

# **Rapport final**

## **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-f**

**Mars 2006**



# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>v</b>
<b>1 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE LA RECHERCHE POUR 2005-2006.....</b>	<b>1</b>
<b>2 CONTRIBUTION AU PROGRAMME CRYSYS.....</b>	<b>1</b>
<b>3 BILAN DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE EN DATE DU 31 MARS 2006.....</b>	<b>5</b>
3.1 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #1 : GLACE DE RIVIÈRE.....	5
3.2 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #2 : GLACE DE RIVIÈRE.....	18
3.3 ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #3 : GEL DU SOL .....	24
<b>4 PUBLICATIONS CRYSYS 2005-2006 .....</b>	<b>39</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Description des diverses étapes de l'analyse qualitative .....	7
Figure 2 :	Trois sous images RADARSAT en pseudocouleur de l'hiver 2002 .....	8
Figure 3 :	Profil d'un embâcle .....	9
Figure 4 :	Description des diverses étapes de l'analyse quantitative .....	11
Figure 5 :	Résultat de l'analyse quantitative pour l'image du 30 janvier 2002 .....	12
Figure 6 :	Structure de la classification orienté objet pour l'identification de la glace thermique	14
Figure 7 :	Exemple de classification d'une zone à risque d'embâcle le 11 février 2003 .....	15
Figure 8 :	Classification finale de l'image polarimétrique .....	22
Figure 9 :	Campagne de mesures sur la St-François : profil de Géoradar et carotte de glace. ....	23
Figure 10 :	Carotte de glace de la rivière St-François et l'image reconstituée de la partie supérieure (glace blanche) (vue latérale, vue du haut, vue du bas). ....	24
Figure 11 :	Variation de la profondeur du gel (barre orange), hauteur de la neige (en gris) et humidité du sol (triangles bleus) enregistrée à 5 cm pour les champs 9, 10 et 11 avec la moyenne des précipitations mensuelles, la moyenne des températures quotidiennes maximales et minimales enregistrée au niveau de la station météorologique de Scott, en fonction du temps. ....	27
Figure 12 :	Relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar (triangles verts), la constante diélectrique du sol (losanges bleus) à 5 cm de la surface et la profondeur du gel (barre orange) pour les champs 3, 4 et 7. ....	28

Figure 13: Droite de régression linéaire entre la rétrodiffusion et la température du sol pour le champ numéro 1.....	30
Figure 14 : Cartes du gel de sol du bassin versant du Bras d'Henri élaborées à partir d'image RADARSAT-1 du 2 novembre 2004 (a) et 13 janvier 2005 (b).....	31
Figure 15 : 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 $S_{HH} + S_{VV}$ , $S_{HH} - S_{VV}$ , $2S_{HV}$ .....	33
Figure 16 : Signatures polarimétriques de la parcelle A pour l'image du a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003.....	34
Figure 17 : Relations entre le coefficient de rétrodiffusion dans les polarisations HH, VV et VH et la température du sol mesurée à 5cm de profondeur pour deux groupes d'utilisation du sol (les carrés rose représentent les labours, les losanges bleu les champs de foin).....	35
Figure 18 : Illustration d'une image ENVISAT acquise en mode APP a) le 10 janvier 2004 (VV-HH) b) le 10 janvier 2005 (HV-HH).....	36

# 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 31 mars 2006**

---

#### **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 était 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), a complété son étude et effectuera le dépôt de sa thèse en avril 2006, pour soutenir le 24 mai 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) sont utilisées.

- 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 activités réalisées depuis avril 2005 sont 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 coté 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.

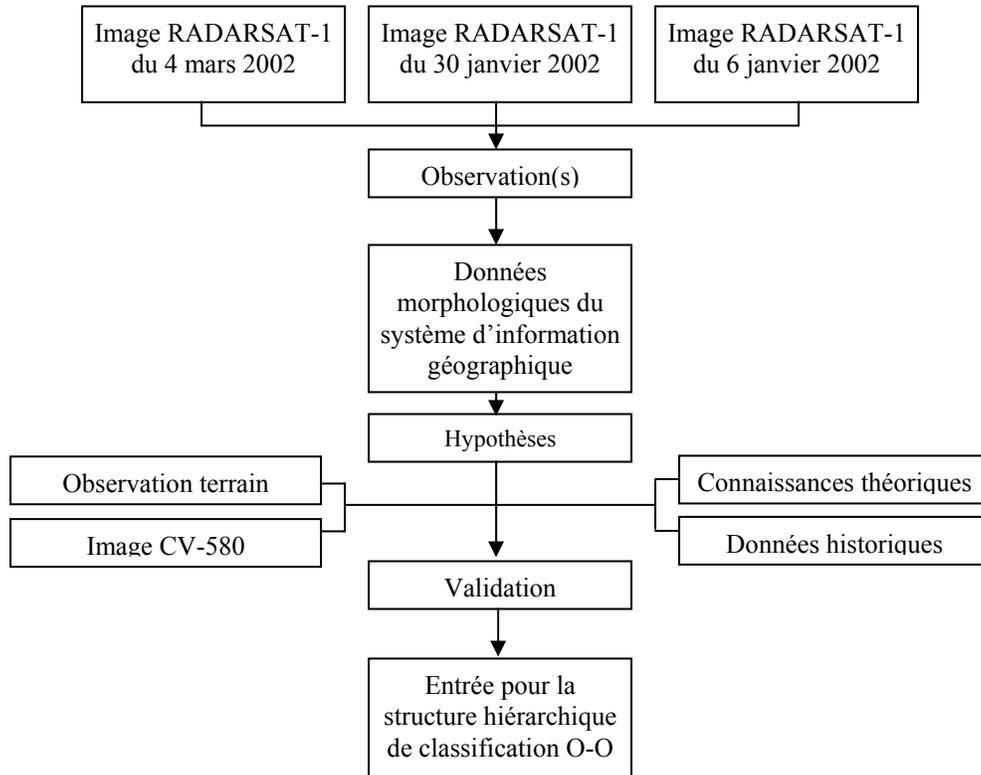
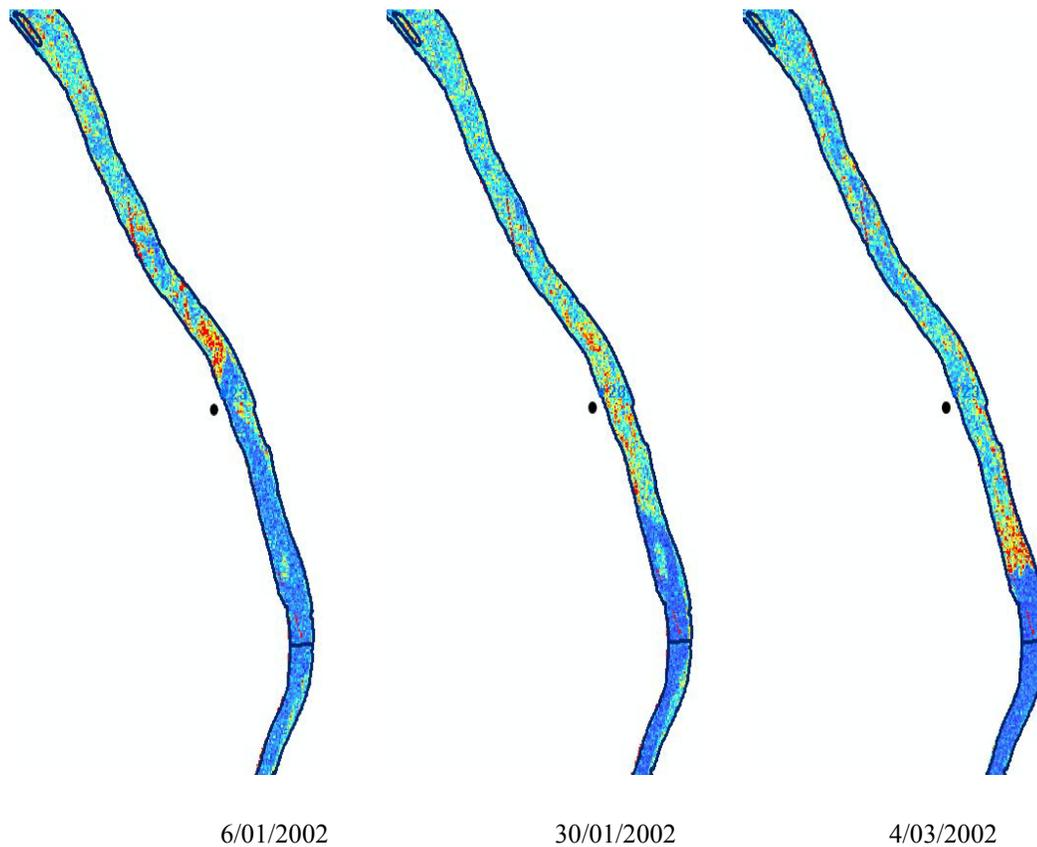


Figure 1 : Description des diverses étapes de l'analyse qualitative.

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.

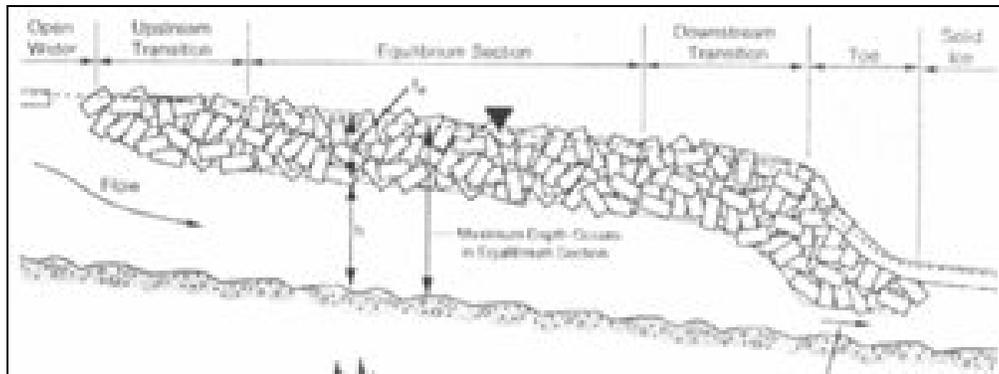


**Figure 2 : Trois sous images RADARSAT en pseudocouleur de l'hiver 2002.**

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**

<b>Paramètres image</b>	<b>Paramètres SIG</b>	<b>Paramètres de l'objet</b>
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.

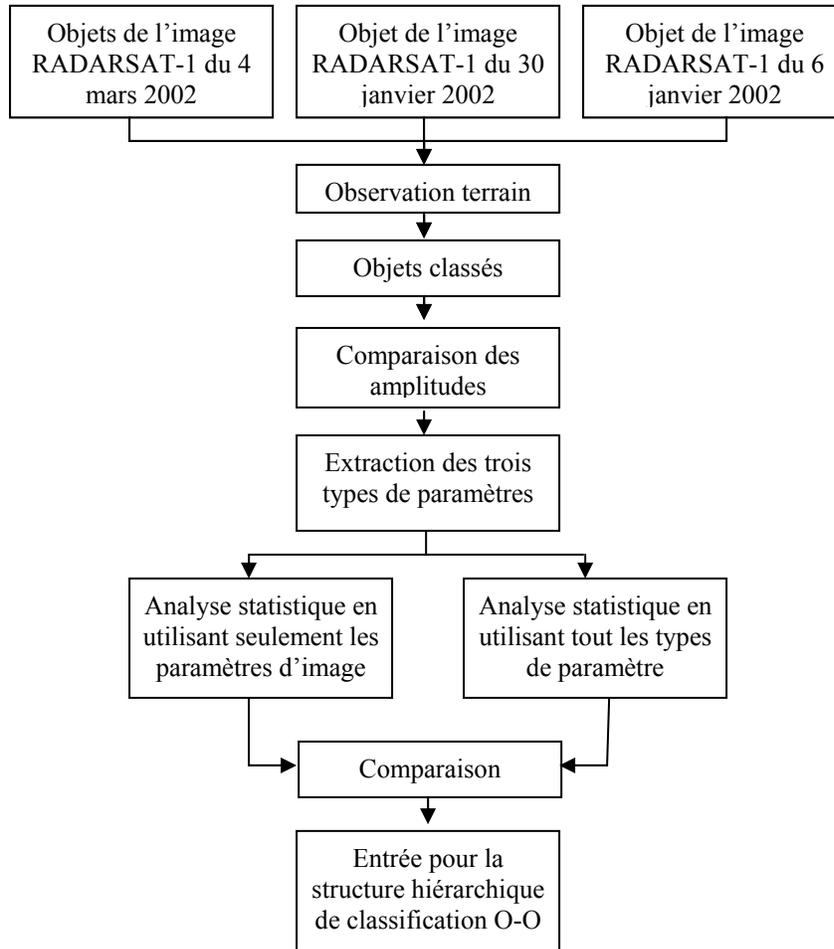


Figure 4 : Description des diverses étapes de l'analyse quantitative.

La Figure 5 présente un exemple de résultat de l'analyse quantitative. En fait, nous avons formulé au début de notre recherche l'hypothèse suivante : « **introduire les caractéristiques de la rivière dans le processus d'analyse des images RADARSAT (mode fin) peut permettre une meilleure valorisation des informations qu'elles contiennent** ». Nous remarquons dans la Figure 5 une nette amélioration de l'ajout des paramètres de morphologie et de forme ce qui rehausse la séparabilité des diverses classes de glace. Des résultats similaires sont obtenus pour les deux autres images utilisées lors de l'analyse quantitative.

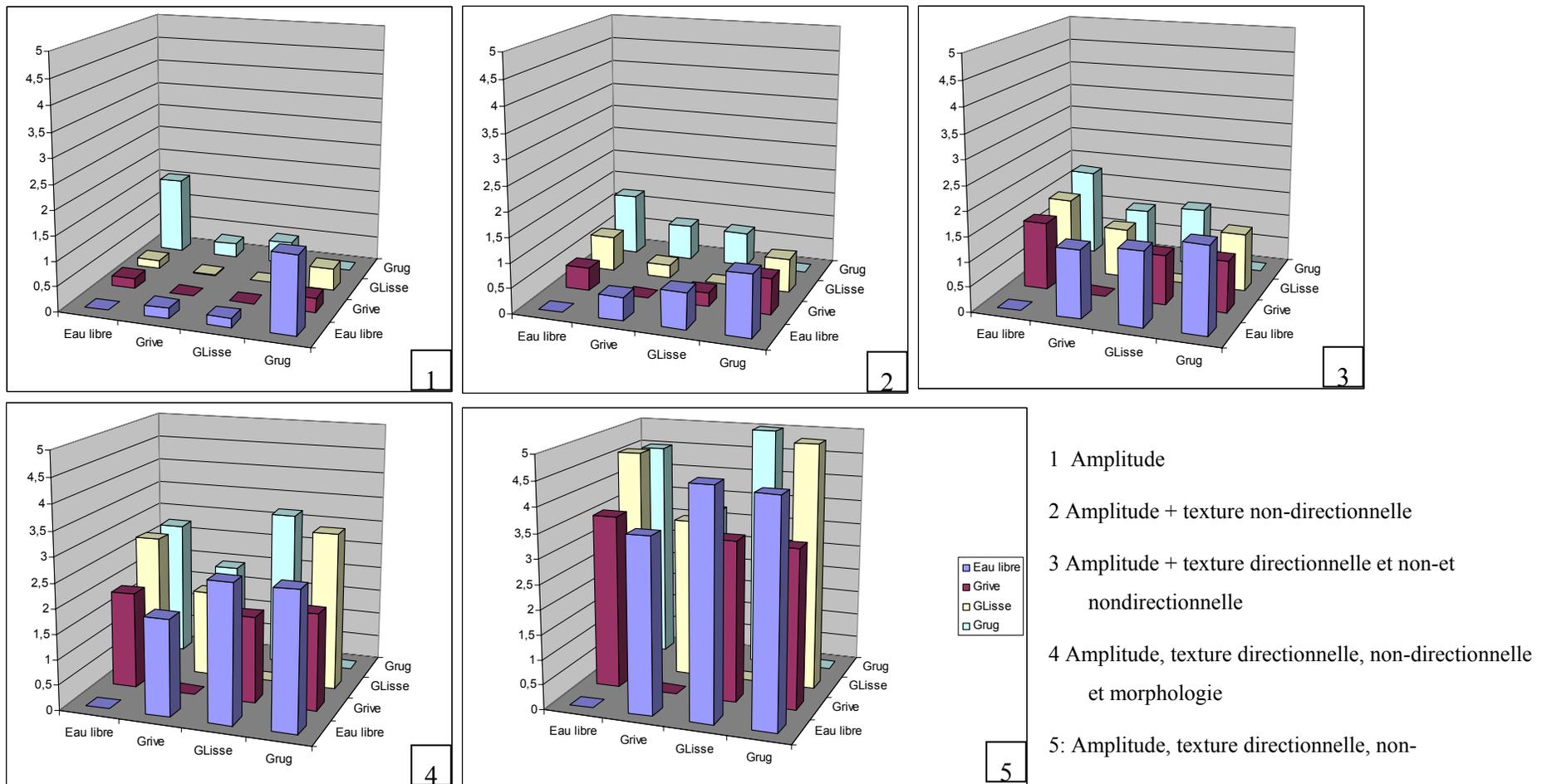


Figure 5 : Résultat de l'analyse quantitative pour l'image du 30 janvier 2002.

## **Intégration des données météorologiques**

Pour la rivière Saint-François, les données météorologiques en archive correspondant aux années d'acquisition des images (2001-2002-2003) ont été 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**

La hiérarchie ou la structure de la classification orienté objet est l'étape où nous synthétisons toutes les informations a priori réunies sur la glace de rivière. Les conclusions tirées des analyses qualitative et quantitative au côté des connaissances sur la théorie de glace de rivière sont regroupées sous forme de règles logiques de classification. L'objectif étant d'augmenter les caractéristiques détectables de la glace par rapport aux méthodes de classification conventionnelles, généralement, appliquées dans la littérature. En guise d'exemple de cette augmentation des caractéristiques détectable de la glace, le schéma de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente la partie de la structure hiérarchique développée et qui concerne la glace thermique. Pour les valeurs d'amplitude moyenne (0.1 à 0.16) des images RADARSAT-1, les méthodes de classification conventionnelle mènent à l'identification de la glace de rivière thermique. Cependant nous remarquons qu'en utilisant la classification orientée objet et en y intégrant les données morphologiques du SIG, nous avons réussi à faire ressortir, en plus, les informations suivantes (Figure 6) :

- Glace de rive thermique;
- Couvert complet de glace thermique;
- Feuille de glace thermique;
- Zone de rapides.

Ces informations sont très utiles pour d'autres études, comme par exemple, le calcul du débit sous glace, les vitesses d'écoulement, et le transport des sédiments.

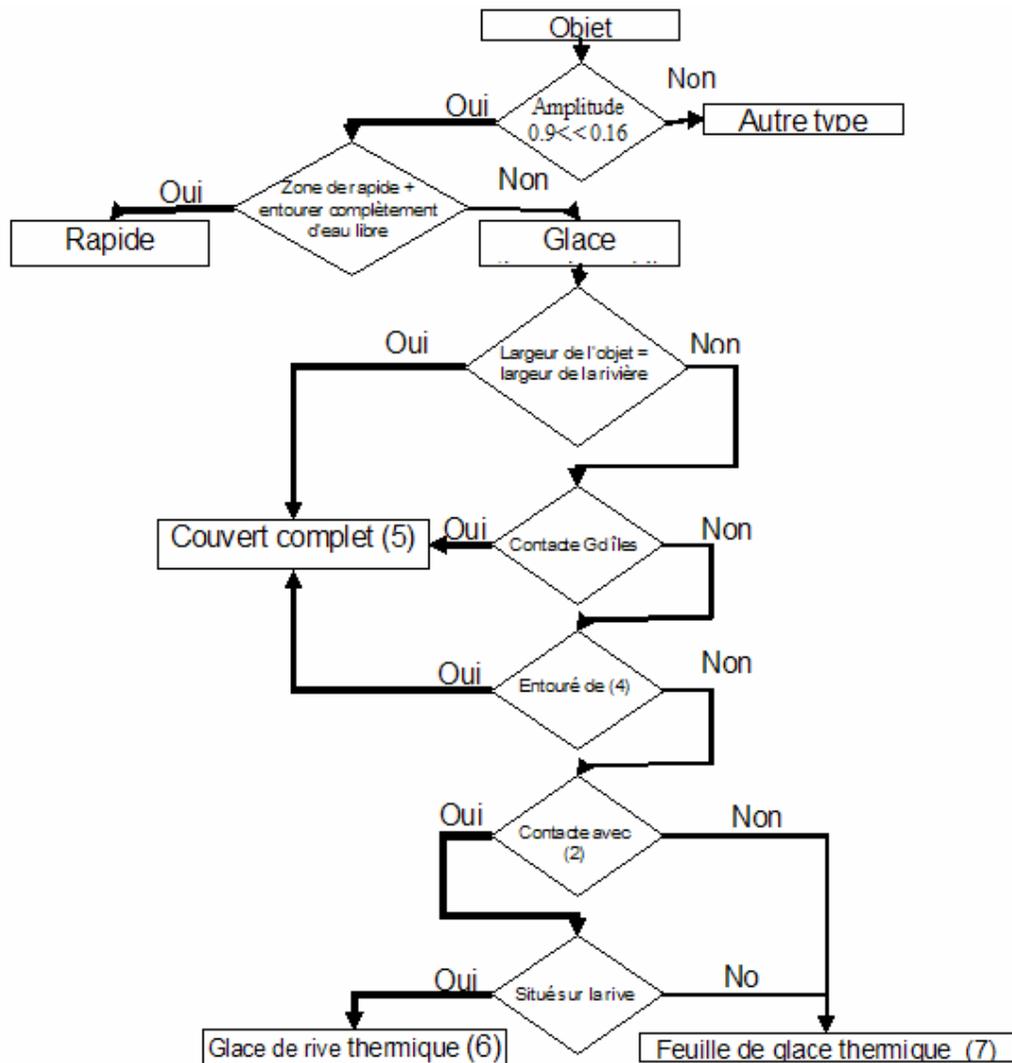


Figure 6: Structure de la classification orienté objet pour l'identification de la glace thermique.

Dans cette étude nous avons aussi parvenu à caractériser les zones à risque d'embâcle et même à évaluer sommairement ce risque (Figure 7). Cette information est impossible à atteindre avec les classifications conventionnelles. En fait, les zones à risque d'embâcle sont classées avec ces méthodes comme étant de la glace fortement agglomérée. Cette dernière information concerne la nature du couvert de glace, tandis que définir le risque d'embâcle est un niveau supérieur d'information qui concerne ce que le couvert de glace représente.

Nous avons démontré que la classification orientée objet est mieux appropriée pour la caractérisation de la glace de rivière. L'approche développée a permis (1) de bâtir une connaissance sur les processus de glace de rivière, (2) de ressortir des informations sur ce que le couvert de glace représente, en addition de celles relatives à sa nature et (3) de transférer cette expertise directement à la machine, et ainsi augmenter l'intelligence, la capacité et l'autonomie du système.

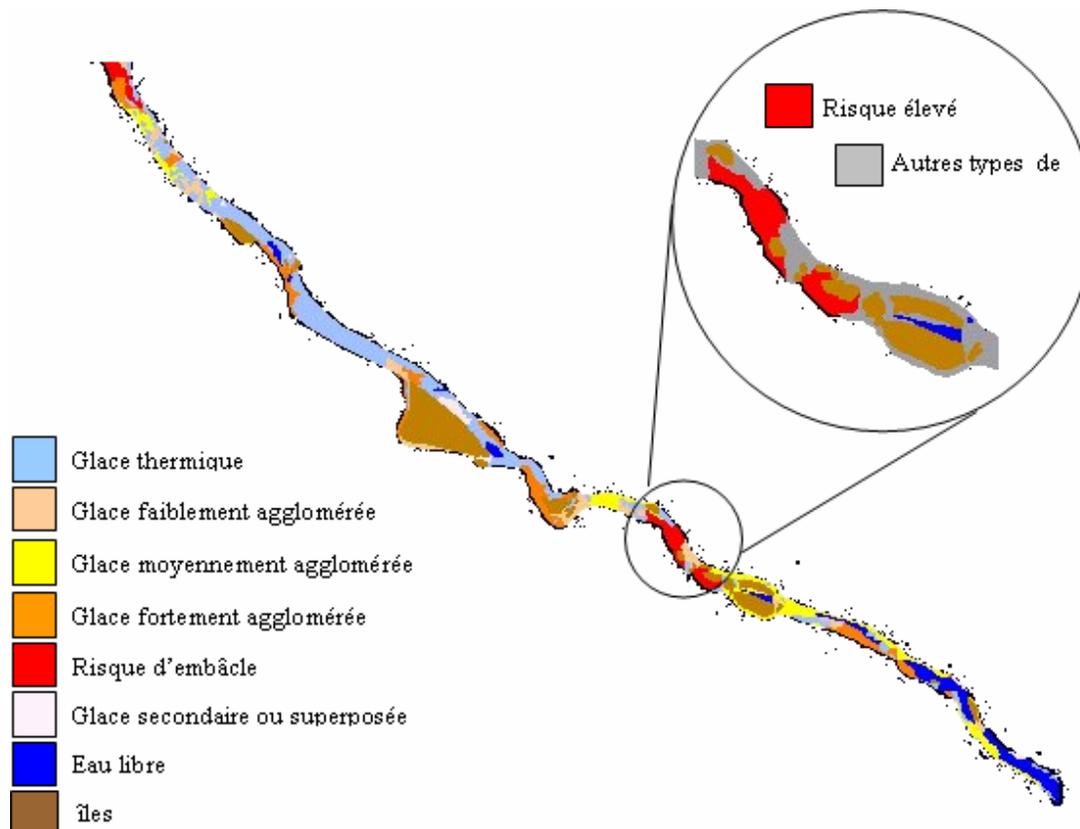


Figure 7: Exemple de classification d'une zone à risque d'embâcle le 11 février 2003.

## **Principales contributions de la recherche**

En somme, ce travail de recherche a un caractère multidisciplinaire. Il a été réalisé dans une perspective scientifique mais aussi de gestion de la ressource. Nous jugeons que notre contribution à la recherche est considérable aux niveaux de deux principaux volets. En effet, sur le plan scientifique, nous avons développé une nouvelle procédure pour caractériser la glace de rivière à plusieurs niveaux d'information y compris l'évaluation du degré de risque lié à la présence des embâcles. Nous avons aussi développé une méthodologie de construction de la structure hiérarchique de la classification Orientée Objet et un processus de segmentation en objets des images RADARSAT-1 (mode fin) spécifique à la glace de rivière. Sur le plan gestion de la ressource, nous avons développé une technique qui permet l'automatisation des processus de segmentation et de classification ce qui facilite son utilisation dans un contexte opérationnel. Nous avons optimisé le temps de traitement en cas d'urgence (embâcle et/ou inondation) dès l'acquisition d'une image RADARSAT-1 (ou RADARSAT-2) jusqu'à la fin de la classification. Nous jugeons que la technique développée constitue un outil d'aide considérable aux différentes entités décisionnelles intéressées par le suivi et la caractérisation de la glace de rivière. Ces différentes contributions scientifiques et opérationnelles nous ont menées à différentes conclusions:

- 1. Les images RADARSAT-1 mode fin constituent l'outil le plus approprié pour une meilleure caractérisation de la glace de rivière.**
- 2. Le développement d'un système d'information géographique, SIG, constitue un moyen nécessaire pour la caractérisation de la glace de rivière.** Le SIG a été développé selon deux volets : statique et dynamique. Le volet statique a permis le calcul des indices morphologiques et à déterminer les zones d'îles et de rapides. Le volet dynamique est relié aux observations terrain et aux données historiques. Ainsi, le système d'information géographique constitue un outil pour effectuer la mise à jour de sa partie dynamique en y ajoutant, des nouvelles observations terrain et aussi en archivant les résultats de la classification des images RADARSAT.
- 3. Les analyses qualitative et quantitative nous ont permis de développer une méthode d'extraction des connaissances sur la glace de rivière pour les synthétiser sous forme**

**d'une structure hiérarchique de la classification Orientée Objet.** L'analyse quantitative et l'analyse qualitative ont permis la validation de l'hypothèse de base de cette recherche, qui stipule "l'introduction des caractéristiques de la rivière dans le processus d'analyse des images RADARSAT-1 (mode fin) permet une meilleure valorisation des informations qu'elles contiennent". Elles ont aussi permis de valider la seconde, soit l'apport de l'analyse de texture et de l'analyse polarimétrique comme source d'information.

4. **La combinaison de deux méthodes de segmentation en objets des images RADARSAT a permis l'obtention d'objets de taille et de forme pouvant être utilisées dans la classification Orientée Objet.**
5. **La classification Orientée Objet a permis d'augmenter les caractéristiques détectables de la glace de rivière par rapport aux méthodes de classification conventionnelles.** Son épine dorsale sa structure hiérarchique.

En résumé, tous les objectifs de cette recherche ont été atteints et les deux hypothèses vérifiées. De ce fait, nous avons réussi à atteindre l'objectif ultime : « 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. ».

### **Dépôt et soutenance de thèse**

Le dépôt initial a été effectué le 5 avril 2006 et la soutenance est prévue pour le 24 mai 2006.

### **Communications**

Ali El Battay a effectué une présentation orale à la rencontre annuelle de CRYSYS à Toronto, le 22 février 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 FRAZIL<sup>1</sup>, 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
- Communication au 12<sup>ème</sup> 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.

---

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

- Validation du modèle à l'aide des coefficients de rétrodiffusion extraits des images RADARSAT/ENVISAT/Convair-580.

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 12<sup>ème</sup> 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**

Afin de calculer le coefficient de diffusion total issu de l'interaction du signal radar avec le couvert de glace la méthode du *Doubling Matrix* sera appliquée. Cette méthode permet de prendre en considération tous les phénomènes de diffusion multiples pouvant contribuer dans cette interaction. Son application nécessite le calcul des matrices de diffusion des interfaces (air/glace et glace/eau) et des différents diffuseurs présents dans le couvert glace.

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 Convoir-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 8). 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 identifier 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 columnaire.



**Figure 8 : Classification finale de l'image polarimétrique.**

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

### **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).

### **Mesures de terrain et de laboratoire**

À l'hiver 2006, Mme Gherboudj a participé à une série d'activités reliées à la mesure des caractéristiques du couvert de glace, dans l'objectif d'une meilleure compréhension du phénomène et de l'obtention de données d'entrée pour son modèle théorique.

- Relevés sur la rivière St-François (Québec) : Le 28 février 2006 et le 9 mars 2006, mesures de Géoradar sur le couvert de glace de la rivière St-François, en collaboration avec Hydro-Québec-IREQ et l'Université Laval (Tableau 2, Figure 9).

**Tableau 2 : Sommaire des mesures de Géoradar**

Date	Site #3		Site #Q2	
	28/02/06	09/03/06	28/02/06	09/03/06
Nombre de carottes de glace	3	x	4	6
Type de glace dominant	Thermique	x	Frasil	Frasil
Épaisseurs	30-40 cm	x	20-30 cm	20-30 cm
Profil Géoradar	200 Mhz	x	200 Mhz	400 Mhz 900 Mhz

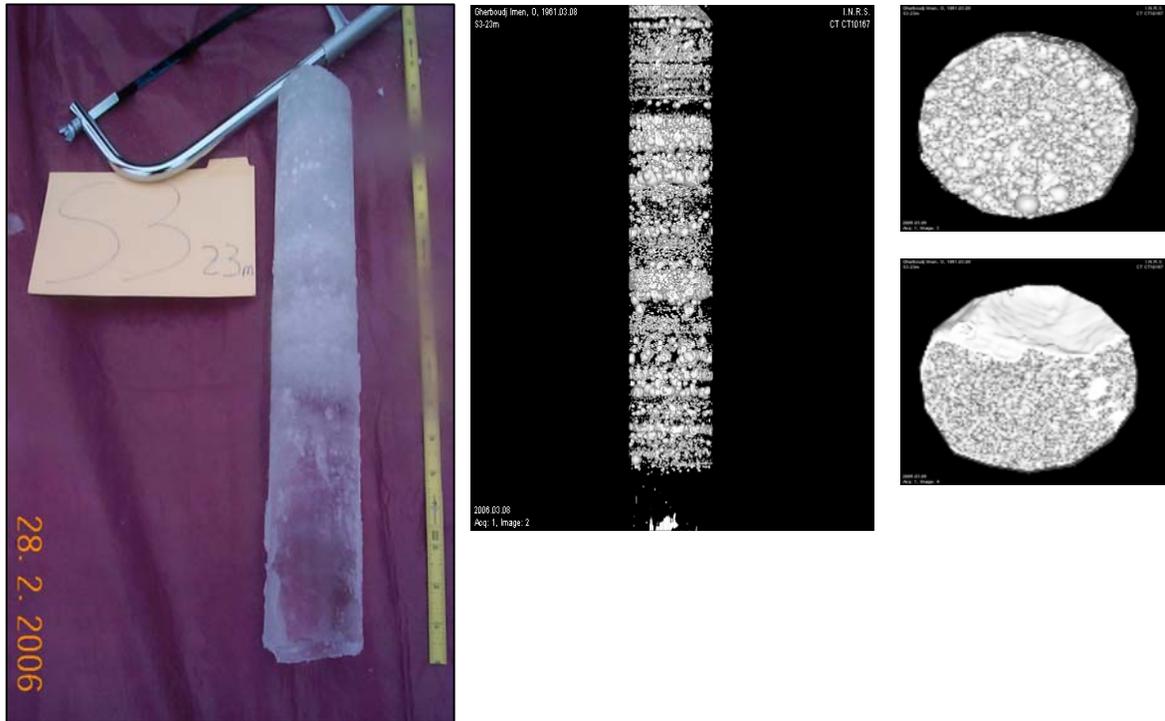


**Figure 9 : Campagne de mesures sur la St-François : profil de Géoradar et carotte de glace.**

Les données du géoradar seront traitées par Mme Gherboudj au printemps 2006. Les carottes de glace ont par la suite été passées au scanner rayon X de l'INRS-ETE pour en étudier la densité et la composition (

Figure 10). Ces données seront traitées par Mme Gherboudj à l'été 2006.

- Relevés sur la rivière Athabasca (Alberta). Le 23 mars 2006, extraction de carottes de glace de la rivière Athabasca. Du 27 au 31 mars, analyse des carottes en chambre froide par Mme Gherboudj (photos au microscope).



**Figure 10 : Carotte de glace de la rivière St-François et l'image reconstituée de la partie supérieure (glace blanche) (vue latérale, vue du haut, vue du bas).**

### **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. M. Khaldoune a réalisé le dépôt initial de sa thèse le 5 avril 2006 et soutiendra le 8 mai 2006.

### **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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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).

Les activités réalisées depuis avril 2005 sont donc les suivantes :

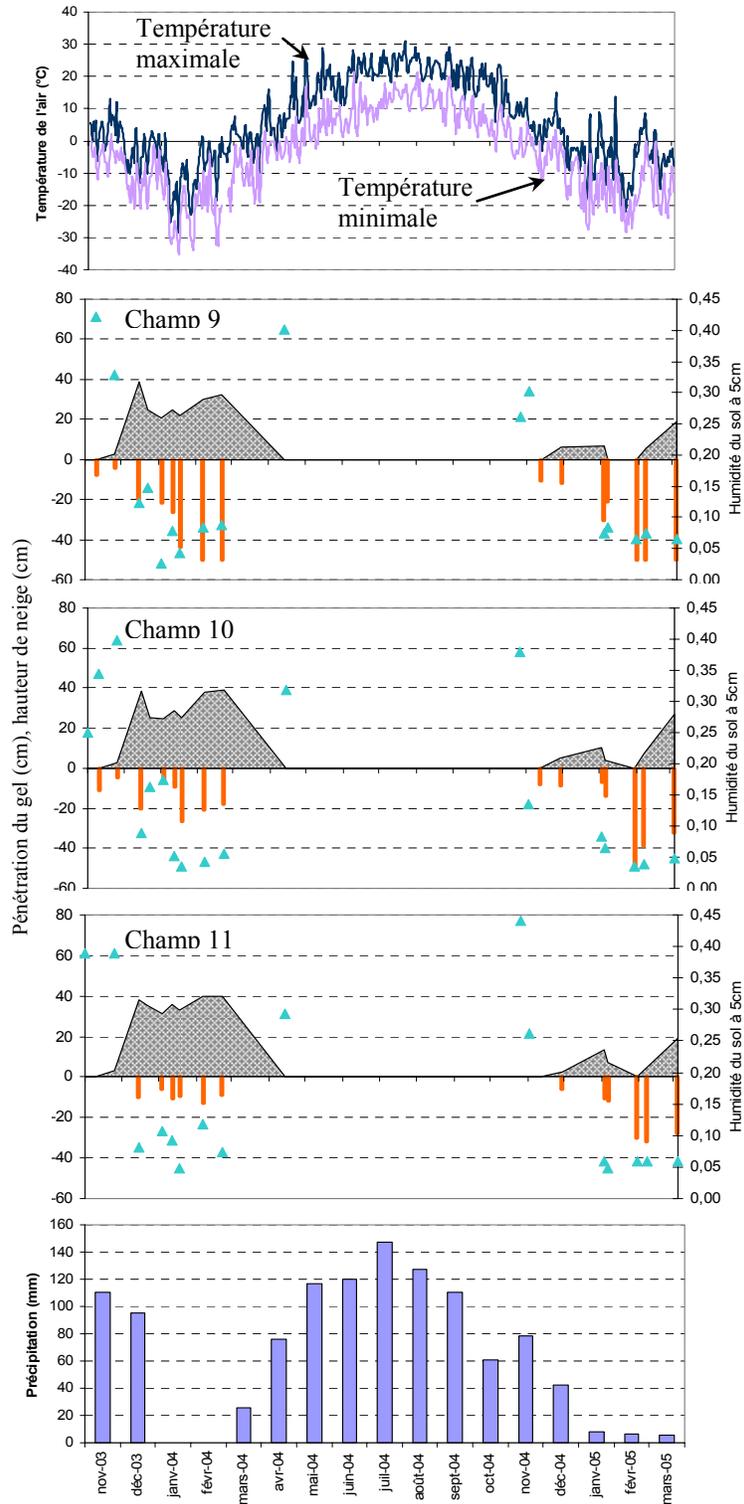
### **Traitement et analyses statistiques des données mesurées sur le terrain (2004-2005)**

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 11 présente quelques résultats obtenus.

Nous avons suivi la distribution spatiale et temporelle de la température et de l'humidité dans le sol pendant deux saisons hivernales, pour douze champs agricoles du bassin versant du Bras d'Henri. Dans cette section, nous tâcherons de montrer les effets du gel du sol sur les mécanismes de transfert d'énergie et de l'eau au niveau du sol de ce bassin versant. Ces effets sont dus à deux facteurs majeurs : premièrement, il s'agit des interactions entre la hauteur de la neige et le gel du sol et deuxièmement des caractéristiques pédologiques du sol (exemple des champs 9, 10 et 11,) (Figure 11).

Nous avons étudié l'effet de hauteur de la neige à 10, 20, et 30 jusqu'à 66 cm, comme maximum d'accumulation enregistrée *in situ*, sur la variation de la température de la surface de sol. Ainsi, lorsqu'il y a une couverture de neige de 40 cm par exemple, la température de la surface du sol est maintenue à environ 0°C, même avec une température atmosphérique de -10°C, par contre quand la température descend en dessous de -10°C, même si la couche de neige est importante (40 cm), la surface de sol peut geler. Le maintien de la température de surface du sol autour de 0°C peut se faire pendant une certaine période, selon la date de l'installation du gel et la profondeur atteinte avant l'accumulation de neige. Généralement, il est évident que la couverture de neige joue un rôle important, en maintenant la chaleur à la surface du sol, même lorsque la température extérieure baisse en dessous de -10°C.

Cependant, selon les caractéristiques pédologiques différentes, le contenu en eau peut varier d'un champ à l'autre, ce qui se reflète par des constantes diélectriques variables. Ainsi, l'interprétation du signal radar, de même que la sensibilité de l'image radar aux conditions du sol, exige la connaissance d'un très grand nombre de paramètres mesurés sur le terrain : température du sol à différentes profondeurs, constante diélectrique ainsi que rugosité de la surface du sol. La forme du profil hydrique détermine la profondeur de pénétration du signal qui peut ainsi varier de quelques millimètres dans le cas du sol humide à quelques centimètres dans le cas du sol gelé, qui, par ailleurs, se comporte comme un sol sec.



**Figure 11 : Variation de la profondeur du gel (barre orange), hauteur de la neige (en gris) et humidité du sol (triangles bleus) enregistrée à 5 cm pour les champs 9, 10 et 11 avec la moyenne des précipitations mensuelles, la moyenne des températures quotidiennes maximales et minimales enregistrée au niveau de la station météorologique de Scott, en fonction du temps.**

## Cartographie du gel du sol avec les données RSO de RADARSAT-1

Pour suivre le comportement du signal radar rétrodiffusé en fonction de l'humidité du sol et de la profondeur du gel, nous avons calculé la moyenne des coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) enregistrés à chaque date d'acquisition pour chaque champ agricole. À la Figure 12 nous avons présenté un exemple des résultats obtenus.

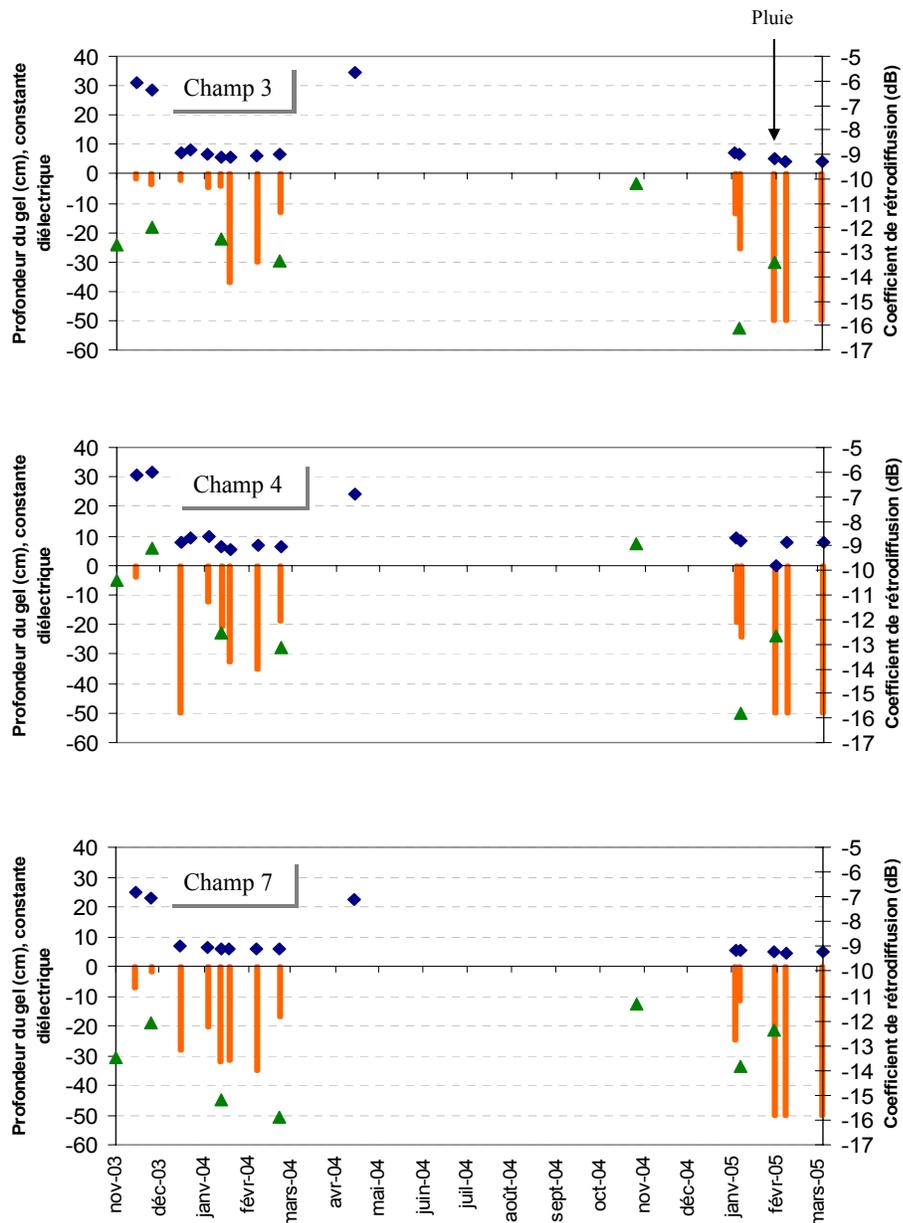
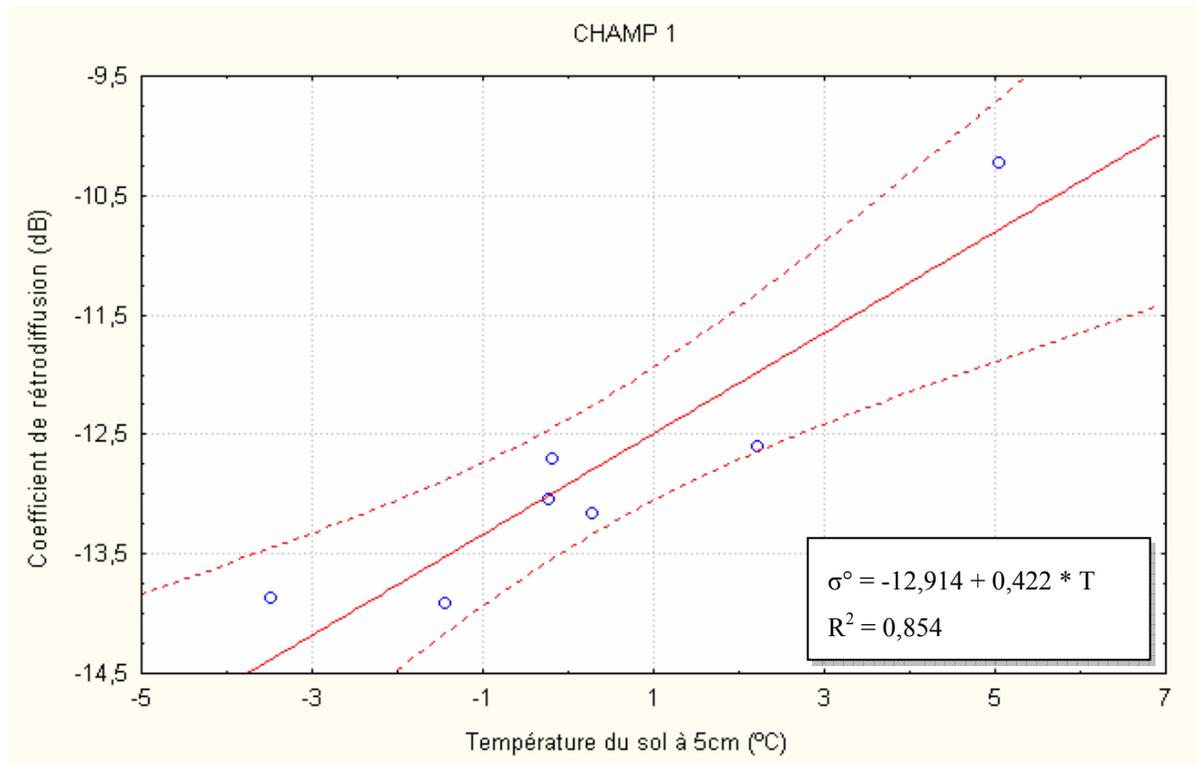


Figure 12 : Relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar (triangles verts), la constante diélectrique du sol (losanges bleus) à 5 cm de la surface et la profondeur du gel (barre orange) pour les champs 3, 4 et 7.

Nous avons suivi la variation du signal de rétrodiffusion en fonction de la profondeur du gel du sol, ainsi que l'impact de la hauteur du couvert nival sur la profondeur du gel du sol. Les résultats obtenus ont montré une nette sensibilité du coefficient de rétrodiffusion au changement de la température du sol. Nous avons trouvé que lorsque le sol gèle, le coefficient de rétrodiffusion diminue, cette baisse étant de l'ordre de 3 à 5 dB, selon le matériel original et la rugosité de la surface du sol. La rugosité des surfaces a été analysée du point de vue qualitatif, les champs à rugosité forte (labourés) présentaient des coefficients plus élevés que ceux des champs à faible rugosité (en foin).

### **Traitement et analyses statistiques des images RSO acquises (2003-2004, 2004-2005)**

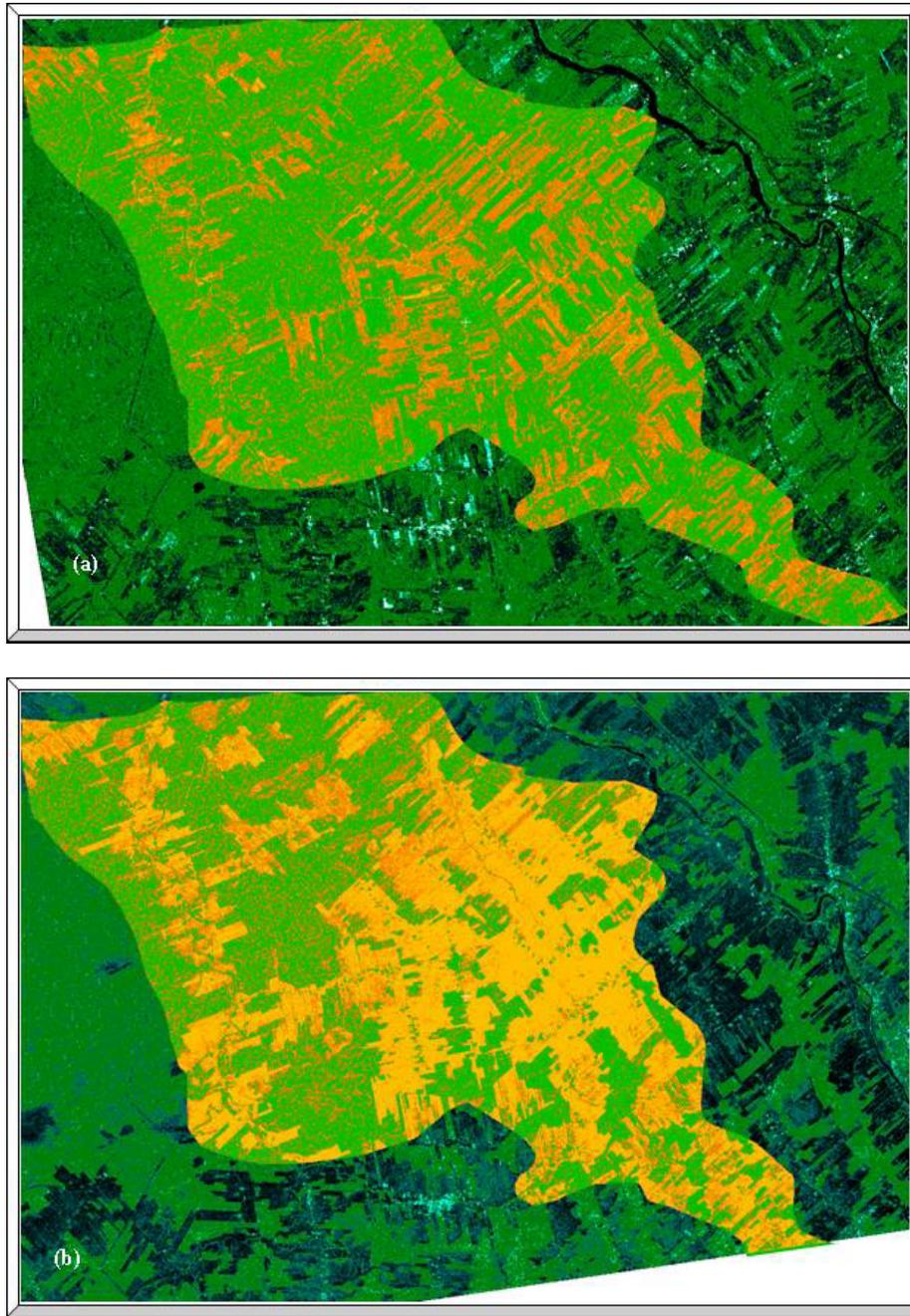
Nous avons effectué des analyses de corrélation afin de trouver les relations qui existent entre les différentes variables du modèle (température du sol et les coefficients de rétrodiffusion). Mais, avant de procéder à l'interprétation des résultats obtenus lors des diverses analyses de sensibilité, il est nécessaire dans un premier temps, de vérifier certaines hypothèses pour la réalisation d'une régression linéaire. Nous avons effectué un test sur les résidus pour examiner qu'ils sont normalement distribués et que leurs moyennes sont nulles. Ainsi, nous avons observé des corrélations positives et significatives entre la température du sol et la rétrodiffusion radar pour presque tous les champs. L'amplitude des corrélations varie de faible ( $r = 0,45$ ) à forte ( $r = 0,97$ ). De plus, les corrélations obtenues vont dans le sens du modèle proposé. Plus précisément, en ce qui concerne les corrélations entre la variable de température de sol mesurée à 5 cm du sol et les coefficients de rétrodiffusion, nous observons que plus la température est élevée, plus la rétrodiffusion l'est aussi (exemple du champ 1, Figure 13).



**Figure 13: Droite de régression linéaire entre la rétrodiffusion et la température du sol pour le champ numéro 1.**

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.

Nous avons établi une méthode basée sur des analyses statistiques et nous avons calculé un seuil du signal radar fixé à une température de la surface du sol de 0°C (température à partir de laquelle on considère un sol gelé). Pour la cartographie du gel du sol, nous avons utilisé une carte pédologique du bassin étudié, en nous basant sur les informations pédologiques et sur les analyses statistiques. En prenant en considération l'occupation du sol, un algorithme a été généré et utilisé pour produire des cartes du gel du sol au niveau du bassin versant du Bras d'Henri pour chaque date d'acquisition. Ainsi, nous avons pu répondre au troisième objectif : développement d'un algorithme de cartographie du gel du sol à partir des images RSO. La Figure 14 présente le résultat de la cartographie du gel du sol pour deux dates d'acquisition 2 novembre 2004 et 13 janvier 2005.



**Figure 14 : Cartes du gel de sol du bassin versant du Bras d'Henri élaborées à partir d'image RADARSAT-1 du 2 novembre 2004 (a) et 13 janvier 2005 (b).**

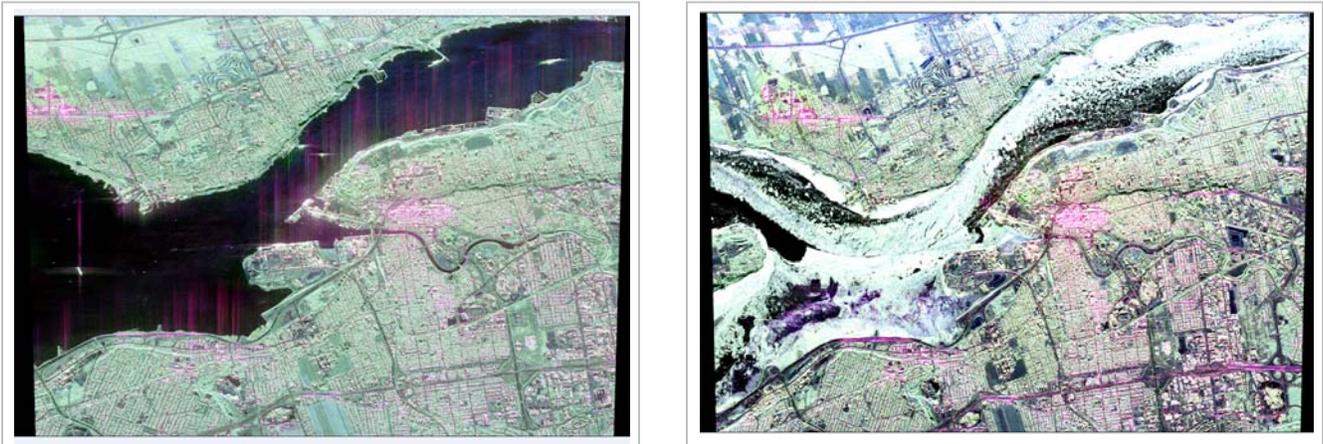
Les résultats de la cartographie du gel de sol dans le bassin versant du Bras d'Henri démontrent clairement le potentiel des images RADARSAT-1 (polarisation HH) pour le suivi de la température du sol.

Des différences temporelles ont été observées d'une image à l'autre. Sur les images acquises au début de la première saison (8 novembre 2003), une grande partie du bassin était pratiquement gelée (couleurs jaune et brune). Le sol est resté gelé durant toute la saison hivernale 2003-2004. Le 2 novembre 2004 (deuxième saison), les conditions étaient différentes, une grande partie du territoire du bassin versant n'étant pas encore gelée (couleur verte). Nous avons remarqué que le gel était présent surtout au niveau des champs à rugosité élevée (couleur brune). Le 13 janvier 2005, tous les champs agricoles étaient gelés. Les zones qui sont restées dégelées pendant l'hiver étaient des aires boisées.

### **Potentiel de la polarimétrie radar pour le suivi du gel de sol**

La base de données des images acquises en 2002-2003 est constituée de deux survols RSO polarimétriques du Convair-580 (résolution spatiale de 6 m), dont une image acquise le 14 novembre 2003 correspondant à des conditions sans gel du sol et une autre acquise le 19 février 2003 correspondant à des conditions avec gel (Figure 15).

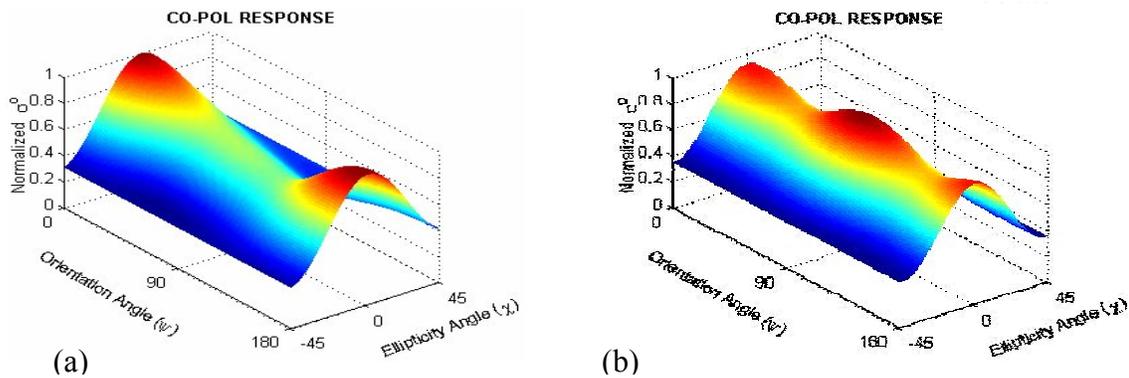
Pour le traitement des données de la polarimétrie radar (Entropie, anisotropie,  $\alpha$ , décomposition de Cloude et Pottier, signature polarimétrique), nous nous sommes servis de deux logiciels, PolSARpro (Agence Spatiale Européenne, Université de Rennes I) et PWS (Centre Canadien de Télédétection). La Figure 15 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 15 : 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  $S_{HH} + S_{VV}$ ,  $S_{HH} - S_{VV}$ ,  $2S_{HV}$ .**

La signature de copolarisation pour l'image du 19 février 2003 (image avec gel de sol) de la parcelle A (Figure 16) 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.

En étudiant les différents paramètres polarimétriques, l'information qu'elles contiennent quant au suivi du gel du sol est ressortie. En effet, il apparaît clairement que la température du sol a affecté le signal rétrodiffusé. Les paramètres radar en bande C sont sensibles aux diffusions de volume et de surface. L'analyse des paramètres de la décomposition de Cloude et Pottier a fourni des résultats intéressants. Hormis la valeur de l'anisotropie (importance relative des phénomènes de moindre probabilité) qui a augmenté pour l'image d'hiver, la relation entre le signal radar et le gel du sol se manifeste par une baisse de l'entropie (caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion) et de l'angle  $\alpha$  (nature du mécanisme de rétrodiffusion). En effet, quand le sol est gelé, le signal est faiblement dépolarisé et le mécanisme de diffusion qui domine est celui de surface. Cependant, il faut aussi noter que lorsque le sol est gelé sur plusieurs centimètres (au moins 15 cm), la température enregistrée au niveau de la surface ne semble pas affecter la réponse polarimétrique.

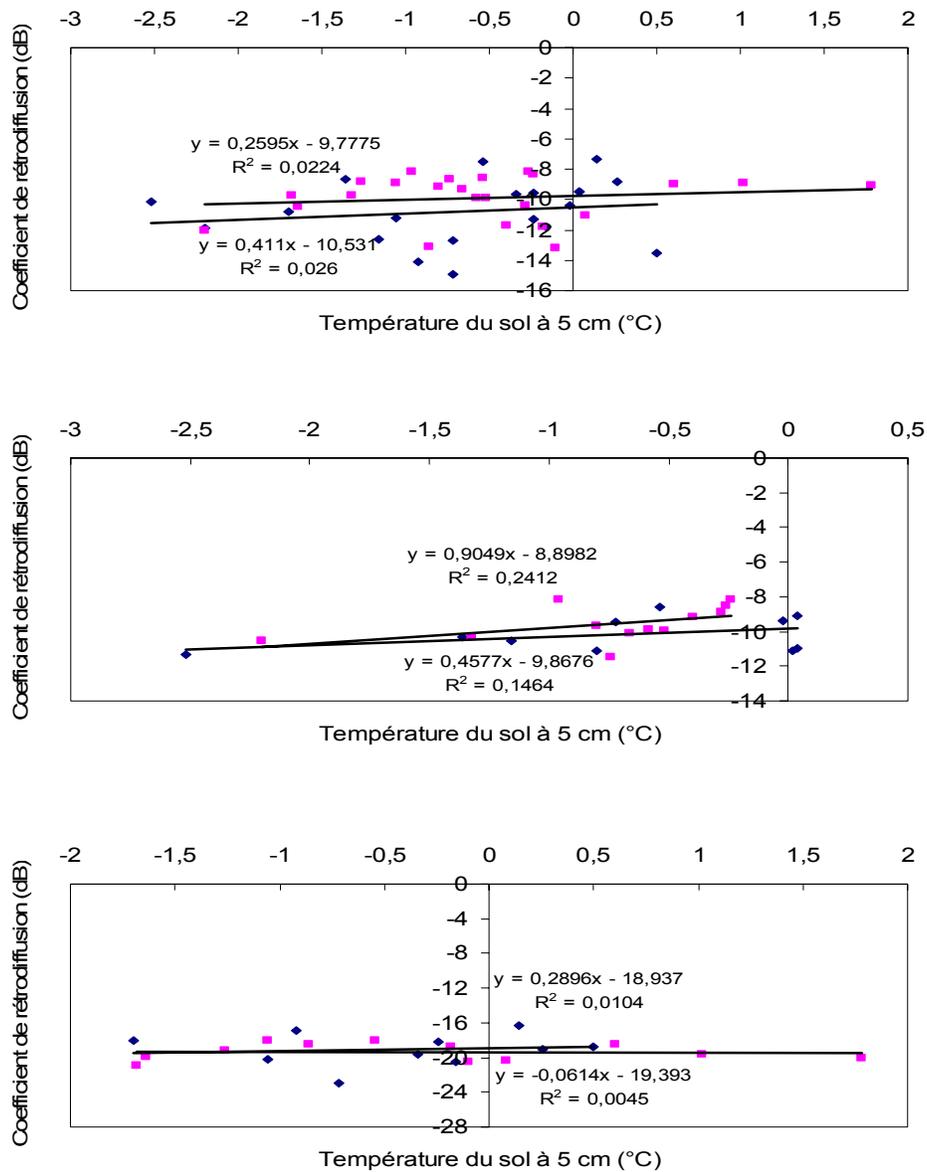


**Figure 16 : Signatures polarimétriques de la parcelle A pour l'image du a) 14 novembre 2002 et b) 19 février 2003.**

L'analyse des réponses polarimétriques a montré que les mécanismes de diffusion associés au gel du sol étaient différents. Avec la signature de copolarisation, il a été observé que pour les sols gelés, la forme du diagramme était différente de celles des parcelles non gelées, ce qui peut être très intéressant pour suivre la distribution spatiale du gel du sol dans les zones agricoles. Nous avons proposé des outils polarimétriques de suivi du gel du sol. Néanmoins, les résultats demeurent limités, à cause de l'insuffisance des données au sol pour les parcelles couvertes par les images polarimétriques.

### **Cartographie du gel du sol avec les données ASAR d'ENVISAT**

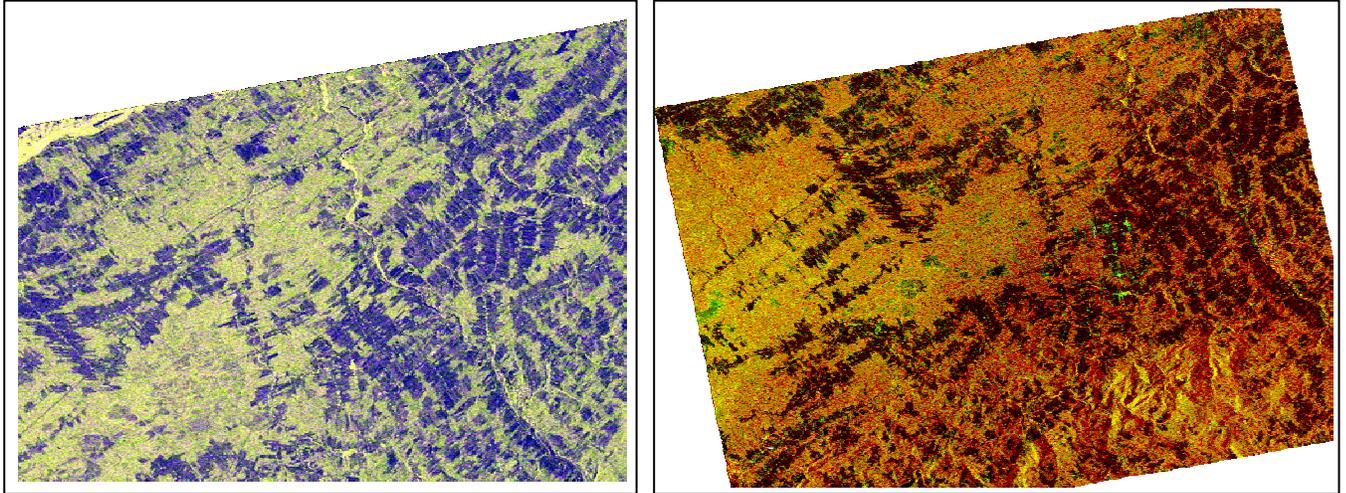
Dans le but d'analyser la réponse du signal ASAR à la température du sol, les coefficients de rétrodiffusion ont été calculés pour tous les champs agricoles étudiés. Nous avons classé les champs en deux groupes, selon l'occupation du sol : les labours et les champs en foin. La Figure 17 représente la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la température du sol mesurée à 5 cm de profondeur pour les deux groupes. Les coefficients de rétrodiffusion dans les polarisations HH et VV diminuent avec la température du sol. En effet, une différence de 3dB a été enregistrée entre la période du gel et la période de non gel dans la polarisation HH, 2dB en polarisation VV et autour de 1dB dans la polarisation VH. La sensibilité du signal à la température du gel du sol est donc plus grande en polarisation HH qu'en polarisation VV. En polarisation VH, le signal radar rétrodiffusé est presque stable quelque soit la température du sol. On note une faible baisse du signal de 1dB quand le sol gèle.



**Figure 17: Relations entre le coefficient de rétrodiffusion dans les polarisations HH, VV et VH et la température du sol mesurée à 5cm de profondeur pour deux groupes d'utilisation du sol (les carrés rose représentent les labours, les losanges bleu les champs de foin).**

D'autre part, la Figure 18 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. 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 18 : 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 18b).

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.

L'analyse des données ASAR du satellite ENVISAT a montré aussi la sensibilité du signal à la température du sol mesurée à 5cm de profondeur. Pour les polarisations HH et VV, le coefficient de rétrodiffusion baisse entre 1 et 3dB lorsque le sol gèle. Avec la polarisation VH, le coefficient de rétrodiffusion est resté insensible à la température du sol. En utilisant des données ASAR d'ENVISAT, notre objectif était d'analyser le comportement du signal radar par rapport aux variations de la température de la surface du sol, et de voir l'utilité de la multipolarisation pour s'affranchir de la rugosité de la surface des parcelles. Les résultats obtenus mettent en évidence la sensibilité des polarisations HH et VV pour la température du sol. L'effet de la rugosité des parcelles (labourées vs en foin) est moins prononcé sur les images ASAR à cause de leur faibles angles d'incidence (mode S2 et S3). Contrairement aux images RADARSAT-1, les faibles angles d'incidence de ces images ASAR permettent donc de s'affranchir de l'occupation du sol des parcelles. Par contre, la faible résolution du capteur ASAR (30 m) et sa faible sensibilité aux variations de température du sol ne nous permettrait pas une cartographie du gel du sol à l'échelle parcellaire aussi précise que celle obtenue avec les images RADARSAT-1 en mode fin.

### **Communications**

Le résultat de l'analyse des données polarimétriques a fait l'objet d'une présentation orale au 12<sup>ème</sup> congrès de l'Association Québécoise de Télédétection et la publication d'un article dans les comptes-rendus de cette conférence. Une communication a aussi 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<sup>ème</sup> conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE à Québec en mai 2005.

La soumission d'un article au Journal Canadien de Télédétection (volet polarimétrique) a été reportée au mois d'avril 2006 après le dépôt de la thèse. De plus, deux autres articles sont aussi en préparation, l'un sur l'analyse des images RADARSAT et ENVISAT (International Journal of Remote Sensing), l'autre sur l'analyse des paramètres affectant le gel du sol du gel.

Une communication a été présentée à la rencontre annuelle de CRYSYS à Toronto, le 22 février 2006.



## 4 Publications CRYSYS 2005-2006

---

### a) Conférences avec arbitrage (COF)

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

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

### b) Communications orales

KHALDOUNE, J. BERNIER, M. VAN BOCHOVE, E. et M. NOLIN (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 S. MERMOZ (2005). **Investigating Polarimetric SAR Data for River Ice Monitoring,** Advanced SAR 2005, 15 to 17 November 2005, CSA, Montréal.

EL BATTAY, A., BERNIER, M. and T. OUARDA (2006). **Integration of Radarsat-1 Data and GIS for Object-Oriented Classification of River Ice: The Saint-François River Case Study.** CRYSYS Final Annual Science Meeting, February 22-24, 2006, Toronto.

KHALDOUNE, J., BERNIER, M. VAN BOCHOVE, E. et M. NOLIN (2006). **Development of an algorithm for mapping and monitoring frozen ground in an agricultural watershed using radarsat-1, envisat and polarimetric SAR data.** CRYSYS Final Annual Science Meeting, February 22-24, 2006, Toronto.

**c) Affiche**

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

**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.

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., KHALDOUNE, J., EL BATTAY, A., GHERBOURJ, I., OUARDA, T. et E. Van BOCHOVE (2006). 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-f, mars, 37 pages.

**e) 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.

KHALDOUNE, J. (2006). Développement d'une méthode de mesure et de cartographie du gel du sol 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). Thèse de Doctorat qui sera défendue le 8 mai 2006 à l'Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE, 264 p.

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 qui sera défendue le 24 mai 2006 à l'Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE, 280 p.