

***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-e6

Avril 2005

Rapport de recherche 2004-2005

CRYSYS

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

par

Monique Bernier, Yves Gauthier, Imen Gherboudj, Jalal Khaldoune,

Ali El Battay, Taha Ouarda et Eric Van Bochove

Rapport de recherche No R-617-e6

Avril 2005

TABLE DES MATIÈRES

1	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE LA RECHERCHE POUR 2004-2005	1
2	CONTRIBUTION AU PROGRAMME CRYSYS.....	2
3	BILAN DES ACTIVITÉS RÉALISÉES EN 2004-2005.....	3
3.2	ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #1 (GLACE-APPROCHE CONTEXTUELLE).....	3
3.3	ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DU VOLET #2 (GLACE – MODÉLISATION RADAR)	6
3.4	ACTIVITÉS TENUES DANS LE CADRE DE L’OBJECTIF #3 (GEL DU SOL)	14
3.5	RÉFÉRENCES	23
4	FORMATION DE CHERCHEURS	25
5	PUBLICATIONS RÉCENTES DÉCOULANT DES ACTIVITÉS FINANCÉES PAR CRYSYS	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Caractérisation de la rivière St-François	4
Figure 2 : Tests préliminaires de classification non-supervisée et de segmentation objet.	4
Figure 3 : Classification non-supervisée de la glace sur une section de la rivière Peace (Alberta). Approche combinée, image RADARSAT-1 du 20 février 2005	5
Figure 4 : Comparaison entre le signal radar réel et le signal standardisé sur la glace de rivière : (a) couple du 24 et 30 janvier 2002, (b) couple du 25 février et 4 mars 2003.	8
Figure 5 : a) Image ENVISAT (APP) polarisation VV du 10/01/04 de la région d'étude. b) Résultats de la classification non supervisée appliquée sur l'image APP du 10/01/04. La forêt (masque bleu), sol agricole (masque rouge).	16
Figure 6 : Moyenne des coefficients de rétrodiffusion pour trois champs différents en fonction de: a) température dans les 5cm du sol b) constante diélectrique mesurées à 7cm de la surface.	17
Figure 7 : Image APP du 10/01/04 a) polarisation HH, b) rapport de polarisation HH/VV. La forêt est masquée (masque blanc).	17
Figure 8 : Constante diélectrique mesurée avec le modèle de Dobson en fonction de l'humidité du sol pour 4 champs selon leur texture.	18
Figure 9 : Localisation des sites expérimentaux dans ArcGIS	19
Figure 10 : Profil de température mesuré à 5 cm de la surface du sol, exemple des champs : 3 et 4	20

Figure 11 : Carte du gel de sols de différentes textures dans le sous-bassin du Bras d'Henri à trois dates: a) 08 novembre 2003, b) 19 janvier 2004, c) 29 février 2004.	22
---	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques de l'acquisition des images ENVISAT	15
Tableau 2 : Caractéristiques de l'acquisition des images RADARSAT-1	20
Tableau 3 : Caractéristiques de l'acquisition des images ENVISAT	21

1 Objectifs scientifiques de la recherche pour 2004-2005

Volet #1

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

Volet #2

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

Volet #3

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 :

1. Développer le potentiel des capteurs satellitaires pour suivre et comprendre les variables de la cryosphère dans le temps et l'espace.
2. 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.
3. 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.

Ce projet contribue au premier objectif, soit le développement et le raffinement d'algorithmes pour le suivi temporel des propriétés de la glace de rivière (volets 1 et 2) et celui du gel du sol en région agricole (volet 3) à partir des données micro-ondes actives.

Ce projet contribue aussi au troisième objectif. Il permet d'assembler des données sur la cryosphère (profil de la température dans le sol, gel du sol, épaisseur et densité de la neige, types de glace, ...) qui seront archivées pour le développement ultérieur et la validation de modèles climatiques et pour le suivi du climat.

3 Bilan des activités réalisées en 2004-2005

Les activités des trois volets ont progressé normalement en 2004-2005. Les activités réalisées lors de la dernière année sont résumées ici.

3.2 Activités tenues dans le cadre du volet #1 (Glace-Approche contextuelle)

Ce volet est principalement réalisé par Ali El Battay dans le cadre de sa thèse de Doctorat en Science de l'eau sous la direction des professeurs Bernier et Ouarda de l'INRS-ETE.

Objectifs spécifiques pour 2004-2005 :

1. Intégrer les données historiques disponibles sur la rivière Saint-François et les données de terrain et d'observation au SIG. Ainsi, une base complète sur le contexte morphologique, historique et temporel sera disponible pour le traitement de chaque image RADARSAT que nous avons;
2. Effectuer une étude sur les paramètres de texture les plus significatifs pour la discrimination des types de glace de rivière;
3. Réaliser une classification non supervisée qui servira de référence lors de l'évaluation des résultats obtenus avec la classification orientée objet;
4. Procéder à la classification Orientée Objet (O-O) et évaluer ses résultats (e.g. déterminer parmi les couches du SIG et de textures celles qui sont essentielles pour la classification O-O);
5. Présenter une communication aux Xes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), Ottawa, 24-29 mai 2004;

- **Caractérisation de la rivière - SIG**

Pour la caractérisation du contexte de la rivière, les couches de largeur, de sinuosité et de profondeur ont été complétées (Figure 1). Elles ont été créées à partir de données vectorielles et de données terrain et à l'aide d'un script développé en Visual Basic. Ces couches seront utilisées dans la classification orientée objet (O-O).

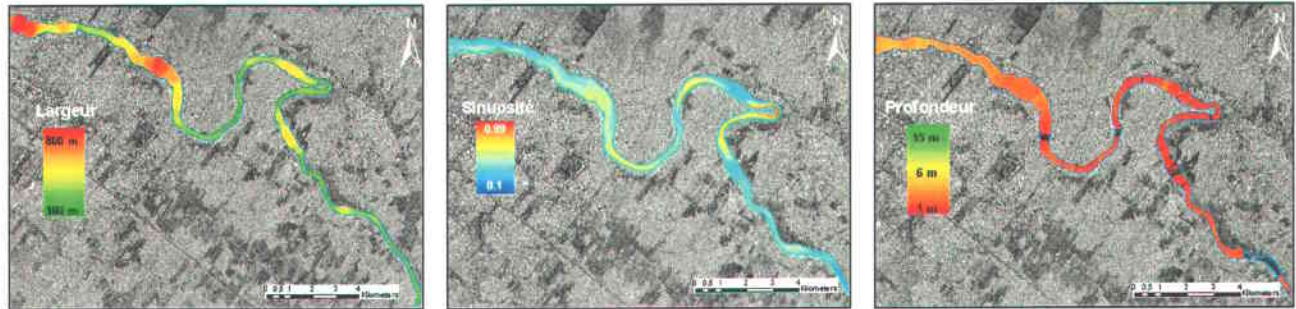


Figure 1 : Caractérisation de la rivière St-François

- **Paramètres de texture**

Les images brutes ont été transformées en images de texture (12 paramètres). Ces images seront également intégrées à la classification orientée objet pour déterminer leur apport.

- **Classification contextuelle**

Des tests de segmentation pour la création d'objets image ont été entrepris (Figure 2). Actuellement, nous travaillons à identifier les couches d'information contextuelle qui permettent la meilleure segmentation et la meilleure classification de la glace de rivière.

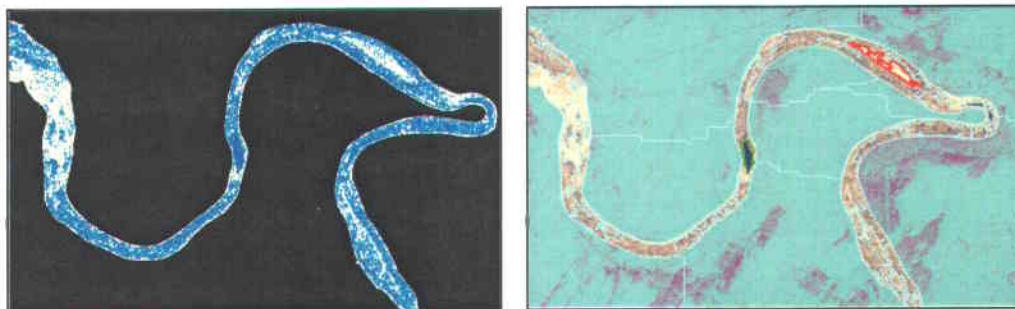
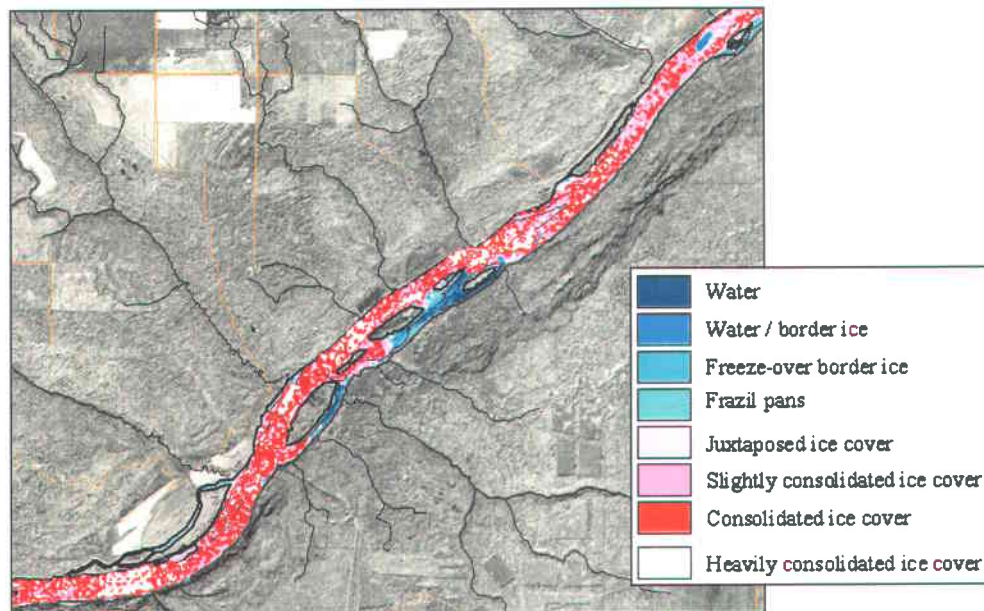


Figure 2 : Tests préliminaires de classification non-supervisée et de segmentation objet.

- **Classification conventionnelle**

À partir d'images RADARSAT-1 de la rivière Peace (Alberta), une méthodologie a été développée pour réaliser une classification non supervisée qui servira de référence lors de l'évaluation des résultats obtenus avec la classification orientée objet. Cette méthode utilise d'abord une image de texture moyenne, sur laquelle une classification Fuzzy K-Mean est appliquée. Cette première étape permet une meilleure discrimination à l'intérieur des secteurs de faible rétrodiffusion tels que l'eau libre, la glace lisse (glace thermique, glace de rive) et les radeaux de glace. Dans un deuxième temps, la classe de plus haute rétrodiffusion est isolée pour créer un masque. Sous ce masque, on reprend la classification Fuzzy K-Means à partir de l'image de rétrodiffusion, que l'on a préalablement filtrée (filtre de Kuan et filtre médian). On obtient ainsi une meilleure discrimination à l'intérieur des secteurs de forte rétrodiffusion (glace consolidée) (Figure 3).



**Figure 3 : Classification non-supervisée de la glace sur une section de la rivière Peace (Alberta).
Approche combinée, image RADARSAT-1 du 20 février 2005**

→ Communications

Trois communications ont été présentées:

EL BATTAY, A., GAUTHIER, Y. PHILIPPIN, M. et BERNIER M. (2004). *Caractérisation de la glace d'une rivière moyenne à l'aide d'un système d'information géographique et des images du satellite RADARSAT*, Xes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection, Ottawa, 24-29 mai.

GAUTHIER Y., SAVARY, S., WEBER, F., JASEK, M., PAQUET, L.-M., et BERNIER M. (2005). *Innovative approach to characterize river ice from SAR data*. Comptes-rendus du 4th EARSEL LISSIG Workshop: Remote Sensing of Snow and Glacier as Water Ressources of the Future, Berne, Suisse, 21-23 Février.

BERNIER M. (2005). *Monitoring of River ice and Soil Freezing Using Remote Sensing and Modeling*. Réunion annuelle de CRYSYS, Kananaskis (Canada), 4-5 Mars.

3.3 Activités tenues dans le cadre du volet #2 (Glace – Modélisation radar)

Ce volet est réalisé par Imen Gherboudj dans le cadre de sa thèse de Doctorat en Sciences de l'eau sous la direction du professeur Monique Bernier et la co-direction, depuis janvier 2005, de Robert Leconte.

Objectifs spécifiques pour 2004-2005 :

1. Standardisation du coefficient de rétrodiffusion des images Radarsat et ASAR acquises avec différents angles d'incidences et différentes directions de vue dans le but de connaître les paramètres qui affectent le signal en bande C.
2. Étude bibliographique des différents modèles électromagnétiques afin d'adapter un de ces modèles pour mieux comprendre l'interaction du signal radar avec la glace de rivière.

3. Étude théorique des données multi polarisées et polarimétriques.
4. Préparation de l'examen doctoral.

- **Standardisation du coefficient de rétrodiffusion des images radar**

Pour développer n'importe quelle méthode automatique capable d'identifier et de cartographier l'évolution de la glace, il est important de déterminer s'il y a une signature spécifique pour chaque type de glace (quantitative). Cependant, le signal radar de glace de rivière est affecté par plusieurs paramètres du capteur (fréquence, polarisation et angle d'incidence) et du couvert de glace (constante diélectrique, épaisseur de glace, etc.). L'angle d'incidence est considéré comme le paramètre 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 temporelle difficile, surtout qu'on ignore l'effet de l'angle d'incidence sur le signal radar de la glace.

Les images RADARSAT les plus adoptées pour l'étude de la glace de rivière sont acquises en mode fin. Ainsi et dans le but d'avoir plus de souplesse dans le choix du mode d'acquisition des images RADARSAT-1, 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. Pour cela, deux couples d'image acquis en 2002 et 2003 sur la rivière Peace ont été formés. Chaque couple est composé de deux images supposées être acquises dans des conditions environnementales très proches avec des modes différents et ou des orbites différentes (24 et 30 janvier 2002; 25 février et 04 mars 2003). Par la suite, un algorithme empirique a été proposé pour estimer la rétrodiffusion d'un même site image à des angles d'incidence différents. Les résultats obtenus à partir de ces deux couples sont représentés à la Figure 4. Bien que les résultats du modèle soient très encourageants, il faut tout de même l'appliquer sur d'autres images afin de le valider.

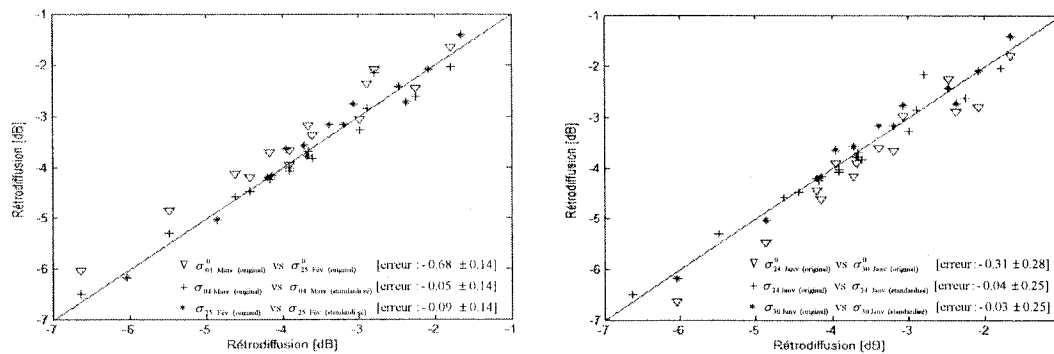


Figure 4 : Comparaison entre le signal radar réel et le signal standardisé sur la glace de rivière : (a) couple du 24 et 30 janvier 2002, (b) couple du 25 février et 4 mars 2003.

D'après les paramètres statistiques présentés sur les graphiques, on remarque qu'en utilisant les données extraites d'une image de référence acquise avec un mode fin donnée, l'algorithme arrive à estimer le signal radar de cette même image mais avec un autre mode fin. Cependant, l'erreur observée peut être causée soit par l'algorithme lui-même soit par le couvert de glace qui peut évoluer durant la période qui sépare les dates d'acquisitions des images. Par ailleurs, ces travaux sur la standardisation nous permettent également d'observer que pour une augmentation de l'angle d'incidence de 10° (entre 37° et 48°) le signal radar de glace diminue de moins de 3 dB. Cette constatation nous permet de supposer que le signal radar de la glace de rivière pourrait être affecté fortement par la rétrodiffusion surfacique à l'interface glace/eau.

• Étude bibliographique des différents modèles électromagnétiques

Très peu d'études théoriques existent sur la modélisation du signal radar de la glace d'eau douce. La seule étude faite sur ce sujet était sur la glace des lacs (Wakabayashi et al., 1993). Le modèle développé consistait à estimer l'intensité du signal radar de la glace acquis avec le capteur ERS-1 opérant en bande C avec la polarisation VV. La surface des deux interfaces (glace/eau et glace/air) était supposée lisse. Ainsi, les diffusions surfaciques considérées étaient spéculaires. La diffusion volumique a été considérée en supposant la présence des inclusions tubulaires et sphériques dans la glace colonnaire. Les couches de glace formées de neige et de frasil (glace granulaire) n'ont pas été bien modélisées dans ce travail parce qu'elles ne sont pas encore caractérisées. Le modèle montrait une sous estimation du signal radar. Le problème est causé soit parce qu'il ne prend pas en considération l'effet de la rugosité de surface des deux interfaces, soit

parce que le couvert de glace n'est pas bien caractérisé à cause de la difficulté des campagnes de mesure terrain ou en raison des deux.

La pénétration du signal radar est quasi totale dans une glace pure et non mouillée. Par exemple, en bande C, le signal pénètre jusqu'à 36 mètres dans la neige sèche (taux d'humidité 0%). Pour ce genre de milieu le signal rétrodiffusé n'est pas juste limité à la réponse des couches supérieures du milieu. Au-delà de 3% d'humidité, le signal dans cette même bande ne pénètre pas plus que 10 cm. Dans ce cas, si la neige couvre la glace de rivière, le signal rétrodiffusé est dû seulement à l'effet de la neige qui agit comme un masque sur la glace (Rott et al., 1988).

L'intensité du signal radar rétrodiffusé est liée aux phénomènes de diffusion surfacique aux interfaces air/glace, glace/eau et glace/sol. Ces deux dernières se produisant lorsqu'il y a pénétration suffisante du signal radar. La diffusion surfacique est la cause principale de la dispersion de l'énergie réfléchie représentée sur l'image radar (Bryan et Larson, 1975).

La diffusion surfacique est d'abord dépendante de la rugosité des interfaces entre les différents milieux. Ainsi, une interface lisse entre deux milieux produit une réflexion spéculaire et un faible retour du signal radar tandis qu'une interface très rugueuse produit une réflexion diffuse et un fort retour du signal.

La diffusion de surface est également dépendante des écarts entre les constantes diélectriques (ϵ) des deux milieux composant l'interface. De même, la diffusion à l'interface glace/eau est plus importante qu'à l'interface glace/sol puisque l'écart entre la constante diélectrique de la glace ($\epsilon \approx 3$) et celle de l'eau ($\epsilon \approx 80$) est supérieur à l'écart entre la glace et les sédiments gelés ($\epsilon \approx 8$). Ainsi, un lac recouvert de glaces flottantes produit un retour du signal plus élevé qu'un lac gelé jusqu'aux sédiments, si les inclusions dans la glace sont semblables dans les deux cas (Elachi et al., 1976; Weeks et al., 1977; Hall et al., 1994; Jeffries et al., 1994).

Lorsqu'il y a pénétration du signal radar dans la glace, les phénomènes de diffusion volumique contribuent à augmenter sensiblement l'intensité de la rétrodiffusion du signal radar. Les inclusions d'air de formes tubulaires peuvent théoriquement jouer un rôle de diffuseurs volumiques (Jeffries et al., 1994). De même, les hétérogénéités de formes sphériques présentes dans la neige glacée qui recouvrent les glaces peuvent causer de la diffusion volumique (Page et

Ramseier, 1975 ; Leconte et Klassen, 1991; Hall et al., 1994). La glace constituée d'agglomération de particules de frasil, et qui peut contenir la même forme d'inclusion, peut présenter le même effet (Leconte et Klassen, 1991). Toutefois, les faibles intensités du signal radar enregistrées pour des glaces contenant des bulles tubulaires d'un lac gelé jusqu'aux sédiments suggèrent plutôt que ces inclusions agissent comme "forward scatters" (Jeffries et al., 1994). Dans les deux cas où le couvert de glace est flottant et contient des inclusions tubulaires ou sphériques, l'effet engendré par ces hétérogénéités est une augmentation de la rétrodiffusion. L'ampleur du phénomène s'accroît avec l'augmentation de ces hétérogénéités dans le milieu. Si les diffuseurs hétérogènes n'ont pas une taille significative (plus petits que la longueur d'onde), la diffusion de volume est faible.

Les paramètres de la glace tels que la rugosité des interfaces, les écarts entre les constantes diélectriques des milieux ainsi que la présence des impuretés dans la glace déterminent donc l'intensité des diffusions surfacique et volumique. Les paramètres du radar tels que la longueur d'onde, la polarisation et l'angle d'incidence influencent aussi l'intensité de la rétrodiffusion.

En amont du développement d'un modèle de rétrodiffusion d'un couvert de glace s'inscrivent donc les étapes de description et de caractérisation physique du milieu d'étude. La rugosité de surface sera entièrement définie par la distribution et la fonction d'autocorrélation des aspérités. Aussi, un modèle de constante diélectrique tenant compte de la forme et de la taille des hétérogénéités présentes dans la glace sera utilisé. On utilisera l'équation du transfert radiatif adaptée à la modélisation électromagnétique des milieux hétérogènes. Les techniques de résolution de cette équation ont également été étudiées.

- **Étude théorique des données multi polarisées et polarimétriques**

En cours d'année, l'étude bibliographique de la modélisation électromagnétique a nécessité le remplacement de cet objectif par l'étude des caractéristiques des différents types glaces de rivière.

- **Étude théorique des caractéristiques des différents types glaces de rivière.**

Essentiellement, il y a cinq types de glaces qui peuvent apparaître dans une rivière, en voici une brève description.

La **glace de rive** est la première forme de glace qui se forme, dès les premiers froids, le long des rives d'une rivière (ou d'un lac) dans les zones d'écoulement laminaire (SCRHCENB, 1989). Cette glace est caractérisée par sa solidité et sa clarté. Son développement se fait horizontalement tout au long des rives, mais aussi verticalement vers le centre de la rivière. Cette progression dépend de facteurs tels que la température de l'air, la vitesse du vent, et bien entendu le régime d'écoulement qui tend à devenir turbulent au centre de la rivière ce qui la freine. La glace de rive peut croître aussi loin des berges autour des obstacles présents dans la rivière : îlots de rochers, piliers de pont). La glace de rive est un processus dominant dans les petites rivières et les ruisseaux. C'est aussi la seule façon de recouvrir les zones d'écoulement rapide. Dans les grandes rivières cependant, la progression rapide du couvert de glace ne peut être expliquée uniquement par la croissance de la glace de rive.

Le **frasil** est défini comme l'ensemble des cristaux de glace formés dans un écoulement turbulent où l'eau est à l'état de surfusion. Dans les tronçons d'un écoulement rapide en rivière (où dans un lac venteux), le mélange turbulent affecte toute la masse d'eau en profondeur. Cela a pour effet d'égaliser les températures en dehors de la couche de surface et, en principe, le frasil apparaît uniformément dans la section de l'écoulement (nucléation hétérogène). Les premières particules de glace formées sont trop petites pour être observées à l'œil nu, mais elles croissent rapidement et forment des disques de glace dont la plus grande dimension est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. La concentration des particules de frasil peut atteindre 10^6 particules/m³, avec une concentration volumique de l'ordre de 0.02 à 0.1 (Michel, 1972). La quantité de frasil formé à la surface de l'eau peut être estimé en utilisant le principe de la conservation de l'énergie à condition que la turbulence soit suffisamment élevée pour garder les cristaux nouvellement formés en suspension (Ashton., 1978). Les flocons de frasil adhèrent très facilement aux éléments étrangers se trouvant dans la zone de formation de ce type de glace. Au tout début, les couverts de glace s'amorcent à partir d'obstacles artificiels, qui barrent la rivière en travers, ou plus généralement

par augmentation de la concentration des glaçons en surface puis par interpénétration des glaçons de dérive qui s'arrêtent, se soudent dans l'écoulement. Les couverts de glace progressent ensuite vers l'amont alimentés par les glaçons et les flocons de slush de frasil. La densité de ce type de couvert de glace varie de 0.85 à 0.917 gr/cm³. Dans le cas où il y a des roches dans le lit de la rivière à l'endroit de la zone de formation du frasil actif (la longueur de la rivière où le frasil apparaît sur toute la profondeur) les particules de glace adhèrent et croissent, dans certains cas, sur des cailloux pour former de la *glace de fond*.

La **glace colonnaire** est, selon les régions, communément désigné par les expressions glace noire ou glace transparente. Les spécialistes l'identifient par le qualificatif colonnaire parce qu'elle est formée de cristaux en forme de colonnes soudées les unes aux autres. Les dimensions des colonnes et leurs formes dépendent de facteurs hydrodynamiques et météorologiques. Selon le processus de formation deux glaces dérivées peuvent exister (Michel, 1972). Si la première pellicule de glace formée sur la rivière est composée de glace de neige ou de frasil, le froid de l'atmosphère soutire de la chaleur de la couche d'eau immédiatement sous cette première couche de glace. Petit à petit, il se forme des cristaux de glace soudés à cette première couche de glace. Ces cristaux amorcent les colonnes, c'est la **glace colonnaire nucléée**. Initialement les colonnes sont nombreuses et petites. Au cours de l'hiver, à mesure que le couvert de glace progresse, on remarque qu'il y a de moins en moins de colonnes. Ceci est dû au fait que certaines colonnes initialement formées sont moins bien disposées que d'autres et sont par conséquent éliminées par celles qui sont bien mieux disposées. La densité de cette glace varie de 0.90 à 0.917 gr/cm³. Si au moment de la formation de la première pellicule de glace, il y a absence de neige ou de frasil, il y a alors formation de glace **colonnaire non nucléée**. Les dimensions des colonnes à l'origine sont nettement supérieures à celles de la glace colonnaire nucléée. Les dimensions dépendent essentiellement de la température de l'air et de la pureté de l'eau lors de la formation des premières particules de glace. La densité de cette glace varie de 0.90 à 0.917 gr/cm³.

La **glace de neige** se forme lors d'une chute de neige. Cette situation se présente lorsque la température de la couche de surface du plan d'eau est de 0 °C ou aux environs de cette température et qu'une précipitation de neige survient. Dans ces conditions de température, la neige demeure en grande partie à l'état solide et ainsi il se forme sur le plan d'eau une couche de

slush de neige laquelle par la suite, si la température de l'air est favorable, se congèle pour former de la glace de neige. Il y a le cas où l'eau s'infiltre dans la neige recouvrant un couvert de glace établi. Les fissures d'un couvert de glace, par où s'infiltre l'eau, peuvent être d'origine thermique, elles peuvent aussi se produire sous le poids d'une épaisseur suffisante de neige ou encore par une fluctuation du niveau d'eau. Au cours d'un hiver, plusieurs couches de glace de neige peuvent se former, toujours, sur un couvert de glace déjà établi (*glace superposée*). Leur densité varie de 0.80 à 0.90 gr/cm³.

Dans certaines rivières, il est fréquent de rencontrer de la **glace agglomérée**. Cette glace est formée par le regel de fragments de glace flottante de toutes formes et de n'importe quels types. Ce type de glace se rencontre principalement en aval des zones de rapides où l'écoulement est turbulent. Cette glace peut contenir un mélange de frasil, de neige et de parcelles de glace de rive détachées par l'action de l'eau, du vent ou par les fluctuations du niveau d'eau. Ces particules se soudent les unes des autres par le gel de l'eau remplissant les vides de ce mélange non homogène. Sa densité est autour de 0.91 gr/cm³.

- **Préparation de l'examen doctoral**

L'objectif de cet examen est de présenter la problématique, de recenser les différents travaux effectués sur la glace de rivière, d'identifier les objectifs et les hypothèses de la recherche, de décrire la modélisation électromagnétique et finalement de présenter la méthodologie. L'examen aura lieu le 4 mai 2005.

→ **Communications**

Une partie des résultats de l'étude de standardisation a été intégrée à une affiche présentée à la 6ème conférence scientifique annuelle GEOIDE, qui s'est tenue du 30 mai au 1er juin 2004 à Gatineau (Québec) :

GAUTHIER, Y., BERNIER, M., PHILIPPIN, M., WEBER, F., GHERBOUDJ, I. and JASEK, M. (2004). *River Ice Monitoring with Synthetic Aperture Radar*. Réunion annuelle du Réseau Geoide, Ottawa, Mai 2004 (Affiche).

BERNIER M. (2005). *Monitoring of River ice and Soil Freezing Using Remote Sensing and Modeling*. Réunion annuelle de CRYSYS, Kananaskis (Canada), 4-5 Mars.

GHERBOUDJ, I., BERNIER, M. et GAUTHIER, Y. (2005). *Standardisation du signal radar de la glace de rivière acquis avec les capteurs RADARSAT-1 et ENVISAT-ASAR*. 12^{ème} Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, Chicoutimi, 10-12 mai 2005. (Affiche).

3.4 Activités tenues dans le cadre de l'objectif #3 (Gel du sol)

Ce volet est réalisé par Jalal Khaldoune dans le cadre de sa thèse de Doctorat en Sciences de l'eau sous la direction du professeur Monique Bernier et de la co-direction du chercheur Eric Van Bochove d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Il est important de noter qu'Agriculture et Agroalimentaire Canada contribue au volet 3 du projet par l'achat d'équipement, la contribution de leur personnel à l'acquisition des données au sol ainsi que l'achat de six images ENVISAT et/ou RADARSAT. De plus, dans le cadre d'une entente de collaboration entre Agriculture et Agroalimentaire Canada et l'Agence Spatiale Canadienne (GRIP) des images polarimétriques pour les volets 2 et 3, ont été acquises en novembre 2002 et février 2003. Les images de février 2003 pour le volet 3 ont été reçues en août 2004.

Objectifs spécifiques pour 2004-2005 :

1. Traitement des données acquises sur le terrain à l'hiver 2004
2. Traitement et interprétation des images acquises
3. Montage du SIG
4. Sélection et instrumentation des sites pour l'hiver 2005
5. Acquisition des données terrain et des images pour l'hiver 2005

- **Traitement des données acquises sur le terrain à l'hiver 2004**

Le traitement des données de terrain (température et constante diélectrique du sol à différentes profondeurs, épaisseur et densité de la neige, données météorologiques) débuté durant l'hiver a été complété en mai 2004. L'analyse de ces données de terrain a fait l'objet de deux présentations par affiche lors de la 6ème conférence scientifique annuelle GEOIDE (30 mai au 1^{er} juin) et au 18ème congrès de l'Association Québécoise des Spécialistes en Science du Sol (AQSSS) (7 au 9 juin 2004).

- **Traitement et interprétation des images ENVISAT acquises**

Six images ENVISAT, de deux types différents (APP et APS), ont été acquises dans deux polarisations parallèles HH/VV (Tableau 1) à l'hiver 2004.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'acquisition des images ENVISAT

Acquéreur	Type	Mode	Date d'acquisition	Nombre de visées	Angle	Orbite
AAC	ASA_APS_1P	Complexe	21 décembre 2003	1	S2	Desc.
CRYSYS	ASA_APP_1P	Précision	10 janvier 2004	1	S3	Asc.
AAC	ASA_APS_1P	Précision	25 janvier 2004	1	S2	Desc.
CRYSYS	ASA_APP_1P	Précision	14 février 2004	1	S3	Asc.
CRYSYS	ASA_APS_1P	Complexe	29 février 2004	1	S2	Desc.
AAC	ASA_APS_1P	Complexe	09 mai 2004	1	S2	Desc.

Afin d'atteindre le second objectif spécifique, soit le traitement des images ENVISAT et éventuellement des images polarimétriques du CONVAIR, un stage de deux mois a été réalisé par le doctorant Jalal Khaldoune à l'Université de Rennes 1 en France, sous la direction des professeurs Éric Pottier, directeur adjoint de l'Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes et Laurent Ferro-Famil. Ce stage lui a permis de s'initier au nouveau logiciel de traitement d'images polarimétriques PolSARpro, développé et conçu par les deux professeurs mentionnés auparavant.

Après avoir visualisé les images sur PolSARpro, un programme a été mis au point à l'aide du logiciel MatlabTM afin de masquer les zones des forêts et tracer les contours des champs agricoles (Figure 5). Les résultats préliminaires obtenus sont encourageants. On peut distinguer clairement les zones agricoles des zones forestières et, au sein même des terres agricoles, on peut remarquer une hétérogénéité due à différents paramètres de la texture du sol de drainage ou à certaines pratiques agricoles.

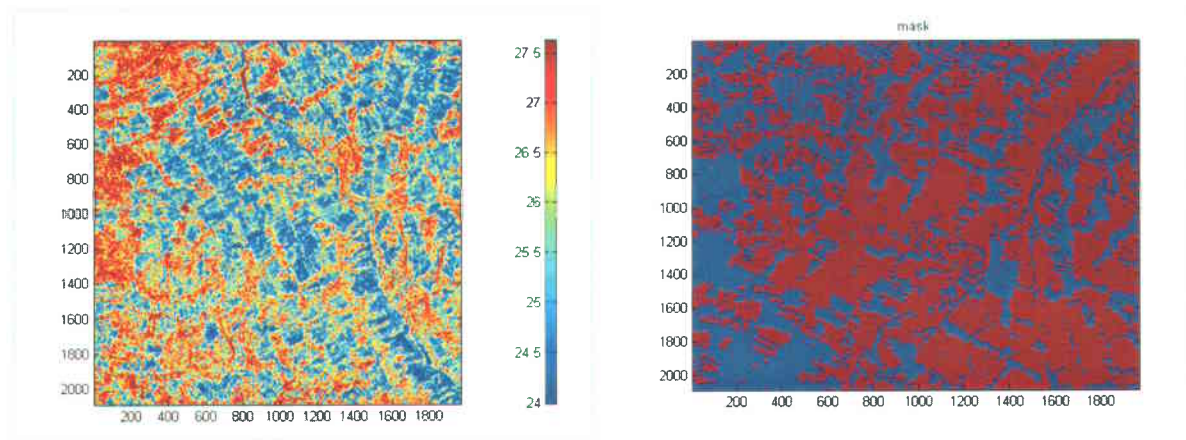
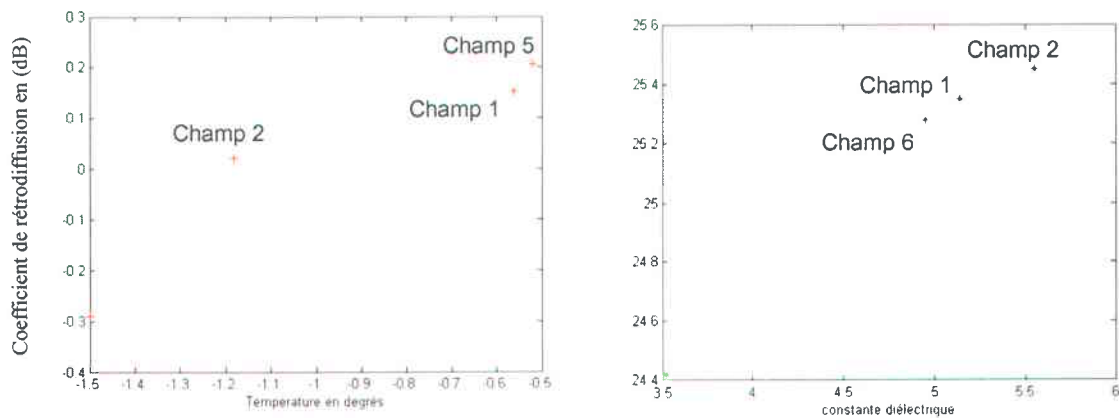


Figure 5 : a) Image ENVISAT (APP) polarisation VV du 10/01/04 de la région d'étude. b) Résultats de la classification non supervisée appliquée sur l'image APP du 10/01/04. La forêt (masque bleu), sol agricole (masque rouge).

Les coefficients de rétrodiffusion pour trois champs différents sont présentés sur la (Figure 6), en fonction de la température mesurée à 5 cm de la surface du sol (a) et de la constante diélectrique du sol mesurée à 7 cm de la surface du sol (b). Lorsque la constante diélectrique diminue, le comportement des coefficients de rétrodiffusion diminue aussi. Le même scénario se répète pour la température du sol; c'est-à-dire, plus un champ est froid, plus son coefficient de rétrodiffusion est bas.



**Figure 6 : Moyenne des coefficients de rétrodiffusion pour trois champs différents en fonction de :
a) température dans les 5cm du sol b) constante diélectrique mesurées à 7cm de la surface.**

À la Figure 7, un masque en blanc est appliqué pour les zones forestières (a), seul les sols agricoles sont visibles, un rapport de polarisation (HH/VV) a été calculé (b).

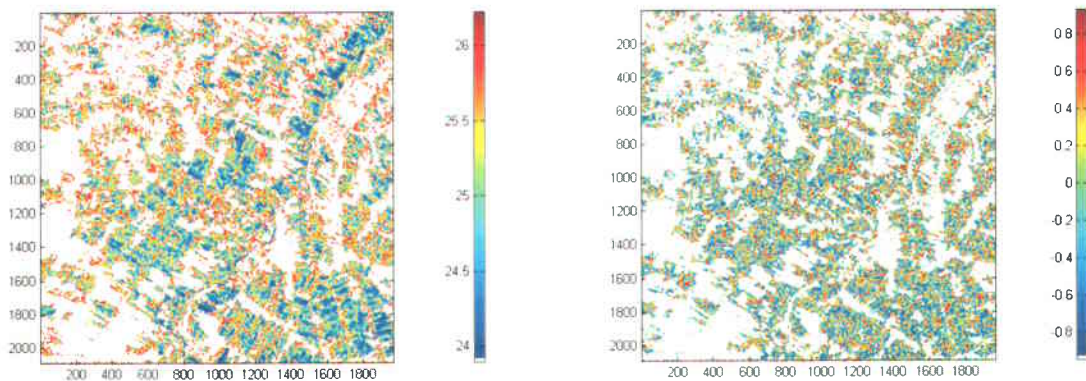


Figure 7 : Image APP du 10/01/04 a) polarisation HH, b) rapport de polarisation HH/VV. La forêt est masquée (masque blanc).

Le rapport de polarisation HH/VV a été calculé pour réduire l'effet de la rugosité des champs agricoles étudiés. Ainsi, seul l'effet de la température du sol est mis en évidence.

À la Figure 8, les parties réelles et imaginaires de la constante diélectrique, obtenues avec le modèle de Dobson, sont présentées pour la bande de fréquence 5,3 GHz et pour différentes textures du sol. Comme on pouvait s'y attendre, la constante diélectrique augmente avec l'humidité du sol, par contre, seule la partie réelle de la constante diélectrique semble affectée par la texture du sol.

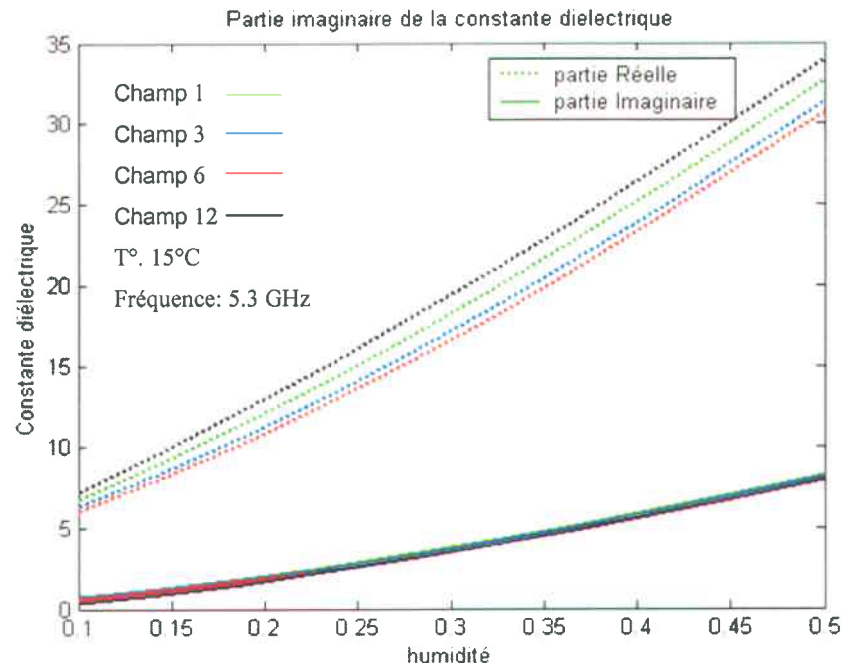


Figure 8 : Constante diélectrique mesurée avec le modèle de Dobson en fonction de l'humidité du sol pour 4 champs selon leur texture.

- **Montage du SIG**

La cartographie du gel du sol dans le sous-bassin versant du Bras d'Henri se fera à partir d'une base de données (modèle numérique de terrain et occupation du sol) et de mesures de terrain réalisées durant deux saisons hivernales (2003-2004 et 2004-2005); ces mesures permettront de valider les hypothèses et les relations existant entre la variable spatiale des températures et les caractéristiques locales du site.

- **Sélection et instrumentation des sites pour l'hiver 2005**

Pour la deuxième année consécutive et en collaboration avec le ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire Canada, nous avons choisi pour cette étude le sous-bassin versant du Bras d'Henri, de la région Chaudière Appalaches. Douze champs agricoles ont été instrumentés dans de nombreux points de mesure (5 points dans chaque champ) (Figure 9).

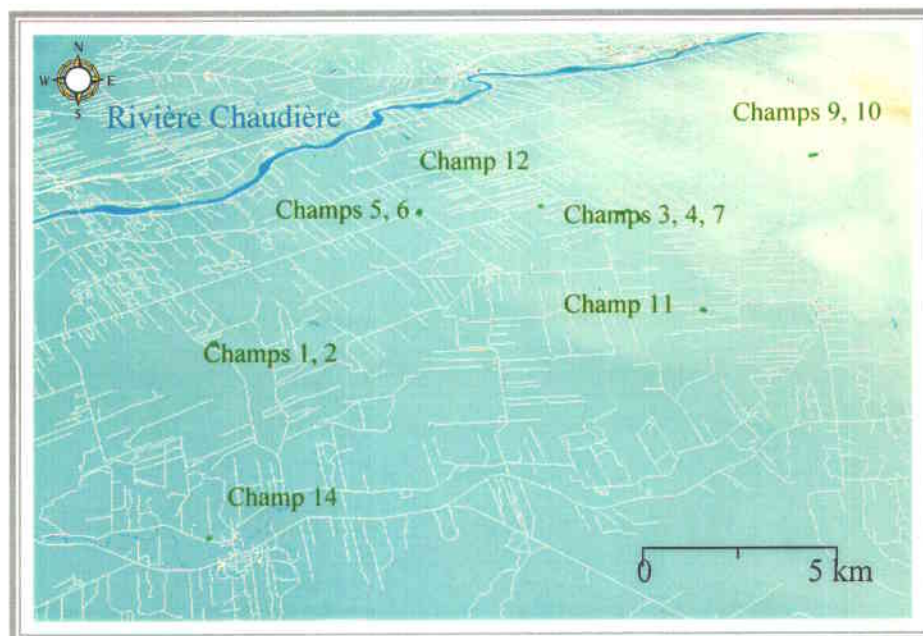


Figure 9 : Localisation des sites expérimentaux dans ArcGIS

Chaque point comprend 3 thermocouples, enfouis à trois profondeurs différentes (-1 cm, -5 cm et -10 cm). Quant au point de mesure central, il comprend 6 thermocouples introduits aux profondeurs suivantes : -1 cm, -5 cm, -10 cm, -15 cm, -35 cm et -50 cm. Cela permet de mesurer les variations de température sous couvert de neige, pendant la saison hivernale. A cela se rajoutent une sonde TDR, que nous avons implantée à 5 cm de la surface afin de mesurer la constante diélectrique, et un enregistreur de température programmé pour une prise à toutes les 6 heures, tout le long de l'hiver.

La distribution des points de mesure dans chaque champ a été réalisée en fonction des paramètres suivants : pédologie, texture du sol, conductivité électrique et pratique agricole. Les

données sur la température sont recueillies soit manuellement, en parallèle avec l'acquisition des images RSO, soit au moyen d'enregistreurs automatiques toutes les 6 heures (Figure 10).

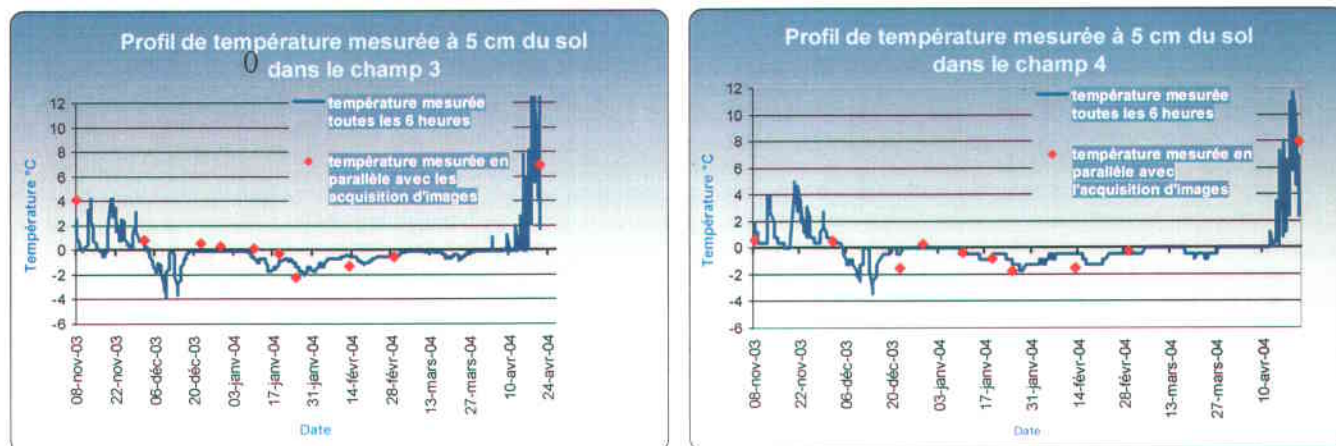


Figure 10 : Profil de température mesuré à 5 cm de la surface du sol, exemple des champs : 3 et 4

- Acquisition des données terrain et des images pour l'hiver 2005

Acquisition des images RSO

La base de données 2004-2005 est constituée de trois images à haute résolution acquises avec le capteur RSO de RADARSAT-1 et de trois images multipolarisations (HH/HV) acquises avec le capteur ASAR d'ENVISAT (Tableau 2 et Tableau 3).

Tableau 2 : Caractéristiques de l'acquisition des images RADARSAT-1

Polarisation	Centre de la scène	Date d'acquisition	Nombre de visées	Angle	Orbite
HH	N 46°29'' W 71°14''	02 novembre 2004	1	F1F	Asc
HH	N 46°29'' W 71°14''	13 janvier 2005	1	F1F	Asc
HH	N 46°29'' W 71°14''	06 février 2005	1	F1F	Asc

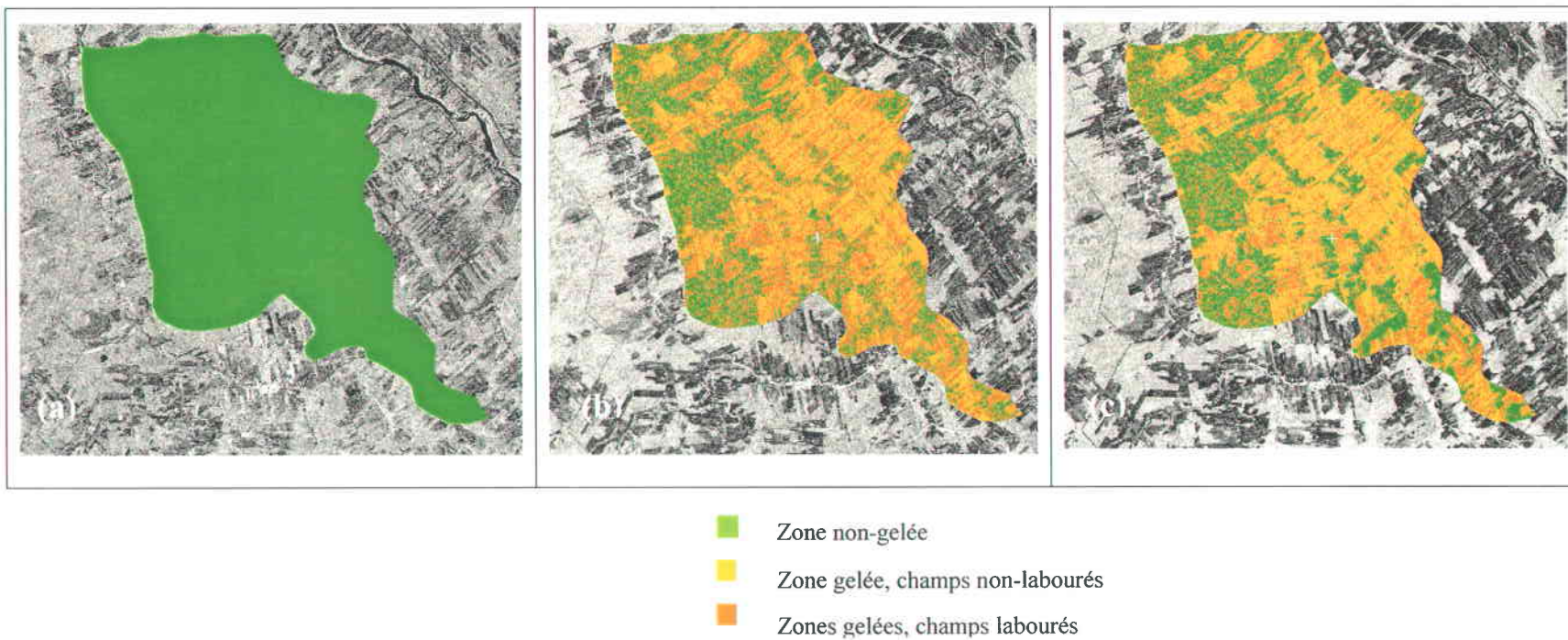
Tableau 3 : Caractéristiques de l'acquisition des images ENVISAT

Polarisations	Type	Mode	Date d'acquisition	Nombre de visées	Angle	Orbite
HH/VH	ASA_APP_1P	Précision	06 décembre 2004	2	S2	Asc
HH/VH	ASA_APP_1P	Précision	10 janvier 2005	2	S2	Asc
HH/VH	ASA_APP_1P	Précision	14 février 2005	2	S2	Asc

Le traitement des données RADARSAT-1 a été complété en mars 2005. Une première carte du gel a été produite à partir des images RADARSAT-1 (Figure 11) pour l'hiver 2003-2004.

Acquisition des données terrain

Les mesures de terrain ont été complétées par un dernier relevé des températures en mars 2005.



**Figure 11 : Carte du gel de sols de différentes textures dans le sous-bassin du Bras d'Henri à trois dates:
a) 08 novembre 2003, b) 19 janvier 2004, c) 29 février 2004.**

→ Communications

KHALDOUNE, J., NOLIN, M., VAN BOCHOVE, E. et BERNIER, M. (2004) Soil freezing monitoring in agriculture region using Synthetic Aperture Radar. 18ème congrès de l'AQSSS, 7 au 9 juin 2004, Baie St-Paul, Québec. (Affiche).

KHALDOUNE, J., SAVARY, S., NIANG, M., BERNIER, M., NOLIN, M et VAN BOCHOVE, E.(2004) Suivi du gel du sol sous couvert de neige dans un milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à l'aide d'images RSO et intégration des données dans un réseau ouvert sur la toile (web), 6ème Conférence scientifique annuelle GEOIDE, 30 mai au 1er juin 2004, Gatineau (Québec) (Affiche).

KHALDOUNE, J. (2004) Cartographie du gel du sol dans un milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images RSO monopolarisées (RADARSAT-1) et multipolarisées (ENVISAT), séminaire donné le 12 juillet 2004 à l'université de Rennes I, France.

BERNIER M. (2005). Monitoring of River ice and Soil Freezing Using Remote Sensing and Modeling. Réunion annuelle de CRYSYS, Kananaskis (Canada), 4-5 Mars.

Deux communications sont prévues pour 2005, soit l'une au 12^{ème} congrès de L'Association Québécoise de Télédétection (10-12 mai) et l'autre à IGARSS05 à Séoul (25-29 juillet).

3.5 Références citées

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

ASHTON, G. D. River Ice Annual Review of Fluid Mechanics, 10: 369-392 (1978).

BRYAN, M.L., and R.W. LARSON. *The study of fresh water lake ice using multiplexed imaging radar, Journal of Glaciology*, 14(72): 445-457, 1975.

- ELACHI, C., and M.L. BRYAN. Imaging radar observations of frozen arctic lakes. *Remote Sensing of Environment*, 5:169-175, 1976.
- HALL, D.K., D.B. FAGRE, F. KLASNER, G. LINEBAUGH, and G.E. LISTON. Analysis of ERS-1 synthetic aperture radar data of frozen lakes in northern Montana and implication for climate studies, *Journal of Geophysical Research*, 99(C11) :22.473-22.482, 1994.
- JEFFRIES, M.O., K. MORRIS, and W.F. WEEKS. Structural and stratigraphic features and ERS-1 synthetic aperture radar backscatter characteristics of Ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-1992, *Journal of Geophysical Research*, 99(C11): 22.459-22.471, 1994.
- LECONTE, R. and P.D. KLASSEN. Lake and River Ice Investigations in Northern Manitoba Using Airborne SAR imagery, *ARTIC*, 44(1):153-163, 1991.
- MICHEL, B. and M. DROUIN. Formation classification et propriétés mécanique de la glace, Sixième colloque d'initiation aux principes de l'hydrologie, *rapport No. GCE-72-08-1, Aout* 1972.
- PAGE, D.F. and R.O. RAMSEIER. Application of radar technique to ice and snow studies, *Journal of Glaciology*, 15(73):171-191, 1975.
- ROTT, H., C. MATZLER, D. STROBL, S. BRUZZI and K.G LENHART. Study on SAR land application for snow and glacier monitoring, *ESA Contract No. 6618/85/F/FL (SC)*, Innsbruck: Universitat Innsbruck. 186 p.
- SCRHCENB (Sous Comité Responsable des Glaces de Cours d'Eau du Nouveau Brunswick). (1989). Guide des glaces fluviales au nouveau Brunswick. *Site Web*: <http://www.gnb.ca/009/0369/0004/index-f.html>.
- WAKABAYASHI, H., W.F. WEEKS and M.O. JEFFRIES. A C-band backscatter model for lake ice in Alaska, *In Proceeding of the 1993 International Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'93)*, publ. 93CH3294-6:1264-1266, *Inst. Of Elec. and Electron. Eng., New York*, 1993.

4 Formation de chercheurs

Les trois volets sont réalisés par des étudiants :

Le volet 1 est réalisé en partie, dans le cadre des activités doctorales d'Ali El Battay qui a débuté un doctorat en sciences de l'eau à l'été 2001.

Directeur : Dr. Monique Bernier Co-directeur : Dr Taha Ouarda

Le volet 2 est réalisé dans le cadre de la thèse de Imen Gherboudj qui s'est inscrit au Doctorat en sciences de l'eau en septembre 2003.

Directeur : Dr. Monique Bernier Co-directeur : Dr Robert Leconte (ETS)

Le volet 3 est réalisé par Jalal Khaldoune qui s'est inscrit au doctorat en sciences de l'eau en septembre 2001.

Directeur : Dr. Monique Bernier Co-directeur : Dr Éric Van Bochove (AAC)

Tous les étudiants seront aussi encadrés et assistés par M. Yves Gauthier, agent de recherche spécialisé en télédétection et en système d'information géographique et M. Stéphane Savary, assistant de recherche spécialisé en modélisation hydrologique et en télédétection.

5 Publications récentes découlant des activités financées par CRYSYS

a) Articles soumis

FORTIN, G., VAN BOCHOVE, E., JONES, H.G., THÉRIAUL, T. G. and M. BERNIER (2004).
In-situ measurements of air permeability and gas diffusion through intra-pack ice layers in a
seasonal snowpack. *Atmospheric Environment*.

b) Articles publiés dans des revues avec comité de lecture (RAC)

LAGACÉ*, C., BERNIER, M. et Y. GAUTHIER* (2002). Comparaison du potentiel des images
RADARSAT-1 et SSM/I pour la cartographie du gel saisonnier du sol en zone de taïga.
Télédétection, 2 (3):161-175.

DE SÈVE*, D., M. BERNIER, J.P. FORTIN et A. WALKER (2001). Estimation de l'équivalent
de la neige au sol dans un milieu taïga à l'aide des données SSM/I, *Télédétection*, 2(1) :13-28.

MARTIN*, D., M. BERNIER, J.L. SASSEVILLE et R. CHARBONNEAU (1999). Évaluation
financière de l'intégration de technologies satellitaires pour le suivi du couvert nival, au sein
d'une entreprise hydroélectrique. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (6) : 2033-
2048.

DE SÈVE*, D., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et A. WALKER (1997). Preliminary analysis of
snowmicrowave radiometry using SSM/I passive microwave data : The case of the watershed
of La Grande Rivière (Québec) *Annals of Glaciology*, vol. 25: 353-361.

MARTIN*, D. et M. BERNIER (1997). Analyse multicritères des capteurs satellitaires pour le
suivi du couvert nival. *Journal canadien de télédétection*, 23(3) : 264-275.

c) Conférences avec arbitrage (COF)

GAUTHIER Y., SAVARY, S., WEBER, F., JASEK, M., PAQUET, L.-M., et BERNIER M. (2005). Innovative approach to characterize river ice from SAR data. Comptes-rendus du 4th EARSEL LISSIG Workshop: Remote Sensing of Snow and Glacier as Water Ressources of the Future, Berne, Suisse, 21-23 Février.

FORTIN G., VAN BOCHOVE, E. H.G. JONES, G. THERIAULT and M. BERNIER, (2004) In-situ measurements of air permeability and gas diffusion through intra-pack ice layers in a seasonal snowpack, 5th Circumpolar Ecosystems International Workshop and Symposium, 25-28 février 2004.

GAUTHIER Y., A.L., BATTAY, M. BERNIER, T., M. J. OUARDA (2003). An approach using contextual analysis to monitor river ice from RADARSAT data, 60th Eastern Snow Conference, Sherbrooke, Canada, pp 151-158.

FORTIN*, G., JONES, G.H., BERNIER, M. et M. SCHNEEBELI (2002). Changes in the structure and permeability of artificial ice layers containing fluorescent tracer in cold and wet snow cover. 59th Eastern Snow Conference, Stowe, Vermont, USA.

LAGACÉ*, C. et BERNIER, M. (2000). Développement d'une approche pour le suivi du gel saisonnier à partir de l'utilisation conjointe d'images RADARSAT et d'images SSM/I. Proceedings of Eastern Snow Conference, juin.

DE SÈVE*, D., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et A. WALKER (1999). Analysis of radiometry of snow cover with SSM/I data in a taiga area : The case of James Bay area (Quebec). Proceedings of Eastern Snow Conference. Fredericton (New-Brunswick), 2-4 juin, pp. 31-42.

DE SÈVE*, D., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et A. WALKER (1998). Spatio-temporal analysis of microwave radiometry of snow cover with SSM/I data in a taiga area. Proceedings of the 27th Int. Symp., on Remote Sensing of Environment, Tromsø, Norvège, juin 1998.

MARTIN*, D., BERNIER, M. et J.L. SASSEVILLE (1998). A decision making tool for remote sensing technology transfer. Case study : snow cover monitoring for an optimal management

of hydroelectric reservoirs. Proceedings of the 27th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Tromso, Norvège, juin 1998.

MARTIN*, D., J.L. SASSEVILLE et M. BERNIER (1997). La diffusion commerciale des applications des technologies satellitaires : le cas de RADARSAT I pour la gestion des barrages. Symposium international : La géomatique à l'ère de RADARSAT. 25-30 mai, Ottawa, Canada.

d) Actes de colloque

MARTIN*, D., BERNIER, M. et J.L. SASSEVILLE (1996). Survey on expectations of actual and potential users of remote sensing technologies in hydrology, *Proceeding of the Third International Workshop on application of Remote Sensing in Hydrology*, october 16-18, 1996. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.

e) Conférences / Séminaires

BERNIER M. (2005). Monitoring of River ice and Soil Freezing Using Remote Sensing and Modeling. Réunion annuelle de CRYSYS, Kananaskis (Canada), 4-5 Mars.

KHALDOUNE, J. (2004) Cartographie du gel du sol dans un milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images RSO monopolarisées (RADARSAT-1) et multipolarisées (ENVISAT), séminaire donné le 12 juillet 2004 à l'université de Rennes I, France.

EI BATTAY, A., GAUTHIER, Y. PHILIPPIN, M. et BERNIER M. (2004) Caractérisation de la glace d'une rivière moyenne à l'aide d'un système d'information géographique et des images du satellite RADARSAT, Xes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection, Ottawa, 24-29 mai 2004;

GAUTHIER, Y., BERNIER, M., PHILIPPIN, M., WEBER, F., GHERBOUDJ, I. AND JASEK, M. (2004). River Ice Monitoring with Synthetic Aperture Radar. Poster presented at the Annual GEOIDE Network Meeting, Ottawa, May 2004.

KHALDOUNE, J., NOLIN, M., VAN BOCHOVE, E. et BERNIER, M. (2004) Soil freezing monitoring in agriculture region using Synthetic Aperture Radar. 18ème congrès de l'AQSSS, 7 au 9 juin 2004, Baie St-Paul, Québec. (Affiche).

KHALDOUNE, J., SAVARY, S., NIANG, M., BERNIER, M., NOLIN, M. et VAN BOCHOVE, E. (2004) Suivi du gel du sol sous couvert de neige dans un milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à l'aide d'images RSO et intégration des données dans un réseau ouvert sur la toile (web), 6ème Conférence scientifique annuelle GEOIDE, 30 mai au 1er juin 2004, Gatineau (Québec) (Affiche).

FORTIN, G., VAN BOCHOVE, E., BERNIER, M. and G. JONES (2003). Relationship between permeability and gas diffusion through ice layers in snow cover at an agricultural field near Quebec city. CRYSYS Annual Science Meeting, Montreal, March 23-25, 2003

EL BATTAY, A., GAUTHIER, Y., BERNIER, M. and OUARDA, T.B.M.J. (2003). Using contextual analysis to monitor river ice from RADARSAT data. CRYSYS Annual Science Meeting, Montreal, March 23-25, 2003

BERNIER, M. (2003). Remote Sensing of the Cryosphere. Conférence invitée, Réunion annuelle de CRYSYS (Environnement Canada), Montréal, 24-25 mars 2003.

GAUTHIER, Y., EL BATTAY, A., OUARDA, T.B.M.J. and BERNIER, M. (2003). Using contextual analysis to monitor river ice from RADARSAT data. Special workshop on monitoring and analysis of river ice processes, Ste-Foy, February 2003.

f) Rapports de recherche

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., KHALDOUNE, J., GHERBOUDJ, I., EL BATTAY, A., OUARDA, T., E. VAN BOCHOVE ET R. LECONTE (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. INRS-ETE N° R-617-e6. Avril, 31 pages.

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., KHALDOUNE, J., GHERBOUDJ, I., EL BATTAY, A., OUARDA, T. et E. VAN BOCHOVE (2004). 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. INRS-ETE N° R-617-e5. Septembre, 16 pages.

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., FORTIN, G., EL BATTAY, A., KHALDOUNE, J., OUARDA, T.B.M.J. et E. VAN BOCHOVE (2004). Suivi des caractéristiques du couvert nival, du sol et de la glace de rivière à l'aide des techniques de télédétection et de modélisation. Rapport de recherche N° R-617-e4, mars, 15 pages.

BERNIER, M., GAUTHIER, Y., EL BATTAY, A., FORTIN, G., BONNIFAIT, L. OUARDA, T. et E. VAN BOCHOVE (2003). Suivi des caractéristiques du couvert nival, du sol et de la glace de rivière à l'aide des techniques de télédétection et de modélisation. Rapport de recherche INRS-ETE, N° R-617-e3. Mars, 26 pages.

BERNIER, M., Y. GAUTHIER et G. FORTIN (2002). Suivi des caractéristiques du couvert nival, du sol et de la glace de rivière à l'aide des techniques de télédétection et de modélisation. Rapport de recherche INRS-ETE N° R-617. Mai, 30 pages.

MARTIN*, D. et M. BERNIER (1997). Enquête destinée à connaître et à quantifier les attentes des utilisateurs de technologies satellitaires en vue du suivi du couvert nival. Rapport soumis à Environnement Canada dans le cadre du projet CRYSYS, Rapport de recherche INRS-Eau N° R-491, 77 pages.

g) Thèses et mémoires

FORTIN, Guillaume (2003). Sujet de la thèse : « Suivi des croûtes de glace du couvert nival ». Doctorat en Sciences de l'eau, soutenance le 27 octobre 2003. Co-directeur : Dr Éric Martin (Météo-France). *Professeur à l'Université d'Hearst, Ontario.*

EL BATTAY, Ali (2001). Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau. *Inscrit au Doctorat en Sciences de l'eau.*

- CATHERINE LAGACÉ (2000). Suivi temporel de la distribution spatiale du gel du sol à partir des capteurs micro-ondes. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau. *Professionnelle, Direction générale des élections du Québec.*
- DANIELLE DE SÈVE (1999). Utilisation des micro-ondes (données SSM/I) passives pour le suivi du couvert nival en milieu de taïga. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau. *Chercheur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec, IREQ (Varennnes).*
- DANIEL MARTIN (1998). Potentiel de transfert des applications des technologies satellitaires pour la mesure du couvert nival. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau. *Associé de recherche à l'Université Laval.*