

***Implantation d'EQueau sur l'ensemble du
bassin de la rivière La Grande à l'hiver 2000***

Rapport de recherche No 568-f

22 décembre 2000

EQeau

**Implantation d'EQueau sur l'ensemble du bassin
de la rivière La Grande à l'hiver 2000**

Rapport final préparé pour

**Prévisions et Ressources Hydriques,
Hydro-Québec**

**Par
Monique Bernier
Yves Gauthier**

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

Rapport d'étape No 568-f1

22 décembre 2000

Copyright
ISBN

INRS-Eau, 2000
2-89146-457-7

À notre ami Raymond...

L'ÉQUIPE DE R&D:

Monique Bernier, professeure en télédétection

Yves Gauthier, agent de recherche en télédétection et géomatique

Jean-Pierre Fortin, professeur en hydrologie

Ramata Magagi, stagiaire postdoctorale

Alain Royer, technicien en informatique

Marie-Claude Bouchard, stagiaire 2^{ème} cycle

Rebecca Fillion, stagiaire 1^{er} cycle

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ANNEXES	xi
SOMMAIRE	xiii
1 INTRODUCTION	1
2 VALIDATION DE LA MÉTHODE EQeau SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN DE LA RIVIÈRE LA GRANDE	5
2.1 CARTOGRAPHIE DES ÉQUIVALENTS EN EAU À L'HIVER 2000.....	5
2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS DE L'HIVER 2000.....	9
2.2.1 <i>Vérification de l'hypothèse 1 : Un hiver plus doux?</i>	10
2.2.2 <i>Vérification de l'hypothèse 2 : Des coefficients modifiés?</i>	14
3 VÉRIFICATION DE L'APPLICABILITÉ DE L'ALGORITHME POUR LES BASSINS PLUS FORESTIERS AU SUD DE LG4.....	19
3.1 MÉCANISMES D'INTERACTION DES ONDES RADAR AVEC LA VÉGÉTATION ET LE SOL	20
3.2 MODÉLISATION DE L'INTERACTION DES ONDES RADAR AVEC L'ÉPINETTE NOIRE, LE SOL ET LA NEIGE.....	21
3.3 ANALYSE DE LA RÉTRODIFFUSION EN FORÊT BORÉALE.....	29
4 SUPPORT AU PERSONNEL D'HYDRO-QUÉBEC POUR LA PRÉPARATION DES ACQUISITIONS RADARSAT DE L'HIVER 2000-2001	33
4.1 LOCALISATION ET TYPE D'IMAGES.....	33
4.2 PÉRIODES D'ACQUISITION	36
4.3 CAMPAGNES DE TERRAIN.....	37
4.4 MODIFICATION D'EQEAU	39
5 CONCLUSION	41
6 RÉFÉRENCES	45
ANNEXE	47

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DES ORBITES SCANSAR DE L'HIVER 2000	6
FIGURE 2 : COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MESURES ET ESTIMATIONS DE L'ÉQUIVALENT EN EAU	8
FIGURE 3 : RELATION ENTRE LE RAPPORT DE RÉTRODIFFUSION DES IMAGES RADARSAT ET LA RÉSISTANCE THERMIQUE DU COUVERT DE NEIGE POUR L'HIVER 2000 (♦, •, +), COMPARÉE À LA RELATION UTILISÉE DANS EQUATION (—)	10
FIGURE 4 : CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES MOYENNES DES QUATRE DERNIERS HIVERS.	11
FIGURE 5 : PROFILS DU COUVERT DE NEIGE AU SITE #2 . LES DEUX PREMIERS CORRESPONDENT AUX PROFILS DE JANVIER ET DE MARS 1999, LE TROISIÈME ET LE QUATRIÈME À CEUX DE JANVIER ET DE MARS 2000.....	13
FIGURE 6 : VARIATION TEMPORELLE DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LES IMAGES DE L'HIVER 2000	14
FIGURE 7 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION DES IMAGES DE L'ORBITE #3746	15
FIGURE 8 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION DES IMAGES DE L'ORBITE #3151	16
FIGURE 9 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION DES IMAGES DE L'ORBITE #3773	17
FIGURE 10 : OCCUPATION DU SOL DU NORD DU QUÉBEC	19
FIGURE 11 : MÉCANISMES D'INTERACTION DE L'ONDE RADAR AVEC LA VÉGÉTATION ET LE SOL	21
FIGURE 12 : VARIATION TEMPORELLE DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION (σ_x^0) EN MODE S1 (A) ET S7 (B)	24
FIGURE 13 : VARIATION EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES DU SIGNAL DE RÉTRODIFFUSION D'UNE FORÊT OUVERTE: TOTAL, DE SURFACE (SOL OU NEIGE HUMIDE), DE LA VÉGÉTATION ET L'INTERACTION ENTRE LA VÉGÉTATION ET LE SOL. LE GRAPHIQUE DE GAUCHE, CORRESPOND À DES CONDITIONS D'OCTOBRE, CELUI DU CENTRE À CELLES DE JANVIER ET CELUI DE DROITE, À CELLES D'AVRIL (NEIGE HUMIDE:7%).....	25
FIGURE 14: VARIATION EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES DU SIGNAL DE RÉTRODIFFUSION D'UNE FORÊT DE TAÏGA MATURE: TOTAL, DE SURFACE (SOL OU NEIGE HUMIDE), DE LA VÉGÉTATION ET L'INTERACTION ENTRE LA VÉGÉTATION ET LE SOL. LE GRAPHIQUE DE GAUCHE, CORRESPOND À DES CONDITIONS D'OCTOBRE, CELUI DU CENTRE À CELLES DE JANVIER ET CELUI DE DROITE, À CELLES D'AVRIL (NEIGE HUMIDE: 7%).	26
FIGURE 15 : VARIATION DU SIGNAL DE RÉTRODIFFUSION TOTAL ET DE CELUI DU SOL EN FONCTION DE LA DENSITÉ DES PEUPELEMENTS FORESTIERS MATURES À UN ANGLE D'INCIDENCE DE 45 DEGRÉS, À L'AUTOMNE,	27
FIGURE 16 : A) IMAGE SCANSAR REHAUSSÉE DU 2 FÉVRIER 2000,.....	28
FIGURE 17 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION SELON LA DATE.....	30
FIGURE 18 : VARIATION DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION SELON L'OCCUPATION DU SOL.....	30
FIGURE 19 : VARIATION DU RAPPORT DE RÉTRODIFFUSION SELON L'OCCUPATION DU SOL.....	31
FIGURE 20 : COUVERTURE DES IMAGES SCANSAR NARROW	34

FIGURE 21 : COUVERTURE DE L'IMAGE W1 DE VALIDATION	35
FIGURE 22 : QUESTIONNAIRE D'OBSERVATION DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES.....	39

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : IMAGES RADARSAT ÉTALONNÉES DE TYPE SCANSAR WIDE (SCWA) ACQUISES À L'HIVER 1999-2000	6
TABLEAU 2 : PARAMÈTRES D'ENTRÉE POUR L'APPLICATION D'EQUEAU DU 30 JANVIER 2000	8
TABLEAU 3 : INDICES CUMULÉS À LA DATE DES ACQUISITIONS D'IMAGES DE L'HIVER 2000	12
TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DES MODES SCANSAR.....	33
TABLEAU 5 : PÉRIODES D'ACQUISITION POSSIBLES DE L'HIVER 2000-2001	36
TABLEAU 6 : PLANIFICATION DES RELEVÉS DE TERRAIN.....	37
TABLEAU 7 : PARAMÈTRES D'ENTRÉE POUR L'APPLICATION D'EQUEAU DU 2 FÉVRIER 2000	40

SOMMAIRE

Le projet pilote *EQeau* a démontré l'efficacité de l'approche RADARSAT sur la moitié amont du bassin de la Rivière La Grande et les capacités opérationnelles du prototype *EQeau*. Dès juin 1999, nous recommandions à Hydro-Québec d'utiliser dans leurs opérations courantes, des images ScanSAR afin d'estimer l'équivalent en eau des vastes sous-bassins de la rivière La Grande. À l'automne de la même année, le *Service de Prévisions et Ressource hydriques* a commandé l'acquisition d'images RADARSAT pour cartographier l'équivalent en eau de la neige sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande à l'hiver 2000.

Neuf images ScanSAR Wide (500 X 500 km) ont donc été achetées par Hydro-Québec. Ces images provenaient de deux orbites différentes afin de couvrir l'ensemble du bassin de rivière La Grande et des bassins avoisinants. Pour le secteur est bassin, cinq images ont été acquises les 19 novembre 1999 (image de référence) 6 et 30 janvier, 23 février et 18 mars 2000. Pour le secteur ouest, trois images ont été acquises les 22 novembre (image de référence), 2 février et 21 mars 2000. Une neuvième image d'une troisième orbite a aussi été acquise le 1^{er} mars en réponse aux besoins opérationnels. Deux campagnes de terrain ont été réalisées, l'une du 31 janvier au 3 février, l'autre du 20 au 23 mars.

À l'hiver 2000, la détermination de l'équivalent en eau du couvert nival de la région de La Grande a été marquée par plusieurs nouveautés. Pour la première fois, l'analyse des images RADARSAT par le logiciel *EQeau* s'est faite en mode opérationnel. Aussi, plusieurs images ScanSAR ont été acquises au cours du même hiver ce qui nous a permis d'évaluer la stabilité du signal et la qualité radiométrique des images. De plus, le secteur cartographié était quatre fois plus étendu que celui des années passées, donc plus diversifié du point de vue de l'occupation du sol et de la densité de la neige. Finalement, nous avons des données au sol que pour trois des sept images hivernales.

Les résultats de l'application d'*EQeau* sur l'ensemble des images ScanSAR acquises à l'hiver 2000 a été discuté, en détail, dans le rapport d'étape du 30 juin. On a pu constater que ces images surestimaient l'équivalent en eau au sol. Deux causes expliqueraient ce biais systématique. D'une part, les conditions environnementales lors de l'acquisition des images de référence n'étaient pas optimales; le sol était encore dégelé et il y avait déjà une quarantaine de centimètres de neige au sol. D'autre part, des modifications auraient été apportées dans la production des images à la station de réception à Gatineau afin de réduire les artefacts entre les limites des quatre faisceaux des images ScanSAR Wide. Toutefois, ce processus aurait changé la dynamique du signal (radiométrie des images) ce qui nuit à la performance de l'algorithme *EQeau* développé antérieurement à ce changement.

Suite à ces résultats, il est évident que de nouvelles images de référence ScanSAR devaient être prises à l'automne 2000. Afin de pallier au problème de représentativité de l'image de références, deux séries d'images de référence ont été acquises, l'une à la fin d'octobre, l'autre la troisième semaine de novembre. Nous avons aussi proposé une solution de compromis, le mode ScanSAR Narrow (SCN) qui utilise seulement deux faisceaux (20 à 40 degrés) mais couvre tout de même une grande superficie (300 X 300 km). De plus, afin de valider la qualité radiométrique de ces dernières, des images en mode Wide (W1) ont aussi été acquises.

Parallèlement, une modélisation de l'interaction du signal radar avec les peuplements d'épinettes noires, le sol et la neige a été réalisée. Elle a mené à quelques conclusions pratiques pour le suivi opérationnel du couvert nival sur le bassin de la rivière La Grande : 1) Le faisceau S7, sensible à la densité de la forêt, n'est pas recommandable pour l'application d'EQueau. 2) Durant l'hiver, la végétation des forêts peu denses (<25%) ne perturbe pas le signal radar, quelque soit l'angle d'incidence (20 à 49 degrés). 3) Lorsque la densité de la forêt est plus importante (> 40%), le signal radar perd de sa sensibilité aux propriétés du sol, même aux faibles angles d'incidence. 4) L'influence de la densité de la forêt diminue lorsqu'on utilise des images de référence où le sol est gelé. 5) L'augmentation de contraste entre les milieux ouverts et les milieux fermés notée sur les images de printemps s'explique par une augmentation de l'interaction des arbres avec la surface de neige humide, ce qui se traduit par une augmentation du signal total en fonction de la densité de la forêt. Cette augmentation de contraste permet donc de détecter le début de la fonte.

Pour les bassins plus forestiers du Sud, il a été noté que les coefficients de rétrodiffusion moyens sont les plus élevés parce que la forêt est plus dense (40 à 60%). Toutefois, on a remarqué que la signature de la forêt boréale suivait le même patron temporel que les occupations du sol de la taïga (forêt ouverte, tourbières, sol nu). Ces variations temporelles sont normalement causées par les variations des propriétés diélectriques du sol et de la végétation ou de l'instabilité de la calibration des images. Sur cette série d'images d'hiver, il semblerait que la contribution du sol dominerait encore celle de la végétation, même en forêt boréale. Quant aux rapports de rétrodiffusion moyens, celui des forêts boréales restent plus élevés, ce qui signifie qu'il y aurait plus de neige au sol dans ces secteurs plus au sud. L'algorithme EQueau pourrait peut-être s'appliquer sur certains bassins de la forêt boréale.

Finalement, l'algorithme d'EQueau fonctionne pour les bassins moins enneigés à l'ouest de celui de LG4. A l'hiver 2000, les meilleurs résultats ont d'ailleurs été obtenus sur l'orbite de l'ouest (LG2-LG3). Néanmoins, l'interface d'EQueau a été améliorée afin de tenir compte, à l'avenir, de la disparité régionale des densités du couvert nival.

1 INTRODUCTION

Le but du projet « *EQeau* » est de permettre au Service Prévisions et Ressources hydriques d'Hydro-Québec d'utiliser de façon opérationnelle une méthode d'estimation de l'équivalent en eau de la neige à l'aide de l'imagerie RADARSAT.

Les objectifs généraux du projet EQeau sont:

1. Démontrer l'exploitabilité des données de télédétection (RADARSAT et LANDSAT) pour l'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival et l'efficacité du *prototype EQeau* en combinaison avec les méthodes actuelles de relevés sur le terrain.
2. Par rapport aux méthodes actuelles d'estimation, évaluer l'accroissement de la précision (réduction de l'incertitude sur l'écart-type de la mesure) de l'estimation de la quantité d'eau stockée sur le territoire, que permet l'utilisation des données RADARSAT.
3. Mettre en évidence les avantages économiques et stratégiques que procurent l'implantation d'une telle méthode (retour sur l'investissement) et sa commercialisation internationale.

En 1999, le projet pilote « *EQeau* » avait démontré 1) l'efficacité de l'approche RADARSAT sur la moitié amont du bassin de la rivière La Grande et 2) les capacités opérationnelles du logiciel *EQeau*. Des images en mode Wide (165 km X 165 km) avaient été utilisées pour faire la démonstration pré-opérationnelle de l'approche RADARSAT. Les valeurs des cartes d'équivalent en eau produites par le logiciel *EQeau* avaient une bonne concordance avec les équivalents en eau mesurés au sol (rapport d'étape du 31 mars 1999). Des images ScanSAR (500 km X 500 km) avaient aussi été acquises et analysées. Les cartes d'équivalents en eau résultantes avaient généralement une bonne concordance avec les cartes issues des images Wide et les équivalents en eau mesurés au sol. En janvier, l'équivalent en eau moyen pour les trois sous-bassins est similaire (différences de moins de 5%) aux valeurs obtenues avec les images Wide. Au début de mars, les

différences entre les valeurs moyennes sont inférieures à 8%. Les estimations fournies par EQueau avaient été intégrées avec succès au système de prévision des apports d'Hydro-Québec. Les images ScanSAR semblaient donc bien appropriées à la détermination de l'équivalent en eau des sous-bassins de la rivière La Grande sur une base opérationnelle (rapport d'étape du 30 juin 1999).

Dans la foulée de ces résultats, les objectifs spécifiques pour l'année 2000 étaient :

1. Poursuivre la validation opérationnelle d'EQueau sur les sous-bassins LG4, Laforge et Caniapiscau;
2. Cartographier l'équivalent en eau de la neige au sol sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande;
3. Vérifier l'applicabilité d'EQueau sur les bassins moins enneigés à l'ouest de celui de LG4;
4. Vérifier l'applicabilité d'EQueau sur les bassins forestiers au sud de celui de LG4.

À l'automne 1999, le *Service de Prévisions et Ressource hydriques* a donc commandé des images RADARSAT pour cartographier l'équivalent en eau de la neige sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande à l'hiver 2000. Huit images ScanSAR (500 km X 500 km) ont été initialement achetées par Hydro-Québec. Ces images provenaient de deux orbites relatives différentes afin de couvrir l'ensemble du bassin de la rivière La Grande et une partie des bassins situés au sud. Puisque le territoire d'application d'EQueau à l'hiver 2000, couvrait une superficie trois fois plus grande que la superficie cartographiée à l'hiver 1999, 15 images TM du satellite américain Landsat-5 (acquises entre 1995 et 1999) ont aussi été achetées par Hydro-Québec pour cartographier l'occupation du sol. Ces images ont été géométriquement corrigées, classifiées et une mosaïque Landsat de l'occupation du sol a été créée. Ce travail a été réalisé conjointement par l'INRS-Eau et VIASAT.

À l'hiver 2000, les images RADARSAT en mode ScanSAR acquises en novembre 1999 et durant les mois de janvier, février et mars 2000 ont été traitées par VIASAT d'après la procédure opérationnelle établit antérieurement. Dès la réception des images, VIASAT a effectué le traitement radiométrique et géométrique des images RADARSAT afin de produire les matrices d'entrée pour le logiciel *EQeau*. Ces images ont ensuite été transmises à Hydro-Québec et à l'INRS-Eau pour analyse par *EQeau* et production des cartes d'équivalents en eau. Ces activités correspondent au volet opérationnel du projet.

De plus, l'INRS-Eau a réalisée le volet *R&D* du projet. Ce rapport final décrit les principales activités de R&D réalisées cette année et constitue le principal livrable attendu au 31 décembre 2000. Ce rapport contient quatre volets :

- Participation aux cueillettes de données lors des deux campagnes de terrain, informatisation et analyse des données recueillies au sol; production des cartes d'équivalents en eau à l'aide du logiciel *EQeau* et des images RADARSAT, évaluation de la performance de l'algorithme et de la performance de la méthode dans un contexte opérationnel. (Chapitre 2).
- Vérification de l'applicabilité de l'algorithme pour les bassins plus forestiers au sud de LG4, d'où l'on passe de la forêt de taïga à la forêt boréale (Chapitre 3).
- Support au personnel d'Hydro-Québec pour la préparation des acquisitions RADARSAT pour l'hiver 2001; modification mineure des modules de calcul d'*EQeau*; récupération ou déplacement des diverses sondes installées sur le territoire LG4/Brisay (Chapitre 4).
- Présentation des résultats de l'implantation d'*EQeau* sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande au colloque *Remote Sensing and Hydrology* qui se tenait à Santa Fe, du 2 au 7 avril 2000 (Annexe 1).

2 VALIDATION DE LA MÉTHODE EQeau SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN DE LA RIVIÈRE LA GRANDE

Ce chapitre reprend les grandes lignes du rapport d'étape de juin 2000 et démontre que:

1. Les équivalents en eau estimés à partir des images ScanSAR Wide de l'hiver 2000 sont systématiquement surestimés;
2. Les conditions prévalant lors de l'acquisition des images d'automne 1999 (sol dégelé, 40 cm de neige) n'étaient pas optimales pour des images de référence;
3. La dynamique du signal (radiométrie) des images ScanSAR Wide 2000 diffère de celles de l'hiver 1999 et ne correspond plus aux algorithmes développés antérieurement.

2.1 Cartographie des équivalents en eau à l'hiver 2000

Suite aux excellents résultats du projet de démonstration *EQeau*, obtenus avec l'utilisation des images RADARSAT étalonnées de type ScanSAR Wide de l'hiver 1999 (Bernier *et al.*, 1999) et aux bons résultats obtenus avec l'utilisation des images RADARSAT non-étalonnées de type ScanSAR Wide de l'hiver 1998 (Bernier *et al.*, 1999a), il avait été convenu d'utiliser à nouveau les images ScanSAR à l'hiver 2000 pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige dans un cadre opérationnel. Le tableau 1 énumère la liste des images acquises par Hydro-Québec.

Afin de couvrir l'ensemble du bassin de la rivière La Grande, des acquisitions ont été planifiées sur deux orbites ScanSAR (#3746 et #3151). Une troisième (#3773) s'est ajoutée en cours d'hiver dans le but de ré-utiliser l'image de référence de l'automne 1998. La Figure 1 présente la localisation des images acquises.

Tableau 1 : Images RADARSAT étalonnées de type ScanSAR Wide (SCWA) acquises à l'hiver 1999-2000

Faisceau	Date	Heure GMT	Orbite	Mode	Centre d'image approximatif
SCWA	19 novembre 1999	22:31:40	#3746	ASC	53° 05' 39" N 71° 34' 16" W
SCWA	22 novembre 1999	22:43:30	#3151	ASC	52° 41' 57" N 74° 35' 40" W
SCWA	6 janvier 2000	22:31:40	#3746	ASC	53° 05' 39" N 71° 34' 16" W
SCWA	30 janvier 2000	22:31:40	#3746	ASC	53° 05' 39" N 71° 34' 16" W
SCWA	2 février 2000	22:43:30	#3151	ASC	52° 41' 57" N 74° 35' 40" W
SCWA	23 février 2000	22:31:40	#3746	ASC	53° 05' 39" N 71° 34' 16" W
SCWA	1 ^{er} mars 2000	22 :28 :27	#3773	ASC	53° 30' 00" N 70° 30' 00" W
SCWA	18 mars 2000	22:31:40	#3746	ASC	53° 05' 39" N 71° 34' 16" W
SCWA	21 mars 2000	22:43:30	#3151	ASC	52° 41' 57" N 74° 35' 40" W

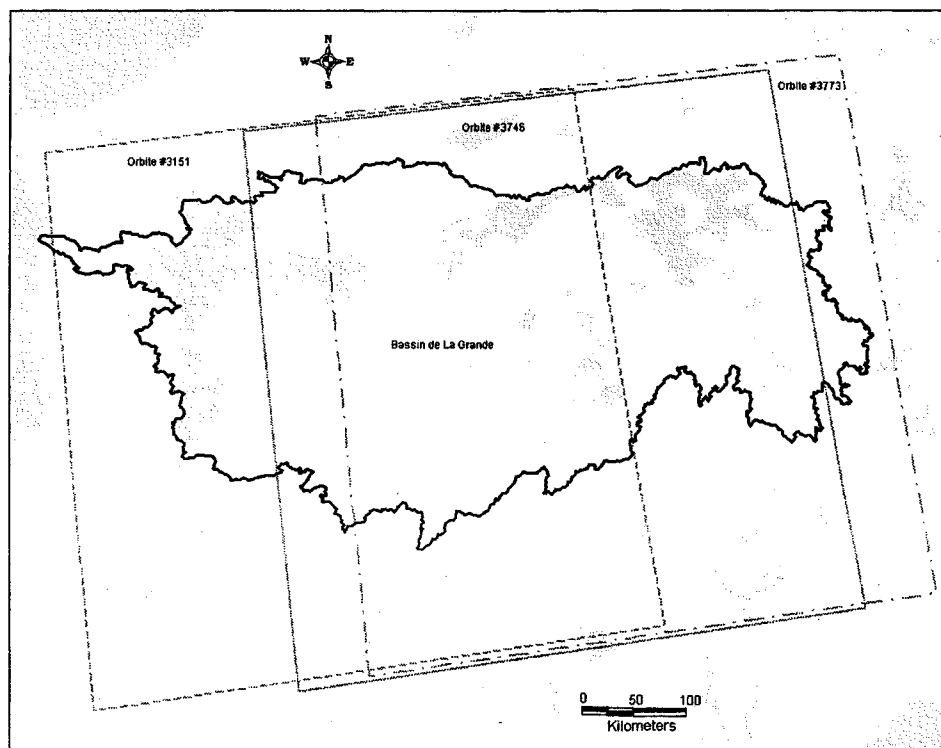


Figure 1 : Localisation des orbites ScanSAR de l'hiver 2000

Les neuf images ScanSAR de l'hiver 1999-2000 ont été traitées de façon identique aux images ScanSAR des deux hivers précédents (Bernier *et al.*, 1999). Après avoir transformé les valeurs brutes en valeurs d'intensités (puissances), les images ont été corrigées géométriquement à partir du logiciel OrthoEngine (PCI) par VIASAT Géo-technologie. Par la suite, les valeurs des images sont transformées en décibels (dB) et les images sont exportées en format brut (raw), afin d'être utilisées par le logiciel *EQeau*, lequel produit les cartes d'équivalents en eau.

Les informations qui doivent être fournies à *EQeau* sont les suivantes (Gauthier et Marais, 1999):

- Images d'hiver à traiter: Les sept images acquises entre le 6 janvier et le 21 mars 2000 et décrites au tableau 1.
- Image de référence: L'image du 19 novembre 1999 a été utilisée comme image de référence pour l'orbite #3746 et l'image du 22 novembre 1999 a été utilisée pour l'orbite #3141. L'image du 7 novembre 1998 a été réutilisée pour l'orbite #3773 .
- Densité moyenne de la neige: La densité moyenne de la neige permet de relier la résistance thermique apparente du couvert de neige issue des images, à l'équivalent en eau. Lorsque des mesures de terrain sont disponibles, ces valeurs sont utilisées. Sinon, une valeur historique ou simulée peut être utilisée.
- Occupation du sol: L'occupation du sol permet d'allouer des valeurs de densité de neige pour chaque occupation du sol et d'exclure les plans d'eau pour l'application de l'algorithme. L'occupation du sol utilisée est celle produite conjointement par VIASAT et l'INRS-Eau, à l'automne 1999, à partir d'une mosaïque de 20 images Landsat-TM (acquises entre 1995 et 1999).
- Algorithme: L'opérateur d'*EQeau* a le choix entre deux algorithmes. L'un est adapté aux conditions habituellement froides de milieu d'hiver et l'autre, aux conditions généralement plus douces de fin d'hiver.

Le tableau 2 donne comme exemple, les paramètres d'entrée pour l'application d'*EQeau* à l'image du 18 mars 2000. *EQeau* a ensuite été appliqué à l'échelle du pixel de l'image (50m) et la carte résultante a été ré-échantillonnée à une maille de 500m. Les cartes résultantes pour

l'ensemble des sept images de l'hiver 2000 ainsi que les estimés de la moyenne des équivalents en eau par sous-bassin se retrouvent dans le rapport d'étape du 30 juin 2000 (Bernier *et al*, 2000).

Tableau 2 : Paramètres d'entrée pour l'application d'EQueau du 30 janvier 2000

Image de l'hiver 2000	Image de référence	Algorithme	Occupation du sol	Densités de neige utilisées [kg/m ³]
30 janvier	19 nov. 1999	fin d'hiver	Forêts	223
			Forêts ouvertes	241
			Landes, Tourbières	251
			Brûlis, Sols nus	261

La figure 2 présente le bilan des estimations d'équivalents en eau et des mesures au sol pour l'hiver 2000. Cette figure confirme que les équivalents en eau fournis par *EQueau* sont généralement surestimés par rapport à l'information disponible sur les conditions au sol (lignes de neige, hauteur de neige donnée par la station météorologique du site #2). La section 2.3 se penche sur les causes possibles de cette surestimation.

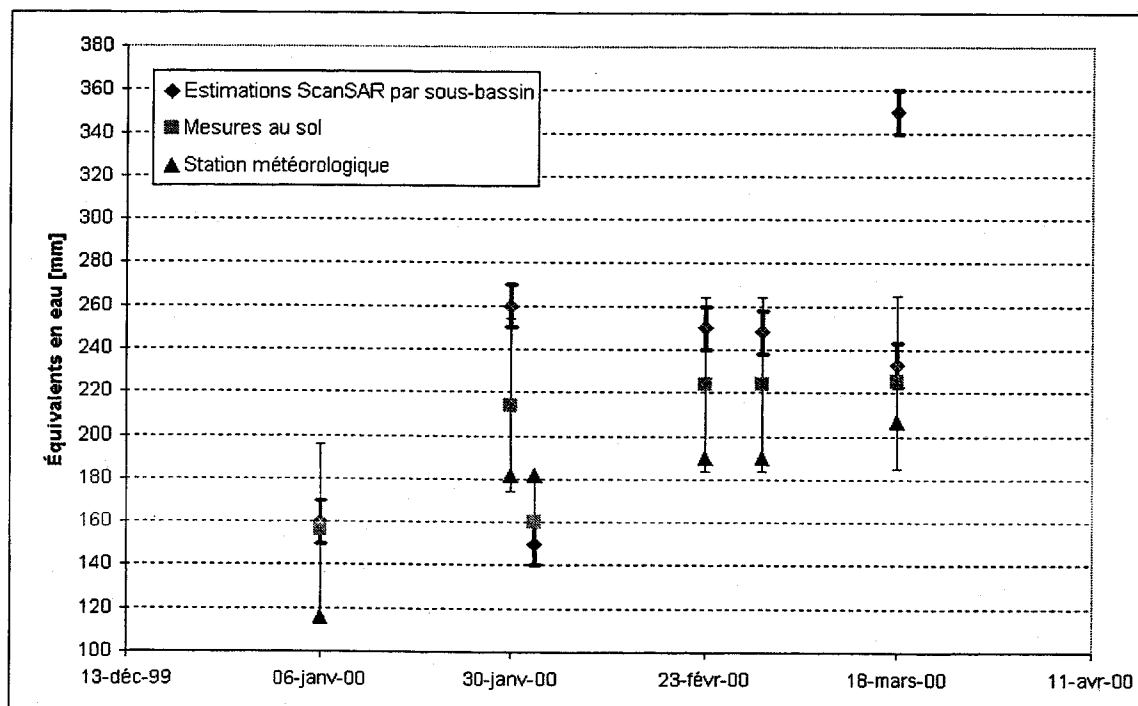


Figure 2 : Comparaison des différentes mesures et estimations de l'équivalent en eau

2.2 Analyse des résultats de l'hiver 2000

À la base de l'algorithme de calcul des équivalents en eau par EQeau, il y a la relation empirique entre le rapport de rétrodiffusion des images RADARSAT et la résistance thermique du couvert de neige, telle qu'établie au cours des dernières années. Pour expliquer ce qui a pu affecter les résultats de l'hiver 2000, il faut d'abord valider la relation entre ces deux paramètres.

La résistance thermique du couvert de neige fût mesurée sur plusieurs sites d'échantillonnage lors des campagnes de terrain INRS-HQ du 31 janvier au 3 février et du 20 au 23 mars 2000. Les rapports de rétrodiffusion moyens de ces mêmes sites ont été extraits des images de neige sèche correspondant aux dates des campagnes de terrain (30 janvier, 2 février et 18 mars). Rappelons que les rapports de rétrodiffusion sont calculés en soustrayant les intensités en décibels d'une image d'hiver et les intensités en décibels d'une image de référence (automne). La figure 3 montre la relation précédemment établie entre les deux paramètres concernés, sur laquelle on a ajouté les valeurs de l'hiver 2000. De façon évidente, les valeurs de l'hiver 2000 ne correspondent pas du tout à ce qui a été observé au cours des dernières années. En utilisant l'algorithme actuel d'EQeau, les rapports de rétrodiffusion calculés à partir des images de l'hiver 2000 se traduisent par des résistances thermiques estimées nettement supérieures aux mesures de terrain, ce qui explique les équivalents en eau surestimés présentés à la figure 2. Deux causes sont envisagées.

Hypothèse 1.

En admettant que les mesures de terrain soient fiables, il se peut qu'en raison d'un automne et d'un hiver plus doux jumelé à une chute de neige précoce, l'impact de la résistance thermique du couvert de neige sur la température et la profondeur de gel du sol soit différent de celui observé lors des années précédentes. Autrement dit, pour une même résistance thermique, on aurait cette année, un sol moins froid et gelé moins profondément qu'à l'habitude, d'où de plus fortes valeurs de rétrodiffusion.

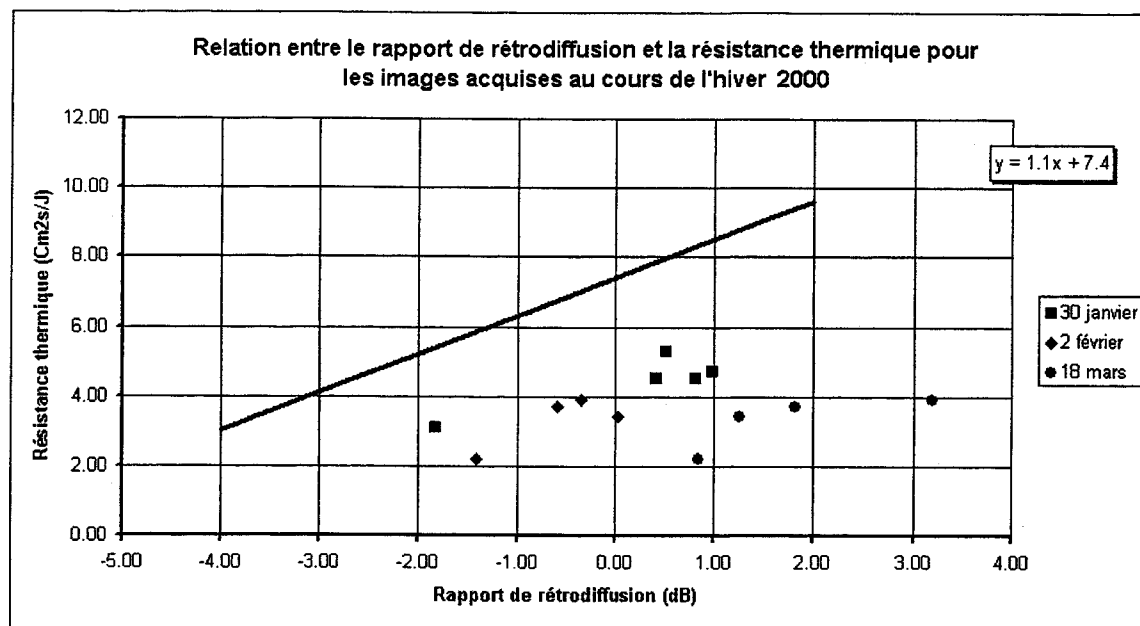


Figure 3 : Relation entre le rapport de rétrodiffusion des images RADARSAT et la résistance thermique du couvert de neige pour l'hiver 2000 (◆, ●, +), comparée à la relation utilisée dans EQueau (—).

Hypothèse 2.

Les rapports de rétrodiffusion calculés sont nuls ou nettement positifs parce que l'une ou les deux images utilisées dans les calculs comportent des valeurs ne correspondant plus aux propriétés physiques du sol. Autrement dit, l'échelle des intensités radar sur les images ScanSAR a été modifiée depuis le développement de l'algorithme.

2.2.1 Vérification de l'hypothèse 1 : Un hiver plus doux?

Afin de vérifier si l'hiver 2000 était significativement différent des hivers précédents, nous disposons des données de trois stations météorologiques installées dans le secteur LG4-LA1 depuis décembre 1996. Toutefois, en raison de problèmes techniques, certaines données sont manquantes. Malgré tout, il a été possible d'établir un portrait général des conditions environnementales de ce secteur pour les hivers 1996-1997, 1997-1998, 1998-1999 et 1999-2000. Les paramètres considérés sont : température de l'air (min, moy, max), température moyenne à la surface du sol et épaisseur de neige moyenne. La figure 3 montre qu'à l'échelle du mois, les

températures de l'air à l'hiver 1999-2000 sont comparables à celles de 1998-1999 pour les mois de décembre et janvier. Par la suite, l'hiver 2000 est légèrement plus froid. Nous ne disposons toutefois pas de données pour les mois d'octobre à décembre 1999, ce qui nous aurait permis de voir le régime thermique de l'automne. Au niveau de l'épaisseur de neige, les mois de décembre 1999 et 2000 sont comparables mais il y a ensuite significativement moins de neige en 2000. Enfin, la température à la surface du sol semble un peu moins froide en 2000. À première vue, l'hiver 2000 n'est donc pas particulièrement doux, ni très différent des hivers précédents. Par contre, il nous manque des données pour la période octobre-décembre, qui peut être critique au niveau du régime thermique du sol. Des observateurs confirment toutefois que les 19 et 22 novembre, le sol n'est pas gelé et qu'il y a environ 40 cm de neige au sol entre LG4 et Caniapiscau. C'est d'ailleurs pour vérifier si les conditions particulières de l'automne 1999 pouvaient être à l'origine des résultats obtenus en janvier 2000 que l'image du 1^{er} mars 2000 a été acquise. Celle-ci est sur la même orbite que les images de l'hiver 1999 et nous pouvions ainsi utiliser l'image de référence du 7 novembre 1998. Les résultats n'ont toutefois pas été concluants, pour des raisons que nous évoquerons à la section 2.22. Il demeure que si l'image de référence de 1999 n'est pas acquise dans des conditions similaires à l'automne 1998, cela peut influencer sur la performance de l'algorithme.

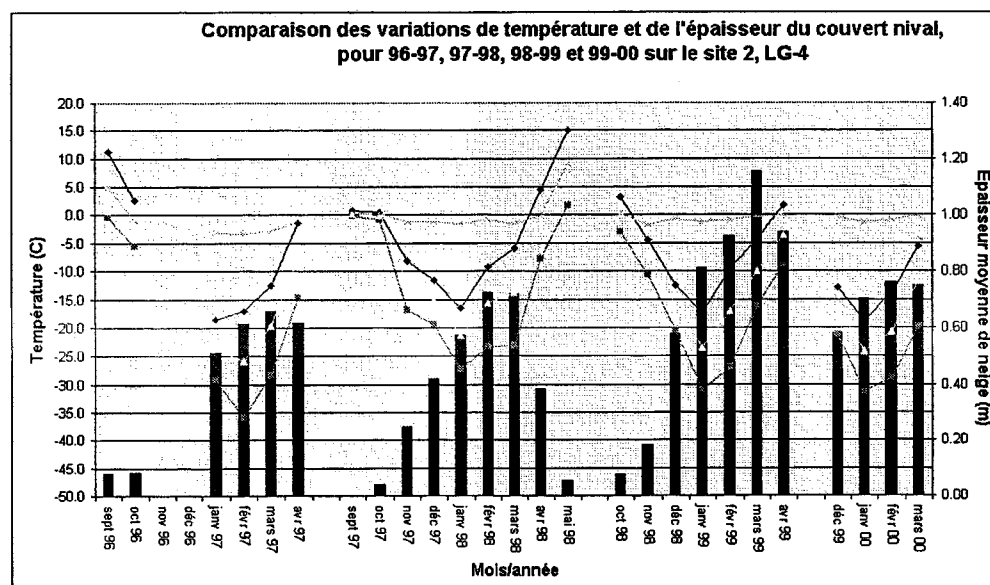


Figure 4 : Conditions environnementales moyennes des quatre derniers hivers.

Pour avoir une meilleure idée des différences entre les hivers 1997 à 2000, nous avons calculé un indice cumulé de la température de l'air, de la température à la surface du sol et de l'épaisseur de neige, de la mi-décembre à la fin mars, aucune donnée n'étant disponible en octobre et novembre 1999. Au tableau 3, nous présentons la valeur de ces indices, au moment de chaque acquisition d'image de l'hiver 2000.

Tableau 3 : Indices cumulés à la date des acquisitions d'images de l'hiver 2000

	1996-1997			1997-1998			1998-1999			1999-2000		
	Tmoy	T 0cm	Neige	Tmoy	T 0cm	Neige	Tmoy	T 0cm	Neige	Tmoy	T 0cm	Neige
06-janv	-406	-89	11	-421	-33	12	-398	-24	16	-369	-15	15
30-janv	-820	-156	24	-777	-69	26	-837	-48	36	-824	-48	32
02-févr	-876	-166	25	-813	-71	28	-867	-51	39	-854	-51	34
23-févr	-1243	-238	38	-1054	-92	43	-1112	-66	58	-865	-53	50
01-mars	-1259	-239	42	-1075	-94	48	-1141	-68	64	-880	-55	56
18-mars	-1609	-311	53	-1188	-110	60	-1274	-80	84	-1376	-78	68

Pour l'indice de température de l'air (Tmoy), on remarque que pour un 6 janvier, c'est en 2000 qu'il est le plus haut. Donc la période du 13 décembre 1999 au 6 janvier 2000 est un peu plus douce que les années précédentes. Par rapport à 1999, l'indice 2000 demeure légèrement plus haut en janvier et février mais devient plus bas, en mars. C'est donc un hiver qui démarra doucement mais qui s'étira plus longtemps. Au niveau de l'épaisseur de neige, l'indice est plus élevé en 1999 et en 2000 qu'en 1997 et en 1998. Pour un 6 janvier, les indices 1999 et 2000 sont similaires mais par la suite, l'indice 1999 est toujours plus élevé. Ce qui signifie qu'en 2000, la neige est tombée tôt, mais qu'il y a eu peu de chutes de neige par la suite. Donc, la combinaison d'un début d'hiver plus doux et d'une chute de neige précoce fait qu'au 6 janvier 2000, l'indice de température à la surface du sol (T 0cm) est le plus haut des dernières années. Par contre, au 30 janvier, l'indice 2000 est comparable à l'hiver 1999. En résumé, l'hiver 2000 est assez semblable à l'hiver 1999, mais significativement plus doux que les hivers 1997 et 1998. Toutefois, si l'algorithme a bien fonctionné auparavant, il n'y a pas d'indications sérieuses que les conditions de l'hiver 2000 soient différentes au point de donner des résultats erronés. Il demeure tout de même possible qu'en raison d'un automne plus doux, la profondeur du gel soit plus faible en 2000 et que cela puisse affecter les résultats. Une dernière comparaison possible entre les hivers de 1999 et 2000 peut se faire à partir des profils du couvert effectués sur le terrain. La figure 5 montre que pour les années 1999 et 2000, la stratification du couvert est similaire, à l'exception

de mars 2000, où l'on détecte les effets de périodes plus chaudes, soit de la neige humide près de la surface et de la neige transformée par la fonte dans le bas du profil.

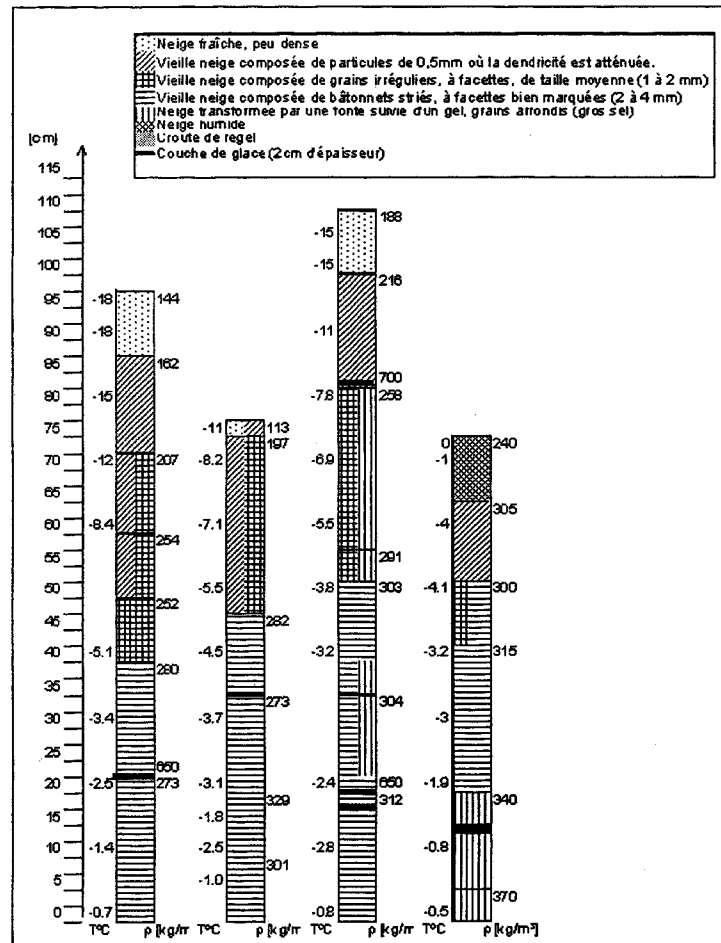


Figure 5 : Profils du couvert de neige au site #2 . Les deux premiers correspondent aux profils de janvier et de mars 1999, le troisième et le quatrième à ceux de janvier et de mars 2000.

2.2.2 Vérification de l'hypothèse 2 : Des coefficients modifiés?

La théorie sous-jacente à EQueau suppose que les coefficients de rétrodiffusion en janvier sont bas parce que le temps froid sévit et que le couvert de neige est faible. Il en résulte un sol très froid et des coefficients de rétrodiffusion plus faibles. À mesure que le couvert de neige augmente, le sol gelé se réchauffe et les coefficients de rétrodiffusion augmentent. On devrait donc observer une certaine variation temporelle du signal radar entre les différentes images acquises au cours de l'hiver, comme ce fût le cas en 1999 (Bernier *et al.*, 1999). La figure 6 démontre toutefois que dans le cas des images de l'hiver 2000, les coefficients de rétrodiffusion extraits des sites d'échantillonnage sont demeurés similaires de novembre à février. Quelques différences sont visibles mais aucun patron significatif ne se dessine. Ce n'est que le 18 mars que l'on observe une hausse d'un à deux dB des coefficients de rétrodiffusion. Cette hausse est d'ailleurs étrange puisque rien, dans les conditions environnementales, ne laisse présager une telle variation par rapport au 23 février.

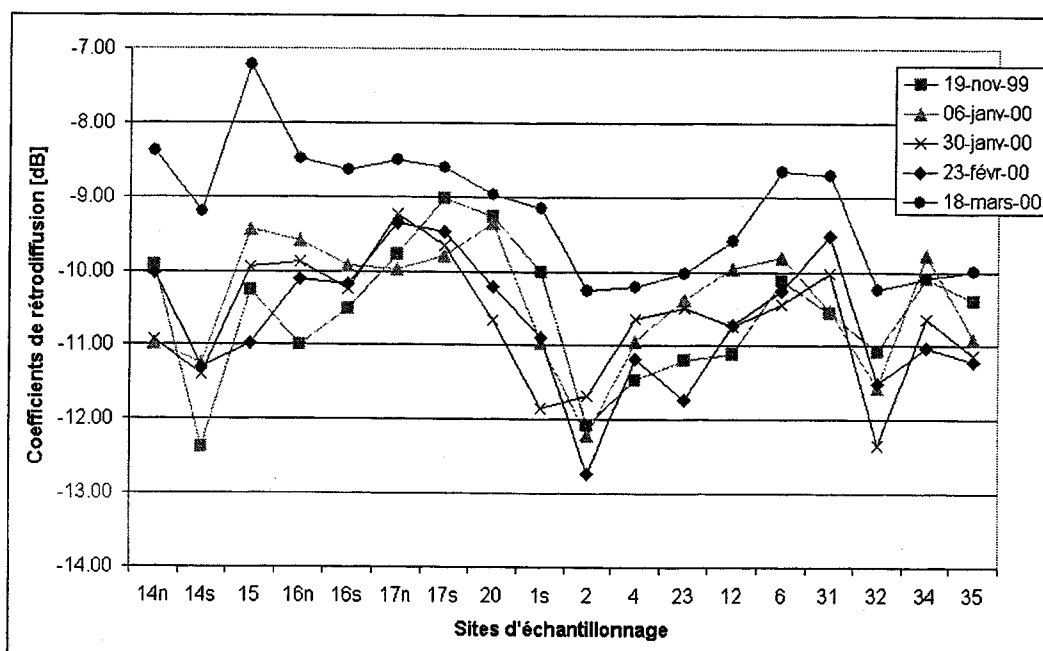


Figure 6 : Variation temporelle des coefficients de rétrodiffusion des sites d'échantillonnage sur les images de l'hiver 2000

Afin d'investiguer plus en détails le comportement des coefficient de rétrodiffusion, nous avons séparé chaque image en 30 bandes verticales d'environ 400 pixels de large chacune. Pour chaque bande, nous avons calculé la rétrodiffusion moyenne, obtenant ainsi un profil intégré verticalement du signal de rétrodiffusion d'une image, en fonction de l'angle d'incidence. La figure 7 présente les profils obtenus sur les 5 images de l'orbite #3746. Le comportement du signal en fonction de l'angle d'incidence y est identique pour chaque image. Ainsi, en calculant un rapport de rétrodiffusion entre deux images, on atténuera cet effet de l'angle d'incidence. Par contre, les coefficients du 18 mars sont de façon presque constante, 1.3 dB plus élevés que toutes les autres dates.

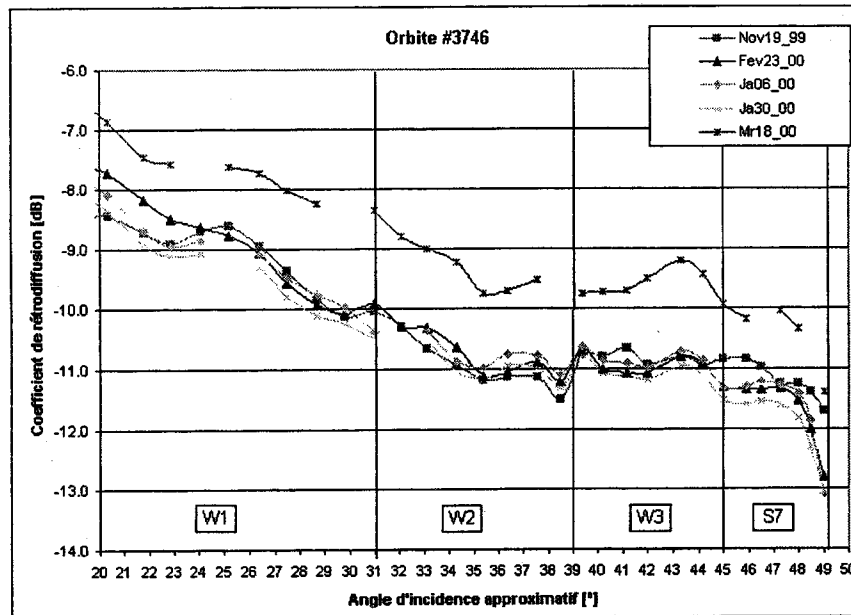


Figure 7 : Variation des coefficients de rétrodiffusion des images de l'orbite #3746 en fonction de l'angle d'incidence

Et si l'on fait abstraction du 18 mars, ce qui est inquiétant, c'est l'absence d'une variation temporelle significative du signal. Pourtant, même si l'automne 1999 fût plutôt doux, il y a une grande différence entre les conditions environnementales du mois de novembre (sol non-gelé) et celles du mois de mars 2000 (sol gelé). Les profils intégrés de la figure 7 nous montrent aussi qu'il existe quelques variations induites par la limite entre deux faisceaux, particulièrement entre W2 et W3, et de moindre façon, entre W3 et S7.

Sur l'orbite #3151 (figure 8), les coefficients de rétrodiffusion des images du 22 novembre et du 2 février suivent un patron similaire à la figure 7, avec par contre, des différences un peu plus marquées entre les faisceaux (spécialement W3 et S7). Toutefois, on remarque que les valeurs de l'image du 22 novembre (sol non-gelé) sont systématiquement au-dessus des valeurs du 2 février, surtout pour les faibles angles d'incidence. Une baisse du signal correspond donc à une situation où le sol est plus froid en février qu'en novembre. Par contre, l'écart est généralement inférieur à 1 dB, ce qui est peu. Quant à l'image du 21 mars, la présence de neige humide fait disparaître l'effet de l'angle d'incidence (*ref*: chapitre 3)

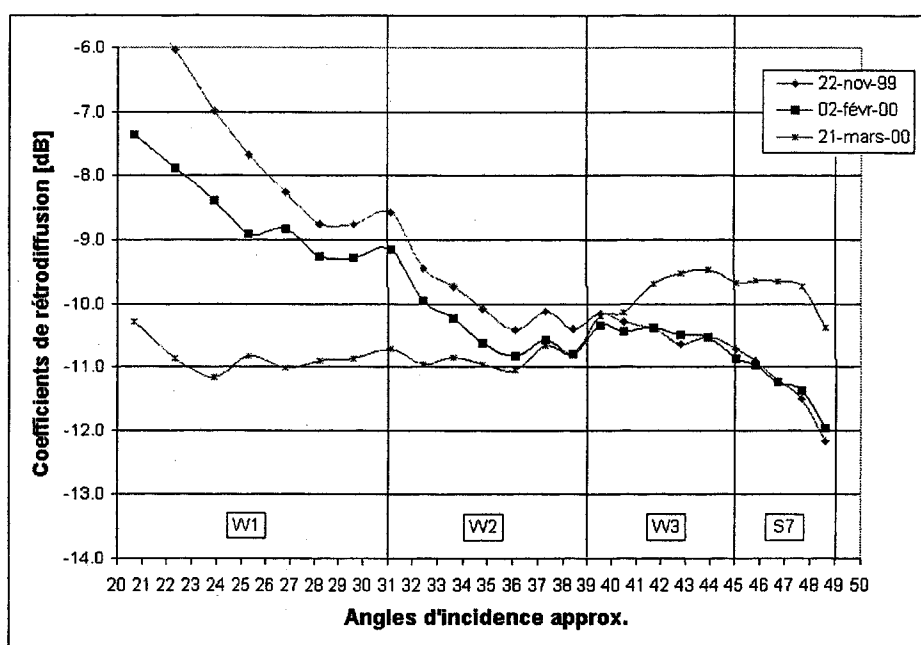


Figure 8 : Variation des coefficients de rétrodiffusion des images de l'orbite #3151 en fonction de l'angle d'incidence

Les observations faites à partir de ces profils intégrés (figures 7 et 8) sont primordiales puisque l'application d'EQueau est dépendante de la variation du signal en fonction des conditions environnementales. La question est maintenant de savoir pourquoi le signal varie maintenant si peu. En comparant le profil intégré de l'image du 1^{er} mars 2000 et celui du 7 novembre 1998, tous deux sur l'orbite #3773, nous obtenons un élément de réponse (figure 9). Le comportement du signal, donc la radiométrie, est significativement différent entre les deux dates. En novembre

1998, il y a de grandes variations attribuables aux limites de faisceaux. En 2000, le profil est beaucoup plus lisse et les limites de faisceaux moins évidentes. La carte des équivalents en eau sera donc biaisée par ces artefacts. Toutes ces observations portent à croire qu'un travail a été effectué par le producteur des données ScanSAR afin de réduire les artefacts inhérents à ces limites. Il se peut même que ce processus soit accompagné d'un certain lissage. Si c'est le cas, les valeurs des images ne sont plus représentatives des propriétés physiques du terrain et tout algorithme développé avant 2000 est difficilement applicable.

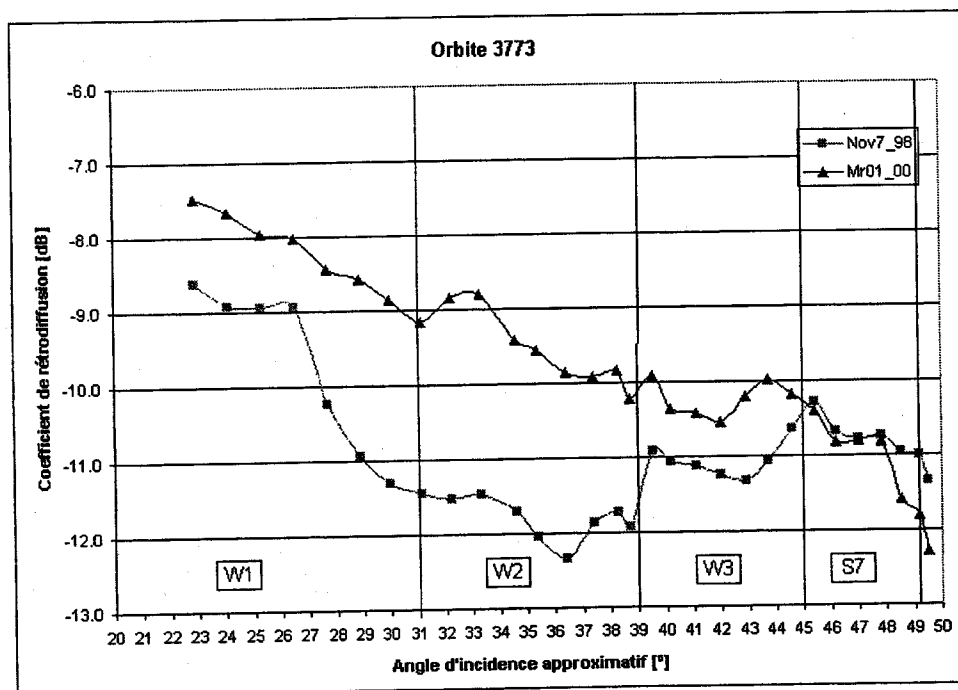


Figure 9 : Variation des coefficients de rétrodiffusion des images de l'orbite #3773 en fonction de l'angle d'incidence.

Des démarches ont été entreprises auprès du producteur de données ScanSAR afin de vérifier cette hypothèse. On nous a confirmé que certains travaux ont été effectués au niveau du contrôle de la qualité des images mais nous n'avons pu connaître la nature exacte de ces travaux.

3 VÉRIFICATION DE L'APPLICABILITÉ DE L'ALGORITHME POUR LES BASSINS PLUS FORESTIERS AU SUD DE LG4

L'un des aspects intéressants de l'utilisation d'images en mode ScanSAR Wide est bien entendu leur large couverture de 500 km X 500 km. On couvre ainsi des bassins situés plus à l'ouest et plus au sud du secteur où EQeau a été développé, soit initialement la région de LG4, LA1 et Caniapiscau. En contrepartie, plus on descend vers le sud, plus on passe de la taïga à la forêt boréale (figure 10).

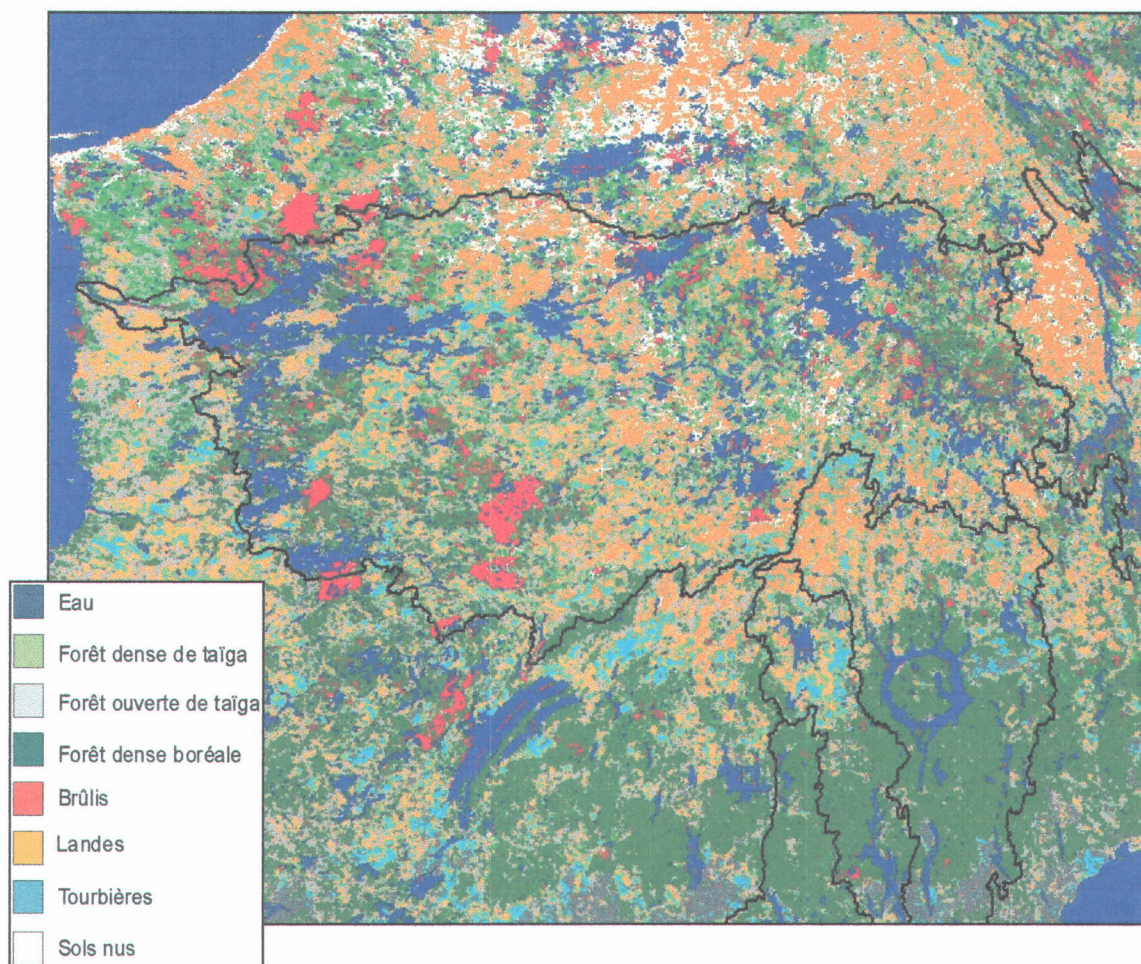


Figure 10 : Occupation du sol du nord du Québec

Il est donc essentiel de comprendre l'effet que peut avoir ce couvert forestier plus dense (40-60%) sur le signal radar et conséquemment, sur l'applicabilité d'EQueau. Les résultats d'une étude approfondie sur les mécanismes d'interaction des ondes radar (en bande C et en polarisation hh) avec la végétation, le couvert de neige et le sol a donc été menée. La section 3.1 décrit les paramètres du modèle utilisé et les principaux résultats obtenus.

3.1 Mécanismes d'interaction des ondes radar avec la végétation et le sol

L'interaction de l'onde radar avec le milieu forestier implique plusieurs mécanismes (figure 11). D'après des études réalisés par Dobson *et al.* (1995), la rétrodiffusion radar d'une couverture végétale peut être exprimée de deux façons, selon la présence (équation 3.1), ou l'absence (équation 3.2), des troncs d'arbres :

$$\sigma_{t-w}^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 \cdot \tau_t^2 (\sigma_m^0 + \sigma_t^0 \cdot \sigma_s^0 + \sigma_d^0) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{t-h}^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 (\sigma_s^0 + \sigma_m^0) \quad (3.2)$$

Où :

- σ_{t-w}^0 : Le coefficient de rétrodiffusion totale d'une végétation arborée
- σ_{t-h}^0 : Le coefficient de rétrodiffusion totale d'une végétation arbustive ou herbacée (non arborée)
- σ_c^0 : Le coefficient de rétrodiffusion des petites branches et du feuillage
- σ_m^0 : Le coefficient de rétrodiffusion multiple entre le sol et le feuillage
- σ_t^0 : Le coefficient de rétrodiffusion direct des troncs
- σ_s^0 : Le coefficient de rétrodiffusion direct du sol
- σ_d^0 : Le coefficient de rétrodiffusion d'interaction entre le sol et les troncs d'arbres
- τ_c : Le coefficient de transmission des micro-ondes à travers le feuillage
- τ_t : Le coefficient de transmission des micro-ondes à travers les troncs d'arbres

Les coefficients de rétrodiffusion et les coefficients de transmission utilisés dans les équations 4.1 et 4.2 sont directement proportionnels à la constante diélectrique de la végétation et du sol. Leurs valeurs varient aussi en fonction du type de végétation, de la longueur d'onde (bande C, X, ou L) et de la polarisation (hh, vv, vh) du signal incident (Kasischke et Bourgeau-Chavez, 1997). La rugosité et le coefficient de réflexion sont deux propriétés du sol qui ont un effet non négligeable sur la quantité totale de la rétrodiffusion. En général, une rugosité élevée augmente la rétrodiffusion directe du sol (σ_s^0) et fait décroître la rétrodiffusion multiple (σ_m^0) et l'interaction (σ_d^0). Le coefficient de réflexion du sol dépend directement de la constante diélectrique. Alors,

une augmentation de l'humidité du sol fait croître la constante diélectrique et par conséquent la rétrodiffusion directe du sol (σ_s^0). Au contraire, le gel du sol, diminue sa constante diélectrique et par conséquent la rétrodiffusion directe du sol.

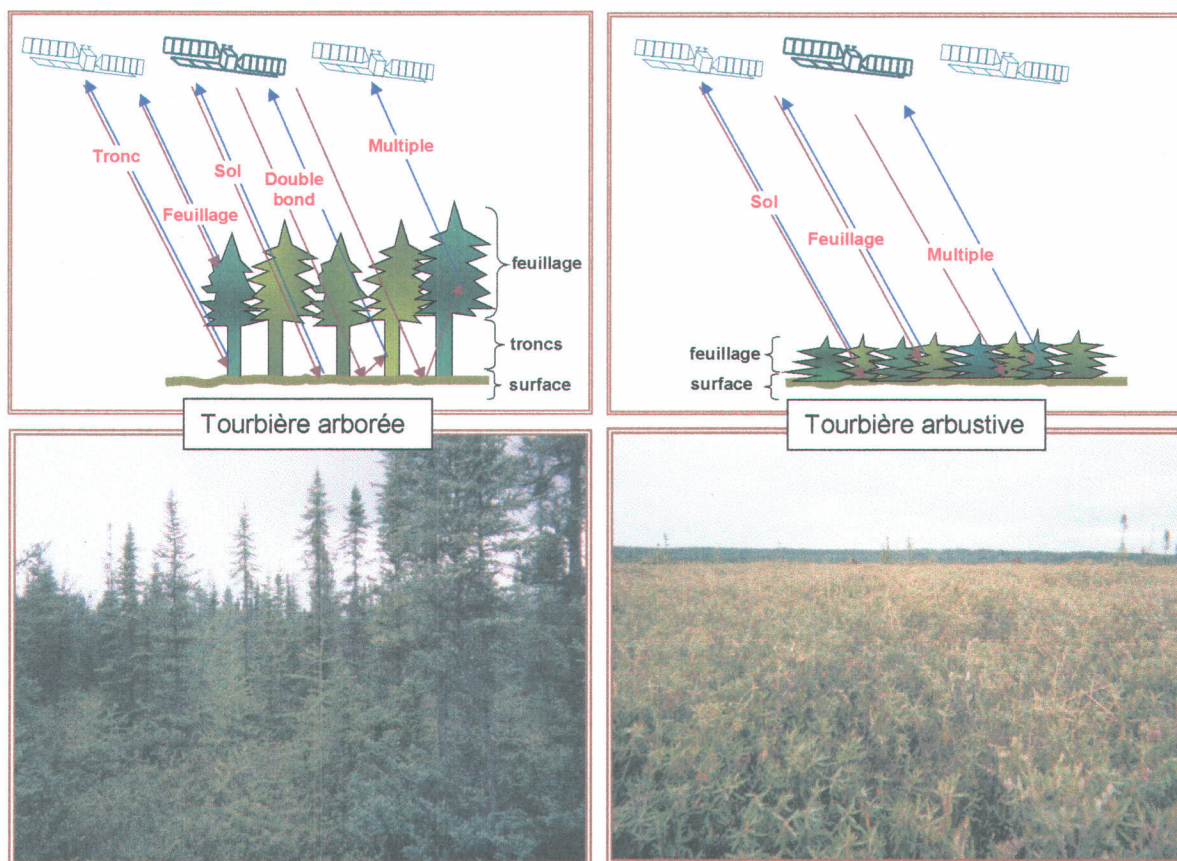


Figure 11 : Mécanismes d'interaction de l'onde radar avec la végétation et le sol

3.2 Modélisation de l'interaction des ondes radar avec l'épinette noire, le sol et la neige

Afin de comprendre le rôle des peuplements d'épinettes noires (*Picea mariana*) sur le signal enregistré par les images RADARSAT, une étude approfondie sur les mécanismes d'interaction des ondes radar (en bande C et en polarisation hh) avec la végétation, le couvert de neige et le sol a été menée. Cette étude a permis d'adapter des modèles de végétation existants à un peuplement dominé par l'épinette noire. Elle a aussi permis de comprendre l'effet de différents paramètres (densité des arbres, angles d'incidence, gel du sol, humidité de la neige) sur la quantité d'énergie

rétrodiffusée. En octobre dernier, les résultats ont été soumis pour publication à la revue *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* dans deux articles dont le premier décrit la base théorique de l'approche méthodologique suivie (Magagi *et al.*, soumis-a; Magagi *et al.*, soumis-b).

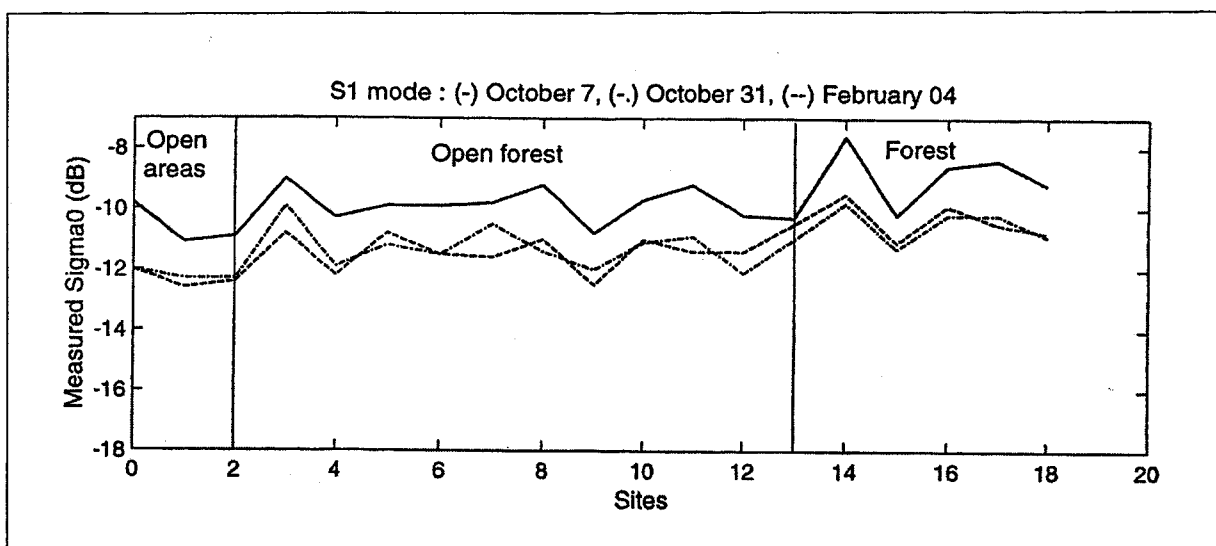
L'approche adoptée pour simuler les coefficients de rétrodiffusion d'un couvert d'épinettes noires de densité faible à moyenne est basée sur le modèle théorique de rétrodiffusion d'un couvert de végétation fermée (Karam *et al.*, 1995). Pour modéliser l'interaction du signal avec les arbres, nous avons utilisé des données sur la structure des épinettes noires fournies par le Centre forestier des Laurentides (Magagi *et al.*, soumis-a) ainsi que des mesures de la longueur et de la circonférence des branches, et de la hauteur des épinettes, effectuées dans le secteur de LG4 à l'automne 1999 et à l'hiver 2000. Des mesures ont également été prises sur le thé du Labrador, afin de modéliser les interactions avec la végétation arbustive. Pour quantifier les contributions du sol et les interactions sol/végétation, nous avons utilisé la fraction du couvert forestier estimée à partir de photographies aériennes de la région de LG4 (Bouchard, 2000). L'étalonnage du modèle a été effectué à partir des valeurs de rétrodiffusion d'images RADARSAT en mode S1 et S7 de la région de LG4, prises à l'automne 1996 et à l'hiver 1997 (images obtenues dans le cadre du programme ADRO). En effet, pour ces images, nous avons plusieurs informations disponibles, dont la constante diélectrique du sol et les caractéristiques du couvert nival.

Le modèle a mis en évidence que l'humidité du sol et l'angle d'incidence sont les deux principaux facteurs qui déterminent l'importance de la diffusion de surface (sol) et de la diffusion de volume (végétation) pour une forêt donnée. Dans le cas de l'épinette noire, ce sont les branches principales de l'arbre qui contribuent à la diffusion de volume, suivies par les tiges (lesquelles supportent les aiguilles) et la végétation basse. Le signal en provenance du sol est donc affecté par la végétation.

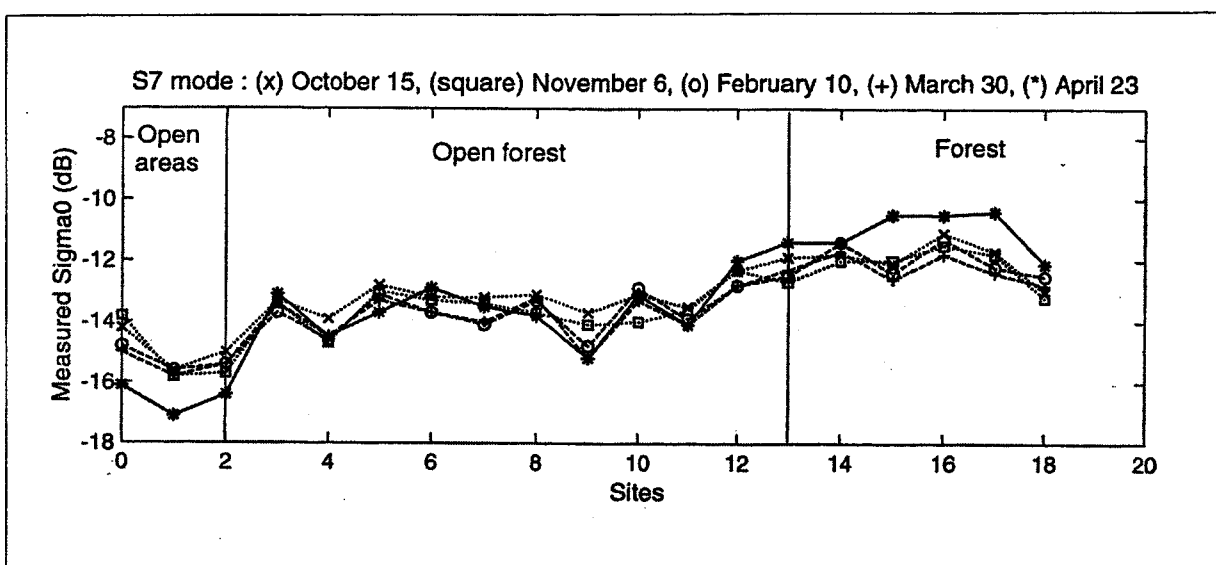
En général, le modèle confirme les observations sur le comportement du signal relevées sur les images RADARSAT en mode standard. À l'automne, d'après le modèle, lorsque la densité des épinettes noires est faible (<20%) le signal en mode S1 (angles d'incidence entre 20 et 27°)

provient essentiellement du sol et plus le sol est humide, plus la rétrodiffusion est forte. D'ailleurs, la figure 12a illustre les variations temporelles des coefficients de rétrodiffusion extraites d'image en mode S1. On n'y observe pas de lien entre la densité des peuplements des sites (10 à 42%) et l'intensité du signal. Toutefois, lorsque la densité de la forêt est plus importante (>40%), le signal en mode S1 perd de la sensibilité aux propriétés du sol. En mode S7 (angles d'incidence de 45 à 49°), le signal augmente légèrement avec l'humidité du sol et la densité de la forêt. C'est d'ailleurs ce que l'on observe à la figure 12b, la rétrodiffusion des forêts étant nettement plus forte que celle des landes.

Le comportement du signal des peuplements d'épinettes noires a aussi été modélisé pour l'ensemble des angles d'incidences situés entre 20 et 49°. Ces angles correspondent à la gamme des angles d'incidence des images ScanSAR Wide. Ainsi, à l'automne, dans les peuplements de faible densité, la contribution du sol est plus importante que celle de la végétation, pour toute la gamme des angles d'incidences (figure 13). Pour les forêts plus denses, la prédominance entre la contribution du sol et celle de la végétation dépend de l'humidité du sol et de l'angle d'incidence (figure 14). Pour les sols secs, la contribution du sol domine jusqu'à 35°, seuil à partir duquel la contribution de la végétation égale ou dépasse celle du sol. Pour les sols humides, la contribution du sol est toujours supérieure à celle de la végétation. De plus, plus l'angle d'incidence est faible, plus la contribution du sol est importante.



a)



b)

Figure 12 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion (σ_x^0) en mode S1 (a) et S7 (b) pour trois types de peuplements forestiers du secteur de LG4: landes (densité < 12%), forêts ouvertes (densité variant de 12 à 30%) et forêt (densité variant de 34 à 42%). Les sites ont été ordonnés en fonction de leur densité.

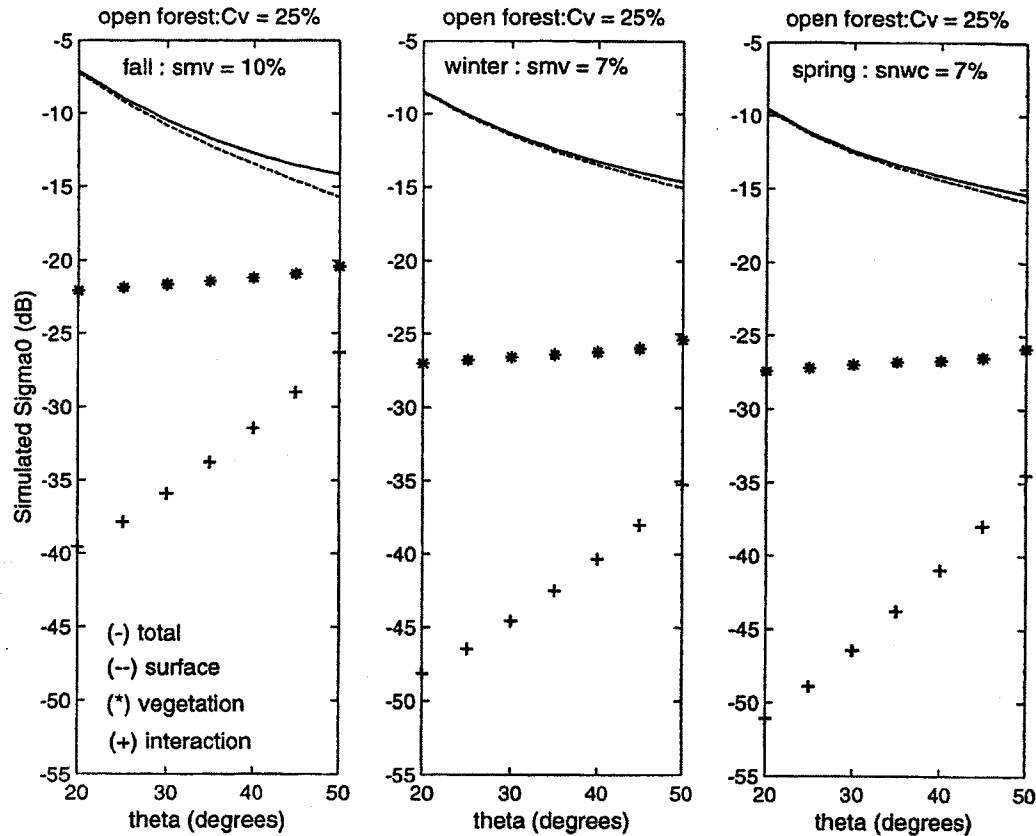


Figure 13 : Variation en fonction de l'angle d'incidence des différentes composantes du signal de rétrodiffusion d'une forêt ouverte: total, de surface (sol ou neige humide), de la végétation et l'interaction entre la végétation et le sol. Le graphique de gauche, correspond à des conditions d'octobre, celui du centre à celles de janvier et celui de droite, à celles d'avril (neige humide:7%).

Le modélisation a aussi permis de mieux saisir les causes du changement de signal occasionné par le gel du sol et la présence de la neige, sèche ou humide (Magagi *et al.*, 2000; Magagi *et al.*, soumis-b). Durant l'hiver, la végétation des forêts peu denses n'affecte pas le signal, quelque soit l'angle d'incidence (figure 13). En effet, la diminution de la constante diélectrique de la végétation, augmente sa transmissivité, ce qui fait que les images RADARSAT d'hiver offrent généralement beaucoup moins de contraste entre les différents peuplements forestiers. De plus, la diminution de la constante diélectrique du sol à l'hiver, va aussi entraîner une baisse de la rétrodiffusion directe du sol et une baisse du signal total, ce qui est effectivement observé sur les images RADARSAT (mode Standard). Pour les forêts plus denses ($>40\%$), la végétation affecte

le signal quelques soient les angles d'incidence (figure 14) et on note une légère augmentation du signal total avec la densité de la végétation, mais de façon moindre qu'à l'automne (figure 15).

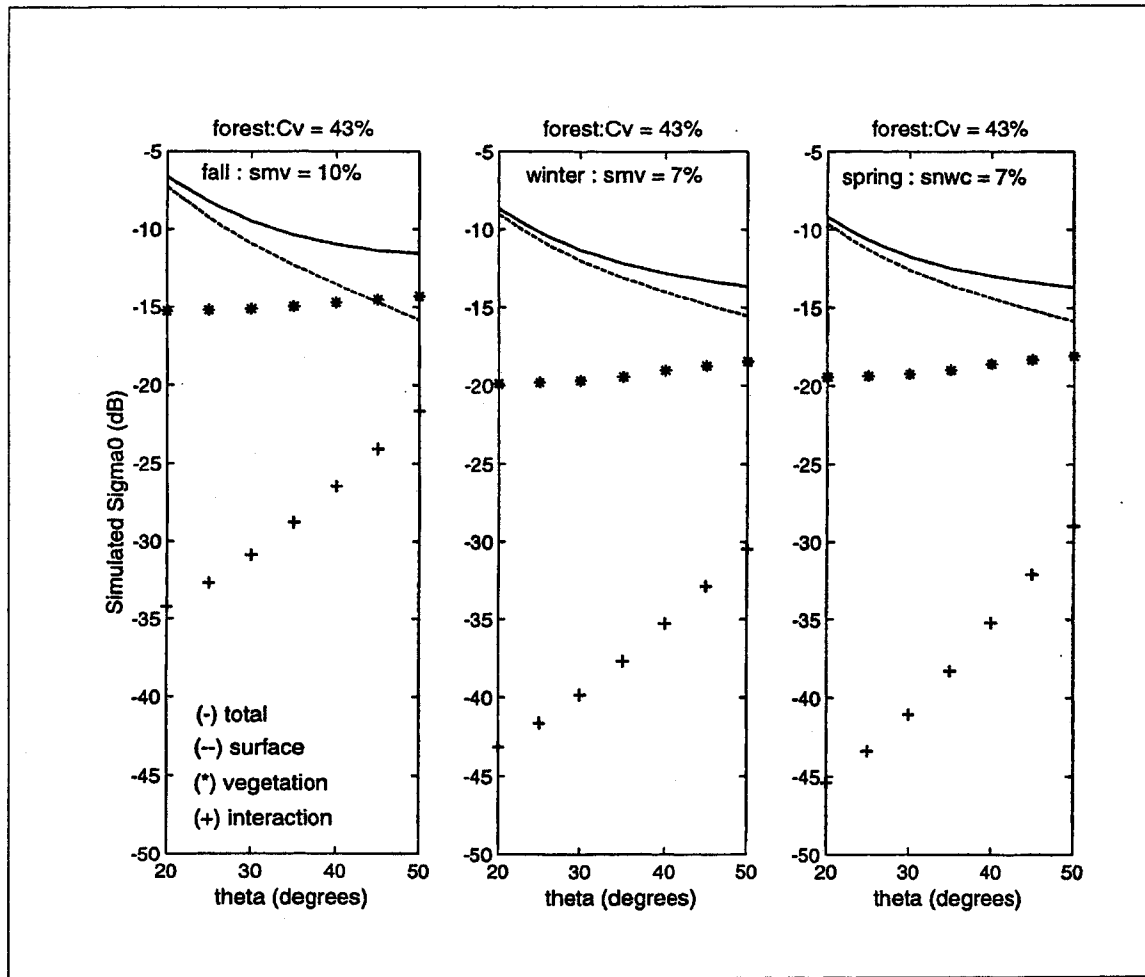


Figure 14: Variation en fonction de l'angle d'incidence des différentes composantes du signal de rétrodiffusion d'une forêt de taïga mature: total, de surface (sol ou neige humide), de la végétation et l'interaction entre la végétation et le sol. Le graphique de gauche, correspond à des conditions d'octobre, celui du centre à celles de janvier et celui de droite, à celles d'avril (neige humide: 7%).

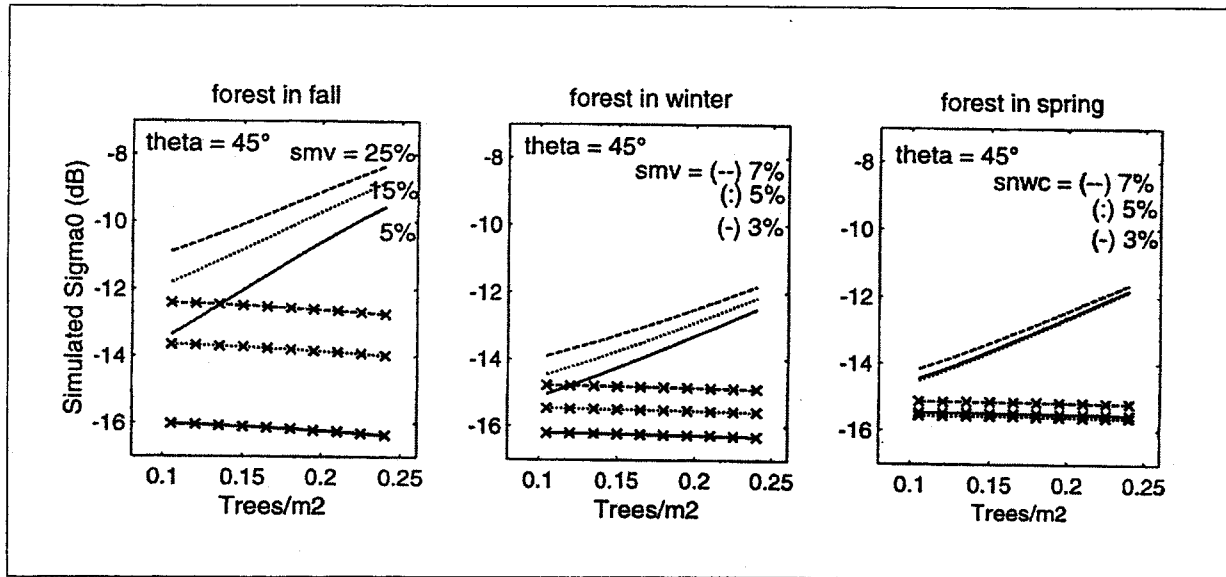


Figure 15 : Variation du signal de rétrodiffusion total et de celui du sol en fonction de la densité des peuplements forestiers matures à un angle d'incidence de 45 degrés, à l'automne, en hiver et au printemps (neige humide).

Au printemps, une couverture de neige humide élimine la contribution du sol et de la végétation basse du signal radar total. Les résultats de la modélisation ont montré que le signal total est alors la somme de trois composantes 1) la rétrodiffusion de la surface du couvert de neige humide, 2) la rétrodiffusion directe des arbres et 3) celle de l'interaction entre la surface de neige humide et les arbres. Si cette surface de la neige est rugueuse, comme c'est généralement le cas dans un milieu hétérogène durant la période de fonte, le signal de rétrodiffusion peut être semblable (± 1 dB) à celui enregistré lorsque la neige est sèche et transparente au signal provenant du sol gelé. Cela peut-être observé tant en peuplement forestier ouvert (figure 13), que fermé (figure 14).

Par contre, lorsque la neige humide est lisse, une baisse significative (> 3 dB) de la rétrodiffusion totale est constatée en milieu ouvert (lande, brûlis, tourbières). Cela peut d'ailleurs être observé sur les images ScanSAR du 2 février (neige sèche) et celle du 21 mars 2000 (neige humide), illustrées à la figure 16. En effet, les lacs et réservoirs apparaissent en noir et les zones à dominance de brûlis, landes et tourbières ressortent en gris foncé. Toutefois, dans les forêts ouvertes ou fermées, le modèle montre que cette baisse du signal est compensée par une augmentation de la contribution de l'interaction surface de neige/végétation arborée ce qui fait augmenter la rétrodiffusion totale des forêts en fonction de la densité des arbres (figure 15). Ainsi, sur cette même image du 21 mars 2000 (figure 16), on observe que les forêts ouvertes

apparaissent en gris pâle alors que les zones densément boisées sont blanches. Il en résulte une augmentation du contraste entre les zones boisées et les zones dégagées (principalement les plans d'eau gelés) lorsque la neige humide est lisse (Bernier *et al.*, 1998; Bagdadi *et al.*, 1999). Ces images ScanSAR pourraient donc servir de complément aux images du visible et du proche infrarouge (VEGETATION) pour la détermination du début de la période de fonte, par temps couvert (Bernier *et al.*, 2000).

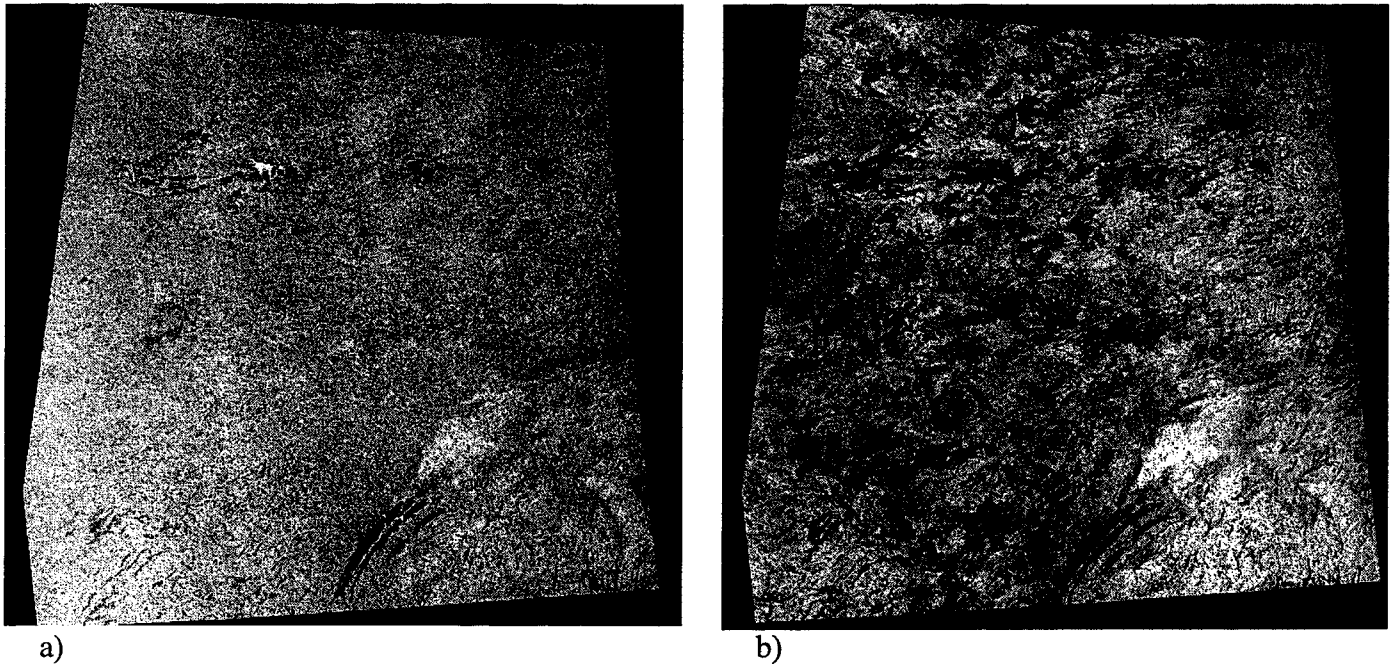


Figure 16 : **a) Image ScanSAR rehaussée du 2 février 2000,**
 b) Image ScanSAR rehaussée du 21 mars 2000

Les résultats de cette modélisation nous permettent de dériver quelques conclusions pratiques pour le suivi opérationnel du couvert nival sur le bassin La Grande :

- 1) Le faisceau S7, sensible à la densité de la végétation, n'est pas recommandé pour l'application de l'algorithme EQueau.
- 2) L'influence de la densité de la forêt sur le signal diminue lorsqu'on utilise des images de référence où le sol est gelé (mois de novembre).
- 3) Durant l'hiver, la végétation des forêts peu denses n'affecte pas le signal, quelque soit l'angle d'incidence (20 à 49°).

- 4) Le début de la fonte printanière (neige lisse) peut être détectée sur les images RADARSAT par une baisse de rétrodiffusion des lacs et des secteurs ouverts (landes). Dans les peuplements forestiers on note alors une légère augmentation de la rétrodiffusion, comparée aux images d'hiver, laquelle est fonction de la densité de la forêt.
- 5) Lorsque la densité de la forêt est plus importante (>40%), le signal radar perd de la sensibilité aux propriétés du sol même aux faibles angles d'incidence.

Cette dernière observation s'applique particulièrement à la forêt boréale, située au sud du bassin de la rivière La Grande. Afin de vérifier si le constat peut être fait sur les images ScanSAR Wide, nous avons étudié le coefficient de rétrodiffusion des images de l'hiver 1999-2000 en fonction de l'occupation du sol.

3.3 Analyse de la rétrodiffusion en forêt boréale

Pour ce faire, nous avons utilisé la cartographie de l'occupation du sol du Canada, produite par le Centre canadien de télédétection et le Service canadien des forêts à partir d'images AVHRR (NOAA) de 1995 et avec une résolution de 1 km. Cette cartographie est moins précise que celles produite dans le cadre de ce projet (résolution de 50 m), mais elle fait par contre une distinction entre la forêt de taïga et la forêt boréale (figure 10). Sous les grandes classes d'occupation du sol (forêt dense de taïga, forêt ouverte de taïga, forêt dense boréale, brûlis, landes, tourbières, sols nus), nous avons calculé la moyenne des coefficients de rétrodiffusion de chaque image. Sur les figures 17 et 18, on présente cette relation sous deux angles différents.

À la figure 17, on fait ressortir les constatations du rapport du 30 juin 2000, c'est-à-dire que mis à part l'image du 18 mars 2000, les coefficients de rétrodiffusion sont pratiquement similaires d'une date à l'autre (écart inférieur à 0.5 dB) pour la majorité des occupations du sol. Cette situation ne permet évidemment pas d'estimer correctement les variations d'équivalents en eau.

À la figure 18, on fait ressortir la différence de rétrodiffusion entre la forêt dense boréale et les autres occupations du sol. Une rétrodiffusion nettement plus élevée est observée dans le cas de la forêt boréale, peu importe la date, parce que la forêt est la plus dense (40 à 60%).

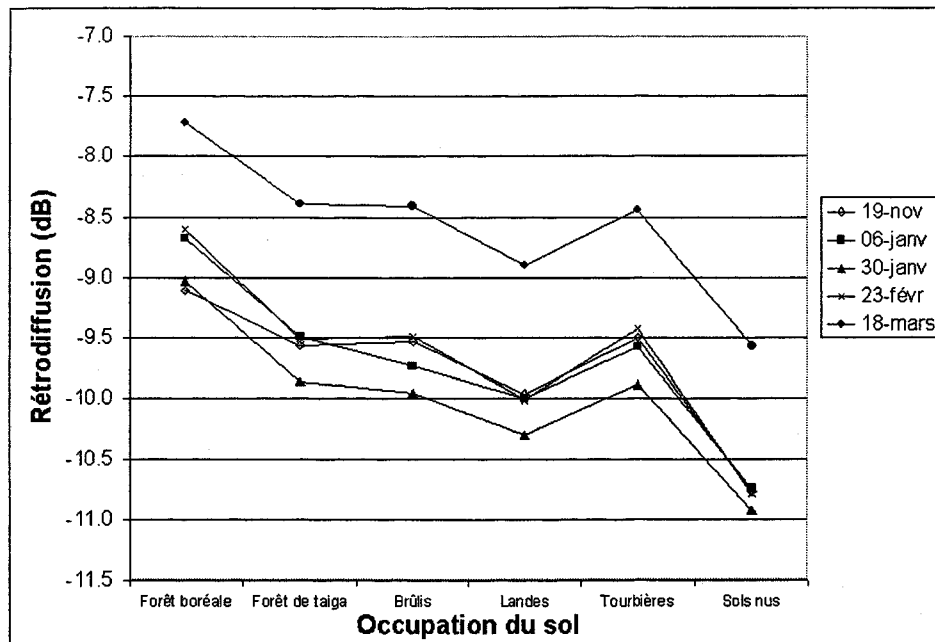


Figure 17 : Variation des coefficients de rétrodiffusion selon la date

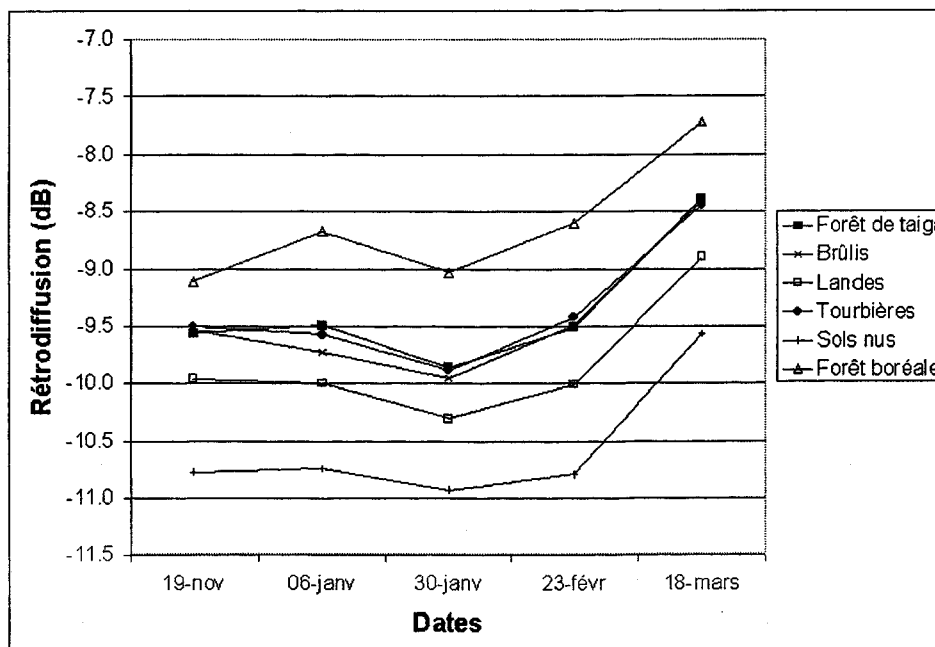


Figure 18 : Variation des coefficients de rétrodiffusion selon l'occupation du sol

De plus, on remarque que la signature de la forêt boréale suit le même patron temporel que les occupations du sol de la taïga (forêt ouverte, tourbières, sol nu). Ces variations temporelles sont normalement causées par les variations des propriétés diélectriques du sol et de la végétation ou de l'instabilité de la calibration des images. Sur cette série d'images d'hiver, il semblerait que la contribution du sol dominerait encore celle de la végétation, même en forêt boréale.

Finalement, la figure 19 montre que les rapports de rétrodiffusion entre l'image d'hiver et l'image d'automne sont très similaires pour toutes les occupations du sol, sauf pour la forêt boréale. Ces derniers restent plus élevés, ce qui signifie, si l'algorithme d'EQueau s'applique (figure 3), qu'il y aurait plus de neige au sol dans ces secteurs plus au sud. Toutefois, nous n'avons pas eu l'occasion de vérifier les quantités de neige mesurées dans ces secteurs à l'hiver 2000, mais nous le vérifierons dans les prochains mois. En conclusion, l'algorithme EQueau pourrait peut-être s'appliquer sur certains bassins de la forêt boréale.

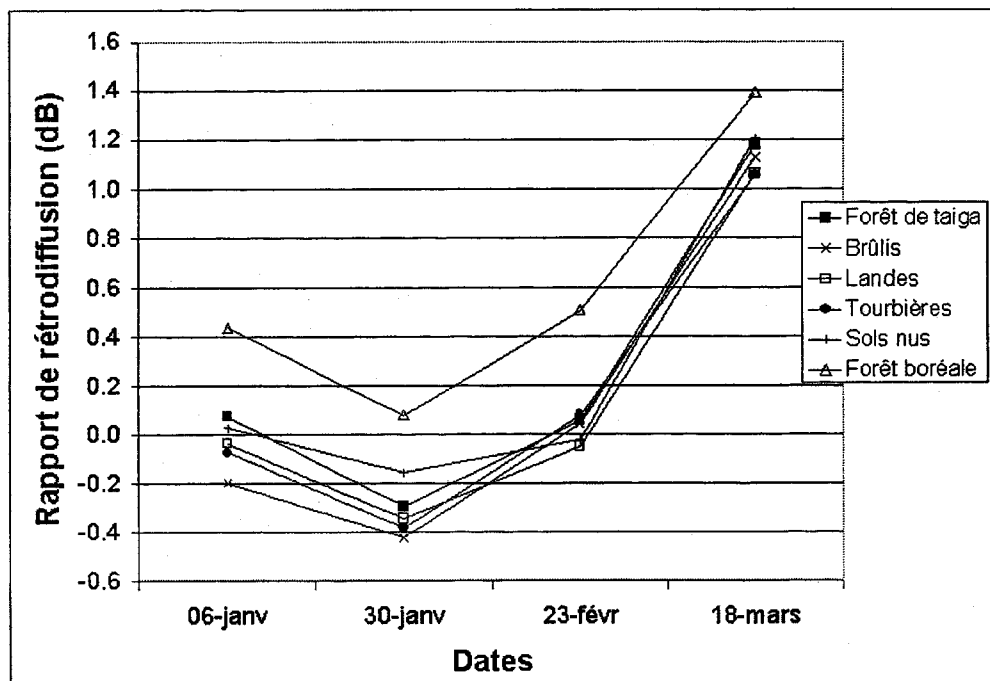


Figure 19 : Variation du rapport de rétrodiffusion selon l'occupation du sol

4 SUPPORT AU PERSONNEL D'HYDRO-QUÉBEC POUR LA PRÉPARATION DES ACQUISITIONS RADARSAT DE L'HIVER 2000-2001

4.1 Localisation et type d'images

L'un des facteurs ayant entraîné l'obtention de résultats mitigés lors de l'hiver 1999-2000 concerne la stabilité radiométrique des images ScanSAR Wide (SCW). Rappelons qu'une image SCW est composée de quatre faisceaux individuels (W1, W2, W3 et S7) et que la reconstitution d'une image à la fois homogène et étalonnée radiométriquement, représente toujours un défi technique. Lors de l'année expérimentale 1998-1999, EQeau a produit de bons résultats avec les images SCW, car même si elles présentaient des variations significatives à la limite des faisceaux, l'utilisation d'un rapport d'images permettait de minimiser ce phénomène sur la carte résultante d'équivalent en eau (Bernier *et al.*, 1999). Par contre, suite à notre analyse des images de l'année 1999-2000 et selon l'information non-officielle que nous avons pu obtenir du Centre Canadien de Télédétection, l'étalonnage radiométrique des images ScanSAR Wide a été modifié afin de lisser les différences entre les faisceaux et ainsi améliorer l'aspect visuel de l'image. Il pourrait en résulter selon nos observations, une stabilité et une précision radiométrique inférieure et ne correspondant plus aux algorithmes établis pour EQeau.

Face à cette incertitude, nous avons proposé à Hydro-Québec d'aller vers un produit RADARSAT de compromis, le mode ScanSAR Narrow (SCN), qui utilise seulement deux faisceaux mais couvre tout de même une large superficie (tableau 4). De plus, la gamme des angles d'incidence y est plus réduite, ce qui devrait éliminer les problèmes de sous-estimation que nous avons rencontré dans le faisceau S7 (45°-49°) du mode SCW.

Tableau 4 : Caractéristiques des modes ScanSAR

	ScanSAR Wide	ScanSAR Narrow
Faisceaux	W1, W2, W3, S7	W1, W2
Angles d'incidence	20° à 49°	20° à 40°
Couverture	500 X 500	300 X 300
Résolution	100 m	50 m
Format	8 bits	8 bits

Conséquemment, il faut trois images SCN, acquises à l'intérieur de six jours, pour couvrir entièrement le bassin de la rivière La Grande (figure 20). Toutefois, contrairement aux images SCW de l'hiver 2000, aucun bassin au sud de La Grande n'est couvert par le mode SCN.

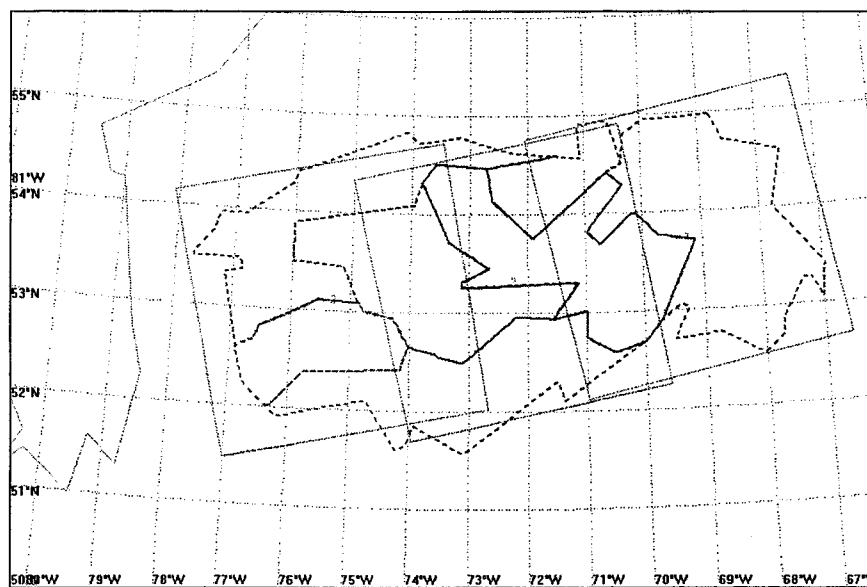


Figure 20 : Couverture des images ScanSAR Narrow

Quatre scénarios d'acquisition, en orbite ascendante, ont été proposés :

1. Dans le premier cas, une seule image SCN est acquise sur la partie est du bassin, permettant une cartographie des sous-bassins de LG4, LA1 et Caniapiscou.
2. Dans le deuxième cas, en plus de l'image sur l'est du bassin, une deuxième image est acquise trois jours plus tard, sur le centre du bassin (LG4, LG3 (80%), Eastmain (75%)). On couvre au total, 72% du bassin de La Grande.
3. Dans le troisième cas, la deuxième image est plutôt acquise six jours après la première, sur l'ouest du bassin (LG1, EOL, LG2, LG3 (75%), Eastmain (40%)), pour une couverture totale d'environ 80% du bassin.
4. Dans le dernier cas, les trois images sont acquises, afin d'obtenir une couverture complète du bassin.

→ C'est le **scénario 4** qui a été retenu par Hydro-Québec pour l'hiver 2000-2001.

Toujours dans la foulée des résultats et des analyses de l'année 1999-2000, une deuxième recommandation a été faite à Hydro-Québec. Il s'agit de prévoir l'acquisition d'une image en mode Wide (W1) sur le bassin de La Grande, au moment le plus rapproché possible des acquisitions SCN, afin de pouvoir valider la qualité de ces dernières et les équivalents en eau en décaulant. Une image W1 couvre 165 km X 165 km et possède une résolution spatiale de 30m. Les analyses de 1998-1999 (Bernier *et al.*, 1999) montrent que les valeurs des images du mode Wide sont normalement comparables aux valeurs du mode ScanSAR. L'image de validation sera centrée sur l'ouest du bassin de LG4 et sera acquise 4 jours après la dernière SCN (figure 21). Plusieurs sites d'échantillonnage HQ-INRS et une station météorologique « Rneige » sont localisés sur ce secteur, ce qui permettra une double validation.

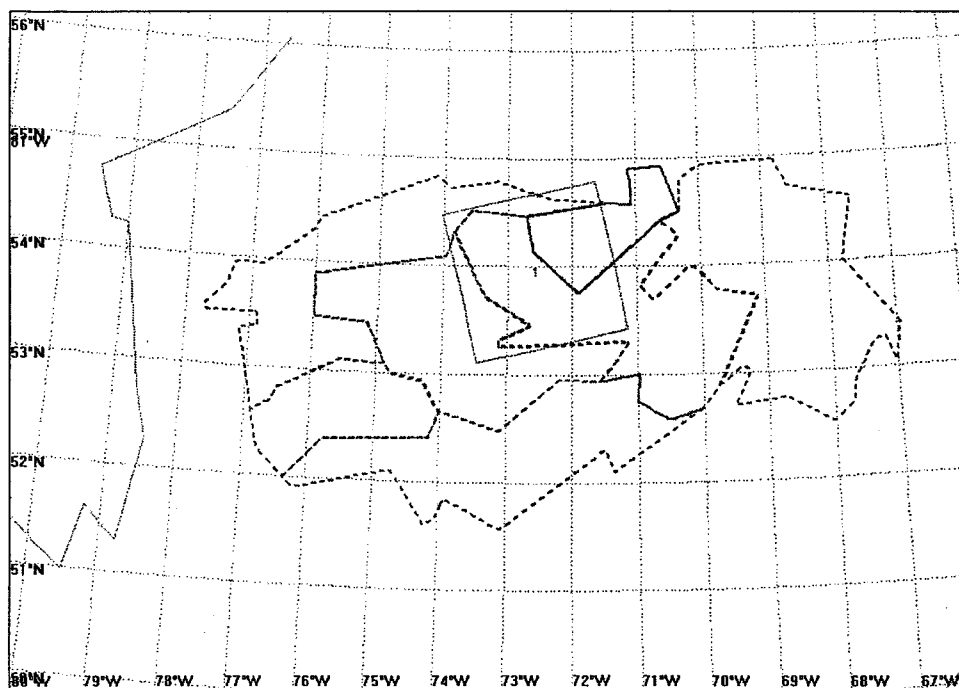


Figure 21 : Couverture de l'image W1 de validation

Comme ces images de validation feront partie du volet R&D du projet et que le développement d'outils pour le suivi du couvert de neige à partir des données de RADARSAT-1 et 2 fait partie des objectifs du réseau CRYSYS, les images W1 ont été gracieusement fournies à l'INRS-Eau par l'Agence spatiale canadienne, via le réseau CRYSYS.

4.2 Périodes d'acquisition

Une fois le type d'image identifié (SCN, W1) et les orbites ascendantes sélectionnées (est, centre et ouest), il reste à déterminer les périodes d'acquisition désirées. Le tableau 5 présente les dates correspondantes disponibles pour l'hiver 2000-2001.

Tableau 5 : Périodes d'acquisition possibles de l'hiver 2000-2001

Série	Image SCN ouest	Image SCN centre	Image SCN est	Image 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	27 fév	24 fév	21 fév	03 mrs
6	23 mrs	20 mrs	17 mrs	27 mrs

Un autre facteur pouvant avoir entraîné l'obtention de résultats mitigés lors de l'hiver 1999-2000 concerne la représentativité de l'image de référence. Le cas idéal est une image d'automne avec un sol gelé et sans neige. Dans la réalité, la période de gel du sol chevauche souvent les premières chutes de neige. Selon les données disponibles, l'automne 1999 a été relativement doux et le gel tardif. De façon optimale, il faut que l'image d'automne soit acquise dans les mêmes conditions que lors de l'établissement des algorithmes de calcul d'EQueau. Nous avons donc recommandé d'acquérir deux séries d'images d'automne cette année, afin d'obtenir une meilleure image de référence et de mieux comprendre les variations du signal à cette période critique.

→ La recommandation a été suivie par Hydro-Québec et les séries 1 et 2 (tableau 5) ont été acquises.

Au moment de compléter la rédaction de ce rapport, VIASAT Géo-Technologies inc. nous livrait les images SCN de ces deux séries corrigées géométriquement. Aucune analyse n'a donc pu être faite, mais une première inspection visuelle a montré que la limite entre les deux faisceaux est toujours visible et que la variation du signal en fonction de l'angle d'incidence est apparente. Toutefois, ces variations du signal sont normales et elles devraient être minimiser par le rapport

de rétrodiffusion. Ces images d'automne seront analysés dès le début de janvier afin de sélectionner la série de référence.

Les images W1 des 3 et 27 novembre 2000 ont, quant à elles, été reçues à l'INRS-Eau. Elles seront corrigées géométriquement et analysées à partir des images SCN. Aucun artefact n'a été observé jusqu'à maintenant sur ces deux images W1.

En ce qui concerne les images d'hiver, puisque l'algorithme d'EQueau a été développé à partir d'images de la fin janvier et de la mi-mars, nous recommandons l'acquisition des séries 4 et 6 (tableau 5) pour 2001. Nous croyons qu'il est préférable de faire une application correcte d'EQueau sur ces deux périodes avant de l'appliquer à d'autres moments.

→ La recommandation a été suivie par Hydro-Québec et les séries 4 et 6 (tableau 5) ont été commandées. Toutefois, en vertu de l'intérêt que représente une cartographie de l'équivalent en eau dès le début de janvier, Hydro-Québec a également commandé la série 3 (tableau 5).

4.3 Campagnes de terrain

Suite à la programmation des images de l'hiver 2000-2001, les besoins en matière de relevés de terrain ont été établis (tableau 6).

Tableau 6 : Planification des relevés de terrain

Avant l'acquisition des images d'octobre	Lors de l'acquisition des images d'octobre	Lors des acquisition des images de novembre	Lors de l'acquisition des images d'hiver
• Vérification des sondes en place et des stations météo ; • État du sol (gel ou non, profondeur de gel) ; • Neige (présence ou non, épaisseur, sèche ou humide).	• État du sol (gel ou non, profondeur de gel) ; • Neige (présence ou non, épaisseur, sèche ou humide) ; • Météo (précipitations, température de l'air).	• État du sol (gel ou non, profondeur de gel) ; • Neige (présence ou non, épaisseur, sèche ou humide) ; • Météo (précipitations, température de l'air).	• Relevés de neige ; • Profils de neige; • Température et cte diélectrique du sol; • Données météorologiques

En connaissant les conditions à la fin octobre et en utilisant les données des stations météo en continu, on peut connaître les conditions lors de l'acquisition des images en novembre. C'est pourquoi une seule campagne de terrain était nécessaire à la fin octobre. Malheureusement, celle-ci n'a pu avoir lieu, pour des raisons de disponibilité du personnel d'Hydro-Québec. Afin d'obtenir des données sur les conditions environnementales lors de l'acquisition des images, nous avons donc produit un questionnaire qu'Hydro-Québec a distribué à des observateurs aux aéroports et aux centrales situées sur le bassin, lors des deux fenêtres d'acquisition de l'automne (figure 22). Quant au matériel en place (sondes de température, sondes TDR), il n'a pas été vérifié, mais en sept ans, le nombre de bris est généralement minime (1 ou 2 par année). En ce qui a trait aux trois stations météorologiques « Rneige », nous ne recevons actuellement que les données du site #2 (LG4-LA1) et celles-ci sont partielles et même parfois erronées. La mise au point des trois stations, qui devait se faire en octobre, a été reportée à la fin janvier 2001. Il sera donc difficile de faire un bilan des conditions environnementales de l'automne 2000 et du début de l'hiver 2001 comparable aux dernières années.

Les campagnes de terrain d'hiver (tableau 6), permettent de valider l'algorithme d'EQueau, de fournir les densités de neige au modèle et d'évaluer la précision des cartes d'équivalent en eau produites. Pour valider l'algorithme, nous utilisons les données des profils de neige (types de grains, épaisseur, densité, résistance thermique, température et constante diélectrique des couches). Ces profils doivent idéalement être faits lors de l'acquisition du début février et si possible, de la mi-mars. Pour fournir les densités de neige au modèle et pour évaluer la précision des équivalents en eau, nous utilisons les données des relevés de neige (épaisseur, équivalent en eau et densité du couvert). Des relevés couvrant le secteur de l'image W1 et de l'image SCN-centre seront effectués lors de campagnes de terrain conjointes HQ-INRS-Eau, au début février et à la mi-mars. Des relevés répartis sur l'ensemble du bassin de La Grande seront également effectués par Hydro-Québec lors de chaque période d'acquisition d'images (début janvier, début février, mi-mars).

Complément d'observations Météo – Projet RADARSAT	
24, 27 et 30 octobre 2000	
Idéalement entre 17h et 18h	
Date et Heure du relevé :	__/__/__ :__
Quelle est la température de l'air ?	_____ °C
Est-ce qu'il neige ?	Oui ☐ Non ☐
Est-ce qu'il pleut ?	Oui ☐ Non ☐
Quelle est l'épaisseur de neige au sol ?	_____ cm
La neige au sol est-elle humide?	Oui ☐ Non ☐
Le sol est-il gelé?	Oui ☐ Non ☐
Commentaire :	_____ _____
Note : Si l'on peut facilement faire une balle de neige, la neige est humide.	
Lieu de l'observation :	_____
Nom de l'observateur :	_____
Merci de votre collaboration!	

Figure 22 : Questionnaire d'observation des conditions environnementales

4.4 Modification d'EQueau

Un paramètre d'entrée d'EQueau est la densité moyenne de la neige. Elle permet de relier la résistance thermique apparente du couvert de neige issue des images, à l'équivalent en eau. Lorsque des mesures de terrain sont disponibles, ces valeurs sont utilisées. Sinon, une valeur historique ou simulée peut être utilisée. Dans la version 1999 d'EQueau, une valeur moyenne est entrée pour chacune des principales occupations du sol (tableau 7) pour une image donnée.

Tableau 7 : Paramètres d'entrée pour l'application d'EQueau du 2 février 2000

Image de l'hiver 2000	Image de référence	Algorithme	Occupation du sol	Densités de neige utilisées [kg/m ³]
2 février	22 nov. 1999	Milieu d'hiver	Forêts	179
			Forêts ouvertes	188
			Landes, Tourbières	199
			Brûlis, Sols nus	201

À l'hiver 2000, nous avons pu constater à partir des relevés au sol effectués par l'INRS-Eau et Hydro-Québec que les densités étaient plus faibles du côté des secteurs LG2-LG3 et EOL-EM1 (180 et 230 kg/m³) que du côté des secteurs de LG4-Caniapiscau (220 à 260 kg/m³). Comme une image ScanSAR couvre de 300 km (Narrow) jusqu'à 500 km (Wide), la densité moyenne de la neige au sol peut varier d'une région à l'autre à l'intérieur d'une même image ce qui était moins probable sur les images Standard (100 X 100km). Toutefois, EQueau ne pouvait alors tenir compte de cette disparité régionale des densités du couvert nival.

En vue de l'application d'EQueau aux images de l'hiver 2001, nous avons modifié l'interface afin que des densités moyennes différentes, le cas échéant, puissent être données à chacune des utilisations du sol de chacun des sous-bassins d'une image donnée.

5 CONCLUSION

A l'hiver 2000, le suivi du couvert nival de la région de La Grande a été marqué par plusieurs nouveautés. Pour la première fois, l'analyse des images RADARSAT par le logiciel EQeau s'est faite en mode opérationnel donc les gestionnaires étaient aux aguets des résultats et leurs attentes élevées. Aussi, c'était la première année que plusieurs images ScanSAR Wide étaient acquises au cours d'un même hiver ce qui nous a permis d'évaluer la stabilité du signal et la qualité radiométrique de ces images. De plus, le secteur cartographié était quatre fois plus étendu que celui des années passées donc plus diversifié du point de vue de l'occupation du sol et de la densité de la neige. De plus, nous avons des relevés détaillés des conditions du sol que pour trois des sept images.

Ce rapport a discuté des résultats de l'application du logiciel EQeau sur l'ensemble des images acquises à l'hiver 2000 (objectifs spécifiques 1 et 2). Nous avons établi que les images surestimaient l'équivalent en eau de la neige au sol. Nous avons aussi tenté d'expliquer ce biais systématique. D'une part, les conditions environnementales lors de l'acquisition des images de référence n'étaient pas optimales: le sol était encore dégelé et il y avait une quarantaine de centimètres de neige au sol. D'autre part, des modifications auraient été apportées dans la production des images ScanSAR Wide à la station de réception, afin de réduire les artefacts entre les limites des quatre faisceaux. Toutefois, ce processus aurait changé la dynamique du signal (radiométrie des images, stabilité temporelle du signal) ce qui diminue la performance de l'algorithme EQeau développé antérieurement à ce changement.

Suite à ces résultats, il est évident que de nouvelles images de référence ScanSAR devaient être prises à l'automne 2000. Afin de pallier au problème de représentativité de l'image de références, deux séries d'images d'automne ont été acquises, l'une à la fin d'octobre, l'autre la troisième semaine de novembre. La plus représentative sera ensuite choisie comme série de référence. Nous avons aussi proposé une solution de compromis, le mode ScanSAR Narrow (SCN) qui utilise seulement deux faisceaux (20 à 40 degrés) mais couvre tout de même une large

superficie (300 X 300 km). De plus, afin de valider la qualité radiométrique de ces dernières, des images en mode Wide (W1) ont aussi été acquises.

Parallèlement, une modélisation de l'interaction du signal radar avec les peuplements d'épinettes noires, le sol et la neige a été réalisée. Elle a mené à quelques conclusions pratiques pour le suivi opérationnel du couvert nival sur le bassin de la rivière La Grande:

- 1) Le faisceau S7, sensible à la densité de la forêt, n'est pas recommandé pour l'application d'EQueau.
- 2) Durant l'hiver, la végétation des forêts peu denses (<25%) ne perturbe pas le signal radar, quelque soit l'angle d'incidence (20 à 49 degrés).
- 3) Lorsque la densité de la forêt est plus importante (> 40%), le signal radar perd de sa sensibilité aux propriétés du sol, même aux faibles angles d'incidence.
- 4) L'influence de la densité de la forêt diminue lorsqu'on utilise des images de référence où le sol est gelé.
- 5) L'augmentation de contraste entre les milieux ouverts et les milieux fermés notée sur les images de printemps s'explique par une augmentation de l'interaction des arbres avec la surface de neige, ce qui se traduit par une augmentation du signal total en fonction de la densité de la forêt. Cette augmentation de contraste permet donc de détecter le début de la fonte, par temps couvert.

Pour les bassins plus forestiers du Sud, il a été noté que les coefficients de rétrodiffusion moyens sont les plus élevés parce que la forêt est plus dense (40 à 60%). Toutefois, on a remarqué que la signature de la forêt boréale suivait le même patron temporel que les occupations du sol de la taïga (forêt ouverte, tourbières, sol nu). Ces variations temporelles sont normalement causées par les variations des propriétés diélectriques du sol et de la végétation ou de l'instabilité de la calibration des images. Sur cette série d'images d'hiver, il semblerait que la contribution du sol dominerait encore celle de la végétation, même en forêt boréale. Quant aux rapports de rétrodiffusion moyens, celui des forêts boréales restent plus élevés, ce qui signifie qu'il y aurait plus de neige au sol dans ces secteurs plus au sud. L'algorithme EQueau pourrait peut-être s'appliquer sur certains bassins hydrologiques de la forêt boréale.

Finalement, l'algorithme d'EQueau fonctionne pour les bassins moins enneigés à l'ouest de celui de LG4. A l'hiver 2000, les meilleurs résultats ont d'ailleurs été obtenus sur l'orbite de l'ouest (LG2-LG3). Néanmoins, l'interface d'EQueau a été améliorée afin de tenir compte, à l'avenir, de la disparité régionale des densités du couvert nival en plus de celle due à l'occupation du sol.

6 RÉFÉRENCES

BAGHDADI, N., GAUTHIER Y., BERNIER, M. et J.P. FORTIN (2000). Potential and limitations of RADARSAT SAR Data for Wet Snow Monitoring. *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 1, pp. 316-320.

BERNIER, M., Y. GAUTHIER, J.P. FORTIN, A ROYER, R. FILION, M.C. BOUCHARD, (2000). Implantation d'EQueau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande à l'Hiver 2000. Rapport d'étape pour Prévisions et Ressources Hydriques, Hydro-Québec. INRS-Eau, rapport de recherche No R568-e, 30 juin 2000, 48 pages.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. TURCOTTE et A. EL BATTAY (2000). Combined use of VEGETATION and RADARSAT data for updating areal distribution and water equivalent of snow cover, in the HYDROTEL hydrological forecasting model. Vegetation 2000, Belgirate, Italy, 3-6 April.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). Determination of Snow Water Equivalent using RADARSAT Data in Eastern Canada, *Hydrological Processes*, vol 13, pp 3041-3051.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. TURCOTTE et A. ROYER (1999a). Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT. Rapport d'étape pour Prévisions et Ressources Hydriques Hydro-Québec. INRS-Eau, rapport de recherche No R543, 30 juin 1999, 35 pages.

BOUCHARD, M.-C. (2000). Rapport de stage, INRS-Eau et Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec, août 2000, 50 pages.

GAUTHIER, Y. et M. MAURAS, (1999). Guide de l'utilisateur du logiciel EQueau, INRS-Eau et VIASAT Géo-Technologies, 30 septembre 1999, 30 pages.

DOBSON, M.C., ULABY, F.T. PIERCE, L.E., SHARICK, T.L., BERGEN, K.M., KELLNDORFER, J., KENDRA, J.R., LI, E., LIN, Y.C., NASHASHIBI, A., SARABANDI, K. and P. SIQUEIRA, Estimation of forest biophysical characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR, *IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 877-895, 1995.

KARAM, M. A., F. AMAR, A. K. FUNG., E. MOUGIN, A. LOPES, D. M. LE VINE, and A. BEAUDOIN, A Microwave polarimetric scattering model for forest canopies based on vector radiative transfer theory, *Remote Sensing Environ.*, vol. 53, pp. 16-30, 1995.

KASISCHKE, E.S. et BOURGEAU-CHAVEZ, L.L. (1997). Monitoring South Florida Wetlands Using ERS-1 SAR Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, no. 3, 281-291.

MAGAGI, R., BERNIER, M., et UNG, C.H., soumis-a, Quantitative analysis of RADARSAT SAR data over a sparse forest canopy. Article soumis au *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Octobre 2000.

MAGAGI, R., BERNIER, M., et BOUCHARD M.-C., soumis-b, Use of ground observations to simulate the seasonal changes in the backscattering coefficient of the subarctic forest. Article soumis au *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Octobre 2000.

ANNEXE

Operational determination of snow water equivalent using Radarsat data over a large hydroelectric complex in eastern Canada

**YVES GAUTHIER, MONIQUE BERNIER,
JEAN-PIERRE FORTIN**

INRS-Eau, Université du Québec, 2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec G1V 4C7, Canada

e-mail: gautyves@inrs-eau.quebec.ca

RAYMOND GAUTHIER, RENÉ ROY

Prévisions et Ressources Hydriques, Hydro-Québec, 75 René-Lévesque Ouest, 9ième étage, Montréal, Québec H2Z 1A4, Canada

PIERRE VINCENT

Viasat Géo-Technologie, 419 boulevard Rosemont, Montréal Québec H2S 1Z2, Canada

Abstract The operational feasibility of using Radarsat ScanSAR data to estimate the spatial distribution of snow water equivalent (SWE) in the La Grande River basin, a large hydroelectric complex located in a subarctic climatic region (Northern Québec, Canada), is demonstrated for the 1998–1999 winter season. The methodologies developed for this project have been implemented within a MapInfo™ application that has been named *EQeau*. Analysis of ScanSAR images has shown that they can yield results similar to wide mode images, despite their lower resolution. On a sub-basin level, *EQeau* and ScanSAR images have given similar SWE (± 1 –12%) to those derived from Hydro-Quebec snow lines for January and March 1999.

Key words Please provide up to 10 key words, see letter.

INTRODUCTION

Determining snow water equivalent (SWE) on large remote basins constitutes an everyday challenge for hydrologists and hydroelectric complex managers. Such is the case for the La Grande River basin (Northern Québec, Canada), a large hydroelectric complex covering 184 000 km² north of the 52nd parallel. Located in a subarctic climatic region, the La Grande River basin receives most of its precipitation as snow. Obtaining accurate estimates of the SWE for this region can have great economic benefits, by optimizing dam operations as well as affecting marketing strategies. However, due to the size and remoteness of the basin, direct measurements of SWE are costly and generally very sparse.

Consequently, the goal of this project was to demonstrate the operational feasibility of using Radarsat SAR data to estimate the spatial distribution of SWE in a large hydroelectric complex such as the La Grande River basin. The objectives were not only the development of a reliable estimation method, but also the development of a MapInfo™ application (*EQeau*) to apply the method and facilitate the integration of the results into the existing Hydro-Quebec water supply forecasting process. The scope

of this paper is to briefly present and discuss the 1999 results obtained by *EQeau* with ScanSAR images, which are more interesting for their large coverage and higher cost-benefit ratio (Martin *et al.*, 1999).

THE APPROACH

The method and algorithms behind *EQeau* are based on studies conducted by INRS-Eau in agricultural areas of southern Québec (Bernier & Fortin, 1998) and in open forest areas of northern Québec with ERS-1 SAR images (Bernier *et al.*, 1999a) and adapted for Radarsat SAR data in the same open forest environment (Bernier *et al.*, 1999b). The underlying physical principles are the following:

- The snow cover characteristics, mainly its insulation properties (thermal resistance (R)) influence the underlying soil temperature.
- The dielectric constant of the soil varies with the soil temperature below 0°C. The colder the soil surface is, the lower is the dielectric constant.
- The backscattering signal from the soil is influenced by the soil dielectric constant and by the penetration depth of the frost in the soil.
- Consequently the snow cover characteristics influence the backscattering signal recorded by the SAR sensor.

The algorithm used to recover the SWE from SAR data is derived from two equations documented in Bernier & Fortin (1998) and Bernier *et al.* (1999a). The first defines the linear relationship between the snow thermal resistance and the backscattering ratio between a winter image and a reference (snow-free) image ($\sigma_w^\circ - \sigma_r^\circ$) in dB [Author: What is dB? Units?]. The second infers the SWE from the estimated snow thermal resistance and a function of the mean density of the snow cover (obtained from snow lines or snow models). This density is spatially distributed according to the land cover, obtained by the classification of Landsat-5 images.

DATA AND STUDY SITE

The experimental phase of the project (1996–1998) was carried out over a section of the LG4 sub-basin, which could be covered by a single Radarsat Standard-1 type image (100 km × 100 km). The pre-operational phase of 1998–1999 was carried out over the three uppermost sub-basins of the La Grande River: LG4, LA1 and Caniapiscou (total area of 75 000 km²) (Fig. 1). This area consists of moderately dense black spruce forest, open land, burnt areas and peat bogs. Three Radarsat Wide-1 type images (150 km × 150 km) were used to cover 75% of the area within three days (Bernier *et al.*, 1999a). However, when calibrated ScanSAR Wide products (SCW) became available for the same period, we were also able to acquire ScanSAR images, which completely covered the three sub-basins (Fig. 1). Table 1 shows the general characteristics and differences of each Radarsat product and the acquisition dates of these images.

All images are processed with the following sequence: inversion of the Look-up table, transformation of DN [Spell out DN] values into power values, geometric

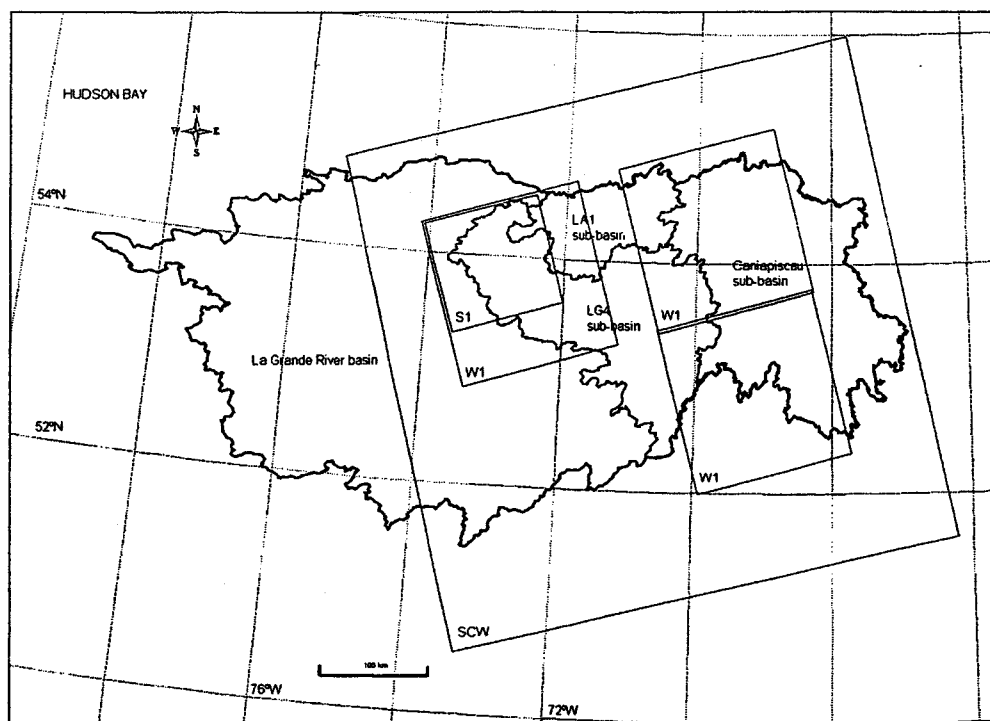


Fig. 1 Study site and coverage of Radarsat images.

Table 1 Characteristics of some Radarsat-1 products and dates of image data acquisitions.

Radarsat-1 beam mode	ScanSAR Wide	Wide 1	Standard 1
Coverage	500 km × 500 km	165 km × 165 km	100 km × 100 km
Nominal resolution	100 m	30 m	30 m
Pixel size	50 m	12.5 m	12.5 m
Beam number and incidence angles	4 W1 (20°–31°) W2 (31°–38°) W3 (39°–45°) S7 (45°–49°)	1 W1 (20°–31°)	1 S1 (20°–27°)
Recording format	8 bit	16 bit	16 bit
Calibrated data	Yes	Yes	Yes
Date of image acquisition	11/07/98 01/18/99 03/07/99 03/31/99	11/11 & 11/14/98 01/22 & 01/25/99 03/11/99 –	– – – –

correction using a DEM, image filtering and computation of the backscattering coefficient (σ^0_i) for each pixel. Thereafter the image can be imported within *EQeau*, where the backscattering ratio is calculated for each pixel. The backscattering contribution of vegetation and topography being generally similar on both images, this ratio ($\sigma^0_w - \sigma^0_i$) is used to reduce their impact and to isolate the signal variations induced by the snow cover characteristics.

Concurrent to the image acquisitions of November, January and early March, detailed field measurements (snow lines or snow pits) were made at 30 test-sites and used in the validation and in the interpretation of the results.

ANALYSIS OF SCANSAR IMAGES AND SWE ESTIMATES

The four images were first analysed to detect any artificial effect due to the ScanSAR mode. A first look at the images reveals a significant change of backscattering, between the W2 and W3 beams. There is a clear and sudden increase of signal at this point. A horizontal transect of all four images confirms this observation and detects more subtle changes between the W1 and W2 beams as well as between the W3 and S7 beams. However, these shifts are generally similar on all images and should therefore be cancelled by the backscattering ratio, having no significant influence on the SWE estimates.

The next step is to evaluate the temporal variation of the backscattering coefficients. Mean values extracted from different areas of all images confirm a gradual 2 dB increase of the signal between early November and the end of March. This is consistent with a gradual warming of the soil, caused by the constant accumulation of snow and also by the less extreme air temperatures of March.

The last analysis before the actual estimation of SWE is to compare the ScanSAR backscattering coefficients with those from the Wide images acquired during the same period. This comparison gives only a general idea for three reasons: (a) there are seven days between a ScanSAR and a Wide acquisition, (b) a certain area can be imaged with higher incidence angles with ScanSAR than with Wide beam, and (c) there is a 70 m difference of resolution between both images. Nonetheless, comparisons indicate a good correlation between the signal of Wide and ScanSAR images, as well as more homogeneous coefficients from ScanSAR data.

Being satisfied with the quality of the ScanSAR data, we integrated them into *EQeau* to estimate the SWE for 18 January, 7 March and 31 March. The 7 November image was used as the reference image. The SWE was estimated for every non-water pixel and maps were created by interpolating at the 500 m resolution. *EQeau* also calculated the mean SWE for the three sub-basins of the study area. Results for ScanSAR data, Wide mode data and interpolations from Hydro-Quebec's field data are shown in Table 2.

Table 2 Mean SWE obtained from ScanSAR data, Wide mode data and field data in the winter of 1999.

Sub-basin	Mean SWE: from ScanSAR data	from Wide mode data	from field data
	18 January 1999	22 & 25 January 1999	22–30 January 1999
LA1	211 mm (100% of sub-basin)	216 mm (87% of sub-basin)	213 mm
LG4	216 mm (100% of sub-basin)	225 mm (74% of sub-basin)	214 mm
Caniapiscou	193 mm (100% of sub-basin)	189 mm (89% of sub-basin)	215 mm
	7 March 1999	11 March 1999	19–20 March 1999
LA1	308 mm (100% of sub-basin)	307 mm (27% of sub-basin)	328 mm
LG4	328 mm (100% of sub-basin)	350 mm (23% of sub-basin)	304 mm
Caniapiscou	289 mm (100% of sub-basin)	312 mm (89% of sub-basin)	331 mm
	31 March 1999		2–4 April 1999
LA1	347 mm (100% of sub-basin)		332 mm
LG4	369 mm (100% of sub-basin)		314 mm
Caniapiscou	329 mm (100% of sub-basin)		331 mm

For January 1999, results from RADARSAT data are almost identical to the ones obtained by conventional methods, particularly for the LG4 and LA1 sub-basins. Figure 2 also shows a good correlation between the SWE estimated from ScanSAR and Wide images at this date. SWE are slightly underestimated (-10%) on the Caniapiscou sub-basin, if we consider the Hydro-Quebec values as a guide. The relief of this sub-basin is more accentuated than for the others and it is possible that snow lines are less representative of the area. For early March, Radarsat data from the LG4 and LA1 basins differs by $\pm 6\%$ from the Hydro-Quebec values. Again it is on the Caniapiscou sub-basin that the SWE are underestimated (12%). However, in this case, Hydro-Quebec's measurements were done much later in the month. Finally, results for the end of March are still relatively good despite the fact that there was some snow melt a few days before and that the air temperature is warmer. However, these are limiting conditions for an effective and reliable use of *EQeau*.

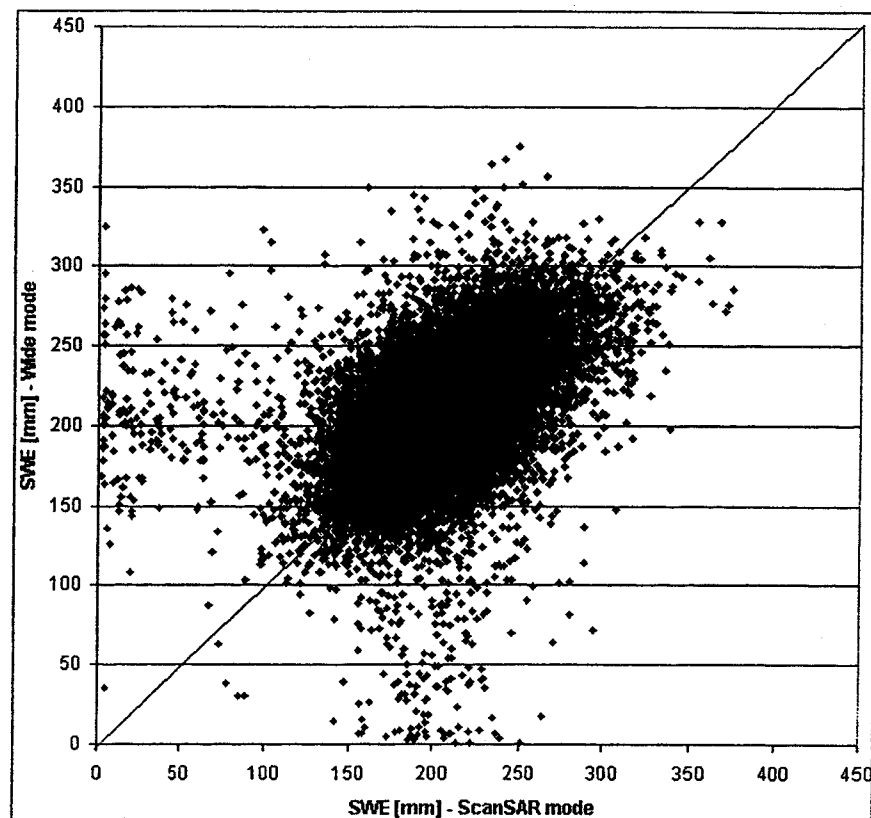


Fig. 2 Comparison of SWE from ScanSAR and Wide mode data in January 1999.

CONCLUSION

This phase of the *EQeau* project has demonstrated that ScanSAR images can give similar SWE estimates to those obtained with Wide images and that the values are consistent with mean SWE obtained from conventional snow line interpolation. Furthermore, the results were successfully integrated within the Hydro-Quebec water supply forecasting process. The next step of the study is to apply *EQeau* to the entire La Grande River basin and to estimate SWE based on land cover classes and altitudes.

REFERENCES

- Bernier, M. & Fortin J. P. (1998) The potential of times series of C-band SAR data to monitor dry and shallow snow cover. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36(1) 226–243.
- Bernier, M., Fortin, J. P., Gauthier, Y., Gauthier, R., Roy, R. & Vincent, P. (1999a) Determination of Snow Water Equivalent using Radarsat SAR data in Eastern Canada. *Hydrol. Processes* 13, 3041–3051.
- Bernier, M., Fortin, J. P., Gauthier Y., Gauthier, R., Bisson J. L. & Vincent P. (1999b) Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires. *Revue des sciences de l'eau* 12(2), 407–423.
- Martin, D., Bernier, M., Sasseville, J. L. & Charbonneau R. (1999) Évaluation financière de l'intégration de technologies satellitaires pour le suivi du couvert nival , au sein d'une entreprise hydroélectrique. *Int. J. Remote Sens.* 20(10), 2033–2048.