certaines mesures comme l'épaisseur et la densité de chaque type de glace, la taille et la forme des diffuseurs et la rugosité aux deux interfaces air/glace et glace/eau. On vise particulièrement à mieux caractériser la glace de neige et de frasil (leur densité, forme et tailles des inclusions d'air).

3.3 Activités tenues dans le cadre du volet #3 : Gel du sol

Le **volet #3** est réalisé par Jalal Khaldoune, étudiant au doctorat financé par CRYSYS (Directrice : Monique Bernier, co-directeur : Éric van Bochove). Il vise à cartographier le gel du sol à l'échelle du Bras d'Henri, sous-bassin versant des rivières Beaurivage et Chaudière au sud de Québec. Plus spécifiquement, il permettra de préciser les relations entre la température de l'air, l'épaisseur et la densité du couvert de neige, et les coefficients de rétrodiffusion extraits d'images radar. La méthodologie proposée implique une phase de traitement des images RSO issues de trois sources différentes (monopolarisation : RADARSAT-1, multipolarisation : ENVISAT-ASAR, polarimétriques : RADARSAT-2 (CV-580)), une deuxième phase de saisie de données dans un Système d'Information Géographique (SIG) et une dernière phase, qui est par ailleurs critique, puisqu'elle découle des deux phases antérieures et qu'elle se traduit par le développement (la réalisation) d'une carte du gel du sol.

Les objectifs spécifiques définis pour l'année 2005-2006 sont :

Objectifs spécifiques du volet #3 pour 2005-2006 :

- Traitement des données terrain prises au cours de l'hiver 2005-2006.
- Traitement des images RSO acquises pendant la même période.

- Analyses statistiques des dépendances entre les coefficients de rétrodiffusion des données RSO et les variables mesurées au champ (utilisation de la régression multiple comme méthode pour la modélisation des dépendances).
- Communication au 12^{ème} Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection.
- Soumission d'un article au Journal Canadien de Télédétection, au sujet des résultats obtenus suite à l'analyse des données terrain.
- Communication au 25^{ème} congrès IGARSS 2005.
- Développement d'algorithmes qui nous permettra de cartographier le gel du sol dans ArcGIS, en nous basant sur les données RSO (coefficients de rétrodiffusion).

Tous les objectifs touchaient entièrement ou partiellement la période d'avril à octobre 2005. Les activités réalisées depuis avril 2005 sont donc les suivantes :

Traitement et analyses statistiques des données mesurées sur le terrain (2004-2005)

Toutes les données terrain acquises au cours des deux campagnes de terrain (hivers 2003-2004 et 2004-2005) ont été traitées et analysées. La Figure 6 présente quelques résultats obtenus.

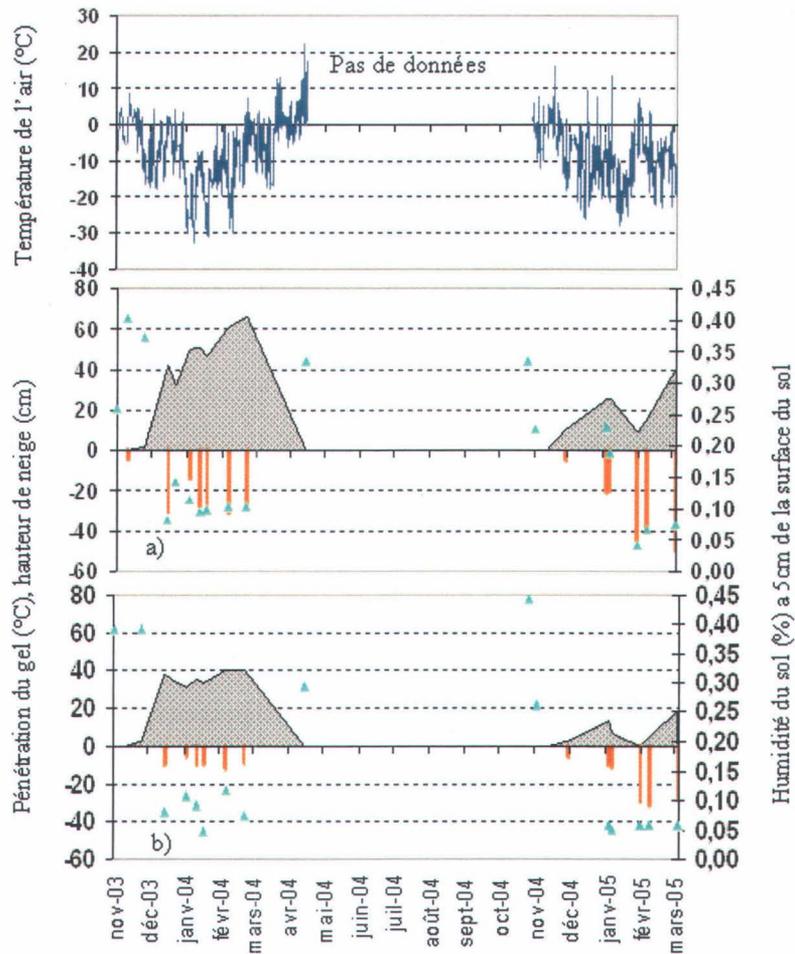


Figure 6 : Relations entre le couvert nival, l'humidité du sol (5cm), la profondeur du gel et la température de l'air pour deux champs agricoles aux profils pédologiques différents

Traitement et analyses statistiques des images RSO acquises (2004-2005)

Toutes les séries d'images RADARSAT-1 (6), ENVISAT (9) et RADARSAT-2/Convair-580 ont été corrigées radiométriquement et géométriquement. Les champs agricoles utilisés ont été sélectionnés et les valeurs des coefficients de rétrodiffusion ont été extraites.

Pour le traitement polarimétrique, nous avons utilisé deux images du Convair-580, une image acquise le 14 novembre 2003 correspondant à des conditions sans gel et une autre image acquise le 19 février 2003 correspondant à des conditions avec gel. La Figure 7 représente les deux

images polarimétriques affichées selon la décomposition de Pauli. Nous pouvons clairement distinguer des structures avec diffusion multiple- caractéristiques d'un milieu urbanisé (couleur rouge), des secteurs avec diffusion de surface- caractéristiques des champs agricoles (que nous distinguons clairement sur les images en couleur bleue), et finalement des secteurs où le mécanisme de diffusion est surtout de volume (3ème matrice de Pauli), représenté sur les images par des zones forestières (couleur verte).

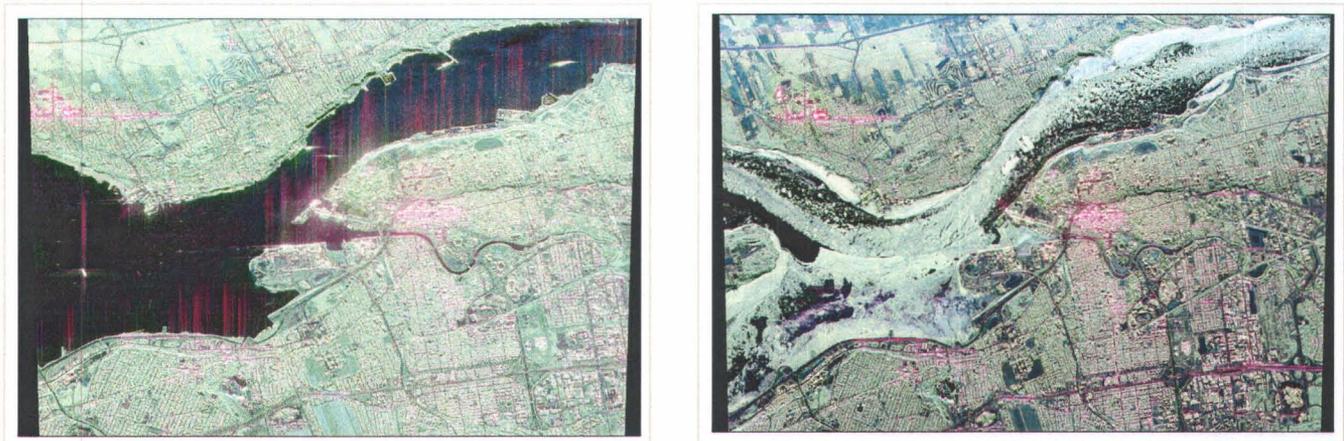


Figure 7 : Image Convair-580 (6m) de la zone d'étude acquise le : a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003. Visualisation par la décomposition de Pauli $S_{HH} + S_{VV}$, $S_{HH} - S_{VV}$, $2S_{HV}$.

Pour le traitement des données de la polarimétrie radar (Entropie, anisotropie, α , décomposition de Cloude et Pottier, signature polarimétrique), nous nous sommes servis de deux logiciels, PolSARpro (Agence Spatiale Européenne, Université de Rennes I) et PWS (Centre Canadien de Télédétection).

La signature de copolarisation pour l'image du 19 février 2003 (image avec gel de sol) de la parcelle A (Figure 8) montre un maximum de rétrodiffusion à la polarisation HH et VV et une hauteur du piédestal de 0,35, caractéristique d'une diffusion de surface. Pour l'image sans gel (image d'automne), toujours pour le même secteur, la signature de copolarisation montre une forme en selle et un piédestal de 0,29, ce qui indique un milieu où des structures debout sont présentes, étant donné que le signal rétrodiffusé est dominé par une combinaison de réflexion double et diffusion multiple et volumétrique.

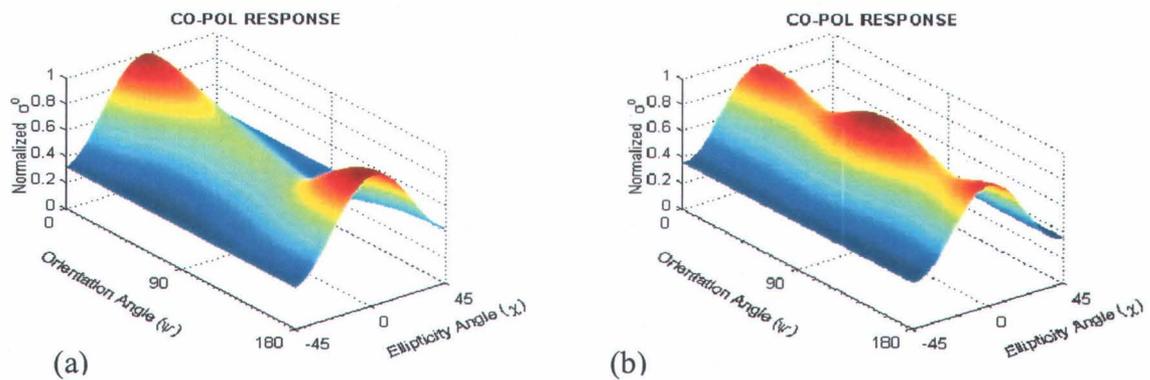


Figure 8 : Signatures polarimétriques de la parcelle A pour l'image du a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003

Une segmentation H- α . a aussi été effectuée. Son analyse ainsi que celle des signatures polarimétriques montrent la possibilité de discriminer un sol gelé d'un sol non gelé.

D'autre part, la Figure 9a représente une image ASAR affichée dans trois canaux VV, HH et VV/HH, qui sont respectivement représentés en rouge, vert et bleu. Les variations d'intensité de chaque couleur indiquent un changement des conditions à la surface, notamment les variations de l'occupation du sol (peuplement forestier, terres agricoles), le gel ou le dégel du sol. Les champs agricoles apparaissent en couleur sombre dans l'image. (Figure 9a.). Une grande partie du sol était gelée. La forêt apparaît dans des tonalités vert jaunâtre indiquant une rétrodiffusion également élevée dans les deux polarisations (HH et VV). Les tonalités bleues dans l'image indiquent une faible rétrodiffusion de HH et de VV, avec une rétrodiffusion de VV plus forte que HH, correspondant aux champs ou aux zones humides.

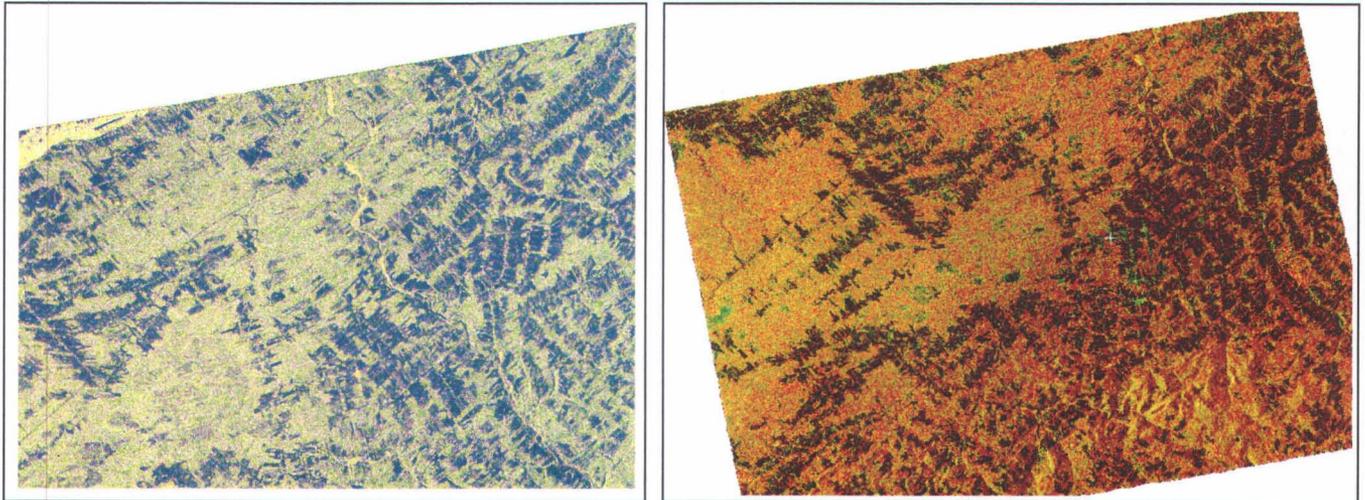


Figure 9 : Illustration d'une image ENVISAT acquise en mode APP. a) le 10 janvier 2004 (VV-HH). b) le 10 janvier 2005 (HV-HH)

Bien que la réponse de la rétrodiffusion varie en fonction de l'humidité du sol, la sensibilité des hyperfréquences polarisées HH et VV est la même quant aux modifications de l'humidité du sol. Toutefois, certaines études ont indiqué que, par rapport aux hyperfréquences à polarisation parallèle, la sensibilité à l'humidité du sol des polarisations croisées était supérieure.

Afin de connaître les bonnes combinaisons de polarisations pour l'étude du gel du sol, nous avons jugé utile d'ajouter la polarisation croisée (puisque nous avons à notre disposition des images acquises avec les polarisations HV et HH, comme nous pouvons le voir à la figure 9(b).

L'utilisation des données en polarisation croisée améliore la discrimination entre la diffusion de surface et la diffusion de volume. Les surfaces lisses, telles que les champs agricoles et les secteurs de végétation basse apparaissent dans des tonalités vertes (rétrodiffusion dominant de HH), tandis que des secteurs boisés apparaissent dans des tonalités oranges, dues à la haute rétrodiffusion de HV ; par ailleurs, ces dernières sont fortement corrélées avec la diffusion de volume.

Communications

Le résultat de l'analyse des données polarimétriques a fait l'objet d'une présentation orale au 12^{ème} congrès de l'Association Québécoise de Télédétection et la publication d'un article dans les comptes-rendus de cette conférence.

La soumission d'un article au Journal Canadien de Télédétection a été reportée au mois de Janvier 2006.

Une communication a été présentée au 25e congrès de l'IGARSS en Corée, en juillet 2005 : *Mapping frozen soils at the watershed scale using SAR data*. Par ailleurs, une affiche a aussi été présentée à la 7^{ème} conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE à Québec en mai 2005.

Développement d'algorithmes de corrélation

L'analyse des données a permis de développer un algorithme de cartographie de gel de sol basé sur l'analyse de seuillage pour les différentes textures de sol étudiées (figure 7). Une carte de gel de sol a été générée pour trois dates données des images RADARSAT-1 (08/11/2003, 02/12/2003 et 29/02/2004). La carte a été établie sur la base du plan de dépôt de matériaux du sol, et de la relation entre les coefficients de rétrodiffusion et les températures mesurées à 5 cm de la surface du sol;

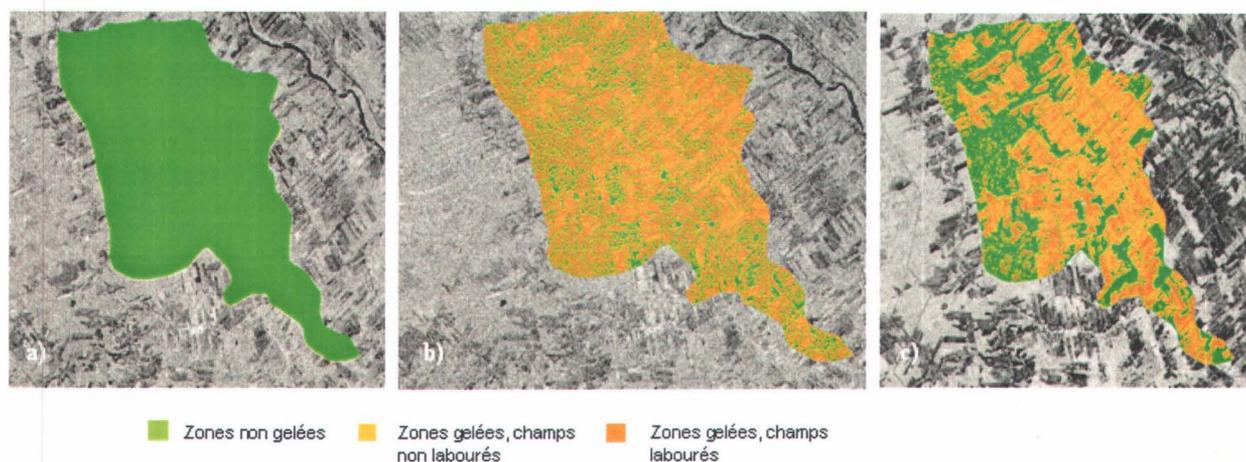


Figure 10 : Cartographie du gel/non gel de sol du bassin versant Bras d'Henri selon a) 08 novembre 2003, b) 02 décembre 2003 et c) 29 février 2003

4 Publications 2005 découlant des activités financées par CRYSYS

a) Conférences avec arbitrage (COF)

b) Actes de colloque

GHERBOUDJ, I, BERNIER M. et GAUTHIER, Y. 2005. **Standardisation du signal radar d'images RADARSAT-1 et ASAR pour le suivi du couvert de glace en rivière.** 12^{ème} congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, 10 au 12 mai 2005, Chicoutimi, Québec (CD-ROM).

KHALDOUNE, J. BERNIER, M. VAN BOCHOVE, E. et NOLIN, M. 2005. **Suivi du gel du sol dans un milieu agricole par la polarimétrie RSO.** 12^{ème} congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, 10 au 12 mai 2005, Chicoutimi, Québec (CD-ROM).

c) Ateliers / Séminaires

KHALDOUNE, J. BERNIER, M. VAN BOCHOVE, E. et NOLIN M, 2005. **Caractérisation et suivi du gel du sol dans un milieu agricole sous couvert de neige avec les images RSO de radarsat-1.** 7^{ème} conférence scientifique annuelle du réseau GEOIDE, 29 au 31 mai 2005, Québec (Affiche).

KHALDOUNE, J. BERNIER, M. VAN BOCHOVE, E. et NOLIN M, 2005. **Mapping frozen soils at the watershed scale using SAR data.** IGARSS 2005, 25 to 29 July 2005, Seoul, Korea. Communication orale.

BERNIER, M. GAUTHIER, Y. GHERBOUDJ I. et MERMOZ S 2005 . **Investigating Polarimetric SAR Data for River Ice Monitoring,** Advanced SAR 2005, 15 to 17 November 2005, CSA, Montréal.

d) Rapports de recherche

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., KHALDOUNE, J., GHERBOURJ, I., EL BATTAY, A., OUARDA, T. et E. Van BOCHOVE, 2005. Suivi du couvert de glace en rivière et du gel du sol à l'aide du radar, des SIG et de la modélisation. Rapport de recherche No. R-617-e7, octobre, 23 pages.

Thèses et mémoires

GHERBOUDJ, I., 2005. Modélisation électromagnétique de la rétrodiffusion radar (bande C) de la glace de rivière, Examen Doctoral, INRS-ETE, mai, 79 pages.