

Record Number: 24490
Author, Monographic: Bernier, M.//Gauthier, Y.//Fortin, G.
Author Role:
Title, Monographic: 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 d'étape no 1
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau, Terre & Environnement
Date of Publication: 2002
Original Publication Date: Mai 2002
Volume Identification:
Extent of Work: viii, 33
Packaging Method: pages
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Terre & Environnement, rapport de recherche
Series Volume ID: 617 e1
Location/URL:
ISBN: 2-89146-480-X
Notes: Rapport annuel 2002-2003
Abstract: Numéro de rapport demandé par Johanne le 2002/06/17, ISBN attribué par Geneviève 5.00\$;
Numéro de rapport d'étape e1 ajouté le 20021210 par jdb suite à une vérification faite avec anne et johanne. La page couverture de l'original ne mentionne pas ce numéro, ni la copie qui fut déposée.
Call Number: R000617 e1
Keywords: rapport/ ok / dl

***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 No R-617

Mai 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**

Par

Dr Monique Bernier

Yves Gauthier

Guillaume Fortin

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE
2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7**

Rapport de recherche No R-617

Mai 2002

© INRS-Eau, 2002

ISBN: 2-89146-480-X

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
1. OBJECTIFS DE RECHERCHE POUR L'ANNÉE 2001-2002	1
2. RÉSULTATS DE L'OBJECTIF 1	3
3. RÉSULTATS DE L'OBJECTIF 2	5
4. RÉSULTATS DE L'OBJECTIF 3	15
5. RÉSULTATS DE L'OBJECTIF 4	25
PUBLICATIONS RÉCENTES DÉCOULANT DES ACTIVITÉS FINANCÉES PAR CRYSYS	29

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DATES D'ACQUISITION, À L'HIVER 2000-2001, D'IMAGES RADARSAT-1.....	5
TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DU MODE SCANSAR NARROW ET DU MODE WIDE.....	6
TABLEAU 3 : IMAGES RADARSAT EN MODE FIN ACQUISES SUR LE SEGMENT AVAL DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS DANS LE CADRE DES PROGRAMMES ADRO-2 ET DRU.....	26

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 :	COUVERTURE DE L'IMAGE WIDE PAR RAPPORT À L'IMAGE SCANSAR NARROW	7
FIGURE 2 :	COMPARAISON DES MODES WIDE (W1) ET SCANSAR NARROW (SCN) À L'AUTOMNE	7
FIGURE 3 :	COMPARAISON DES MODES WIDE (W1) ET SCANSAR NARROW (SCN) EN MILIEU D'HIVER.....	8
FIGURE 4 :	COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS ET MESURÉS AUX SITES À PARTIR DU MODE WIDE ET DU MODE SCANSAR NARROW	9
FIGURE 5 :	COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS AUX SITES À PARTIR DU MODE WIDE ET DU MODE SCANSAR NARROW	10
FIGURE 6 :	CARTES D'ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT JANVIER PRODUITES À PARTIR DES IMAGES DES MODES SCANSAR NARROW (GAUCHE) ET WIDE1 (DROITE).....	11
FIGURE 7 :	COMPARAISON MAILLE PAR MAILLE DES CARTES D'ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT JANVIER PRODUITES À PARTIR DES IMAGES DES MODES SCANSAR NARROW ET WIDE1	11
FIGURE 8 :	CARTES D'ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT FÉVRIER PRODUITES À PARTIR DES IMAGES DES MODES SCANSAR NARROW ET WIDE1	12
FIGURE 9 :	COMPARAISON MAILLE PAR MAILLE DES CARTES D'ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT FÉVRIER PRODUITES À PARTIR DES IMAGES DES MODES SCANSAR NARROW ET WIDE1	12
FIGURE 10 :	INSTRUMENTATION POUR MESURER LA DIFFUSION. A : BONBONNE DE KRYPTON; B : CHAMBRES DE DIFFUSION; C : SERINGUES; D : VIALS.....	16
FIGURE 11 :	PERMÉAMÈTRE À AIR. A : ÉCHANTILLONNEUR; B : UNITÉS DE LECTURE DIGITALES POUR LE DÉBIT, LA DIFFÉRENCE DE PRESSION ET LA TEMPÉRATURE	16
FIGURE 12 :	SCHÉMA D'UNE CHAMBRE DE DIFFUSION POUR LE KR DANS LA GLACE.....	17

FIGURE 13 : SCHÉMA DU PERMÉAMÈTRE À AIR.	19
FIGURE 14 : PROFILS STRATIGRAPHIQUES POUR LES STATIONS 1 ET 2 DURANT L'HIVER 2001-2002.....	21
FIGURE 15 : A = THREE INITIAL ARTIFICIAL ICE LAYERS; B = NATURAL ICE LAYERS	22
FIGURE 16 : PROFILS DE TENEUR EN EAU ET DE TEMPÉRATURE. LES LIGNES PLEINES AU DESSUS DE CHAQUE GRAPHIQUE CORRESPONDENT À LA SURFACE DU COUVERT ET LES LIGNES POINTILLÉES À LA HAUTEUR MOYENNE À LAQUELLE LES COUCHES DE GLACE ARTIFICIELLES ÉTAIENT SITUÉES.....	23
FIGURE 17 : DISTRIBUTION SPATIALE DU PARAMÈTRE DE TEXTURE "MEAN" POUR LE SITE #6	27

1. Objectifs de recherche pour l'année 2001-2002

Quatre objectifs de recherche avaient été proposés au printemps 2001 :

- 1) Récupérer les données de terrain sur le couvert nival recueillies depuis dix ans par l'INRS-Eau et les mettre dans un format numérique compatible avec la base de données du Centre de documentation de CRYSYS localisé à l'Université de Waterloo.
- 2) Comparer la qualité et la stabilité radiométrique des images en mode Wide et ScanSAR de RADARSAT-1 dans le but d'extraire l'équivalent en eau du couvert nival.
- 3) Mesurer l'importance relative de différents facteurs physiques et environnementaux affectant la présence des croûtes et des lentilles de glace dans le couvert nival ainsi que les échanges énergétiques, liquides et gazeux entre le sol et l'atmosphère et développer une méthode de suivi, en milieu naturel, des stades de formation et d'évolution des croûtes et lentilles de glace sur toute la période hivernale.
- 4) Évaluer l'efficacité du radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite RADARSAT-1 pour la caractérisation et le suivi du couvert de glace des rivières du sud du Québec.

Les deux premiers objectifs ont été complétés. Le troisième objectif (travaux de thèse de Guillaume Fortin) se poursuivra durant les prochains 12 mois, avec l'analyse des résultats et la rédaction de la thèse. Le quatrième objectif se poursuivra dans le cadre de la thèse d'Ali Elbattay et le survol du Concair-580 sur la Saint-François planifié pour l'hiver 2003, permettra d'évaluer l'efficacité des capteurs RSO multipolarisations (Concair-580, ENVISAT-1, RADARSAT-2).

2. Résultats de l'objectif 1

Depuis dix ans, un ensemble assez important de données sur le couvert nival ont été recueillies par le personnel et les étudiants de l'INRS-Eau, maintenant Eau, Terre et Environnement. Ces données ont été recueillies au Québec dans les régions des Cantons de l'Est (1988-1990), de La Pocatière (1992-1994), de Nicolet (1993-1995), et de la Baie James (1994-1999). **L'objectif 1** du projet visait à récupérer ces données (existant sous forme papier, vieux format numérique). Il s'agissait de les mettre sous une forme numérique compatible avec la base de données du Centre de documentation de CRYSYS (Waterloo), de les documenter, et de les transférer à Waterloo. La construction de la base de données ACCES a débutée à l'hiver 2001 et a été complétée au début de l'automne 2002. La base a ensuite été transférée à l'Université de Waterloo et elle est maintenant intégrée à la base de données du Canadian Cryospheric Information Network. Durant l'été qui vient la base de données sera mise à jour avec les données recueillies à l'hiver 2001 et cette mise à jour sera transférée au responsable du CCIN. Une mise à jour de la base sera envoyée à chaque année par l'INRS.

3. Résultats de l'objectif 2

Suite à l'incertitude reliée aux valeurs radiométriques des images ScanSAR Wide de l'hiver 2000 pour la région de La Grande Rivière, nous avons jugé prudent de valider les valeurs radiométriques des images ScanSAR Narrow de l'hiver 2001 à partir d'images Wide, acquises lors de la même période (tableau 1).

Tableau 1 : Dates d'acquisition, à l'hiver 2000-2001, d'images RADARSAT-1

Série	Images SCN ouest	Images SCN centre	Images SCN Est	Images W1 (validation)
1	30 oct	27 oct	24 oct	3 nov
2	23 nov	20 nov	17 nov	27 nov
3	10 jan	7 jan	4 jan	14 jan
4	03 fév	31 jan	28 jan	07 fév
5	-	-	-	03 mrs
6	23 mrs	20 mrs	17 mrs	27 mrs

Les 15 images ScanSAR Narrow ont été achetées par Hydro-Québec et les six images Wide (W1) ont été fournies par l'Agence spatiale canadienne (ASC) dans le cadre du support que l'ASC accorde au programme CRYSYS. Si le signal est comparable sur les deux modes, l'incertitude sera réduite. Une telle validation n'est toutefois pas absolue, en ce sens que les deux séries de données comparées ne sont pas identiques. Le tableau 2 nous montre les différentes caractéristiques des deux modes.

Tableau 2 : Caractéristiques du mode ScanSAR Narrow et du mode Wide

Mode Radarsat-1	ScanSAR Narrow	Wide 1
Couverture	300 km X 300 km	165 km X 165 km
Résolution nominale	50 m	30 m
Dimension du Pixel	25 m	12.5 m
Nombre de faisceaux et angles d'incidence	2 W1 (20°-31°) W2 (31°-39°)	1 W1 (20°-31°)
Format d'enregistrement (résolution radiométrique)	8 bit	16 bit
Données étalonnées	Oui	Oui

Ainsi, l'on comparera des données de résolution spatiale et de résolution radiométrique différentes, ce qui peut engendrer certaines différences au niveau de la rétrodiffusion mesurée. Également, le territoire commun, couvert par les deux modes, le sera selon des angles d'incidence différents (figure 1). Enfin, chaque image en mode Wide est acquise 7 jours après l'image en mode ScanSAR Narrow, période pendant laquelle les conditions environnementales peuvent avoir changé. Néanmoins, malgré les différences entre les deux séries de données, le mode Wide peut permettre de confirmer la validité des résultats obtenus avec le mode ScanSAR Narrow.

La première comparaison sera celle du signal d'automne. On voit très bien sur la figure 2, que malgré les différences énumérées plus haut entre les séries de données ScanSAR Narrow (SCN) et Wide (W1), le signal demeure fort comparable à l'automne. Il y a un peu plus de différences à la fin octobre mais c'est normal puisque les conditions environnementales y sont plus variables entre les deux périodes d'acquisition. En novembre, la rétrodiffusion est identique.

À l'hiver, les données sont aussi très similaires. La figure 3 montre que tant au début janvier qu'au début février, les rétrodiffusions des deux modes sont comparables. Les équivalents en eau estimés à partir des deux modes devraient donc aussi être similaires. À la fin mars, les conditions de neige humide prévalant lors de l'acquisition de l'image Wide (27 mars) ont rendu la correction géométrique de l'image extrêmement difficile et les comparaisons malheureusement

impossibles. L'image Wide acquise le 3 mars a aussi été traitée mais les résultats ne sont pas discutés ici.



Figure 1 : Couverture de l'image Wide par rapport à l'image ScanSAR Narrow

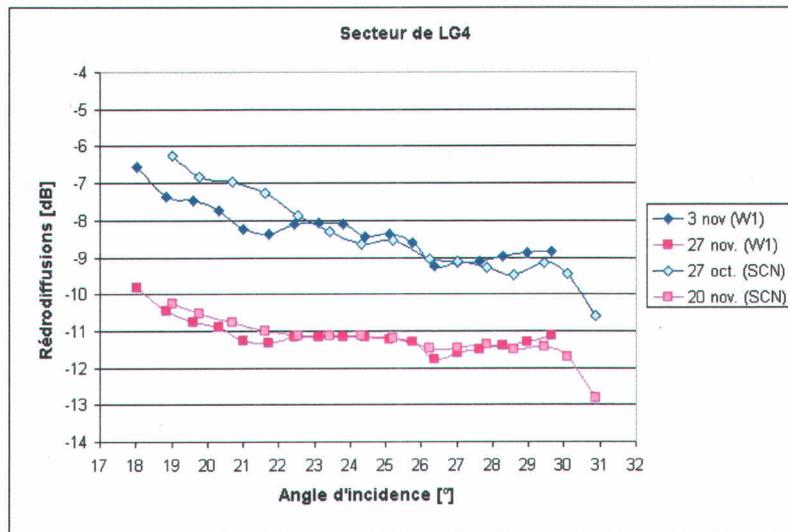


Figure 2 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) à l'automne

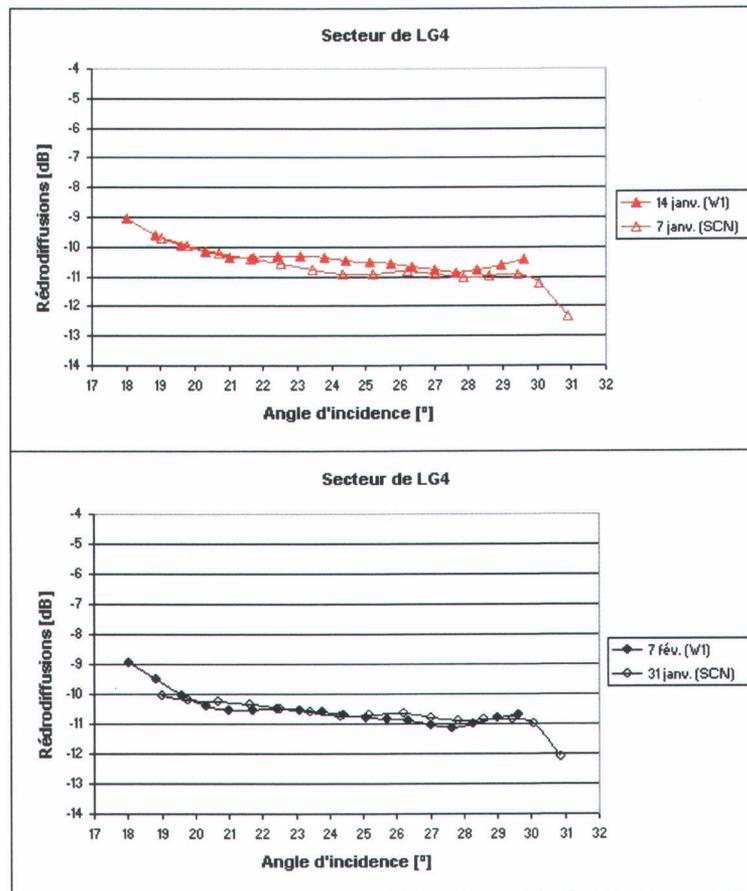


Figure 3 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) en milieu d'hiver

Selon la même méthodologie que Bernier *et al.*, les équivalents en eau ont été estimés pour les sites d'échantillonnage inclus sur l'image Wide. Les rétrodiffusions moyennes de chaque site ont été extraites sur une zone de 350m X 700m, pour les images du 27 novembre, 14 janvier et 7 février. Nous ne possédons aucune donnée de terrain et aucune image ScanSAR Narrow pour la période correspondant à l'image du 3 mars et nous n'utiliserons donc pas cette image à ce stade de la validation. Rappelons que l'image du 27 mars est également inutilisable pour cette application (neige humide). Tout comme pour le mode ScanSAR Narrow, ce sera l'image de la fin novembre qui sera utilisée comme image de référence. D'autre part, l'algorithme utilisé est le même qu'en mode ScanSAR Narrow et les densités utilisées sont celles correspondant aux trois bassins couverts par l'image Wide (LG3, LG4 et Laforge). Les seules comparaisons possibles

entre les deux modes sont donc pour les couples “7 janvier (SCN) / 14 janvier (W1)” et “31 janvier (SCN) / 7 février (W1)”.

La figure 4 compare donc les équivalents en eau mesurés aux sites d'échantillonnages, avec les équivalents en eau estimés localement pour ces même sites, et ce, dans les deux modes. On constate que l'écart entre les valeurs estimées et mesurées est similaire pour les deux modes. Rappelons que l'écart-type sur les valeurs moyennes mesurées est de 25mm en janvier. La figure 5, quant à elle, compare uniquement les équivalents en eau estimés et confirme que les deux modes donnent des résultats comparables, quoiqu'on remarque des valeurs légèrement plus élevées en mode ScanSAR Narrow. Quatre sites donnent des résultats très différents mais ils ne correspondent pas à un secteur spécifique ou à une occupation du sol particulière. Cette différence est probablement liée à des changements environnementaux d'ordre local. En résumé, pour les deux périodes possibles, l'application de l'algorithme au niveau local donne des résultats comparables dans les deux modes, avec toutefois des valeurs un peu plus faibles en mode Wide (9mm).

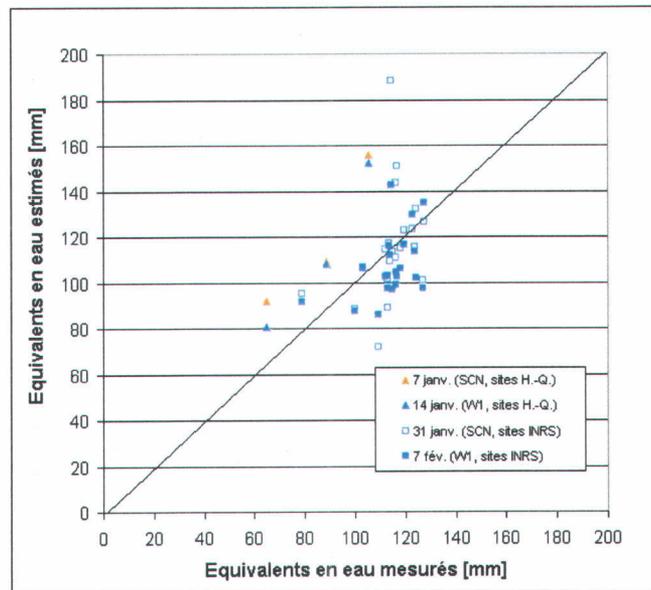


Figure 4 : Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow

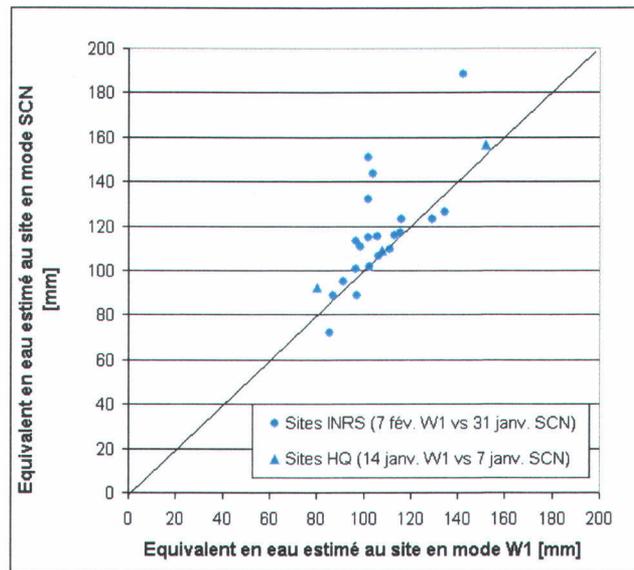


Figure 5 : Comparaison des équivalents en eau estimés aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow

EQeau a été appliqué sur les images Wide en utilisant l'image de référence du 27 novembre et les mêmes densités que lors de l'application opérationnelle sur les images ScanSAR Narrow (secteur LG4). La figure 6 présente pour le secteur commun, les cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des deux modes. Sur une telle carte où les valeurs sont regroupées en classes, on constate que les équivalents en eau sont principalement compris dans les classes <150 mm, quel que soit le mode. On remarque toutefois que sur la carte Wide, les valeurs sont souvent une classe au-dessus de la carte ScanSAR Narrow. Avec une comparaison plus détaillée de maille (500 m) à maille (500 m), la figure 7 permet de constater que les estimés du mode Wide sont effectivement plus élevés, mais d'une dizaine de millimètres seulement.

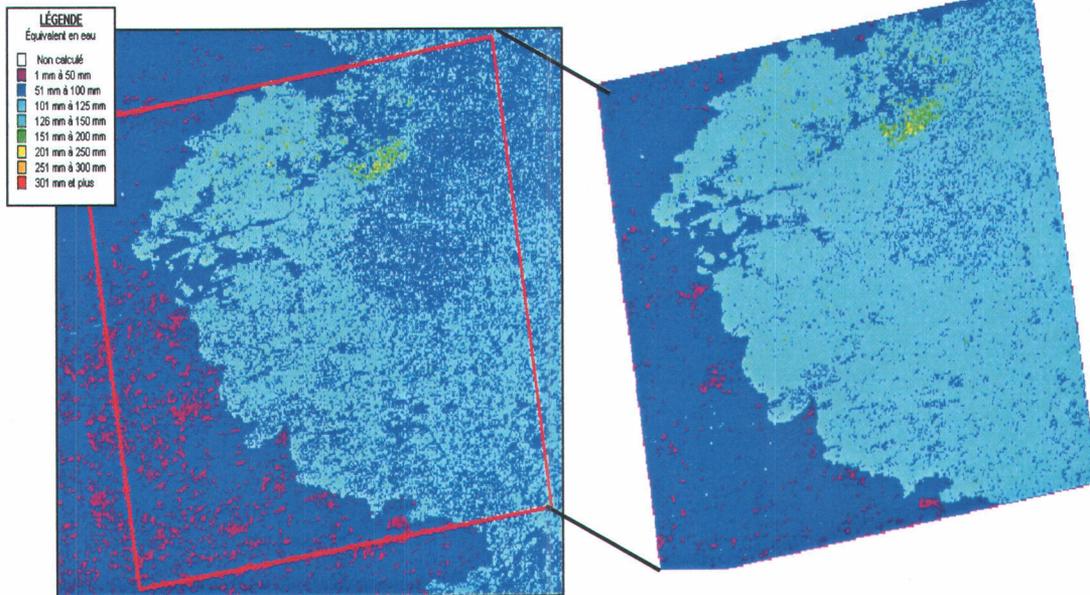


Figure 6 : Cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow (gauche) et Wide1 (droite)

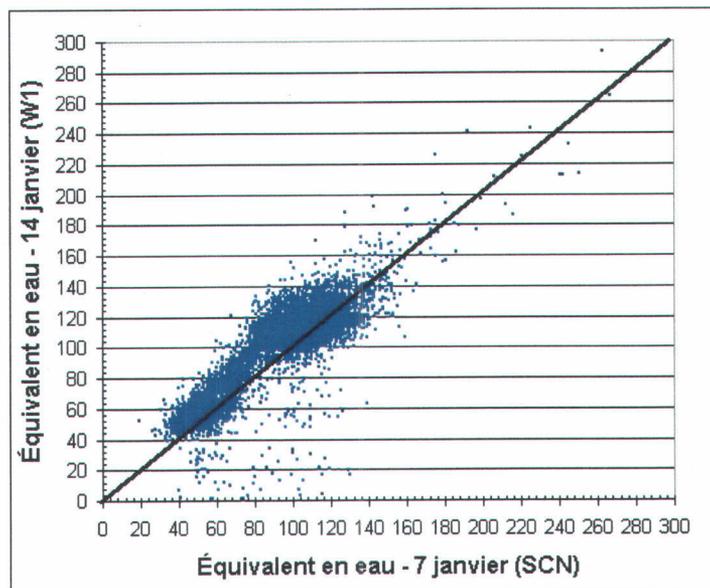


Figure 7 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1

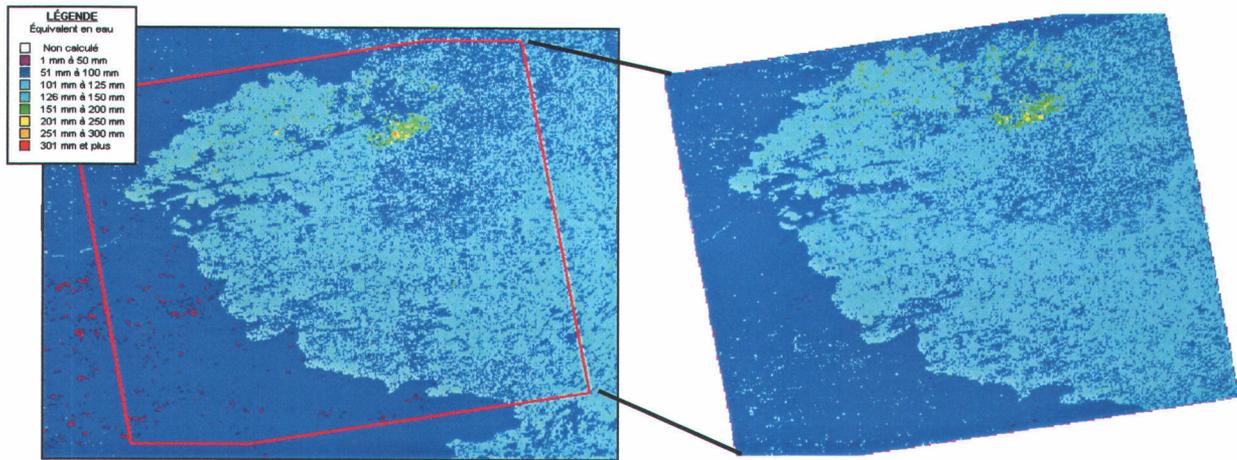


Figure 8 : Cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1

Le même exercice est repris pour les données du 31 janvier et du 7 février (figure 8). Dans ce cas, les deux modes donnent des résultats sensiblement identiques (figures 8 et 9). L'image Wide donne des résultats plus élevés de 3 mm en moyenne.

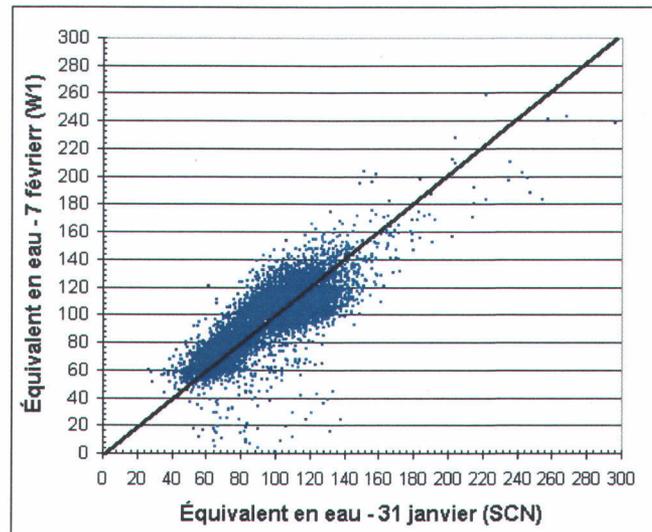


Figure 9 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1

Compte tenu des différentes caractéristiques des deux modes, les résultats obtenus avec le mode Wide concordent avec ceux obtenus du mode ScanSAR Narrow en janvier et février, ce qui donne une plus grande assurance sur la qualité radiométrique du mode ScanSAR Narrow.

En conclusion, le signal radar des images ScanSAR Narrow a été comparé avec le signal d'images Wide acquises lors de la même période. Tant en novembre qu'en hiver, les rétrodiffusions sont très similaires. Ainsi, l'application de l'algorithme pour chacun des sites d'échantillonnages donne des résultats semblables dans les deux modes, avec toutefois des valeurs un peu plus faibles en mode Wide (10 mm). En comparant les cartes produites par les deux modes, maille à maille (500m), on se rend compte que les deux modes donnent là aussi des résultats sensiblement identiques, avec une différence moyenne de 10 mm en janvier et de 3 mm en mars, à la faveur cette fois, du mode SCN. Ces résultats confirment la stabilité du système RADARSAT et la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow.

4. Résultats de l'objectif 3

L'objectif 3 est réalisé par Guillaume Fortin, étudiant inscrit au doctorat en sciences de l'eau de l'INRS-ETE, dans le cadre de sa thèse doctorale. Les deux principaux objectifs de la thèse sont :

- a) Mesurer l'importance relative de différents facteurs physiques environnementaux affectant la présence des croûtes et de lentilles de glace dans le couvert nival ainsi que les échanges énergétiques, liquides et gazeux entre le sol et l'atmosphère.
- b) Développer une méthode de suivi, en milieu naturel, des stades de formation et d'évolution des croûtes et lentilles de glace durant l'ensemble de l'hiver.

La ferme expérimentale de J.C. Chapais, d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada, située à Lévis (46°46'18"N, 71°12 '15"W) a été choisie comme site d'étude. Une station météorologique complète y a été installée par l'INRS-Eau au début de l'automne 2000 et une seconde station, réduite, y est opérée depuis quelques années par Agriculture Canada. Une première saison de cueillette de données sur les caractéristiques du couvert nival a été réalisée à l'hiver 2001.

À l'automne 2001, une technique de mesure de diffusion d'un gaz inerte (Krypton) à travers les couches de glace a été développée. Cette technique utilise des chambres de diffusion et du Krypton (figure 10). De plus, un prototype de perméamètre à air, qui était initialement conçu pour mesurer la perméabilité de la neige en 2000-2001, a été modifié pour les couches de glace (figure 11).

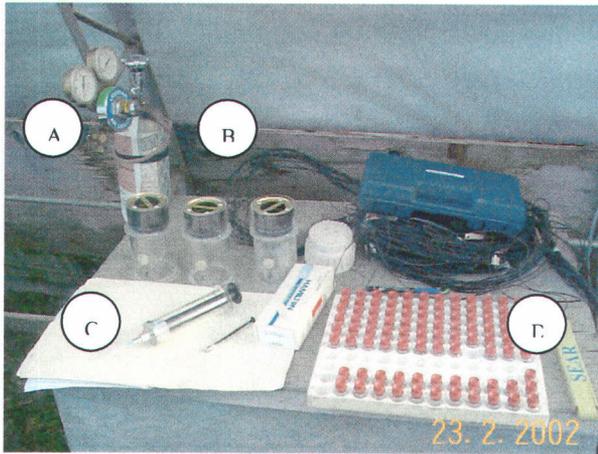


Figure 10 : Instrumentation pour mesurer la diffusion. A : Bonbonne de Krypton; B : Chambres de diffusion; C : Seringues; D : Vials

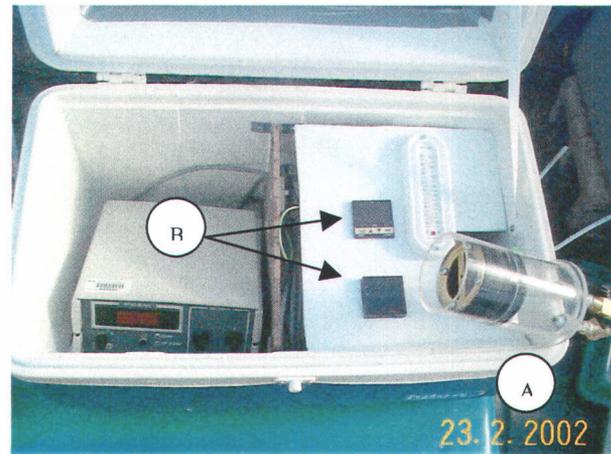


Figure 11 : Perméamètre à air. A : Échantillonneur; B : Unités de lecture digitales pour le débit, la différence de pression et la température

La diffusion d'un gaz à travers un média poreux est influencée par sa porosité et sa tortuosité, deux facteurs qui jouent également un rôle important dans la perméabilité de médias poreux tels que la neige et la glace. La méthode proposée nous a permis de mesurer la diffusion du Krypton à travers des couches de glace semi-poreuse en milieu naturel. Jusqu'à ce jour les principaux travaux effectués sur la transmission des gaz dans le couvert nival ont surtout été orientés vers la perméabilité à l'air de la neige et de la glace. Peu de relation entre la diffusion et la perméabilité de la neige et de la glace ont été réalisés.

L'instrumentation nécessaire pour appliquer notre méthode de diffusion du Krypton est relativement simple. Nous utilisons une chambre de diffusion qui est composée d'un réservoir cylindrique de Plexiglas (volume ~ 450 ml) sur lequel on ajoute un septa sur un côté du cylindre (figure 12). Un bouchon étanche, composé d'une rondelle de caoutchouc qui se compresse contre les parois lorsqu'elle est vissée, a été modifiée. Nous lui avons ajouté une rondelle de Néoprène dans laquelle nous avons laissé une ouverture (diamètre 2.5 cm) et par laquelle le gaz peut se diffuser de la chambre interne vers l'atmosphère. De plus, une autre rondelle de Néoprène est également collée à la surface de la chambre. Lors de la prise de mesures, l'échantillon de glace

est donc maintenu en place entre les deux couches de Néoprène. Une fois la couche de glace bien positionnée on injecte 45 ml de gaz par le septa (10% du volume de la chambre) à l'aide d'une seringue. Ensuite, à un intervalle régulier de 1 minute, durant 10 minutes, on prélève 1 ml de l'atmosphère de la chambre de diffusion. Cette quantité ainsi prélevée est aussitôt injectée dans un vial étanche (volume ~ 7 ml). Les vials sont ensuite amenés au laboratoire pour le dosage du Krypton. À partir des mesures obtenues, pour chaque réplique, nous pourrions par la suite calculer le gradient de diffusion du Krypton (Germon, 1980).

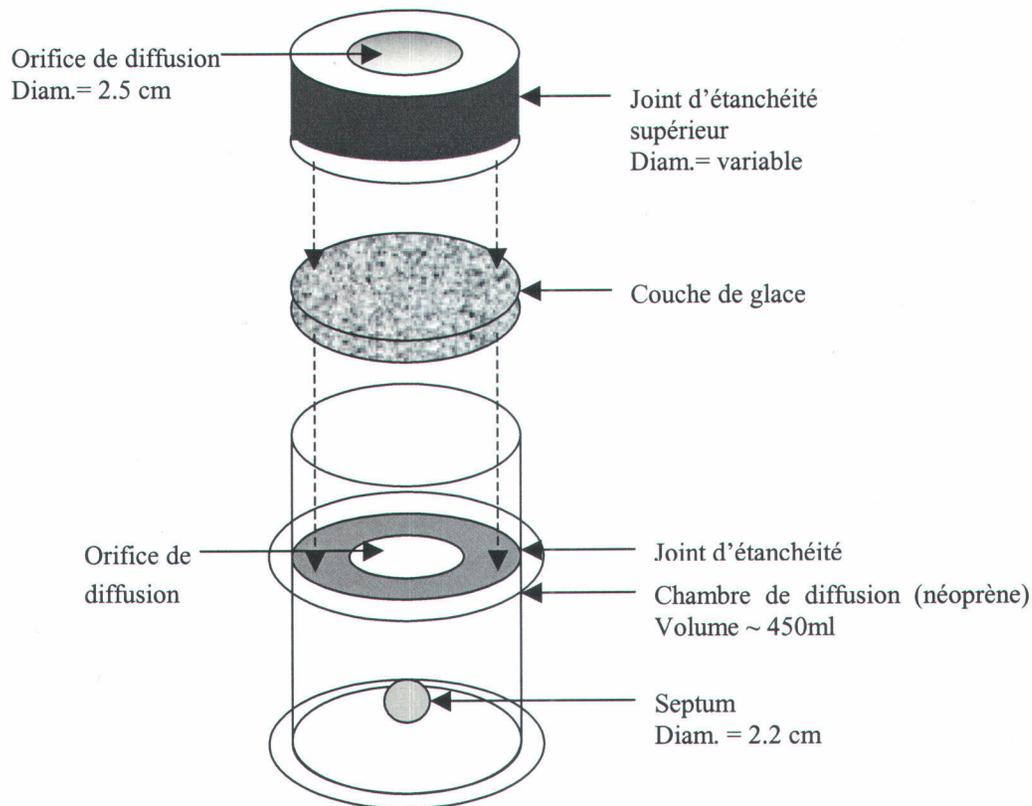


Figure 12 : Schéma d'une chambre de diffusion pour le Kr dans la glace

En complément aux mesures de diffusion des mesures de perméabilité ont été réalisées. La perméabilité intrinsèque d'un médium poreux se définit comme étant la capacité d'un fluide à passer au travers du médium en fonction uniquement du médium, indépendamment du fluide

(Albert and Hardy, 1993). La perméabilité intrinsèque (k_0), m^2 , est calculée grâce à la loi de Darcy (1) (Friedman and Sanders, 1978 in Sommerfeld and Rocchio, 1993):

$$K_0 = Q/A(\Delta P/L \mu_f) \quad (1)$$

où Q est le flux volumétrique (m^3/s), A est la surface transversale (m^2), ΔP est le gradient de pression (Pa/m) sur une distance L (m) et μ_f est la viscosité dynamique du fluide (kg/m/s) dans des conditions déterminées. La loi de Darcy peut être appliquée pour mesurer la perméabilité à l'air de la neige et de la glace lorsque le nombre de Reynolds est faible (<5) et en l'absence de convection. Le perméamètre permet de mesurer le gradient de pression ($\Delta P/L$) et de mesurer le flux volumétrique (Q). Le gradient de pression est mesuré à l'aide de différentiels de pression (*pressure transducer*). Le flux volumétrique peut être mesuré à l'aide d'un débitmètre ou débitmètre de masse (*flowmeter ou mass flowmeter*) ou estimé en fonction de la température du gaz (air), de la pression du réservoir et de la pression atmosphérique corrigée en fonction de l'altitude (Conway and Abrahamson, 1984).

Le modèle que nous avons construit est semblable à celui utilisé par Chacho and Johnson (1987) et Hardy and Albert (1993) (Figure 13). Une pompe à vide (Modèle DOA-V191-AA, Gast a unit of IDEX Corporation, MI) sert à aspirer l'air au travers de l'échantillon de glace. Pour contrôler le débit de l'air nous utilisons des valves de contrôles de débit manuelles. L'instrument comprend aussi un débitmètre de masse (modèle 765, Omega Instruments Inc, Indiana) qui sert à mesurer le débit de l'air pour une échelle variant entre 0 et 200 SCCM avec une précision de $\pm 0.1\%$. Un différentiel de pression (modèle 646-0, Dwyer Instruments Inc, Indiana) sert à mesurer la pression pour une échelle de $\pm 0.5'' H_2O$ avec une précision de $\pm 0.5\%$. Une unité de contrôle digitale (modèle Series16A2130, Dwyer Instruments Inc, Indiana) est utilisée pour faire la lecture des données de pression. De simples valves d'entrée et de sortie sont utilisées pour permettre de mesurer la différence de pression entre la chambre interne et l'atmosphère.

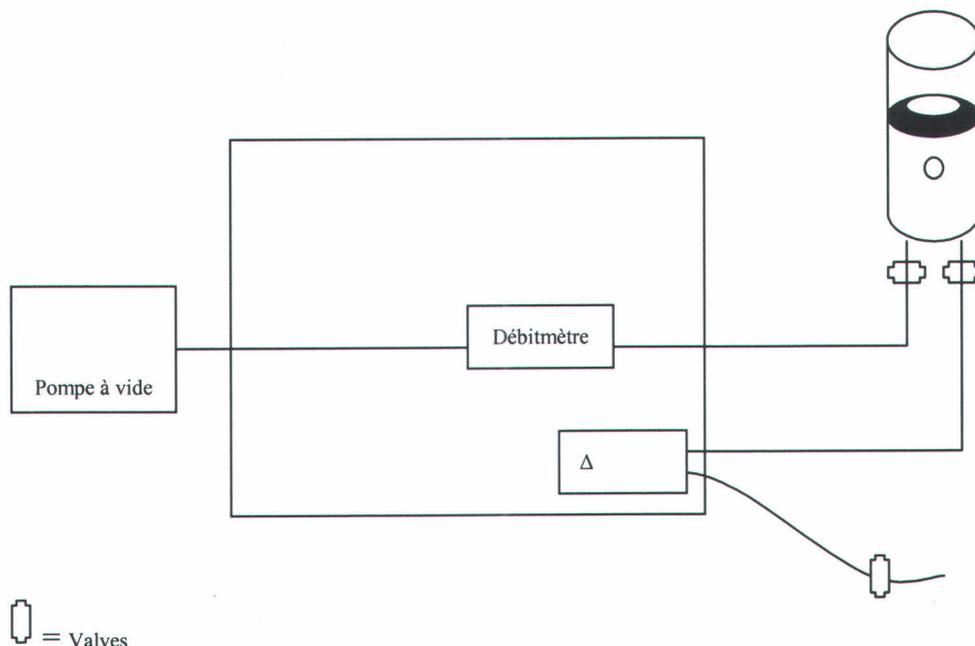


Figure 13 : Schéma du perméamètre à air.

Les mesures prises durant l'hiver 2001-2002 semblent comparables à certaines valeurs publiées dans la littérature. Les analyses subséquentes permettront une meilleure validation de nos résultats.

Durant la saison hivernale 2001-2002, plusieurs données *in situ* ont été recueillies et informatisées entre la mi-janvier et la mi-avril : suivi régulier de la formation des croûtes et de l'évolution du couvert nival (fosses, reconstruction des événements), perméabilité et diffusion des couches de glace, microstructure des couches, hauteur et densité des couches, température de la neige et du sol, distribution spatiale du couvert nival (lignes de neige). La fréquence d'échantillonnage a été hebdomadaire (par paramètre) lors de la période froide et quotidienne durant la période de fonte.

La première étape d'acquisition des données sur le terrain a consisté à réaliser trois lignes de neige. Ces lignes sont marquées par des poteaux installés à tous les 10 mètres afin que des mesures systématiques de l'épaisseur totale (tige graduée) et de l'équivalent en eau de la neige (carottier de type Adirondack) soient prises.

Deuxièmement, des profils stratigraphiques ont été faits selon la méthode utilisée par Goodison *et al.* 1981; Pomeroy and Gray, 1995 (Figure 14). Il s'agit d'une méthode destructive et ponctuelle qui fournit de l'information sur les différentes propriétés physiques des couches de neige. Les différentes mesures acquises grâce à cette technique sont principalement : l'épaisseur des couches de neige et de glace (cm), la dimension (mm) et la forme des grains (C.I.), la densité (kg/m^3), la dureté (N) et la teneur en eau liquide (% par volume). L'épaisseur des couches de neige et de glace (cm) est déterminée à l'œil. Pour mesurer la densité des couches de neige à tous les 5 cm, on prend un échantillon de neige avec une petite pelle rectangulaire de 100 ml puis on pèse l'échantillon avec une balance (IASH/UNESCO/WMO, 1970 ; Pomeroy and Gray, 1995). La dureté de chacune des couches est mesurée avec un indice de dureté des doigts tel que décrit dans la Classification Internationale de la Neige au Sol (Colbeck *et al.*, 1990). Pour mesurer la teneur en eau liquide nous avons utilisé une sonde de capacitance (Denoth, A., University of Innsbruck, Institut for Experimental Physics, Physics of Snow and Ice, Austria). Cette sonde est insérée horizontalement dans les couches de neige afin de mesurer la constante diélectrique. Grâce à la constante diélectrique et à la densité de la couche il est ensuite possible de calculer la teneur en eau de la neige. Les profils permettent d'effectuer un suivi de l'historique des conditions de neige et des couches de glace dans le temps et dans l'espace.

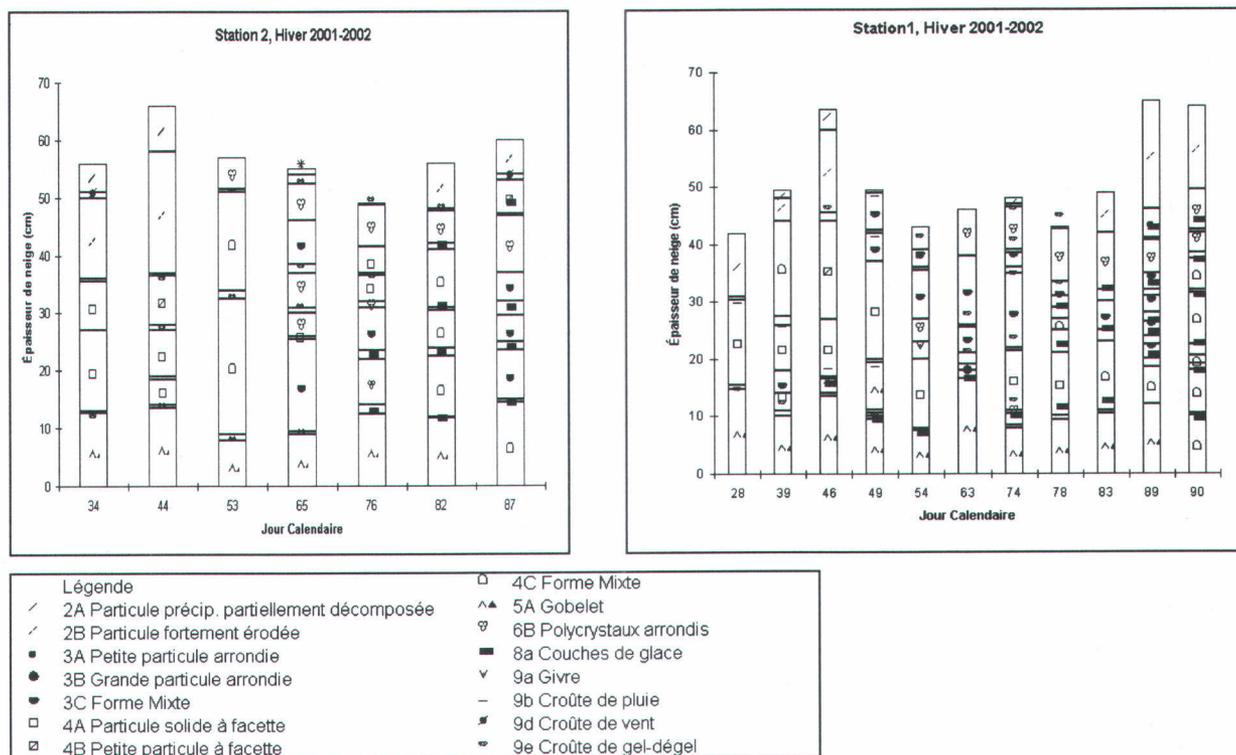


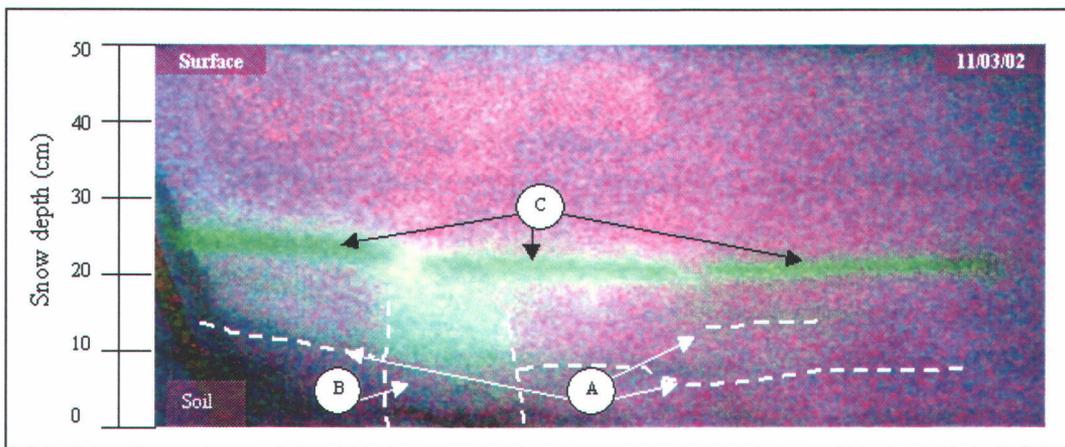
Figure 14 : Profils stratigraphiques pour les stations 1 et 2 durant l'hiver 2001-2002.

Finale­ment, nous avons aussi utilisé un traceur fluorescent pour créer des couches de glace artificielles et pour en faire le suivi en milieu naturel par la suite. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, ils feront d'ailleurs l'objet d'une publication (voir plus bas dans la section activités prévues). Voici le résumé de l'article :

The evolution of artificial ice layers in a natural snow cover was studied during the winter 2001-2002 at the J.-C. Chapais Experimental Farm of Agriculture and Agri-food Canada (46°46'18"N, 71°12 '15"W near Quebec city, P.Q., Canada). The artificial ice layers (surface area, 20x20 cm ; thickness, 0.7 cm, 1.3 cm and 2 cm) were made from distilled water containing a fluorescent tracer (Tinopal CBS-X, direct fluorescence for wavelength from λ_{Ex} : 350 nm to λ_{Em} : 430 nm, concentration : 1 g l⁻¹). The choice of ice thicknesses was based on natural ice layers that were observed during the previous winter of 2000-2001. Artificial ice layers were placed on the snow surface during a snowfall event to ensure that all the layers were well

integrated within the snowpack structure. Fourteen different sets (each set containing one layer of each thickness) were set out in mid-winter and the evolution of the ice layers observed every 3-4 days up to the final spring thaw. An ultraviolet lamp and a digital camera were used at night-time to record ice morphometry and tracer loss. The images show the changes in ice-layer thickness due to freeze-thaw cycles and the downward migration of the tracer during the experimental period.

La figure 15 montre un exemple de l'utilisation du traceur durant la période froide.



**Figure 15 : A = three initial artificial ice layers; B = Natural ice layers
Containing tracer created by water infiltration and refreeze; C = Ice column located at the junction
of two artificial layers**

Conjointement à la prise de photos des données descriptives de chaque profil étaient réalisées. La synthèse de ces informations clés (température et teneur en eau) nous a permis de déterminer comment les couches de glace artificielles évoluaient dans le temps (figure 16).

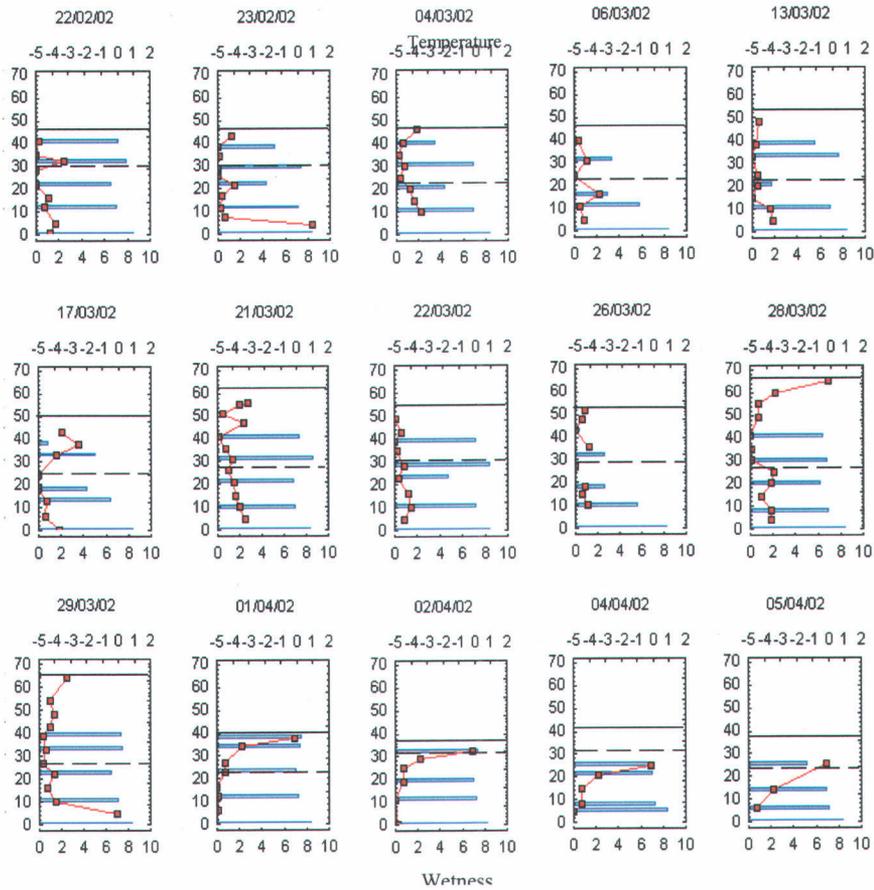


Figure 16 : Profils de teneur en eau et de température. Les lignes pleines au dessus de chaque graphique correspondent à la surface du couvert et les lignes pointillées à la hauteur moyenne à laquelle les couches de glace artificielles étaient situées.

5. Résultats de l'objectif 4

Durant les hivers 2000-2001 et 2001-2002, une série temporelle d'images RADARSAT de la rivière Saint-François (sud du Québec) a été acquise en mode fin, de préférence sous de forts angles d'incidence (39° - 45°), tel que recommandé par Leconte et Klassen (1991). Ces images ont été acquises dans le cadre des programmes ADRO-2 (13 images) et DRU (4 images) de l'Agence Spatiale Canadienne (tableau 3). La planification des acquisitions a été établie en fonction des dates charnières dans l'évolution du couvert de glace de la rivière et du cycle du satellite. Des problèmes techniques et des conflits d'acquisitions nous ont souvent obligés à modifier cette planification. Le choix de la rivière ainsi que celui des dates charnières ont été effectués en collaboration avec le Ministère de la Sécurité Publique du Québec. À chacune des acquisitions, une série d'observations détaillées sur la glace ont été effectuées à différents sites d'échantillonnage. Au début de février, des mesures de l'épaisseur de la glace ont aussi été prises (l'épaisseur maximal était de 36 cm). Le 19 mars 2002, un survol de la rivière en hélicoptère a aussi été réalisé afin de visionner les sites d'embâcles, malheureusement le mince couvert de glace avait fondue dans les dernières 48 heures. Comme le montre le tableau 3, l'hiver 2002 a été si doux que la glace n'a jamais couvert entièrement le chenal de la rivière.

Toutes les images RADARSAT ont été orthoréférenciées à l'aide d'un MNA au 1: 20 000. Toutes les données disponibles sur la rivière ont aussi également colligées. Des traitements d'images préliminaires (rehaussements, évolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion de la glace, analyse des paramètres de texture) ont été utilisées pour tenter de faire ressortir l'information sur les différents stades de la glace (Figure 17). L'analyse se poursuivra dans les deux prochaines années afin d'identifier les caractéristiques de la glace effectivement détectées par le radar. Les résultats seront évalués en regard des variables nécessaires aux modèles de prévision des embâcles (production d'indices de sensibilité aux embâcles pour des sections homogènes de la rivière). Ce modèle sera intégré dans un SIG avec différentes données sur la largeur et la pente des biefs, la bathymétrie, le nombre de tributaires, la localisation des barrages

et des ponts, l'historique des événements,... Dans les prochains mois, dans le cadre de la préparation de son examen doctoral, l'étudiant (Ali Elbattay) définira les variables nécessaires à de tels modèles de prévision et l'information pouvant être extraite des images radar.

Tableau 3 : Images RADARSAT en mode Fin acquises sur le segment aval de la rivière Saint-François dans le cadre des programmes ADRO-2 et DRU.

Dates d'acquisition	Mode	Conditions de la glace	Dates d'acquisition	Mode	Conditions de la glace
24 nov. 2000	F5-Des	eau libre	06 janv. 2002	F5-Des	Couvert partiel
26 nov. 2000	F5-Asc	eau libre	30 janv. 2002	F5-Des	Couvert partiel
18 déc. 2000	F5-Des	Englacement	4 mars 2002	F3N	Couvert partiel
11 jan. 2001	F5-Des	Couvert complet	19 mars 2002	F5-Des	eau libre
28 fév. 2001	F5-Des	Couvert complet			
16 mars 2001	F1-Asc	Couvert complet			
17 mars 2001	F3-Des	Couvert complet			
24 mars 2001	F5-Des	Neige humide			
26 mars 2001	F5-Acs	Neige humide			
9 avril 2001	F1-Asc	Couvert partiel			
10 avril 2001	F3-Des	Couvert partiel			
17 avril 2001	F5-Des	eau libre			
19 avril 2001	F5-Asc	eau libre			

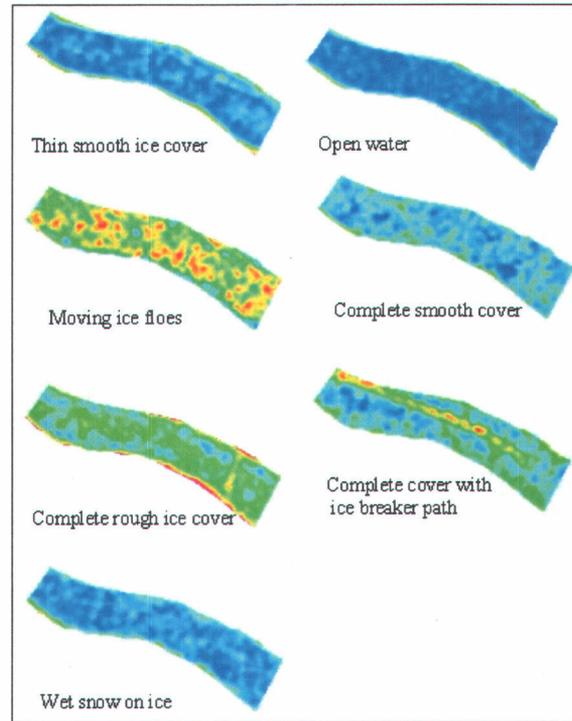


Figure 17 : Distribution spatiale du paramètre de texture "MEAN" pour le site #6

Publications récentes découlant des activités financées par CRYSYS

a) Article accepté dans des revues avec comité de lecture (ART)

LAGACÉ, C* et BERNIER, M. (2002). Développement d'une approche pour le suivi du gel saisonnier à partir de l'utilisation conjointe d'images RADARSAT et d'images SSM/I. Revue de Télédétection (sous presse).

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

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

d) Conférences avec arbitrage (COF)

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, Tromso, 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.

e) 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.

f) Rapports de recherche

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 no R491, 77 pages.

g) Thèses et mémoires

EL BATAY 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.

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.

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..

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.