

Record Number: 17090
Author, Monographic: Bernier, M.//Fortin, J. P.//Gauthier, Y.//Turcotte, R.//Royer, A.
Author Role:
Title, Monographic: EQeau : Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT. Rapport d'étape no 2
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1999
Original Publication Date: 30 juin 1999
Volume Identification:
Extent of Work: xvi, 87
Packaging Method: pages incluant 3 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 543 e2
Location/URL:
ISBN: 2-89146-349-8
Notes: Rapport annuel 1999-2000
Abstract: Rapport d'étape 2 pour Prévisions et ressources hydriques Hydro-Québec
Ancien R000543b
20.00\$
Call Number: R000543 e2
Keywords: rapport/ ok/ dl

***Méthode opérationnelle d'estimation de
l'équivalent en eau de la neige par imagerie
RADARSAT***

Rapport d'étape

30 juin 1999

EQeau

**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**

par

**Monique Bernier, Jean-Pierre Fortin, Yves Gauthier
Richard Turcotte et Alain Royer**

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

Rapport de recherche No R543b

30 juin 1999

© INRS-Eau, 1999

ISBN: 2-89146-349-8

L'ÉQUIPE DE RECHERCHE :

Monique Bernier, professeure en télédétection

Jean-Pierre Fortin, professeur en hydrologie

Yves Gauthier, agent de recherche en télédétection et géomatique

Richard Turcotte, ingénieur civil et spécialiste d'Hydrotel et de Physitel

Alain Royer, technicien en informatique

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ANNEXES	xi
SOMMAIRE	xiii
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DU PROJET	3
3. BILAN DES ACQUISITIONS D'IMAGES DE L'HIVER 1998-1999	5
4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES IMAGES	7
4.1 DESCRIPTION DES IMAGES SCANSAR	7
4.2 DESCRIPTION DES IMAGES SCANSAR	9
4.3 ANALYSE DES IMAGES SCANSAR.....	10
4.3.1 <i>Analyse visuelle des images</i>	10
4.3.2 <i>Analyse de la variation transversale du signal</i>	12
4.3.3 <i>Analyse de la variation temporelle du signal</i>	13
4.3.4 <i>Analyse du signal selon le mode d'acquisition</i>	14
5. APPLICATION DE L'ALGORITHME	17
5.1 VÉRIFICATION DE L'ALGORITHME	17
5.2 JANVIER 1999	18
5.3 DÉBUT MARS 1999	23
5.4 FIN MARS 1999	28
5.5 SUIVI TEMPOREL	30
6. DIFFUSION DES RÉSULTATS	31
7. CONCLUSION.....	33
RÉFÉRENCES.....	35
ANNEXES (SOUS PLI SÉPARÉ)	

LISTE DES FIGURES

FIGURE 4.1 : TYPES DE FAISCEAUX RADARSAT	7
FIGURE 4.2 : COUVERTURE AU SOL DES DIFFÉRENTS TYPES D'IMAGE RADARSAT	9
FIGURE 4.3 : IMAGE SCANSAR DU 18 JANVIER 1999	11
FIGURE 4.4 : VARIATION TRANSVERSALE DE LA RÉTRODIFFUSION SUR LES QUATRE IMAGES SCANSAR	12
FIGURE 4.5 : VARIATION TEMPORELLE DU SIGNAL SUR LES IMAGES SCANSAR	14
FIGURE 4.6 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION D'UN TRANSECT EXTRAIT SUR DES IMAGES SCANSAR ET WIDE EN NOVEMBRE 1998	15
FIGURE 4.7 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION MOYENS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE, CALCULÉS À PARTIR DES IMAGES SCANSAR ET WIDE DE L'HIVER 1998-1999	16
FIGURE 5.1 : RELATION ENTRE LES RAPPORTS DE RÉTRODIFFUSION ET LA RÉSISTANCE THERMIQUE	17
FIGURE 5.2 : CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE À PARTIR DES IMAGES SCANSAR (18 JANVIER 1999) ET WIDE (22 ET 25 JANVIER 1999)	19
FIGURE 5.3 : ÉCARTS DES ÉQUIVALENTS EN EAU [MM] ENTRE LA CARTOGRAPHIE « WIDE » ET LA CARTOGRAPHIE « SCANSAR » - JANVIER 1999. L'HISTOGRAMME DONNE LE NOMBRE RÉEL DE PIXELS POUR CHAQUE ÉCART	21
FIGURE 5.4 : COMPARAISON DIRECTE DES ÉQUIVALENTS EN EAU EXTRAITS SUR UN TRANSECT TRAVERSANT LES CARTES « SCANSAR » ET « WIDE » D'EST EN OUEST – JANVIER 1999.....	22
FIGURE 5.5 : CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE À PARTIR DES IMAGES SCANSAR (7 MARS 1999) ET WIDE (11 MARS 1999).....	24
FIGURE 5.6 : ÉCARTS DES ÉQUIVALENTS EN EAU [MM] ENTRE LA CARTOGRAPHIE « WIDE » ET LA CARTOGRAPHIE « SCANSAR » - DÉBUT MARS 1999. L'HISTOGRAMME DONNE LE NOMBRE RÉEL DE PIXELS POUR CHAQUE ÉCART.....	26
FIGURE 5.7 : COMPARAISON DIRECTE DES ÉQUIVALENTS EN EAU EXTRAITS SUR UN TRANSECT TRAVERSANT LES CARTES « SCANSAR » ET « WIDE » D'EST EN OUEST – DÉBUT MARS 1999.....	27
FIGURE 5.8 : CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE À PARTIR DE L'IMAGE SCANSAR DU 31 MARS 1999.....	29
FIGURE 5.9 : VARIATION TEMPORELLE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS ET MESURÉS SUR LES SOUS-BASSINS DE CANIAPISCAU LA1 ET LG4	30

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3-1 : BILAN DES ACQUISITIONS D'IMAGES DE L'HIVER 1998-1999.....	5
TABLEAU 4-1 : CARACTÉRISTIQUES DES MODES SCW, W1 ET S1.....	8
TABLEAU 5.1: DENSITÉS MOYENNES DE LA NEIGE AU SOL MESURÉES LORS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE L'HIVER 1999 ET UTILISÉES PAR EQEAU999.....	18
TABLEAU 5-2 : COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À PARTIR DES DONNÉES DE RADARSAT ET ESTIMÉS À PARTIR DES RELEVÉS D'HYDRO-QUÉBEC POUR JANVIER 1999.....	23
TABLEAU 5-3 : COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À PARTIR DES DONNÉES DE RADARSAT ET ESTIMÉS À PARTIR DES RELEVÉS D'HYDRO-QUÉBEC POUR MARS 1999.....	27
TABLEAU 5.4 : COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À PARTIR DES DONNÉES DE RADARSAT ET ESTIMÉS À PARTIR DES RELEVÉS D'HYDRO-QUÉBEC POUR MARS ET AVRIL 1999.....	29

LISTE DES ANNEXES

ARTICLE 1 : DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT USING RADARSAT DATA IN EASTERN CANADA (*soumis à Hydrological Processes*)

ARTICLE 2 : PRE-OPERATIONAL DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT USING RADARSAT DATA (*Eastern Snow Conference, juin 1999*)

ARTICLE 3 : MÉTHODE OPÉRATIONNELLE D'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE PAR IMAGERIE RADARSAT POUR LA GESTION DES RÉSERVOIRS DU COMPLEXE LA GRANDE RIVIÈRE (*ACFAS, mai 1999*)

SOMMAIRE

Au printemps 1998, Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau ont obtenu du Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) de l'Agence spatiale canadienne un appui financier pour démontrer l'efficacité de l'approche RADARSAT sur la moitié amont du bassin de la Rivière La Grande à l'hiver 1999, soit le projet pilote « *EQeau* ». Ce projet pilote vise aussi à démontrer les capacités opérationnelles du *prototype EQeau* développée conjointement par Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau. Dans ce but, l'acquisition d'une image en mode ScanSAR et de trois images RADARSAT en mode Wide (W1) a été programmée pour les mois de novembre 1998, janvier et mars 1999.

À l'hiver 1999, les images en mode Wide qui couvrent une superficie de 165 km X 165 km ont été utilisées pour faire la démonstration pré-opérationnelle de l'approche RADARSAT (rapport du 31 mars 1999). Dès leur réception, les images Wide ont été corrigées radiométriquement et géométriquement chez VIASAT Géo-Technologie. Par la suite, les fichiers images ont été transférées dans le *prototype EQeau* pour la production des cartes d'équivalent en eau. Les cartes résultantes montrent qu'il y a une bonne concordance entre les valeurs des cartes et les équivalents en eau mesurés au sol et qu'il y a plus de neige au sol en 1999 que les hivers précédents. L'algorithme *EQeau* performe aussi bien dans des conditions d'enneigement normales que dans des conditions de faibles enneigement. De plus, il peut être utilisé aussi bien avec des images en mode Wide qu'avec celles en mode Standard (100 km X 100 km) lesquelles avaient servies à son développement. Le *prototype EQeau* est donc opérationnel.

Les images ScanSAR étant plus complexes et ayant été étalonnées au début de l'année 1999, il avait été prévu de les analyser qu'au printemps. Les images ScanSAR ont d'abord été corrigées radiométriquement et géométriquement chez VIASAT Géo-Technologie. VIASAT a dû adapter sa méthode de rectification géométrique pour prendre en compte la composition multi-faisceaux de ces images. Par la suite, une vérification de la qualité radiométrique des images ScanSAR a montré que malgré les problèmes de *scalloping* (baisse ou hausse des valeurs de l'image entre deux faisceaux), elles se comportent généralement de la même façon que les images Wide. Elles ont ensuite été exportées vers le *prototype EQeau* dont l'interface avait été modifiée par VIASAT afin de mieux répondre aux besoins de l'utilisation.

Les cartes d'équivalents en eau issues des images ScanSAR montrent 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 images ScanSAR semblent donc bien appropriées à la détermination de l'équivalent en eau des sous-bassins de la Rivière La Grande sur une base opérationnelle.

1. INTRODUCTION

Ce projet « *EQeau* » constitue la suite prévue au projet « *Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT* » réalisé en 1997 et 1998, dont l'objectif principal était le développement d'un *prototype EQeau* pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige à partir des images RADARSAT. En effet, en décembre 1997, Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau ont préparé avec l'appui d'Hydro-Québec une proposition pour le Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) de l'Agence Spatiale canadienne, administré par le Centre canadien de télédétection. Cette proposition visait à obtenir du financement complémentaire pour la démonstration à l'hiver 1999 de l'efficacité de l'approche RADARSAT sur la moitié amont du bassin de la Rivière La Grande et de la faisabilité opérationnelle du *prototype EQeau*. Au printemps dernier, cette proposition a été acceptée et financée par le Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) et vient compléter la contribution financière d'Hydro-Québec pour les années 1998 et 1999.

Ainsi, dans le cadre de ce projet « *EQeau* » un plan d'acquisition d'images RADARSAT pour l'hiver 1999 a été préparé par l'INRS-Eau en septembre dernier. La cartographie de l'occupation du sol à partir d'images Landsat et le contour détaillé des trois sous-bassins amonts du complexe La Grande Rivière ont aussi été réalisés à l'automne 1998. Cette cartographie et ces contours détaillés des sous-bassins LG4, La Forge et Caniapiscou ont ensuite été intégrés au *prototype EQeau*. De plus, deux campagnes de terrain ont été faites à l'automne 1998, la première en octobre pour vérifier l'instrumentation au sol et la seconde du 9 au 12 novembre 1998 pour connaître les conditions environnementales lors de l'acquisition des images RADARSAT de référence. Pour les fins de la démonstration, l'acquisition de trois images RADARSAT en mode Wide (W1) et une image ScanSAR a été programmée à trois reprises: en novembre 1998 (images de référence) en janvier et en mars 1999. Les images en mode Wide couvrent une superficie carré d'environ 165 km X 165 km alors que les images en mode ScanSAR couvrent une superficie de 500 km X 500 km.

À l'hiver 1999, les images en mode Wide qui couvrent une superficie de 165 km X 165 km ont été utilisées pour faire la démonstration pré-opérationnelle de l'approche RADARSAT (rapport du 31 mars 1999). Dès leur réception, les images Wide ont été corrigées radiométriquement et géométriquement chez VIASAT Géo-Technologie. Par la suite, les fichiers images ont été transférées dans le *prototype EQeau* pour la production des cartes d'équivalent en eau. Des cartes d'équivalent en eau ont été produites pour les 22 et 25 janvier 1999 ainsi que pour le 14 mars

1999. Ces cartes montrent qu'il y a une bonne concordance des valeurs estimées avec les équivalents en eau mesurés au sol et qu'il y a plus de neige au sol en 1999 que les hivers précédents. L'algorithme *EQeau* performe donc aussi bien dans des conditions d'enneigement normales que dans des conditions de faibles enneigement et peut être utilisé aussi bien avec des images en mode Wide qu'en mode Standard (100 km X 100 km). Le prototype *EQeau* est donc opérationnel.

Les images ScanSAR étant plus complexe et ayant été étalonnées qu'au début de l'hiver 1999 (1^{er} février 1999), il avait été prévu de les analyser qu'au printemps 1999.

Ce rapport d'étape décrit les travaux réalisés à l'INRS-Eau dans le cadre du projet *EQeau* depuis le 1^{er} avril 1999. Ces activités portaient essentiellement sur l'analyse des images ScanSAR de l'hiver 1998-1999 et la comparaison des cartes d'équivalent en eau résultantes avec celles produites à partir des images Wide cet hiver (rapport du 31 mars 1999). Le présent rapport constitue le principal livrable attendu de l'INRS-Eau au 30 juin 1999. Les autres livrables sont :

- 1) La cartographie de l'équivalent en eau de la neige pour la moitié amont du complexe de la La Grande Rivière à partir du prototype *EQeau* et issue du traitement de l'image ScanSAR du 18 janvier 1999 ainsi qu'une analyse des résultats (Chapitre 5).
- 2) La cartographie de l'équivalent en eau de la neige pour la moitié amont du complexe de la La Grande Rivière à partir du prototype *EQeau* et issue du traitement de l'image ScanSAR du 7 mars 1999 ainsi qu'une analyse des résultats (Chapitre 5).
- 3) Une comparaison des résultats obtenus à partir des images Wide et des images ScanSAR (Chapitre 5).
- 4) La diffusion des résultats de la démonstration pré-opérationnelle au moyen de communications et d'articles scientifiques (Chapitre 6).

Une image ScanSAR supplémentaire a été acquise le 31 mars 1999 afin de remplacer l'image Wide qui n'a pu être acquise par le satellite RADARSAT le 14 mars 1999. La cartographie résultante de cette image est aussi présentée au chapitre 5.

2. OBJECTIFS DU PROJET

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 qui en découlent sont:

1. Démontrer l'exploitabilité des données de télédétection (RADARSAT et LANDSAT) pour l'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival et la faisabilité du *prototype EQeau* supportant l'emploi d'une telle méthode 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, basée sur les 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.

Trois partenaires se sont associés pour réaliser ces objectifs: VIASAT Géo-Technologie, l'INRS-Eau et Hydro-Québec.

La compagnie VIASAT Géo-Technologie est responsable des traitements radiométriques et géométriques des images RADARSAT et LANDSAT afin qu'elles puissent être utilisables par le *prototype EQeau*. De plus, elle développe l'interface *du prototype EQeau* en étroite collaboration avec l'INRS-Eau, pour s'assurer de la compatibilité des routines et procédures. VIASAT réalise aussi l'ensemble des traitements géomatiques pour la production des modèles numériques d'altitude (MNA) utilisés pour la rectification géométrique et la délimitation des bassins versants.

Enfin, VIASAT participe activement à la promotion de cette application, à la mise en évidence des avantages économiques et stratégiques et elle devrait assumer un leadership important dans les efforts de commercialisation future.

L'INRS-Eau est responsable de l'adaptation aux images en mode Wide et ScanSAR des algorithmes d'estimation de l'équivalent en eau développés à partir des images Standard et de la vérification de la précision des algorithmes. L'INRS-Eau a aussi développé les modules de calcul du *prototype EQeau* et participera à leur optimisation. Il est aussi responsable de la cueillette des données de contrôle au sol, de leur informatisation et de leur interprétation. Ces données au sol permettent de valider les algorithmes et d'établir les conditions limites d'utilisation. Finalement, l'équipe de l'INRS-Eau assure avec VIASAT Géo-Technologie la formation du personnel d'Hydro-Québec.

Le Service Prévisions et Ressources hydriques d'Hydro-Québec est l'utilisateur final du *prototype EQeau*. Son personnel organise la logistique des campagnes de terrain et y participe. Hydro-Québec fournit aussi les données auxiliaires (données météorologiques, stations climatiques, lignes de neige, cartes numériques, ...) nécessaires à la validation des algorithmes. Hydro-Québec s'implique aussi dans la validation des cartes produites et la diffusion commerciale du *prototype EQeau*.

3. BILAN DES ACQUISITIONS D'IMAGES DE L'HIVER 1998-1999

Le scénario retenu pour l'hiver 1998-1999 prévoyait trois acquisitions d'images RADARSAT en mode ScanSAR : début novembre 1998, mi-janvier 1999 et début mars 1999. Pour tenter de compenser l'annulation de l'image Wide du 14 mars 1999 sur LG4, une quatrième acquisition ScanSAR a été effectuée à la fin mars 1999. Pour la même raison, une image en mode Wide a aussi été acquise sur LG4 le 7 avril 1999. Le tableau 3.1 présente le bilan des acquisitions en mode ScanSAR et celui des images en mode Wide, qui seront fréquemment citées à titre de comparaison.

Tableau 3-1 : Bilan des acquisitions d'images de l'hiver 1998-1999

Date	Mode	Orbite	Couverture
7 novembre 1998	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
11 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
11 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud
14 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
18 janvier 1999	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
22 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
22 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud
25 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
7 mars 1999	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
11 mars 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
11 mars 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud
31 mars 1999	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
7 avril 1999	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1

4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES IMAGES

4.1 Description des images ScanSAR

Les images ScanSAR Wide (SCW) sont une combinaison de quatre faisceaux de RADARSAT (W1, W2, W3 et S7) ce qui permet d'imager 500 km de largeur, sous des angles d'incidence de 20° à 49° (Figure 4.1).

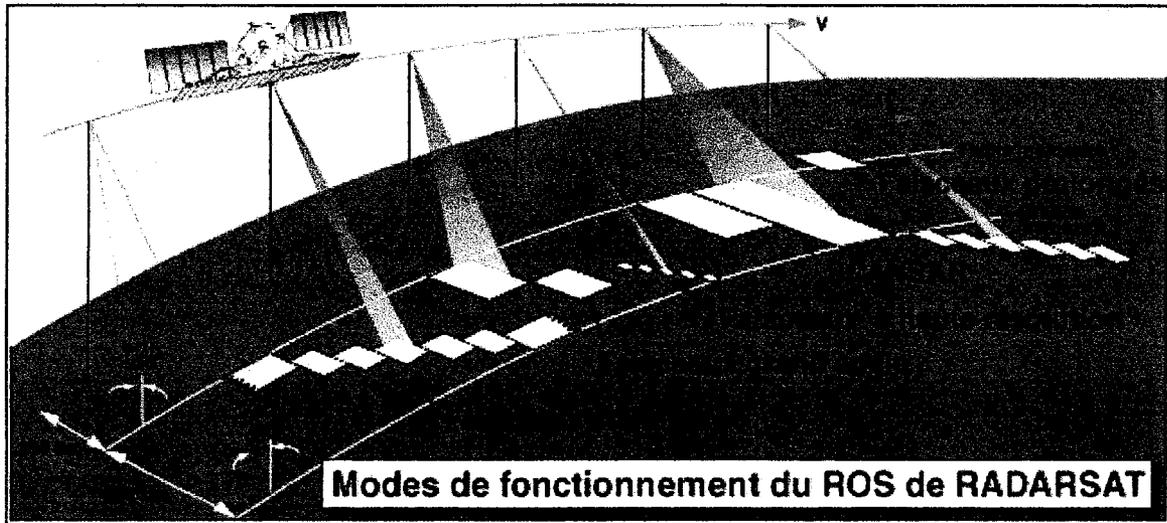


Figure 4.1: Types de faisceaux RADARSAT.

Comme on peut le voir dans le tableau 4.1, le mode ScanSAR offre un gain au niveau de la couverture du territoire, mais exige par contre une concession au niveau de la résolution spatiale des images (100 m) et de la précision radiométrique des données (8 bits). Également, la complexité de ce type d'images a eu pour effet de rendre très difficile l'étalonnage du produit par l'Agence Spatiale Canadienne. Ce n'est que depuis le 1^{er} février 1999 que nous pouvons obtenir des images ScanSAR Wide étalonnées dont les valeurs physiques sont jugées assez stables et comparables. Selon l'Agence Spatiale Canadienne, la précision absolue typique des images est de +/- 1.0dB et la précision relative typique est de +/- 2.0dB. Ces chiffres préliminaires sont toutefois basés sur un très petit ensemble de données.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des modes SCW, W1 et S1

	Mode		
	ScanSAR Wide	Wide 1	Standard 1
Couverture	500 km X 500 km	165 km X 165 km	100 km X 100 km
Résolution nominale	100m	30m	30m
Dimension du pixel	50 m	12.5 m	12.5 m
Nombre de faisceaux et Angles d'incidence	4 W1 (20°-31°) W2 (31°-38°) W3 (39°-45°) S7 (45°-49°)	1 W1 (20°-31°)	1 S1 (20°-27°)
Format d'enregistrement	8 bits	16 bits	16 bits
Données étalonnées	Oui	Oui	Oui

Une autre conséquence de l'utilisation de faisceaux multiples sur la qualité des images ScanSAR est un effet dit de « scalloping » qui se traduit par une baisse ou une hausse des valeurs de l'image entre deux faisceaux. Toujours selon l'ASC, l'erreur typique due au « scalloping » serait de 1.5dB.

Malgré certaines incertitudes encore reliées à l'utilisation des images ScanSAR à des fins quantitatives, ce produit est le plus pertinent pour un suivi opérationnel, puisqu'une seule image couvre les trois sous-bassins à l'étude: LG4, Laforge et Caniapiscau (Figure 4.2).

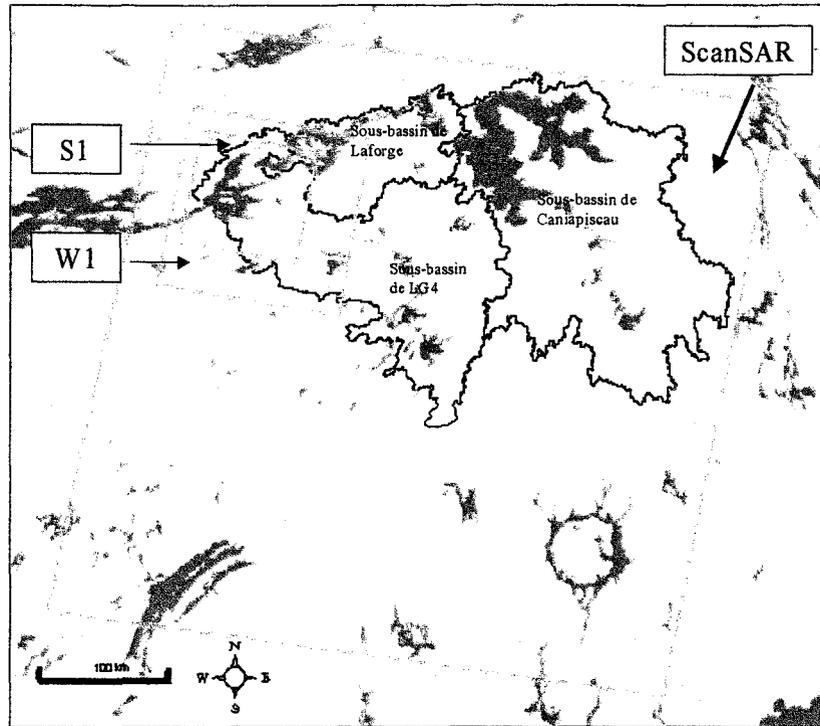


Figure 4.2 : Couverture au sol des différents types d'image RADARSAT.

4.2 Traitement des images ScanSAR

Suite à l'annonce de la disponibilité de produits ScanSAR Wide étalonnés depuis le 1^{er} février 1999, nous avons d'abord demandé à ce que les deux images de l'hiver 1998-1999 acquises avant cette date (7 nov. 98 et 18 jan. 99) soit retraitées par le fournisseur avec les nouveaux paramètres d'étalonnage. Les traitements radiométriques effectués par la suite sont les mêmes que ceux utilisés pour les images Wide (rapport de mars 1999).

Les quatre images ScanSAR de l'hiver 1998-1999 ont ensuite été corrigées géométriquement à l'aide du logiciel SCR (Station Cartographique Radar) de VIASAT qui s'appuie sur le modèle de correction géométrique de précision des images RSO développé au Centre canadien de télédétection. Cette méthode prend en considération les distorsions engendrées par la géométrie d'acquisition du capteur, la position de la plate-forme du satellite (attitude) et les déformations causées par le relief. Chacune des images ScanSAR est géocodée à partir d'un ensemble de

d'appui communs relevés sur les cartes, d'un MNA et des paramètres de positionnement du satellite enregistrés au moment de l'acquisition de l'image. Cette approche permet la superposition précise des images radar prises à différentes dates.

Dans le cas des images RADARSAT de type ScanSAR Wide, VIASAT a dû adapter sa méthode pour prendre en compte la composition multi-faisceaux de ces images afin d'obtenir une meilleure précision planimétrique des ortho-images produites. En effet, les erreurs résiduelles, calculées pour chacun des points d'appui lorsqu'un seul modèle de correction est utilisé sur l'ensemble de l'image (bande de 500 km), sont supérieures (RMS en x et y plus grand que 100 mètres) à celles obtenues pour ces mêmes points lorsque que l'on modélise séparément la moitié gauche et la moitié droite de l'image (RMS en x et y inférieur à 50 mètres). Suite à cette constatation, VIASAT a procédé à la rectification géométrique des images ScanSAR en modélisant séparément les parties de gauche et de droite des images. La modélisation de chacune des parties suit la même démarche et utilise les mêmes paramètres d'orbite. On s'assure également de couvrir une zone de chevauchement entre les deux moitiés en utilisant quelques points d'appui communs aux deux modèles. Ceci permet une meilleure juxtaposition des ortho-images une fois qu'elles sont rééchantillonnées (filtrées) et mosaïquées.

4.3 Analyse des images ScanSAR

4.3.1 Analyse visuelle des images

L'analyse visuelle des images permet de constater deux phénomènes (Figure 4.3). Le premier, est la présence de fortes rétrodiffusions sur les images d'hiver, dans le secteur de LG4. Cette zone s'étend du sud du réservoir jusqu'au lac des Vœux, vers l'est. Ce phénomène n'est pas présent sur l'image d'automne mais apparaît sur l'image de janvier et persiste sur les images de mars. Les mêmes observations avaient été faites sur l'image en mode Wide du 25 janvier 1999 (rapport de mars 1999). On avait alors cru à une anomalie radiométrique, ne disposant que d'une seule image d'hiver sur ce secteur. Mais, à la lueur des observations faites sur les images ScanSAR, il s'agit vraisemblablement d'un phénomène environnemental, survenu entre la mi-novembre et la mi-

mi-janvier. L'augmentation de rétrodiffusion provient soit d'un réchauffement du sol causé par un couvert de neige plus épais, soit de la présence d'une croûte de regel dans le couvert de neige. La forme de la zone affectée est compatible avec la limite possible d'un front chaud (fonte et regel) ou d'une zone de précipitation liquide ou solide. La conséquence de ce phénomène sera, comme dans le cas de l'image Wide du 25 janvier 1999 (rapport de mars 1999), une surestimation des valeurs d'équivalent en eau de la neige de l'ordre de 50 mm pour le sous-bassin de LG4. Par contre, les sous-bassins de Laforge et de Caniapiscou ont été épargnés.

Le deuxième phénomène relevé par l'analyse visuelle est la présence de « scalloping », c'est-à-dire d'une baisse ou d'une hausse de rétrodiffusion significative entre deux faisceaux du radar. Sur la figure 4.3, on observe un tel changement à la limite entre les faisceaux W2 et W3. Si ce phénomène est aléatoire d'une image à l'autre, il pourrait entraîner une sous-estimation ou une surestimation des valeurs d'équivalent en eau. Toutefois, s'il est présent avec la même intensité et au même endroit sur chaque image, le rapport de rétrodiffusion devrait permettre d'annuler son effet.

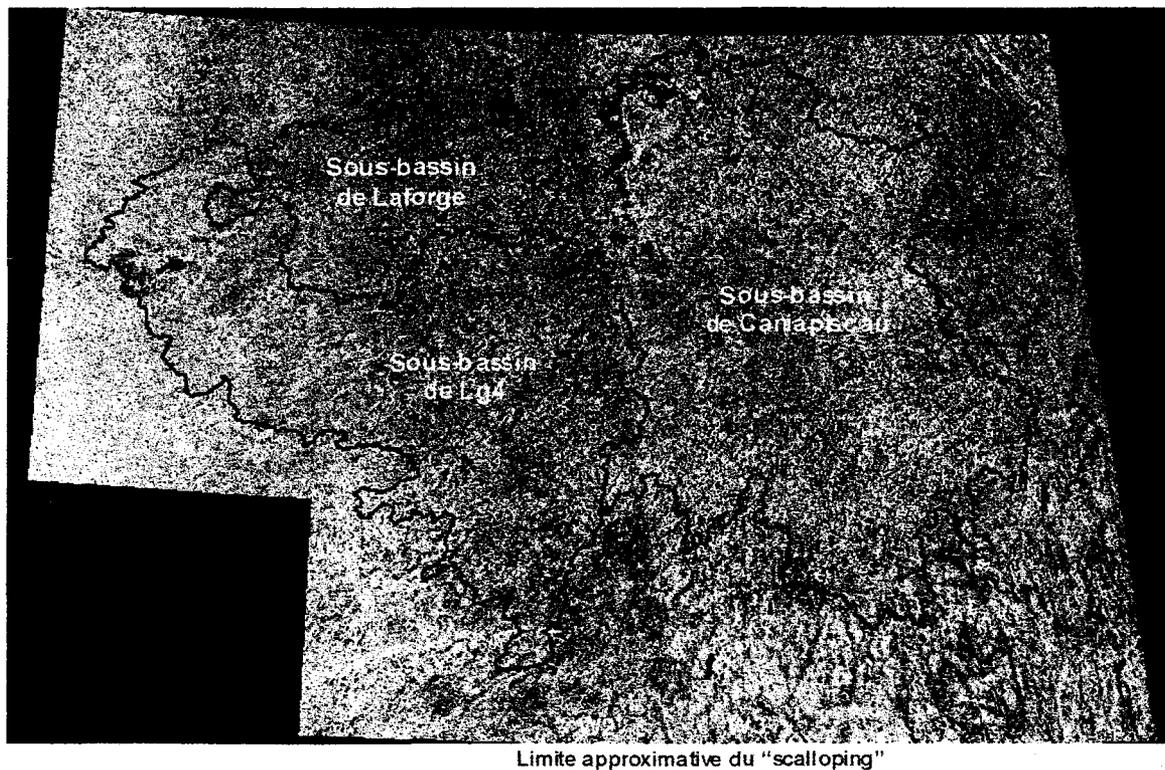


Figure 4.3 : Image ScanSAR du 18 janvier 1999.

4.3.2 Analyse de la variation transversale du signal

L'analyse de la variation transversale du signal devrait permettre de vérifier si le phénomène de « scalloping » est effectivement constant sur toutes les images. Pour ce faire, les coefficients de rétrodiffusion ont été extraits sur différentes lignes de l'image. La figure 4.4 présente une moyenne de quatre transects est-ouest traversant LG4 et Caniapiscau sur les quatre images ScanSAR.

On constate dans un premier temps que les coefficients de rétrodiffusion sont significativement plus élevés dans la partie ouest de l'image, ce qui correspond au secteur de LG4 et à la zone possiblement touchée par un phénomène environnemental. Par contre, il s'agit aussi de la zone où l'on retrouve les angles d'incidence les plus faibles et donc, la plus forte variation de la rétrodiffusion. C'est pourquoi, on remarque aussi des coefficients de rétrodiffusion plus élevés sur l'image d'automne.

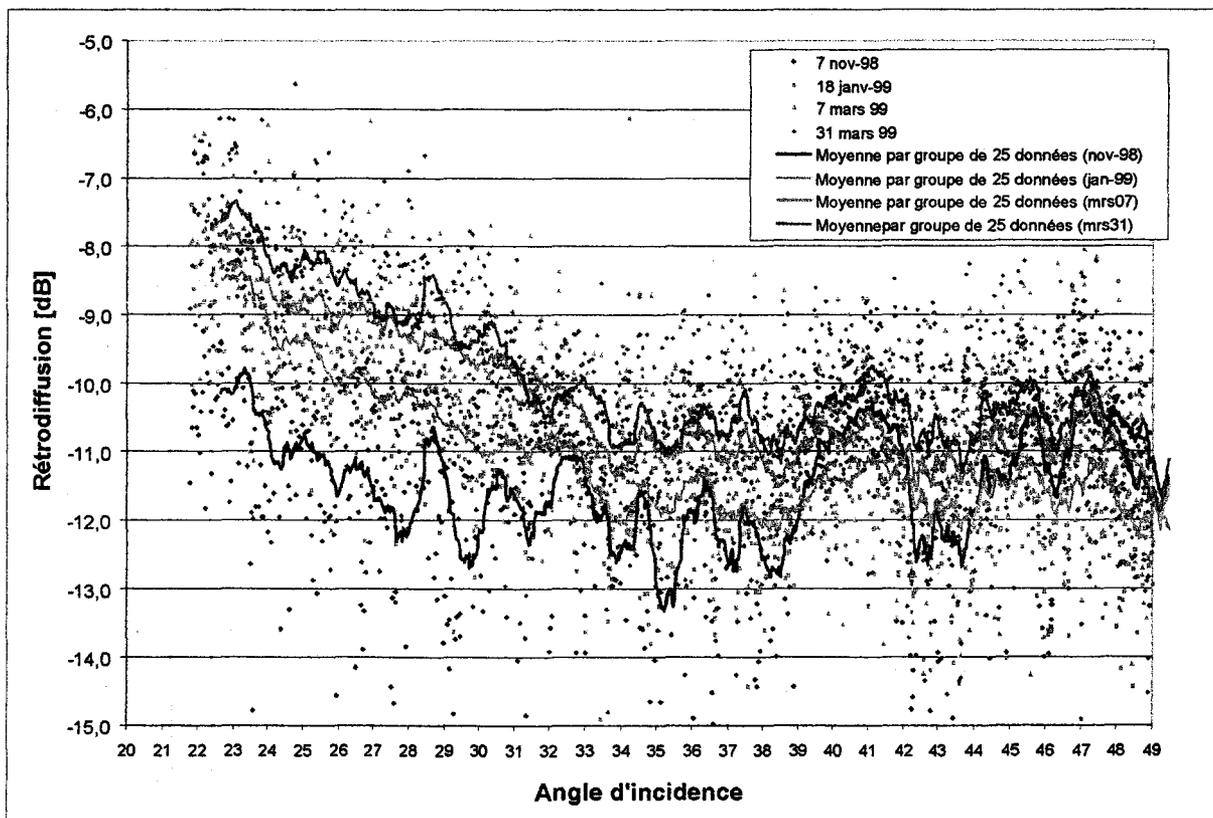


Figure 4.4 : Variation transversale de la rétrodiffusion sur les quatre images ScanSAR.

Quant à l'effet du « scalloping », il est observable à trois différents endroits sur les transects est-ouest:

- changement de pente de la variation de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence autour de 31° - 32° (W1-W2)
- hausse rapide du signal à 38° - 39° (W2-W3)
- hausse à 45° - 46° (W3-S7)

Toutefois, ces comportements sont détectés sur chacune des images et leur effet devrait être annulé par le rapport des rétrodiffusions.

4.3.3 Analyse de la variation temporelle du signal

La figure précédente (Figure 4.4) permet également d'étudier la variation temporelle du signal. Elle démontre une augmentation générale de la rétrodiffusion entre novembre et mars. Toutefois, ces observations ne concernent que la partie de l'image où les transects ont été effectués. En calculant la rétrodiffusion moyenne sur chaque image, chaque sous-bassin et sur les sites d'échantillonnage, les valeurs seront d'autant plus représentatives de l'ensemble du territoire.

La figure 4.5 confirme les mêmes tendances qu'à la figure 4.4, soit une augmentation régulière de la rétrodiffusion entre le 7 novembre et le 31 mars, sauf dans le cas du sous-bassin de Caniapiscou où la rétrodiffusion moyenne est plus élevée (-11.2 dB) le 7 novembre que le 18 janvier (-11.5 dB). En effet, sur l'image ScanSAR du 7 novembre, le phénomène de « scalloping » est plus fort et le sous-bassin de Caniapiscou se retrouve justement dans ce fuseau où les rétrodiffusions sont un peu plus élevées. Mis à part cette exception, le comportement des rétrodiffusions est compatible avec un réchauffement graduel du sol relié à l'accumulation constante de neige et au réchauffement continu des températures de l'air en mars.

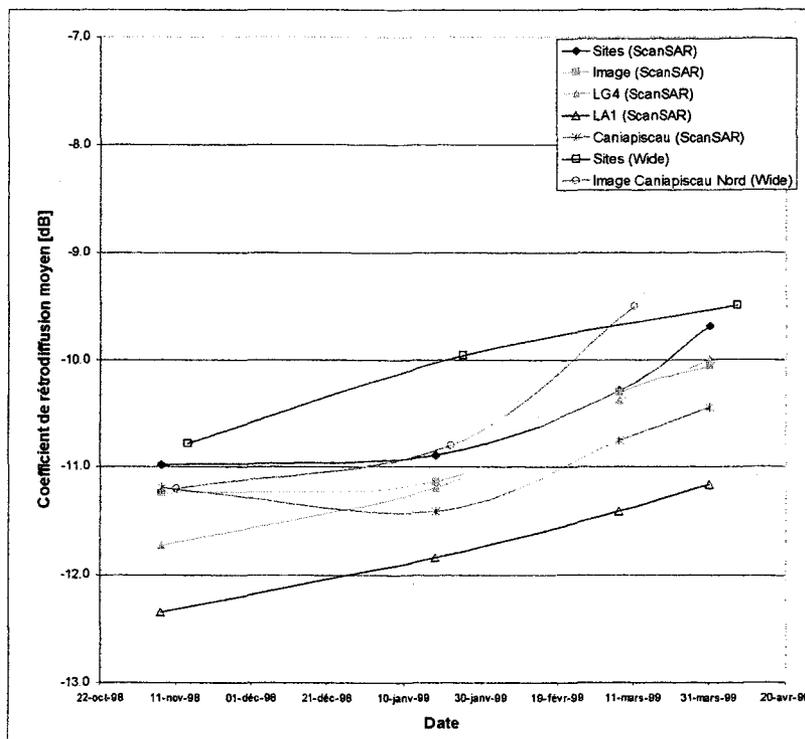


Figure 4.5 : Variation temporelle du signal sur les images ScanSAR.

4.3.4 Analyse du signal selon le mode d'acquisition

La comparaison de la rétrodiffusion des images ScanSAR et des images en mode Wide est effectuée seulement pour compléter l'évaluation générale des images ScanSAR puisque :

- Il y a de quatre à sept jours d'écart entre les acquisitions ScanSAR et les acquisitions en mode Wide de l'hiver 1998-1999; d'où de possibles changements de température et surtout de possibles chutes de neige.
- Il y a une différence au niveau des angles d'incidence sous lesquels un même territoire est imagé (Secteur LG4 : Wide (20° à 31°), ScanSAR (23° à 34°); Secteur Caniapiscou : Wide (20° à 31°), ScanSAR (36° à 44°)).
- Il y a une différence de résolution spatiale de 70 m entre les deux modes d'acquisition (30 m vs 100 m).

Néanmoins, la figure 4.6 reprend le transect ScanSAR d'automne de la figure 4.4 et y ajoute les valeurs extraites au même endroit en mode Wide.

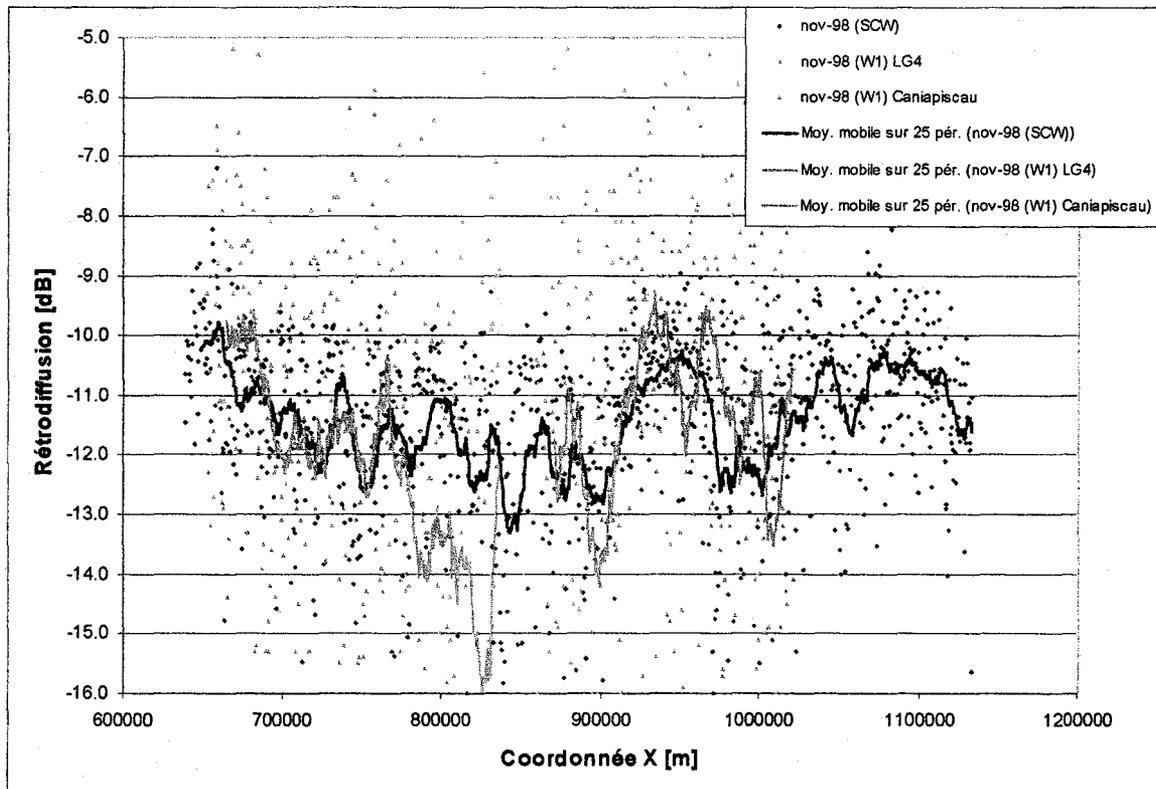


Figure 4.6 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion d'un transect extrait sur des images ScanSAR et Wide en novembre 1998.

Malgré les facteurs limitatifs énumérés plus hauts, la figure 4.6 démontre tout de même que les coefficients de rétrodiffusion sont en moyenne, constants d'un mode d'acquisition à l'autre. Par contre la dispersion des points indique une variabilité plus forte pour le mode Wide (16 bits) et une plus grande homogénéité pour le mode ScanSAR (8 bits), malgré la plus grande gamme d'angles d'incidence.

Une deuxième comparaison des données est présentée à la figure 4.7, où l'on retrouve les coefficients de rétrodiffusion moyens calculés sur les sites d'échantillonnage, à partir des images ScanSAR et Wide de l'hiver 1998-1999. Encore une fois, les valeurs sont comparables, bien qu'on remarque que les valeurs extraites de la majorité des sites en mode Wide soient plus élevées que celles extraites des images en mode ScanSAR. Il peut s'agir d'un effet de l'angle d'incidence puisque les sites d'échantillonnage sont situés entre 20° et 31° sur les images Wide (secteur LG4) et entre 23° et 34° sur les images ScanSAR.

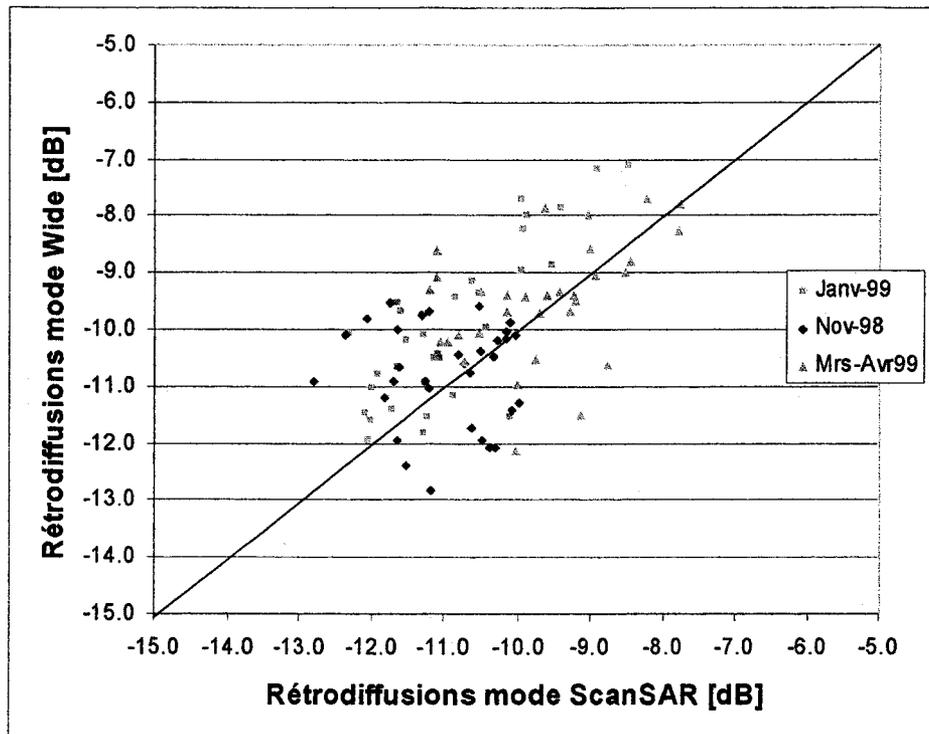


Figure 4.7 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion moyens des sites d'échantillonnage, calculés à partir des images ScanSAR et Wide de l'hiver 1998-1999.

Après une analyse visuelle des images ainsi qu'une analyse transversale et temporelle du signal, nous pouvons conclure que les images ScanSAR se comportent généralement de la même façon que les images Wide. Les problèmes reliés au « scalloping » et les variations reliées aux changements d'angle d'incidence devraient quant à eux s'amoindrir par le calcul du rapport de rétrodiffusion.

5. APPLICATION DE L'ALGORITHME

5.1 Vérification de l'algorithme

Nous avons établi que le comportement et l'ordre de grandeur des coefficients de rétrodiffusion sont généralement comparables entre les modes Wide et ScanSAR. Les algorithmes établis pour les images du mode Wide devraient donc être aussi efficaces pour le mode ScanSAR. Avant l'application, il serait toutefois intéressant de vérifier où les rapports de rétrodiffusion des images ScanSAR de l'hiver 1999 se situent dans le graphique sur le raffinement de l'algorithme, déjà présenté à la figure 6.1 du rapport de mars 1999. La présente figure 5.1 démontre donc que dans le cas de l'image ScanSAR du 18 janvier 1999, les rapports de rétrodiffusion sont un peu en-deçà de la tendance générale alors que dans le cas de l'image ScanSAR du 7 mars 1999, ils sont un peu au-dessus. Ce qui rend toutefois la comparaison difficile c'est qu'avec une résolution de 100m, les rapports de rétrodiffusion des sites d'échantillonnage extraits des images ScanSAR ne comprennent que quelques pixels. De plus, ils sont tous situés dans une petite section de l'image ScanSAR et ne sont plus nécessairement représentatifs de l'ensemble. Ce sera donc à l'application que l'on constatera la performance de l'algorithme.

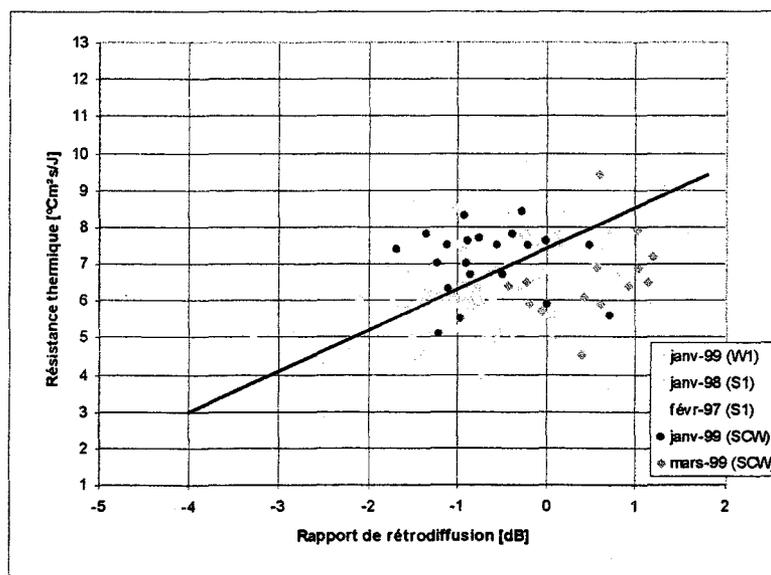


Figure 5.1 : Relation entre les rapports de rétrodiffusion et la résistance thermique

5.2 Janvier 1999

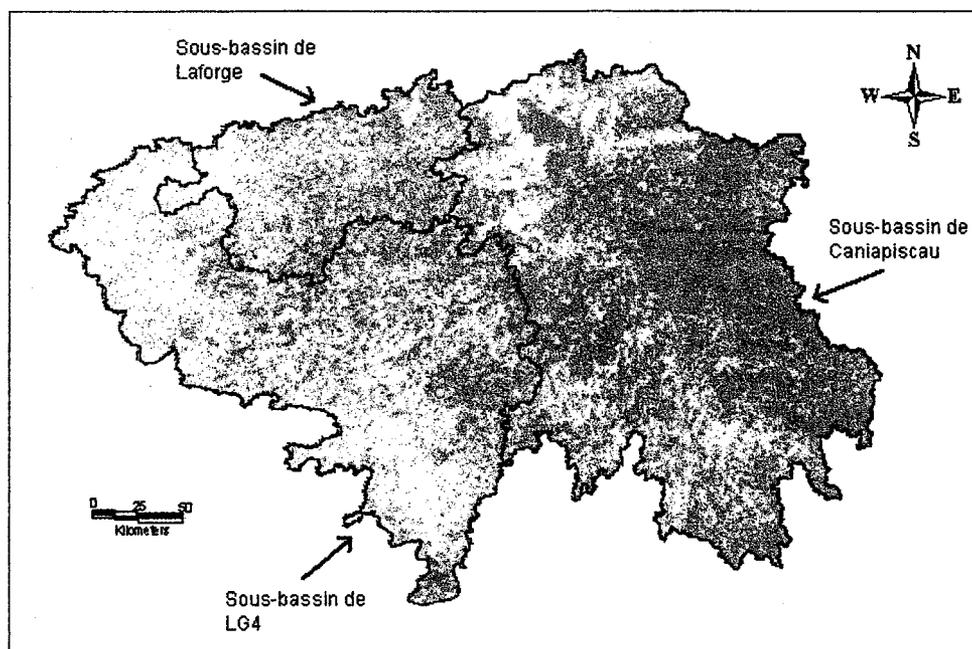
Après les diverses analyses décrites au chapitre 4, les images ScanSAR ont été exportées vers le prototype EQeau. L'image de référence est celle du 7 novembre 1999 et l'algorithme utilisé est le même que pour les images Wide (rapport du 31 mars 1999). Les densités moyennes retenues sont celles mesurées lors des campagnes de terrain de l'hiver 1999 (tableau 5.1).

Tableau 5.1: Densités moyennes de la neige au sol mesurées lors des campagnes de terrain de l'hiver 1999 et utilisées par EQeau.

	Occupation du sol		
	18 janvier 1999	7 mars 1999	31 mars 1999
Forêt	202	223	240
Forêt ouverte	211	238	250
Brûlis	218	252	260
Landes	222	244	270
Sols nus	222	244	270

La figure 5.2 présente la cartographie de l'équivalent en eau de la neige sur les sous-bassins amonts de la rivière La Grande à partir de l'image ScanSAR du 18 janvier 1999. Pour des fins de comparaison, elle présente aussi la cartographie déjà effectuée à partir des images en mode Wide du 22 et du 25 janvier. On y retrouve généralement les mêmes classes dominantes (150-200 mm et 200-250 mm). Toutefois, dans le secteur LG4, il y a une bande jaune visible seulement sur la carte issue de l'image en mode Wide. Cette bande est vraisemblablement reliée à un problème radiométrique à l'extrémité ouest de l'image (patron d'antenne).

Aussi, la zone affectée par le phénomène environnemental discuté plus tôt se distingue sur les deux cartes (figure 5.2) et se traduit par des équivalents en eau plus élevés sur la partie ouest de LG4 (zone où le jaune, orange et rouge dominant). D'après nos relevés de terrain faits à l'est du barrage de LG4, ces équivalents en eau seraient surestimés. Néanmoins, il serait possible qu'il y est effectivement un couvert de neige plus épais au sud et à l'ouest du sous-bassin de LG4. En effet, en janvier, il y avait beaucoup plus de neige près des résidences de LG4 que par les années antérieures même si les relevés de neige d'Hydro-Québec à la station nivométrique de LG4 (86 cm) ne montrent pas cette augmentation. Mais ce site ne représente que quelques pixels.



LÉGENDE
Équivalent en eau

□	Non calculé
■	1 mm à 100 mm
▒	101 mm à 150 mm
▓	151 mm à 200 mm
░	201 mm à 250 mm
◻	251 mm à 300 mm
◼	301 mm à 350 mm
◽	351 mm à 400 mm
◾	401 mm et plus

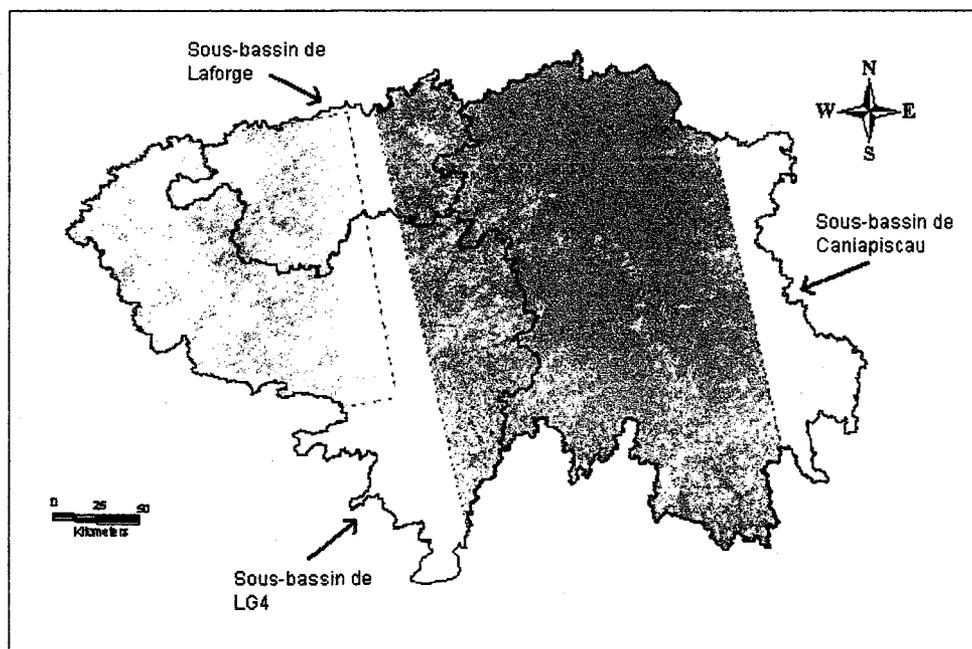


Figure 5.2 : Cartographie de l'équivalent en eau de la neige à partir des images ScanSAR (18 janvier 1999) et Wide (22 et 25 janvier 1999).

De plus, les stations nivométriques plus au sud et à l'extérieur du sous-bassin de LG4 donnent des hauteurs de neige supérieures à 1 mètre (lac Rossignol, 108 cm; lac Cadieux, 103 cm; lac Neoskwescau, 108 cm) même si les équivalents en eau sont inférieurs à 195 mm. Tel qu'illustré par les cartes, il pourrait donc y avoir plus de neige dans ce secteur que l'indique les mesures d'équivalent en eau au sol (lesquelles sont plus incertaines que les hauteurs).

La deuxième différence majeure entre les deux cartes est la classe d'équivalent en eau attribuée aux lacs et réservoirs à des fins cartographiques. Dans sa forme actuelle, l'algorithme attribue à la classe eau, la valeur moyenne calculée sur les autres classes de l'image. Donc, sur la carte issue de l'image ScanSAR, la valeur moyenne est calculée sur l'ensemble des trois sous-bassins et tient compte des forts équivalents en eau estimés pour LG4. C'est pourquoi les lacs et réservoirs sont en jaune (valeur exacte : 203 mm). Par contre, sur la carte issue des images Wide, la moyenne est calculée pour chaque image. C'est pourquoi les lacs et réservoirs sont en jaune (233 mm) sur le secteur de LG4 et en vert (186 mm) sur le secteur de Caniapiscau. Toutefois, la différence est avant tout visuelle puisque la valeur moyenne exacte est conservée pour le calcul de l'équivalent en eau des sous-bassins.

Afin d'évaluer maintenant les différences réelles entre les deux cartographies de la figure 5.2 et de voir leur répartition spatiale, la figure 5.3 présente une carte et un histogramme de ces différences absolues. Les écarts de ± 1 à 10 mm (bleu) et de ± 11 à 20 mm (vert) dominent largement. Des écarts plus élevés (jaune, rouge et rose) existent mais sont surtout localisés à dans quatre zones spécifiques:

- Dans le secteur de LG4 (secteur du « phénomène environnemental ») avec les plus forts équivalents en eau sur l'image Wide,
- À l'extrême est de l'image de gauche (bande jaune discutée précédemment) et peut-être un peu à l'extrême est de l'image de droite (effet du patron d'antenne sur l'image Wide),
- Dans la région montagneuse au sud-est du sous-bassin de LG4 (probablement un effet de la topographie et de son effet sur la correction géométrique),
- Au nord-est du réservoir de Caniapiscau.

Il n'y a donc pas de biais systématique entre les deux modes d'acquisition.

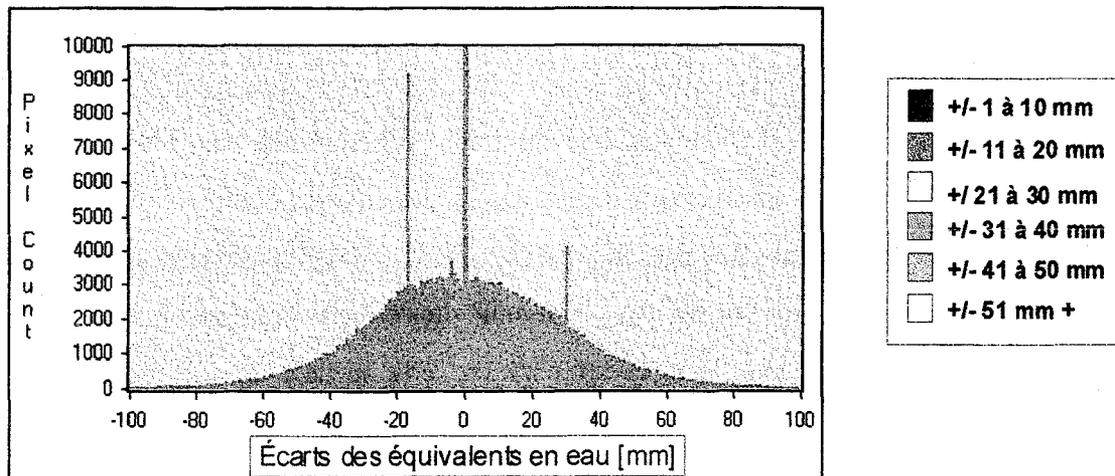
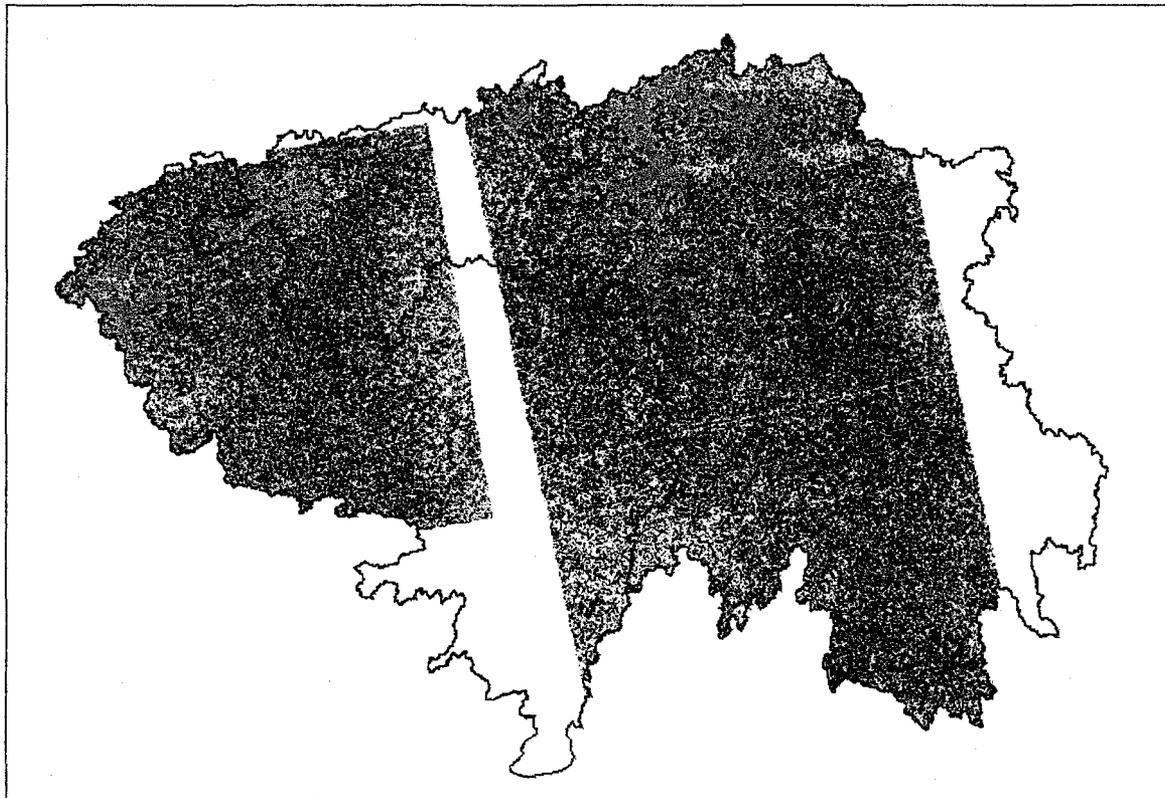


Figure 5.3 : Écarts des équivalents en eau [mm] entre la cartographie «Wide» et la cartographie «ScanSAR» - Janvier 1999. L'histogramme donne le nombre réel de pixels pour chaque écart.

Une autre façon de s'assurer de la concordance des cartes est de porter les équivalents en eau sur un graphique comparatif (Figure 5.4).

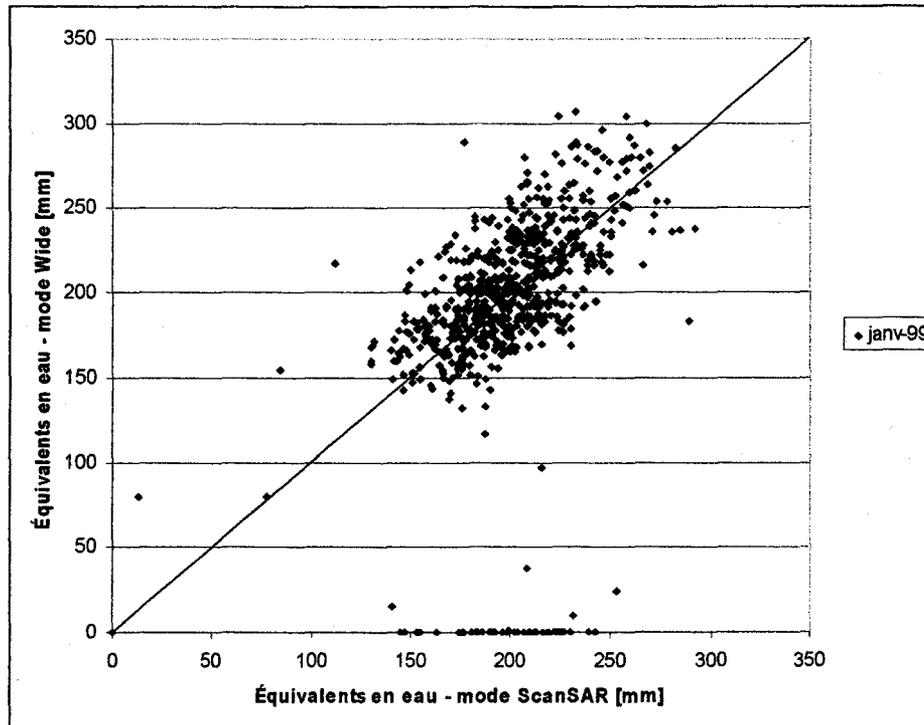


Figure 5.4 : Comparaison directe des équivalents en eau extraits sur un transect traversant les cartes « ScanSAR » et « Wide » d'est en ouest – Janvier 1999.

Les points de la figure 5.4 ont été extraits sur un seul transect est-ouest qui traverse LG4 et Caniapiscou. À nouveau, on ne distingue pas de biais systématique sur les données. Des différences sont toutefois normales puisque rappelons-le, les images ScanSAR et Wide, tant à l'automne qu'à l'hiver, ne sont pas acquises aux mêmes dates et avec la même résolution. Pour la période d'acquisition du 7 au 14 novembre, l'épaisseur du couvert de neige au site #2 (secteur LG4) est passé de 8 à 18 cm alors que la température à la surface du sol variait encore en fonction de celle de l'air. Pour la période d'acquisition du 18 au 25 janvier, l'épaisseur du couvert de neige est passé de 79 à 96 cm alors que la température à la surface du sol, toujours au site #2, est passée de -1.4 à -0.6°C .

Finalement, pour faire le bilan des comparaisons entre les types d'images, le calcul de l'équivalent en eau moyen pour chaque sous-bassin est présenté au tableau 5.2. Les résultats extraits des images Wide ont déjà été présentés dans le rapport de mars 1999.

Tableau 5-2 : Comparaison des équivalents en eau estimés à partir des données de RADARSAT et estimés à partir des relevés d'Hydro-Québec pour janvier 1999

	Moyenne des équivalents en eau		
	À partir de l'image ScanSAR du 18 janvier 1999	À partir des images Wide du 22 et du 25 janvier 1999	À partir des relevés d'H-Q (22 au 30 janvier 1999)
LA1	211 mm (100% du bassin)	216 mm (87% du bassin)	213 mm
LG4	216 mm (100% du bassin)	225 mm (74% du bassin)	214 mm
Caniapiscau	193 mm (100% du bassin)	189 mm (89% du bassin)	215 mm

Les résultats moyens obtenus à partir de l'image ScanSAR de janvier sont donc pratiquement identiques à ceux obtenus précédemment avec les images Wide.

5.3 Début mars 1999

La figure 5.5 présente la cartographie de l'équivalent en eau de la neige sur les sous-bassins amonts de la rivière La Grande à partir de l'image ScanSAR du 7 mars 1999. Pour des fins de comparaison, elle présente aussi la cartographie déjà effectuée à partir des images en mode Wide du 11 mars.

Les équivalents en eau estimés sur la carte « ScanSAR » sont principalement regroupés dans les classes 251-300 mm (doré) et 301-350 mm (rouge), avec une zone plus forte dans le sous-bassin de LG4, où l'on retrouve le fameux secteur affecté par le phénomène environnemental discuté plus haut. La carte « Wide », localisée sur Caniapiscau, présente les mêmes classes dominantes, mais avec une plus forte proportion de pixels dans le rouge et une zone où le rose (351-400 mm) et le blanc (400 mm+) dominant.

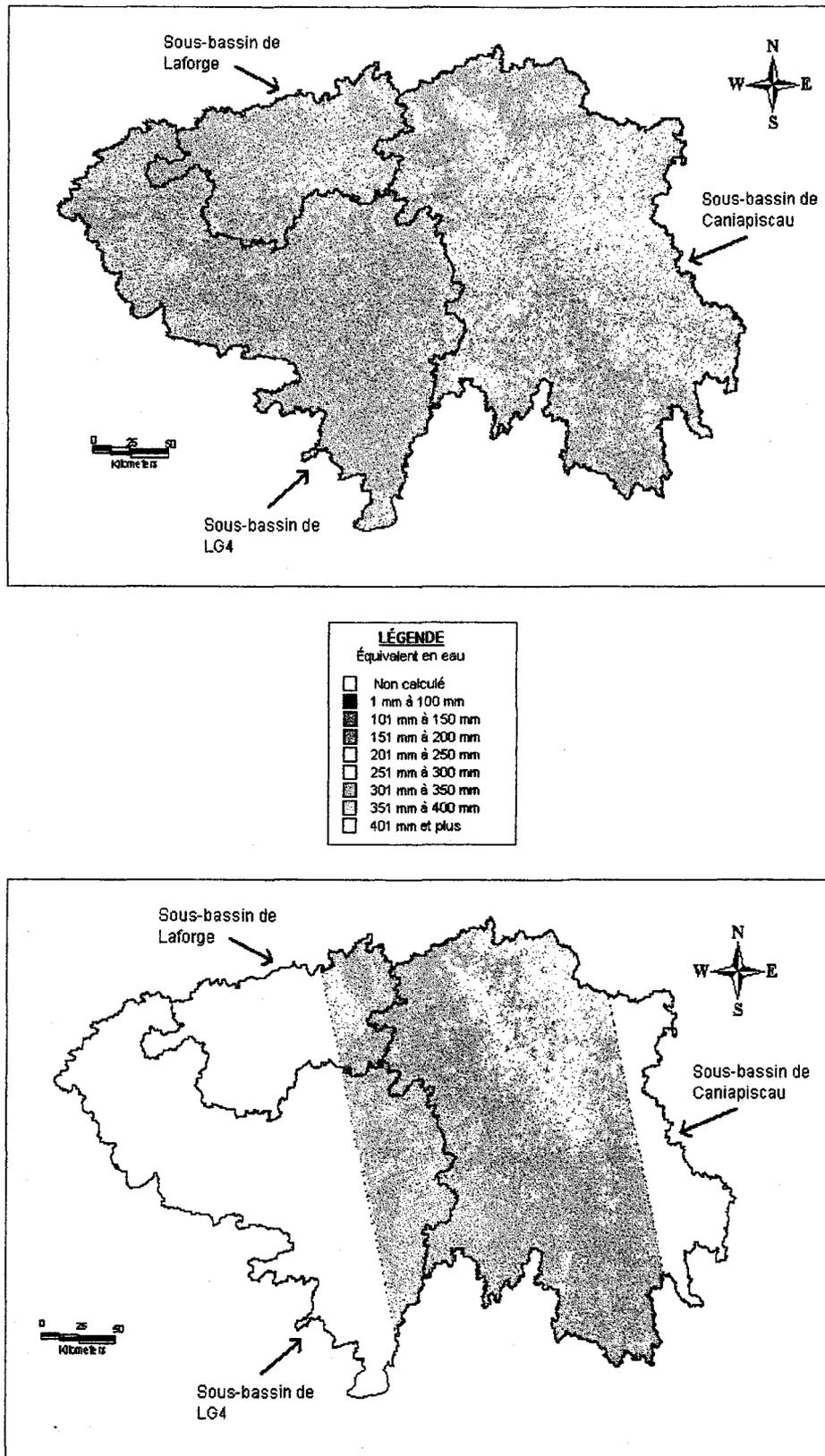


Figure 5.5 : Cartographie de l'équivalent en eau de la neige à partir des images ScanSAR (7 mars 1999) et Wide (11 mars 1999).

Les écarts réels entre les deux cartes sont présentés à la figure 5.6. On y remarque trois zones avec des différences significatives :

- La première est située à la limite des bassins de LG4 et de Caniapiscau, au sud du réservoir. Bien qu'il s'agisse d'une limite entre deux bassins, il ne s'agit toutefois pas d'une zone de très forte altitude ou qui est caractérisée par une occupation du sol particulière.
- La deuxième zone, est située encore une fois sur l'extrême droite des images Wide, comme pour l'image du 25 janvier. Cela pourrait donc confirmer un problème radiométrique relié au patron d'antenne pour les plus forts angles d'incidence du mode Wide 1.
- La troisième zone est localisée à l'extrême est du réservoir de Caniapiscau. À cet endroit, l'imagerie ScanSAR du 7 mars donne des valeurs d'équivalent en eau plus faibles que l'image Wide du 11 mars.

Ces différences peuvent-elle s'expliquer par des changements environnementaux? Pour la période d'acquisition du 7 au 11 mars 1999, le couvert de neige au site #2 (secteur LG4) est passé de 109 à 119 cm alors que la température à la surface du sol est stable à près de -1°C . Il n'y a donc pas de grands changements entre les deux acquisitions. Il est toutefois fort possible, vu la vaste étendue du territoire, que les conditions aient changé plus significativement dans le secteur de Caniapiscau que dans le secteur de LG4 où est située la station climatologique.

En résumé, on constate des différences significatives entre les cartographies « Wide » et « ScanSAR » du début mars 1999 mais celles-ci sont localisées. Le graphique comparatif de la figure 5.7, extrait sur un transect est-ouest du secteur Caniapiscau seulement, montre ainsi que la cartographie « Wide » donne des équivalents en eau plus élevés mais de même ordre de grandeur.

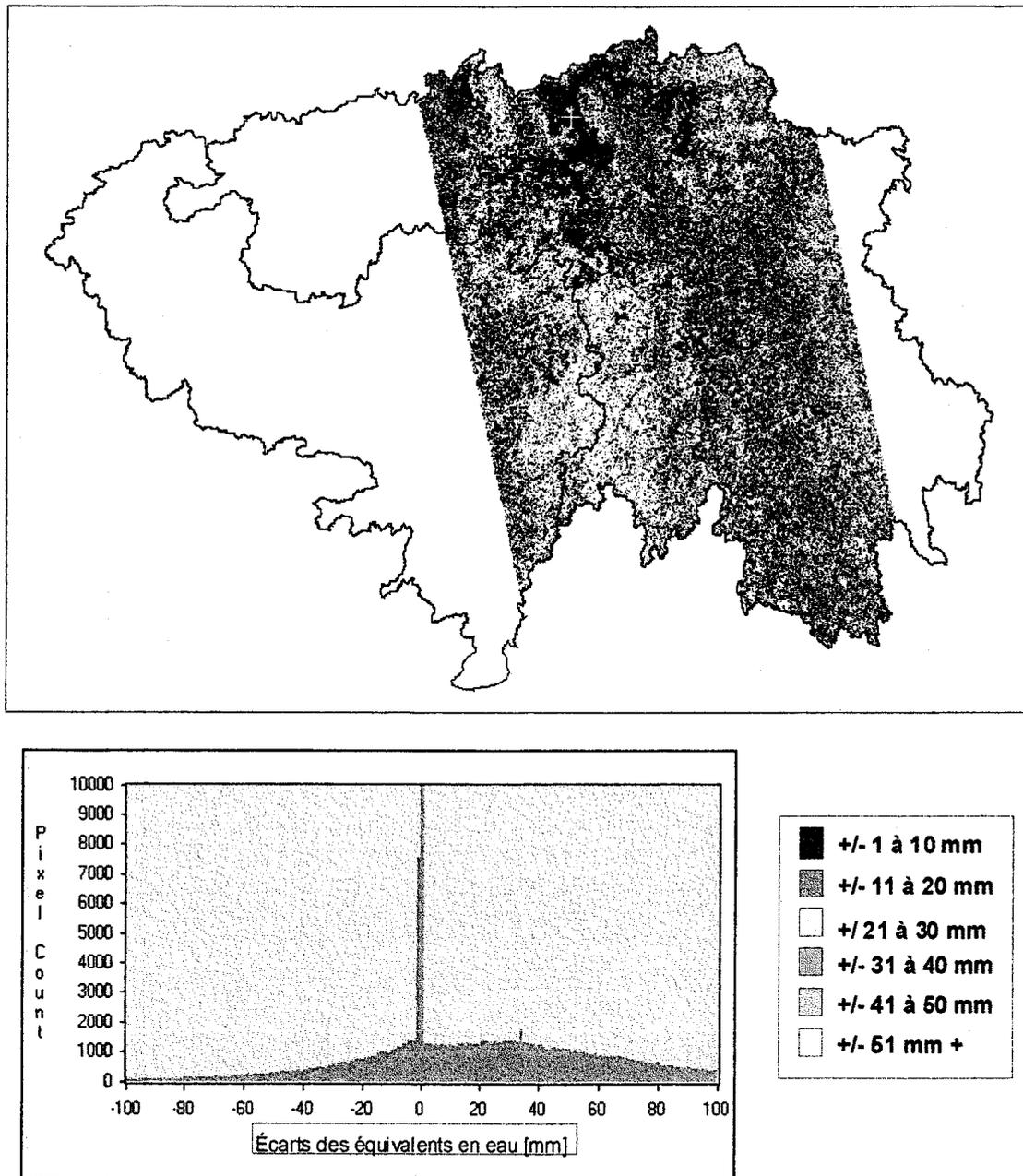


Figure 5.6 : Écarts des équivalents en eau [mm] entre la cartographie « Wide » et la cartographie « ScanSAR » - Début mars 1999. L'historgramme donne le nombre réel de pixels pour chaque écart.

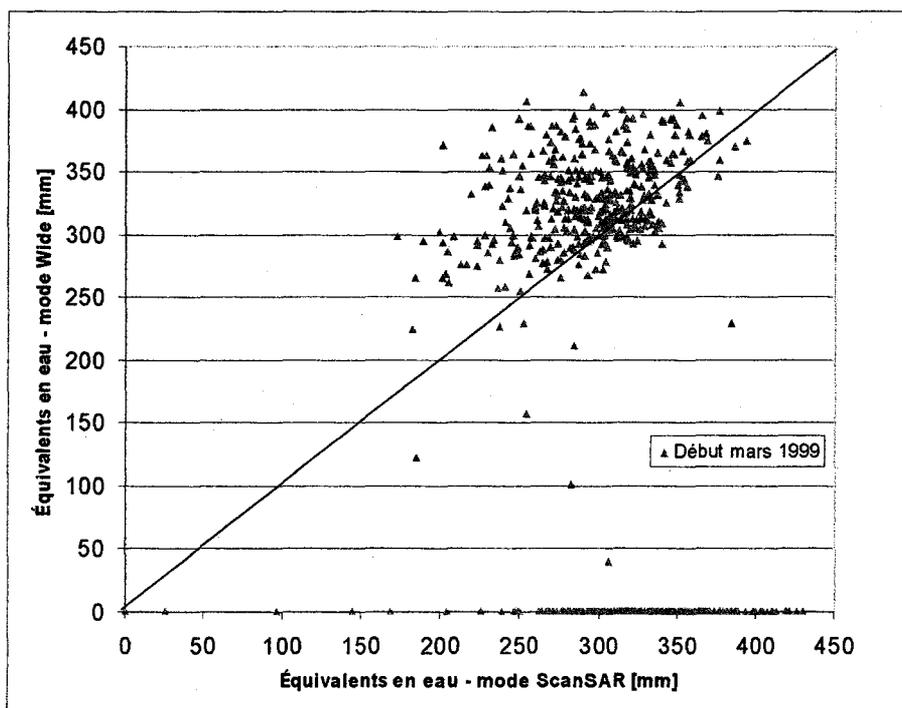


Figure 5.7 : Comparaison directe des équivalents en eau extraits sur un transect traversant les cartes « ScanSAR » et « Wide » d'est en ouest – Début mars 1999.

Finalement, le calcul de l'équivalent en eau moyen pour chaque sous-bassin extrait de l'image ScanSAR est présenté en comparaison avec les résultats extraits des images Wide déjà présentés dans le rapport de mars 1999 (tableau 5.3).

Tableau 5-3 : Comparaison des équivalents en eau estimés à partir des données de RADARSAT et estimés à partir des relevés d'Hydro-Québec pour mars 1999

	Moyenne des équivalents en eau		
	À partir de l'image ScanSAR du 7 mars 1999	À partir des images Wide du 11 mars 1999	À partir des relevés d'H-Q (19 au 21 mars 1999)
LA1	308 mm (100% du bassin)	307 mm (27% du bassin)	328 mm
LG4	328 mm (100% du bassin)	350 mm (23% du bassin)	304 mm
Caniapiscou	289 mm (100% du bassin)	312 mm (89% du bassin)	331 mm

Les équivalents en eau moyens obtenus avec l'image ScanSAR (7 mars 1999) sont similaires (LA1) ou inférieures de 8% à ceux obtenus avec les images Wide (11 mars 1999). Rappelons que, pour que toutes ces comparaisons soient plus justes, il faudrait tenir compte de la répartition spatiale des chutes de neige entre les diverses dates d'acquisition des images RADARSAT et des relevés d'Hydro-Québec. Par exemple, le 10 mars, une vingtaine de mm d'équivalent en eau se sont ajoutés dans le secteur de LG4 et possiblement dans celui de Caniapisseau.

5.4 Fin mars 1999

Le 31 mars 1999, bien que la neige soit sèche ce jour-là, les conditions sont moins propices à l'application d'EQeau. En effet, la fonte a débuté quelques jours auparavant, avec trois jours où la température de l'air a atteint 10°C. La densité du couvert de neige a donc augmenté considérablement et la résistance thermique du couvert ne contrôle plus nécessairement la température du sol en cette période plus douce. Résultat, une application d'EQeau avec l'algorithme de mars ($y=1.1x + 6.5$) et des densités moyennes estimées à partir des relevés d'Hydro-Québec, donne des équivalents en eau erronés entre 400 mm et 600 mm, ce qui est loin des 250 à 350 mm mesurés par Hydro-Québec. Il faut toutefois noter que les densités utilisées sont approximatives puisqu'aucune campagne de terrain intensive n'a été faite à la fin mars et que les relevés d'Hydro-Québec ont été fait autour du 21 mars et après le 2 avril 1999. Les valeurs varient entre 240 et 270 kg/m³ dans le premier cas et entre 280 et 320 kg/m³ dans le second cas. Dans cette optique, si l'on relance l'application avec les valeurs du premier cas, en supposant que l'augmentation de densité de la neige n'a pas encore eu d'effet sur le sol, on obtient des résultats encore surestimés, mais plus près de la réalité. La figure 5.8 montre en effet des équivalents en eau variant de 250 à plus de 400 mm. Les équivalents en eau moyens estimés pour chaque bassin sont présentés au tableau 5.4.

Il demeure toutefois certain qu'une application d'EQeau dans ces conditions de début de fonte, ne présente pas la même fiabilité qu'en milieu d'hiver. Il serait nécessaire d'étudier plus en détail le comportement de l'algorithme et du signal radar en cette période.

Tableau 5.4 : Comparaison des équivalents en eau estimés à partir des données de RADARSAT et estimés à partir des relevés d'Hydro-Québec pour mars et avril 1999

	Moyenne des équivalents en eau		
	À partir de l'image ScanSAR du 31 mars 1999	À partir des relevés d'H-Q (19 au 21 mars 1999)	À partir des relevés d'H-Q (2 au 4 avril 1999)
LA1	347 mm (100% du bassin)	328 mm	332 mm
LG4	369 mm (100% du bassin)	304 mm	314 mm
Caniapiscou	329 mm (100% du bassin)	331 mm	331 mm

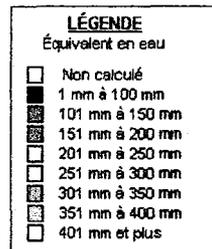
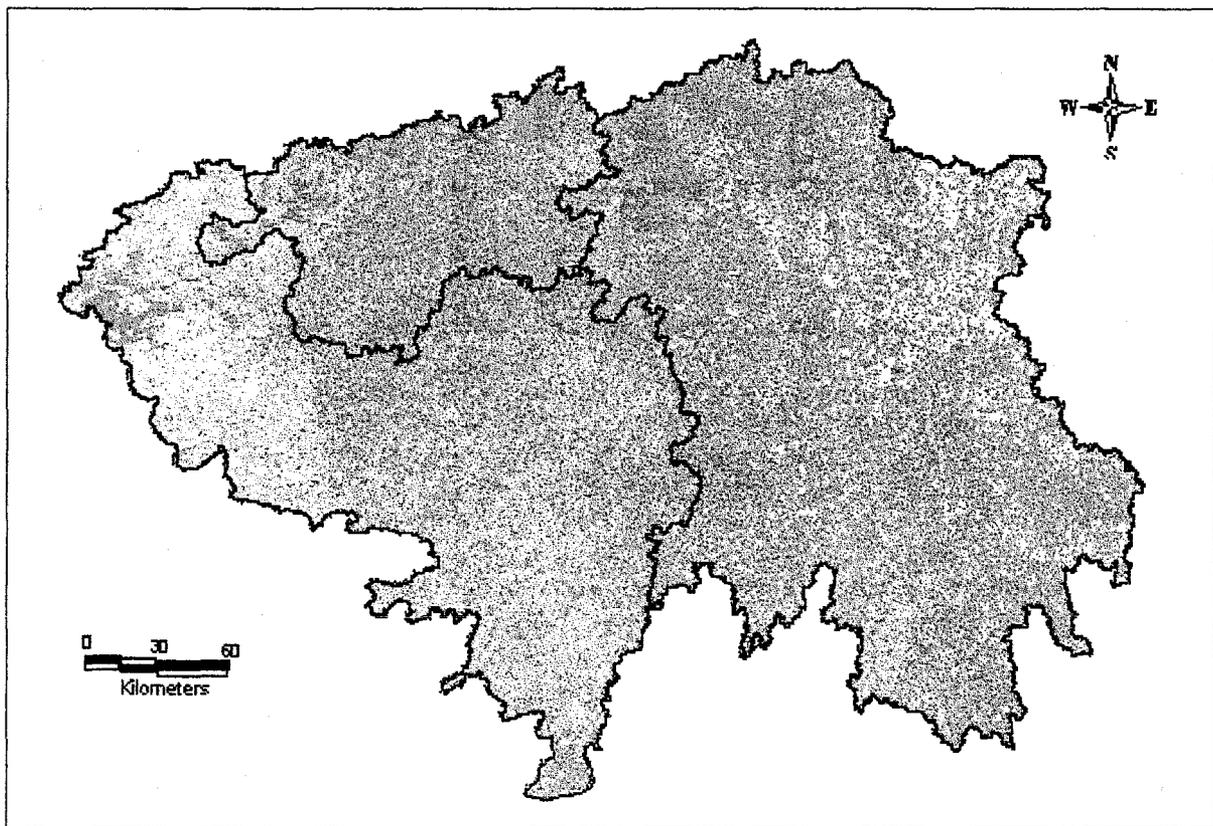


Figure 5.8 : Cartographie de l'équivalent en eau de la neige à partir de l'image ScanSAR du 31 mars 1999.

5.5 Suivi temporel

La figure 5.9 illustre la variation temporelle de l'équivalent en eau moyen pour les trois sous-bassins étudiés à l'hiver 1999 et compare les trois modes d'acquisitions de cette information, les images ScanSAR, les images Wide et les relevés au sol d'Hydro-Québec.

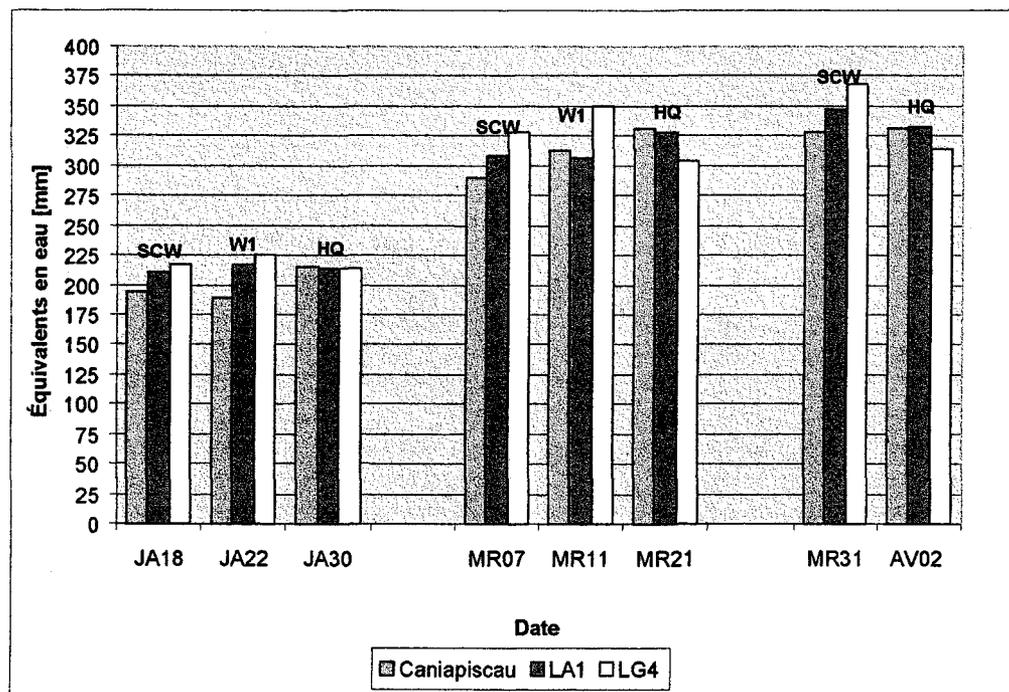


Figure 5.9 : Variation temporelle des équivalents en eau estimés et mesurés sur les sous-bassins de Canapiascau LA1 et LG4.

D'abord, on note l'augmentation constante de l'équivalent en eau de la neige au sol entre la mi-janvier et la fin de mars 1999, suite à des chutes de neige régulières tout au long de l'hiver. Il est aussi intéressant de noter la correspondance entre les estimés d'équivalent en eau moyen des images ScanSAR et ceux des images Wide même si elles ont été prises à des dates différentes. Quelque soit la date d'acquisition des images (mi-janvier, début mars ou fin mars), le sous-bassin LG4 a toujours plus de neige au sol que les deux autres bassins et c'est toujours Canapiascau qui a le moins de neige au sol à l'hiver 1999. La différence entre les deux modes et les données terrains nous donne aussi une idée de l'incertitude des estimations extraites des images RADARSAT. Toutefois, il faut aussi tenir compte de la répartition spatiale des chutes de neige entre les dates d'acquisition des images et celles des relevés d'Hydro-Québec.

6. DIFFUSION DES RÉSULTATS

À l'hiver 1999, les images en mode Wide ont été utilisées pour faire la démonstration pré-opérationnelle de l'approche RADARSAT (rapport du 31 mars 1999). Des cartes d'équivalent en eau ont été produites par le *prototype EQeau* pour les 22 et 25 janvier 1999 ainsi que pour le 14 mars 1999. Ces cartes montrent qu'il y a une bonne concordance des valeurs estimées avec les équivalents en eau mesurés au sol et qu'il y a plus de neige au sol en 1999 que les hivers précédents. L'algorithme *EQeau* a donc aussi bien performé dans des conditions d'enneigement normales que dans des conditions de faibles enneigement. De plus, le prototype *EQeau* s'est avéré opérationnel et il peut fonctionner aussi bien avec des images en mode Wide (et même ScanSAR) qu'en mode Standard.

Afin de faire connaître les résultats cette démonstration, trois communications ont été présentées en mai et en juin dernier par l'équipe de l'INRS-Eau (le nom du conférencier est souligné) :

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). « Pré-opérationnel determination of Snow Water Equivalent (SWE) using RADARSAR Data » In : *Eastern Snow Conference (ESC99)*. Fredericton, New-Brunswick, 2-4 juin.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT pour la gestion des réservoirs du complexe la Grande Rivière, *ACFAS*, 10-12 mai, Ottawa.

GAUTHIER, Y., M. BERNIER, J.P. FORTIN, R. TURCOTTE, A.N. ROUSSEAU, P. VINCENT et R. GAUTHIER (1999) « Use of Satellite Data to Estimate the Snow Characteristics Required by Distributed Hydrologicals Models : The EQeau Challenge. In : Abstracts of the 1999 *American Geophysical Union* (1999) Spring Meeting, Boston, USA, 2-4 juin.

Deux de ces trois communications seront publiées dans des Actes de conférences, soient celle de l'ACFAS et celle d'ESC'99. Les communications écrites soumises se retrouvent dans l'Annexe de ce rapport. Un article scientifique a aussi été soumis à la revue internationale: *Hydrological Processes* et il se retrouve aussi à l'Annexe :

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999).
« Determination of Snow Water Equivalent (SWE) using RADARSAT Data in Eastern Canada »
soumis à la revue *Hydrological Processes*, juin 1999.

De plus, Pierre Vincent de VIASAT et Raymond Gauthier d'Hydro-Québec ont présenté une communication chez RSI Int. à Vancouver au début de juin. Finalement, une conférence sur la même thématique a été donnée par Raymond Gauthier à l'Agence spatiale Canadienne le 18 juin dernier.

7. CONCLUSION

Durant les trois derniers mois, les activités réalisées à l'INRS-Eau portaient essentiellement sur l'analyse des images ScanSAR de l'hiver 1998-1999 et la comparaison des cartes d'équivalent en eau résultantes avec celles produites à partir des images Wide (rapport du 31 mars 1999).

Des cartes de l'équivalent en eau de la neige pour la moitié amont du complexe de la La Grande Rivière issues du traitement de l'image ScanSAR ont été produites pour les 18 janvier (figure 5.2) 7 mars (figure 5.5) et 31 mars 1999 (figure 5.8). Elles ont été comparées aux cartes obtenues à partir des images Wide. Ainsi, malgré les problèmes de scalloping et la grande diversité d'angles d'incidence des images ScanSAR (multi-faisceaux), les cartes d'équivalents en eau issues de ces images montrent généralement une bonne concordance avec les cartes issues des images Wide et les équivalents en eau mesurées au sol.

Il est aussi intéressant de noter, pour les trois sous-bassins, la correspondance entre les estimés d'équivalent en eau moyen issues des images ScanSAR et ceux issus des images Wide. En janvier, l'équivalent en eau moyen des 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% et ce malgré une chute de neige importante, le 10 mars, soit entre les acquisitions ScanSAR et Wide. De plus, quelque soit la date d'acquisition des images RADARSAT (mi-janvier, début mars ou fin mars), le sous-bassin LG4 a toujours plus de neige au sol que les deux autres bassins et c'est toujours Canapiascau qui a le moins de neige au sol à l'hiver 1999.

Des anomalies radiométriques ayant aussi été notés sur les images Wide 1 (principalement aux extrémités des images) et puisque les résultats des deux types d'images sont comparables, les images ScanSAR semblent donc les plus appropriées à la détermination de l'équivalent en eau des vastes sous-bassins de la Rivière La Grande dans un cadre opérationnel. Suite à l'expérience de la phase pré-opérationnelle (absence d'acquisitions, anomalies radiométriques sur certaines images), nous recommandons d'envisager l'acquisition d'au moins une image ScanSAR à tous les 24 jours de la mi-janvier à la fin mars, soit 4 images, au-dessus du bassin de la Rivière La Grande pour l'hiver 2000.

Finalement, notons que le prototype *EQeau* a aussi bien performé avec les images ScanSAR que les autres modes. La modification apportée par VIASAT au processus de correction géométrique des images ScanSAR a été très satisfaisante car aucune difficulté particulière est apparue dans les étapes postérieures de cartographie de l'équivalent en eau. De plus, durant les trois derniers mois, VIASAT a aussi modifié l'interface d'*EQeau* ce qui rend son utilité encore plus flexible.

Durant la prochaine étape, nous analyserons les images ScanSAR de l'hiver 1997-1998 (non-étalonnées toutefois) afin de compléter l'analyse de toutes les images RADARSAT acquises pour ce projet (N. B. ces images de l'hiver 1997-1998 avaient été fournies par l'ASC dans le cadre du projet du programme ADRO). Nous tenterons aussi d'évaluer l'accroissement de la précision de l'estimation basée sur les données RADARSAT, par rapport aux méthodes actuelles d'estimation. Finalement, nous préparerons en collaboration avec nos collègues de VIASAT, un atelier de formation sur l'utilisation d'*EQeau* et les images RADARSAT pour le personnel d'Hydro-Québec. Cet atelier se tiendrait en octobre ou novembre 1999.

Références

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. TURCOTTE et A. ROYER (1999). 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, mars 1998, 28 pages.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). « Pré-operational determination of Snow Water Equivalent (SWE) using RADARSAR Data » In : *Eastern Snow Conference (ESC99)*. Fredericton, New-Brunswick, 2-4 juin.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT pour la gestion des réservoirs du complexe la Grande Rivière, *ACFAS*, 10-12 mai, Ottawa.

GAUTHIER, Y., M. BERNIER, J.P. FORTIN, R. TURCOTTE, A.N. ROUSSEAU, P. VINCENT et R. GAUTHIER (1999) « Use of Satellite Data to Estimate the Snow Characteristics Required by Distributed Hydrological Models : The EQeau Challenge. In : Abstracts of the 1999 *American Geophysical Union* (1999) Spring Meeting, Boston, USA, 2-4 juin.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999). « Determination of Snow Water Equivalent (SWE) using RADARSAT Data in Eastern Canada » soumis à la revue *Hydrological Processes*, juin 1999.

***Méthode opérationnelle d'estimation de
l'équivalent en eau de la neige par imagerie
RADARSAT***

Annexes

30 juin 1999

ARTICLE 1

**DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT
USING RADARSAT DATA IN EASTERN CANADA**

(Soumis à Hydrological Processes)

DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT USING RADARSAT DATA IN EASTERN CANADA

Monique Bernier¹, Jean-Pierre Fortin¹, Yves Gauthier¹,

Raymond Gauthier², René Roy² et Pierre Vincent³.

(1) INRS-Eau

2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada G1V 4C7

Tel : (418) 654-2585 Fax : (418) 654-2600

E-Mail : Monique_Bernier@inrs-eau.quebec.ca

(2) Hydro-Québec, Groupe Production

75 ouest boul. René-Levesque, 9^e étage, Montréal (Québec), Canada H2Z 1A4

Tel : (514) 289-2211, poste 4062

E-Mail : Gauthier.Raymond@hydro.qc.ca

(3) VIASAT Géotechnologies Inc.

419 boul. Rosemont, bureau 301, Montréal (Québec), Canada H2S 1Z2

Tel : (514) 495-6500 Fax : (514) 495-4191

E-Mail : pvincent@viasat.qc.ca

ABSTRACT

In the 1998-1999 winter, the *operational feasibility* of using RADARSAT data to estimate the spatial distribution of Snow Water Equivalent (SWE) in a large hydroelectric complex managed by Hydro-Québec (La Grande River watershed) have been successfully demonstrated. This watershed is located in the subarctic climatic region in the north-west of the Québec province. The vegetation consists of moderately dense to opened Black Spruce forests, opened lands, burned lands and peat bogs. In the last few years, an original approach well adapted for this region has been developed to estimate the SWE from SAR data (ERS-1, RADARSAT). This approach is based on the fact that the snow cover characteristics influence the underlying soil temperature which influences the dielectric properties of the soil and then the recorded backscattering signal. Then, a linear relationship between the backscattering ratios of a winter image and a snow-free (fall) image, and the snowpack Thermal Resistance have been established over the years. Consequently, the algorithm infers the SWE from the estimated Thermal Resistance and the measured mean density of the snowpack. This algorithm has been implemented within a MapInfo™ application that has been named *EQeau*. It allows mapping of the spatial distribution of the estimated SWE at the desired level (pixel, square grid, sub-watershed). During the 1998-1999 winter, *EQeau* has been used successfully in a pre-operational mode using calibrated Wide beam images (W1) from RADARSAT. The algorithm has given results similar to the SWE values derived from Hydro-Quebec snow transects. Also, the SWE increase measured from January to March 1999 is clearly detected on the maps covering almost 77 000 km². The next steps will be the evaluation of the ScanSAR images and the demonstration of the economical advantages of using RADARSAT data in a hydrological forecasting system.

Key words : RADARSAT, Snow Water Equivalent, SAR

INTRODUCTION

In the late eighties, in preparation for the launch of the Canadian satellite RADARSAT, *snow cover monitoring for hydrological applications* was among the research themes selected by the Canada Centre for Remote Sensing within its R&D SAR program. In fact, in many regions of the world, the daily or weekly monitoring of the snow cover requires remote sensing tools usable at regular time intervals and independent of sun illumination or cloud cover. Thus, the use of any visible/IR sensor (AVHRR, Landsat-TM or MODIS), for estimation of the snow cover fraction within a watershed (Cline *et al.*, 1998, Elder *et al.*, 1998, Klein *et al.*, 1998) or the snow albedo (Dozier, 1989) will not be discussed in this paper. Although all active and passive microwave sensors (operating between 0.3 and 300 GHz) are attractive for snow monitoring, the spatial resolution of spaceborne radiometers like SSM/I (from 12 to 30 km), limits generally their use to large and non-forested watersheds (Bernier, 1987; Goodison and Walker, 1994; Kurnoven and Hallikainen, 1997). Nevertheless, a recent study shows that estimation of the Snow water equivalent (SWE) using SSM/I data is possible for shallow snow cover in the taïga environment (De Sève *et al.*, 1997; De Sève *et al.*, in press). On the other hand, SAR technology allows a spatial resolution of the order of 30 m for satellite data. For example, RADARSAT, which have been launch in November 1995 and declared operational in April 1996, offers spatial resolutions between 10 to 100m, and accessibility swath from 50km up to 500km.

The potential of SAR data for snow monitoring has been studied for two decades. In 1981, the European Space Agency and the Joint Research Centre of the European Communities conducted an important airborne campaign for the acquisition of SAR data over snow covered terrain in the Swiss (Mätzler and Schanda, 1984) and Autrian Alps (Rott and Domik, 1984) and in Groënland (Gudmansen *et al.*, 1984). These studies showed that wet snow can be distinguished from snow-free surfaces in both C (5 GHz) and X (10 GHz) bands. Concurrently, a research program on the microwave signatures of snow using sensors installed on an observation tower was developed by the Bern University (Mätzler, 1987). Wet snow appeared significantly different from a snow-free

surface but soil covered by dry snow appeared similar to a snow-free soil surface. A research program with similar objectives was also conducted at the University of Kansas. Contrary to the Swiss scientists, Ulaby and Styles (1981) found a positive relationship between the backscattering coefficient of a dry snowpack and its SWE. These contradictory results have been explained by the fact that other parameters (stratification of the snow cover, the size and shape of snow grains, the surface roughness) affect the backscatter coefficient of a dry snow cover (Shi *et al.*, 1990).

To clarify this ambiguity concerning the determination of the SWE from SAR data, a study was conducted by INRS-Eau using a multitemporal airborne data set in Southern Quebec (Bernier, 1991). This study shows that the soil texture and the soil temperature are prime factors to consider in the analysis of the backscattering signal from a shallow snow cover which is coming essentially from the snow/soil interface (soil surface scattering). When the soil temperature decreases below the freezing point, its relative dielectric constant decreases also as the water in the soil interface freezes and thus, the backscattering signal decreases. Then, the apparent contradictory conclusions between the University of Kansas and the Bern University teams could be the result of the difference in soil texture between the two experimental sites (Bernier and Fortin, 1998). On the agricultural site in Colorado, the temperature increase of the soil surface (from -1.5 to +0.2 C) caused its dielectric constant to increase with a resulting observed increase of the backscattering signal from the snow cover. However, in the Swiss Alps, the dielectric properties of the well drained (rocky) soil did not change through the winter.

Another conclusion of the INRS-Eau airborne study has been to show the potential of using SAR data to determine the SWE of shallow snow cover. The backscattering signal being dominated by the soil surface scattering, the backscattering ratio, between a winter scene and a fall scene, decreases proportionally with the dielectric properties of the frozen soil in winter. Then, a unique relationship has been found between the Thermal Resistance (R) of the snowpack and this backscattering ratio. The spatial distribution of the signal ratio should then depict the spatial distribution of the Thermal Resistance of the snow cover. Furthermore, a linear relationship

between SWE and R being observed, it should be possible to estimate the SWE of shallow dry snow cover using few ground data when the soil is frozen (Bernier and Fortin, 1998). A follow-up of this study has been to test if the relationship between this backscattering ratio, the Thermal Resistance and the SWE could be generalised. Using an ERS-1 data set, similar relationships have been obtained in another agricultural study area with various soil textures in Eastern Québec (Bernier *et al.*, 1995) as well as in a taïga environment in Northern Québec (Bernier *et al.*, 1999a).

In the last few years, the opportunity to use RADARSAT-1 data (C band-HH) for SWE estimation has been studied in the La Grande River watershed, a large (184 000 km²) hydroelectric complex in northern Québec managed by Hydro-Québec. Calibrated RADARSAT images have been acquired over the LG4 sub-watershed (30 000 km²) within the ADRO program of the Canadian Space Agency in Standard beams S1 (20-27°) and S7 (45-49°) as well as in ScanSAR mode (not calibrated). Those acquisitions were made in conjunction with field campaigns (snow lines, snow pits, air and soil temperature, etc.) in November, February, and March during two winter seasons, 1996-1997 and 1997-1998. Then, an empirical algorithm has been developed to estimate the spatial distribution of the Snow Water Equivalent (SWE) using data from Standard beams and field measurements (Bernier *et al.*, 1998).

Considering that our approach for SWE estimation is based on the temporal changes of the dielectric characteristics of the soil related to the snow Thermal Resistance, the S1 mode shown to be more appropriate than S7 mode. The RADARSAT algorithm for the SWE estimation is similar to the one developed previously for the same region with ERS-1 SAR data (Bernier *et al.*, 1999a), but the parameters of the regression (m,b) between the Thermal Resistance of the snowpack and the ratio of the backscattering coefficients of a winter scene over a fall scene have been adjusted. The RADARSAT estimations of the mean SWE on the experimental sites are comparable to the values measured at the field sites. The standard deviations of the estimated values (+/- 17 to 26 mm) are also comparable to the standard deviations (+/- 15 to 24 mm) obtained from field measurements (Bernier *et al.*, 1998).

The final objective of those studies being the operational use of RADARSAT data within the Hydro-Québec hydrological forecasting system, the algorithms and procedures have been implemented within a MapInfo™ application. This software named *EQeau*, jointly developed by Viasat Géo-technologie Inc. and INRS-Eau, allows mapping of the spatial distribution of the SWE estimated from RADARSAT data. It can also resample a map according to a square grid integrating many pixels or calculate the mean SWE on a sub-watershed.

Last winter, we have demonstrated the *operational feasibility* of using RADARSAT data to estimate the spatial distribution of the Snow Water Equivalent (SWE) in the La Grande River watershed. This demonstration is part of a pilot project financed by Hydro-Québec and the Earth Observation Pilot Project Program of the Canadian Space Agency, which is administrated by the Canadian Centre for Remote Sensing. To gradually integrate the RADARSAT technologies within Hydro-Québec's hydrological forecasting system, the methodology was optimized for the *LG4* sub-watershed (30 000 km²) in the 1997-1998 winter and then applied to three sub-watersheds (*LG4*, *Laforge* and *Canapiascau*) in the 1998-1999 winter, covering more than 77 000 km² (Figure 1). Up to 1998, RADARSAT Standard beam data were used. However, beams covering larger areas are necessary to operationally monitor large watersheds. So, acquisition of one ScanSAR image (500 km X 500 km) and three Wide images (165 km X 165 km) were scheduled for each of three acquisitions periods: November 1998, January 1999 and March 1999 (Figure 1).

This paper presents the application of the *EQeau* software in a pre-operational mode to determine the SWE over the upstream half of the La Grande River watershed. We describe the RADARSAT data used in this demonstration, the methodology, the results of the application of the *EQeau* software and the SWE maps produced for the 1998-1999 winter.

DATA DESCRIPTION

Table 1 lists the Wide (W1) and ScanSAR RADARSAT images acquired in the 1998-1999 winter. The plan was to acquire three Wide beam images from two orbits at three different periods during the winter: November, January and March. However, a technical problem on the satellite has prevented the acquisition of a W1 image on March 14, 1999.

Table 1: RADARSAT images acquired during the winter of 1998-1999

Date	Beam	Orbit	Covering
7 November 1998	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
11 November 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
11 November 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South
14 November 1998	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
18 January 1999	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
22 January 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
22 January 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South
25 January 1999	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
7 March 1999	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
11 March 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
11 March 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South

For each acquisition period, a ground campaign (Gauthier *et al.*, 1998) has been conducted mainly in the LG4 sub-watershed. The November campaign allowed to measure the soil dielectric constant, the depth of the soil frost and the soil surface temperature on a few sampling sites. The same measurements were made in January and March, as well as about forty snow transects (snow depth, snow density, SWE) and five vertical profiles (snow pits) representative of the snow conditions of the region (snow density and depth of each layer, grain diameter and type, dielectric constant, temperature).

Table 2 gives a summary of the snowpack and soil characteristics measured during the three ground campaigns. In 1999, between January 28 and March 8, there was a 50 mm increase of the SWE due to new snow precipitation and a decrease of the Thermal Resistance (Th.Res.) of the snowpack due to its densification.

Table 2: Summary of snow cover and soil characteristics for winter 1998-1999

Period	Snow cover characteristics (mean values)				Soil (mean values)	
	Depth [cm]	SWE [mm]	Density [kg/m ³]	Th. Res. [°Cms/J]	T°C	Dielectric Constant
9 – 12 November 1998	10	-	-	-	0.2	8.4
25 - 28 January 1999	100	210	211	8.0	-0.7	3.5
8 - 11 March 1999	111	261	236	7.3	-1.1	3.2

Figure 2 shows the evolution of the meteorological parameters (air temperature, soil temperature, snow depth) during the winter of 1998-1999. First, we can notice the thermal isolation effect of the snow cover on the soil temperature starting at the end of November. Secondly, the air temperature during the week preceding the RADARSAT image acquisitions of late January and at the beginning of March are characteristic of mid-winter conditions for this region ($T_{\text{air}}^{\circ} < -15^{\circ}\text{C}$). Thirdly, the snow depth at the end of the winter (120 cm) is also the normal snow depth for this region but is higher than those of the previous two winters (70 to 80 cm as shown in Figure 3). Fourthly, the soil is frozen but the soil temperature at the snow/ground interface is a bit warmer than the last two years. Finally, there was an additional accumulation of 10 cm of snow between the two RADARSAT acquisitions of January 22 and January 25, 1999.

Finally, a land cover map of the three sub-watersheds was made from five Landsat-TM images. There are six distinct land cover classes: forest, open forest, open land, burned forest, bare soil/rock and water. This map has also been integrated into the *EQeau* software since a few parameters of the algorithm, like the snow density, are dependant of the land cover.

IMAGE PROCESSING

All calibrated Wide (W1) images were processed by VIASAT Géo-Technologie Inc. using both their own geometric correction software and the EASI/PACE image analysis software. The main steps for processing the RADARSAT SAR images are: inversion of the Look-up table (Altrix Systems, 1998), transformation of DN into power values, geometric correction using a DEM, image filtering and computation of the backscattering coefficient (σ°) for each pixel. Then, the image can be imported by *EQeau*, where the backscattering ratios between the winter image and the reference (snow-free) image are calculated. These ratios ($\sigma_w^{\circ} - \sigma_r^{\circ}$) are used to reduce the impact of vegetation and topography.

VALIDATION OF THE ALGORITHM

The algorithm is based on studies conducted by INRS-Eau in agricultural areas of southern Québec and in open forest areas of northern Québec with ERS-1 images (Bernier and Fortin 1998) Bernier *et al.*, 1999a). The physical principles are the following:

- The snow cover characteristics (Thermal Resistance) influence the underlying soil temperature.
- The dielectric constant of the soil varies with the soil temperature under 0°C. The colder is the soil surface, 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 .

To recover the SWE from RADARSAT SAR data, the algorithm uses two equations (Bernier and Fortin 1998). The first one, is the linear relationship between the backscattering ratios and the

snowpack Thermal Resistances. As mentioned earlier, the colder is the soil surface and the deeper is the frost and the lower is the backscattering ratio (Figure 4).

The second equation infers the SWE from the estimated Thermal Resistance (derived from the first relationship) and the mean density of the snowpack (obtained from snow lines or snow cover estimations by a model). The relationship between the SWE and the Thermal Resistance, as a function of density, is illustrated on Figure 5.

For RADARSAT images acquired in mid-winter conditions, the first part of the algorithm has been developed previously from Standard images acquired in February 1997 and January 1998. The Thermal Resistance of the snow cover was computed from field measurements for about twenty homogeneous sites. Those values have been related to the mean backscattering ratio of each homogeneous site extracted from the two Standard images (Figure 4). Then, the backscattering ratios of the sampling sites extracted from the Wide images acquired in January 1999 (table 1) and the corresponding Thermal Resistances of the snow cover, measured on site, were added to Figure 4 to confirm the previously established relationship (Bernier *et al.*, 1998).

The refined algorithm was first tested on the backscattering ratios extracted from the Wide images of January 1999, over the sampling sites. The resulting mean SWE, for those sampling sites, is 219 mm with a standard deviation of 25mm. Those values are similar to the mean SWE measured by snow transects for the same sampling sites during the field campaign (mean of 213 mm, standard deviation of 18 mm).

SWE MAPPING

Using the *EQeau* software, the algorithm was then applied to the three Wide images acquired in January 1999 in order to map the SWE over the three sub-watersheds (*LG4*, *Laforge* and *Caniapiscau*). The resultant maps are presented in Figure 6. There is a noticeable difference between the SWE estimated for the East images acquired on January 22 (Caniapiscau) and the

West image acquired on January 25 (LG4). An analysis of the January 25 image revealed abnormally high backscattering coefficients at the lowest (18-24°) and highest (28-31°) incidence angles resulting in the overestimation of the SWE (250+ mm) for those areas (Bernier *et al.*, 1999b). However, the SWE estimated for the central part of the image are consistent with the values measured during the field campaign (~200 mm). On the Caniapiscou sub-watershed, the highest SWE values (201 to 250 mm) correspond to higher elevations the sub-watershed boundaries. The lowest SWE values (101 to 150 mm) can be found near the Caniapiscou reservoir.

The mean SWE over each sub-watershed were also computed by *EQeau*. Table 3 compares these values to the mean SWE derived from interpolation of the Hydro-Québec regular snow transects. The over-estimated SWE for a part of the LG4 image has affected the mean value calculated for that watershed. For the Caniapiscou watershed, it is important to note that the two Wide images were acquired a week before the HQ snow transects. A snow precipitation (SWE ~15-20 mm) was recorded during the interval and is the cause for the under-estimation seen in Table 3.

Table 3: Comparison of the estimated SWE and the measured SWE for January and March 1999.

Sub-watershed	Snow Water Equivalent	
	RADARSAT Images	Hydro-Québec Survey
	January 22 and 25	January 22 through January 30
LA1	216 mm (87% du bassin)	213 mm
LG4	225 mm (74% du bassin)	214 mm
Caniapiscou	189 mm (89% du bassin)	215 mm
	March 11	March 19 through March 21
Caniapiscou	312 mm (89% du bassin)	331 mm

The same algorithm (mid-winter conditions) has been applied by *EQeau* to the two Wide images acquired on March 11, 1999. The SWE map is shown on Figure 7. An important increase of the SWE was noticed and measured during the March field campaign (table 2). This increase is also apparent on the map produced by *EQeau*. Again, the higher SWE are found on the hills and the lower SWE near the Caniapiscau reservoir. The mean SWE over the Caniapiscau sub-watershed have also been computed by *EQeau*. The result is shown on table 3. Again, the snow transects were done a week after the RADARSAT overpass.

CONCLUSION

In the 1998-1999 winter, the *operational feasibility* of using Wide images from RADARSAT to estimate the spatial distribution of SWE in a subarctic climatic region has been demonstrated. The *EQeau* software was used to produce SWE maps in a pre-operational context over a large hydroelectric complex (77 000 km²) managed by Hydro-Québec. The increase of the measured SWE from late January to the beginning of March was clearly detected on the SWE maps. Furthermore, those SWE maps were transmitted to Hydro-Québec managers as pertinent information.

This original approach seems well adapted for this subarctic region. The algorithm has performed well under normal or below normal snow cover conditions and using either Standard (S1) or Wide (W1) RADARSAT images. The algorithm was successfully tested on the backscattering ratios extracted from the Wide images of January 1999 and November 1998, over the sampling sites. The resulting mean SWE, for those sampling sites, is 219 +/- 25mm. This value is similar to the mean SWE measured by snow transects for the same sampling sites during the field campaign (213 +/- 18 mm). The mean estimated SWE on each of the three sub-watersheds are comparable to values obtained by the interpolation of Hydro-Québec field surveys. However, there is an uncertainty on both ways (RADARSAT and field surveys) to derive the mean SWE of a large

sub-watershed. We are presently working on the determination of these uncertainties for the RADARSAT approach.

Since the calibration of the ScanSAR images was not confirmed by the Canadian Space Agency until February 1st 1999, it was not planned to use them in demonstrating the *operational feasibility*. However, the ScanSAR images are presently under analysis. Following this analysis, we will be able to assess the uncertainty on SWE estimations from both Wide and ScanSAR images. Then, knowing the corresponding economical advantages of these RADARSAT products (Martin *et al.*, 1999), we should be able to make recommendations to Hydro-Québec managers concerning the type of data which is best suited for an operational use of *EQeau* on the La Grande watershed.

REFERENCES

Altrix Systems 1998. 'Extraction of Beta Nought and Sigma Nought from RADARSAT CDPF Products'. *Report No. AS97-5001*, 22 May 1998, 8 pp.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, J.L. Bisson and P. Vincent 1999a. 'Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires', *Revue des sciences de l'eau*, **12** (2).

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, R. Roy and P. Vincent 1999b. 'Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT pour la gestion des réservoirs du complexe la Grande Rivière'. La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, *67^e Congrès de l'ACFAS*, Université d'Ottawa, 10-12 May 1999.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, and P. Vincent 1998. 'Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT'. *Symposium final du programme ADRO*, 14-16 October 1998, Montréal, Canada (ADRO CD-ROM).

Bernier, M. and J.P. Fortin 1998. 'The Potential of Times Series of C-band SAR Data to Monitor Dry and Shallow Snow cover'. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36** (1) 226-243.

Bernier, M. , J.P. Fortin and Y. Gauthier 1995. 'The potential of RADARSAT data to estimate the snow water equivalent based on results from ERS-1' in *Proc. IGARSS'95*, Firenze, Italy, July 10-14, 1496-1498.

Bernier, M. 1991. 'Evaluation des données d'un RADAR à antenne synthétique en bande C et X pour la surveillance du couvert de neige' *Ph.D. Thesis*, Université du Québec, INRS-Eau, 198 pp.

Bernier, P.Y. 1987. 'Microwave remote sensing of snowpack properties: potential and limitations', *Nordic-Hydrology*, 181-200.

Clines, D.W., R.C. Bales and J. Dozier 1998. 'Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling'. *Wat. Resour. Res.* **34** (5) 1275-1285.

De Sève, D., M. Bernier, J.P. Fortin, and A. Walker 1997. 'Preliminary analysis of snow microwave radiometry using SSM/I passive microwave data; the case of La Grande River watershed (Québec), *Annals of Glaciology*, **25**,

De Sève, D., M. Bernier, J.P. Fortin, and A. Walker (in press) . 'Analysis of radiometry of snow cover with SSM/I data in a taiga area; the case of James Bay area. in *Proc. Eastern Snow Conference*, Fredericton, Canada, June 3-4, 1999.

Dozier, J. 1989. 'Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper' *Remote Sensing of Environment*, **28** , 9-22.

Elder, K., W. Rosenthal and R.E. Davis 1998. 'Estimating the spatial distribution of snow water equivalence in a montane watershed'. *Hydrol. Proces.* **12**, 1793-1808.

Gauthier, Y., M. Bernier, J.P. Fortin, R. Gauthier et M. Lelièvre 1997. 'Importance des mesures de terrain dans l'établissement d'algorithmes de suivi du couvert de neige à partir d'images radar'. *VII^e Journée Scientifique du Réseau de Télédétection de l'AUPELF-UREF*. 13-17 October 1997, Sainte-Foy, Canada, 37-43.

Goodison, B.E. and A. Walker 1994. 'Canadian Development and use of snow cover information from passive microwave satellite data' *ESA/NASA International Workshop on Passive Microwave Remote Sensing Related to Land-Atmosphere Interactions*, Saint-Lary, France, 245-262.

Gudmansen, P., S.N. Madsen and L.T. Pedersen 1984. 'SAR-580 Greenland campaign', in *Proc. SAR-580 Investigators Workshop*, **2**, 217-232.

Klein, A.G., D.K. Hall and G.A. Riggs 1998. 'Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model' *Hydrol. Proces.* **12**, 1723-1744.

Kurnoven, L. and M.T. Hallikainen 1997. 'Influence of Land-Cover Category on Brightness temperature of snow' *IEEE Transactions on geoscience and Remote sensing*, **35**, no.2, 367-377.

Martin, D., Bernier, M., Sasseville, J.L. ET R. Charbonneau 1999. 'Evaluation financière de l'intégration de technologies satellitaires pour le suivi du couvert nival, au sein d'une entreprise hydroélectrique' *International Journal of Remote Sensing (in press)*.

Mätzler, C. 1987. 'Applications on the interactions of microwaves with the natural snow cover', *Remote Sensing Reviews*, **2**, 259-387.

Mätzler, C. and E. Schanda 1984. 'Snow mapping with active microwaves sensors', *Int. J. Remote Sensing*, **5**, 409-422.

Rott, H. and G. Domik 1984. 'The SAR-580 experiment on snow and glaciers at the Austrian test site', in *Proc. SAR-580 Investigators Workshop*, **2**, 233-246.

Shi, J. J. Dozier and R.E. Davis 1990. 'Simulation of snow-depth estimation from multi-frequency radar', in *Proc. IGARSS'90*, 1129-1132.

Ulaby, F.T. and W.H. Styles 1981. 'Microwave response of snow' *Adv. Space Research.*, **1**,
131-149.

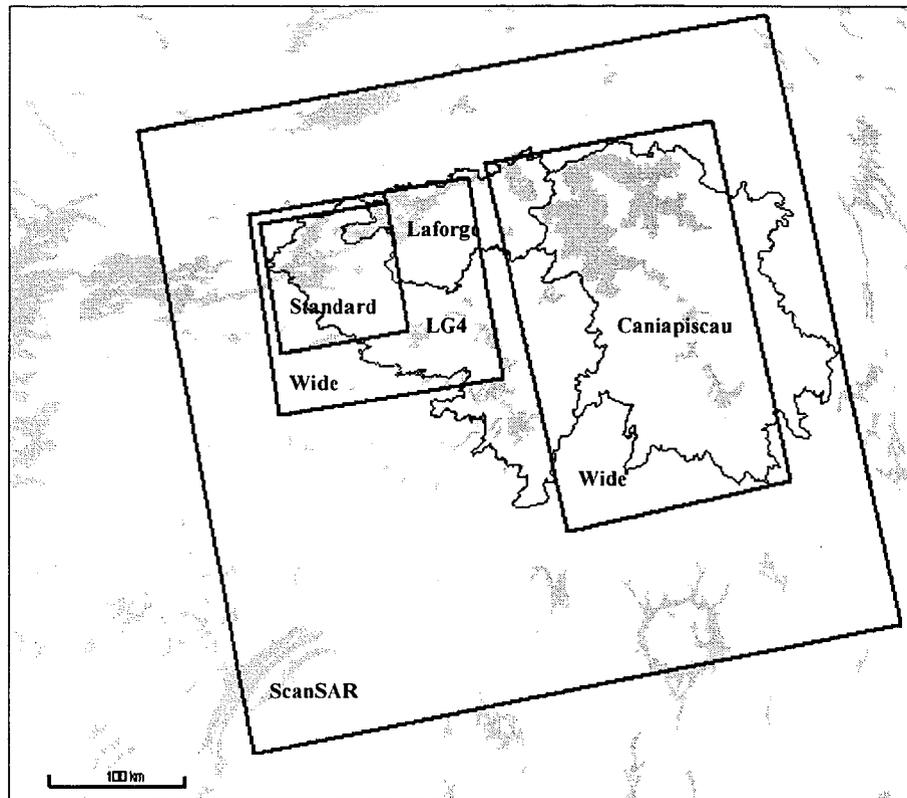


Figure 1: Coverage of the RADARSAT SAR images

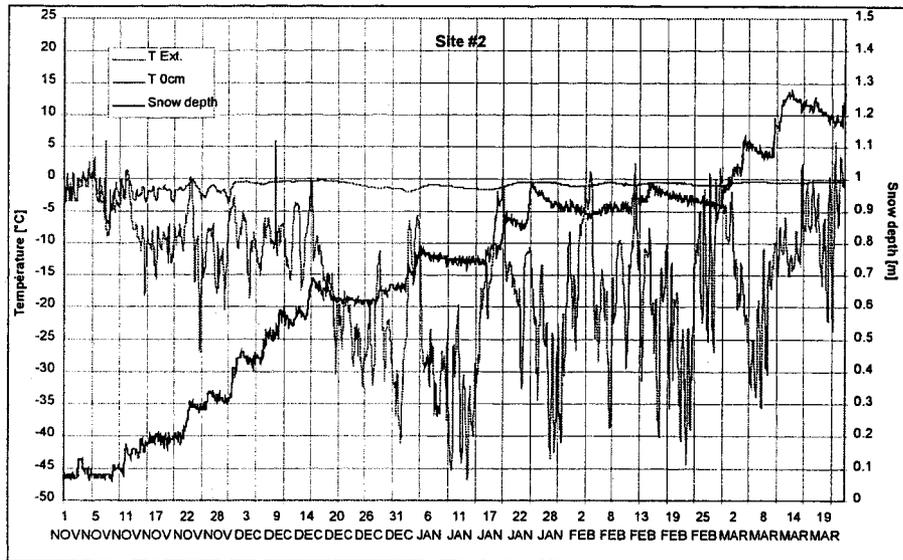


Figure 2 : Data for the winter of 1998-1999 from an automatic meteorological station installed on the LG4 sub-watershed (test site #2).

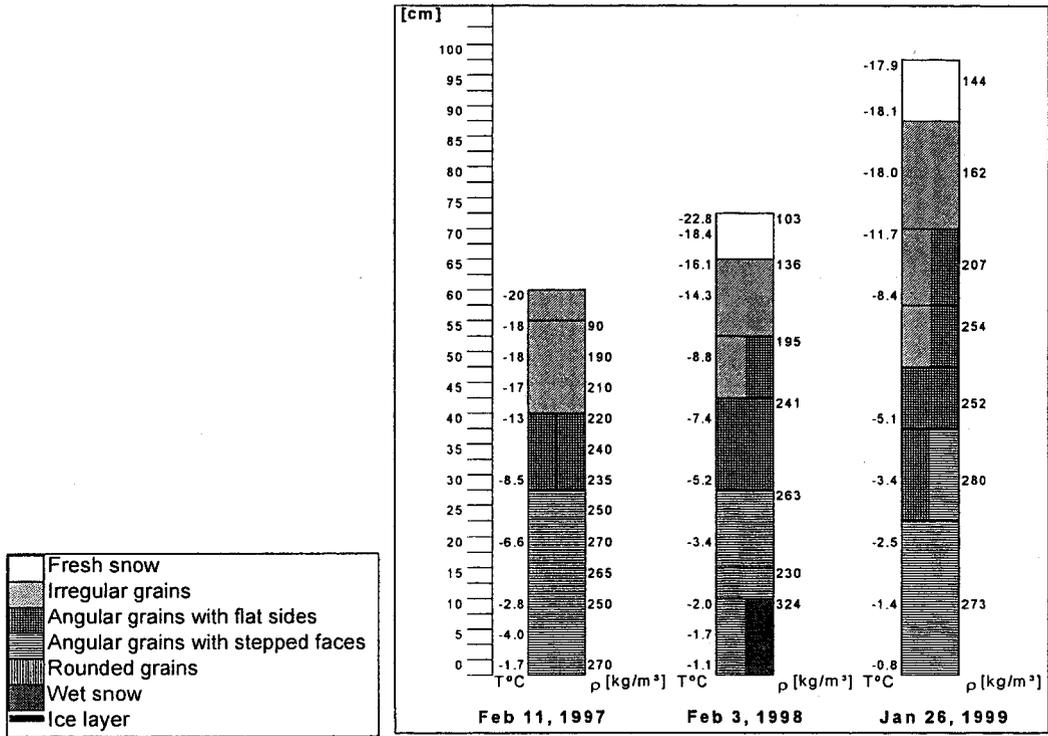


Figure 3 : Comparison of snow profiles measured on test site #2 in 1997, 1998 and 1999

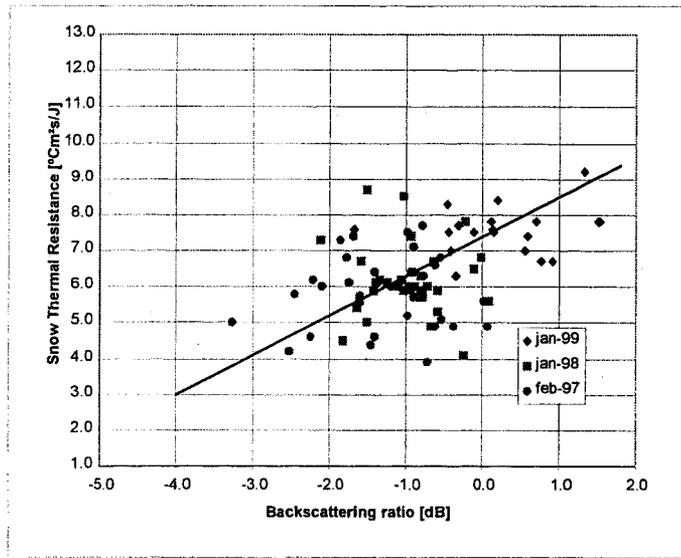


Figure 4 : Relationship between the backscattering ratios and the Thermal Resistance of the snow cover

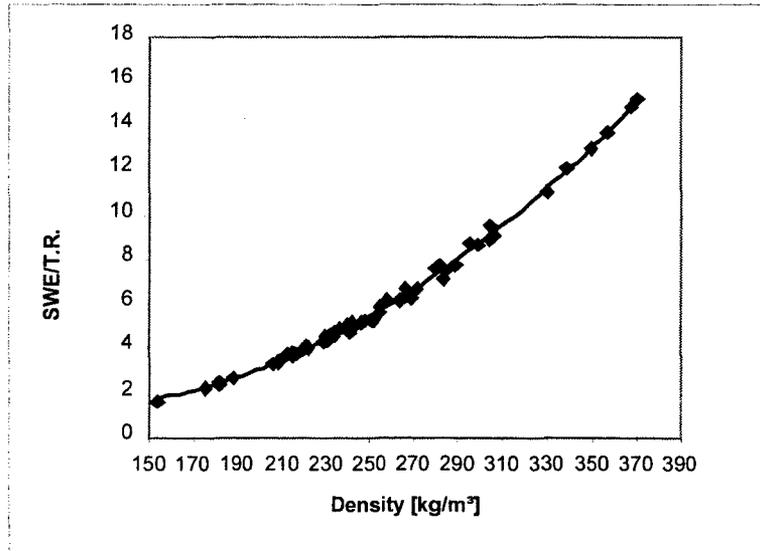


Figure 5 : Relationship between the SWE and the Thermal Resistance of the snow cover, as a function of density

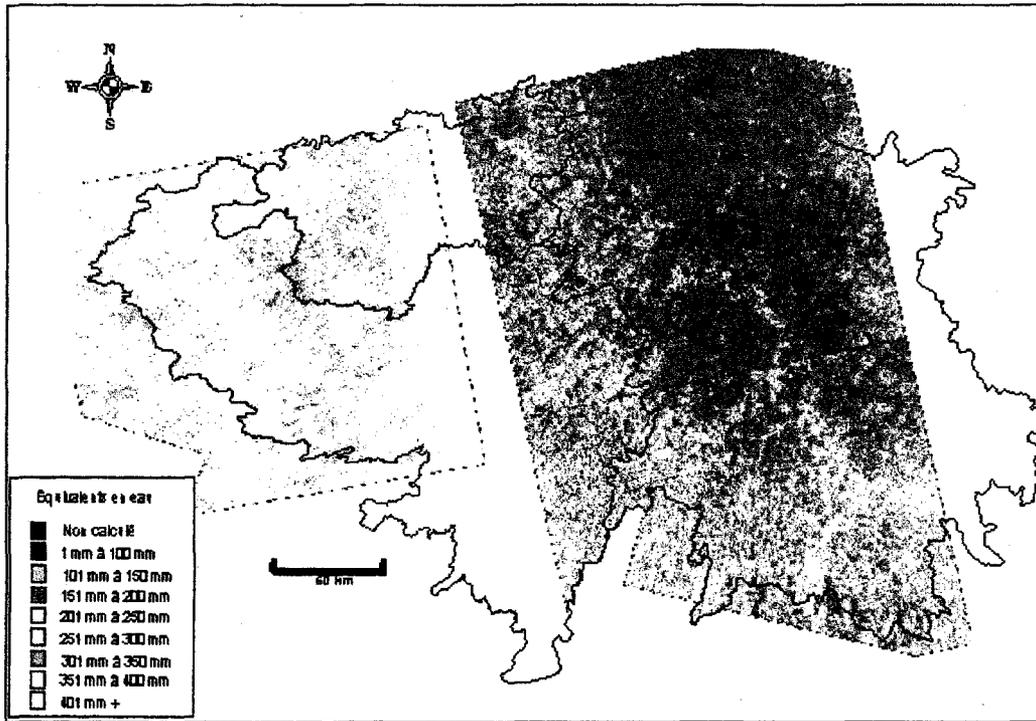


Figure 6 : SWE map derived from RADARSAT images acquired on January 22 and 25, 1999

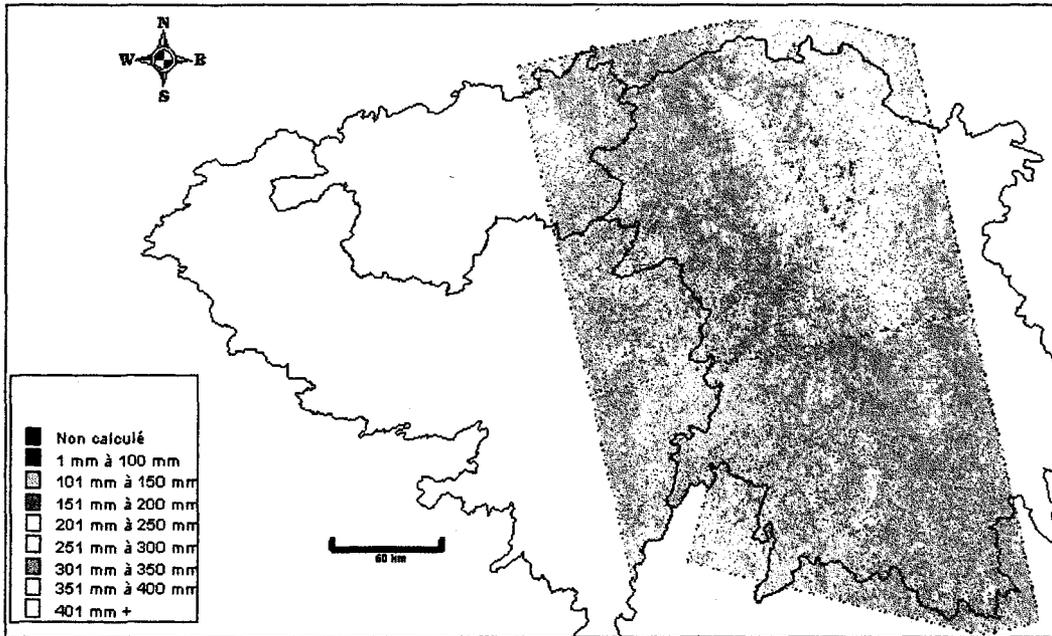


Figure 7 : SWE map derived from RADARSAT images acquired on March 11, 1999

ARTICLE 2

**PRE-OPERATIONAL DETERMINATION OF SNOW WATER
EQUIVALENT USING RADARSAT DATA**

(Eastern Snow Conference, juin 1999)

PRE-OPERATIONAL DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT USING RADARSAT DATA

Monique Bernier¹, Jean-Pierre Fortin¹, Yves Gauthier¹, Raymond Gauthier², René Roy²

et Pierre Vincent³.

(1) INRS-Eau

2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada G1V 4C7

Tel : (418) 654-2585 Fax : (418) 654-2600

E-Mail : Monique_Bernier@inrs-eau.quebec.ca

(2) Hydro-Québec, Groupe Production

75 ouest boul. René-Levesque, 9^e étage, Montréal (Québec), Canada H2Z 1A4

Tel : (514) 289-2211, poste 4062

E-Mail : Gauthier.Raymond@hydro.qc.ca

(3) VIASAT Géotechnologies Inc.

419 boul. Rosemont, bureau 301, Montréal (Québec), Canada H2S 1Z2

Tel : (514) 495-6500 Fax : (514) 495-4191

E-Mail : pvincent@viasat.qc.ca

ABSTRACT

In the 1998-1999 winter, we have demonstrated the *operational feasibility* of using RADARSAT data to estimate the spatial distribution of Snow Water Equivalent (SWE) in a large hydroelectric complex managed by Hydro-Québec: the La Grande River watershed. The algorithms and procedures developed in this project have been implemented within a MapInfo™ application that has been named *EQeau*. It allows mapping of the spatial distribution of the estimated SWE at the desired level (pixel, square grid, sub-watershed). *EQeau* has been used successfully in a pre-operational mode using Wide beam images (W1). The algorithm has given results similar to the SWE values derived from Hydro-Quebec snow transects. Also, the SWE increase measured from January to March is clearly detected on the maps. The next steps in this pilot project will be the evaluation of the ScanSAR images and the demonstration of the economical advantages of using RADARSAT data in a hydrological forecasting system.

Key words : RADARSAT, Snow Water Equivalent, SAR

INTRODUCTION

In the last few years, we have studied the opportunity to use RADARSAT-1 data (C band-HH) for snow monitoring in the La Grande River watershed, a large hydroelectric complex in northern Quebec (184 000 km²) managed by Hydro-Québec. Calibrated RADARSAT images have been acquired within the ADRO program of the Canadian Space Agency in Standard beams S1 (20-27°) and S7 (45-49°) as well as in ScanSAR mode (not calibrated). Those acquisitions were made in conjunction with field campaigns (snow lines, snow pits, air and soil temperature, etc.) in November, February, and March during two winter seasons, 1996-1997 and 1997-1998. Then, an empirical algorithm has been developed to estimate the spatial distribution of the Snow Water Equivalent (SWE) using data from Standard beams and field measurements over the LG4 sub-watershed (Bernier *et al.*, 1998).

Considering that our approach for SWE estimation is based on the temporal changes of the dielectric characteristics of the soil related to the snow thermal resistivity (Bernier and Fortin, 1998), the S1 mode was considered to be more appropriate. The RADARSAT algorithm for the SWE estimation is similar to the one developed previously for ERS-1 data (Bernier *et al.*, 1999a), but the parameters (m,b) of the regression between the thermal resistivity of the snowpack and the ratio of the backscattering coefficients of a winter scene over a fall scene have been adjusted. The RADARSAT estimations of the mean SWE on the experimental sites are comparable to the values measured at the field sites. The standard deviations of the estimated values (+/- 17 to 26 mm) are also comparable to the standard deviations (+/- 15 to 24 mm) obtained from field measurements.

The final objective of those studies being the operational use of RADARSAT data within the Hydro-Québec hydrological forecasting system, the algorithms and procedures have been implemented within a MapInfo™ application. This software named *EQeau*, jointly developed by

Viasat Géo-technologie Inc. and INRS-Eau, allows mapping of the spatial distribution of the SWE estimated from RADARSAT data. It can also resample a map according to a square grid integrating many pixels or calculate the mean SWE on a sub-watershed.

Last winter, we have demonstrated the *operational feasibility* of using RADARSAT data to estimate the spatial distribution of the Snow Water Equivalent (SWE) in the La Grande River watershed. This demonstration is part of a pilot project financed by Hydro-Québec and the Earth Observation Pilot Project Program of the Canadian Space Agency, which is administrated by the Canadian Centre for Remote Sensing. To gradually integrate the RADARSAT technologies within Hydro-Québec's hydrological forecasting system, the methodology was optimized for the *LG4* sub-watershed (30 000 km²) in the winter of 1998 and then applied to three sub-watersheds (*LG4*, *Laforge* and *Canapiascau*) in the winter of 1999, covering more than 77 000 km² (Figure1). Up to 1998, RADARSAT Standard beam data were used. However, beams covering larger areas are necessary to operationally monitor large watersheds. So, acquisition of one ScanSAR image (500 km X 500 km) and three Wide images (165 km X 165 km) were scheduled for November 1998, January 1999 and March 1999 (Figure 1).

This paper presents the application of the *EQeau* software in a pre-operational mode to determine the SWE over the upstream half of the La Grande River watershed. We describe the RADARSAT data used in this demonstration, the methodology, the results of the application of the *EQeau* software and the SWE maps produced for the winter of 1999.

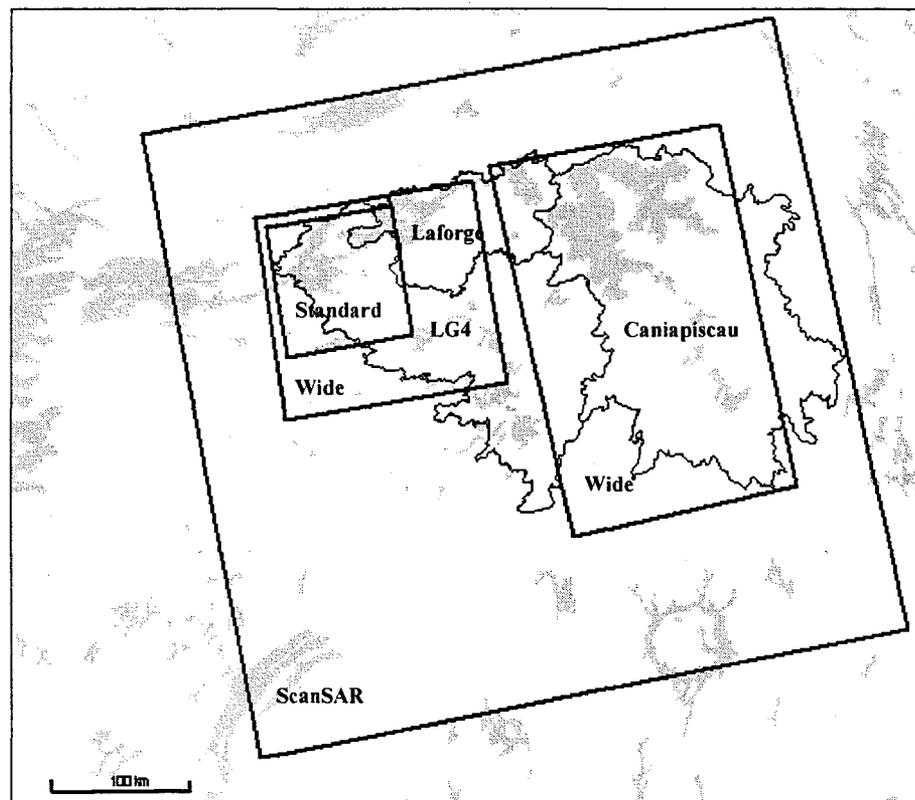


Figure 1: Coverage of the RADARSAT SAR images

DATA DESCRIPTION

Table 1 lists the RADARSAT data acquired last winter, both Wide (W1) and ScanSAR images. The plan was to acquire three Wide beam images from two orbits at three different periods during the winter: November, January and March. However, a technical problem on the satellite has prevented the acquisition of a W1 image on March 14, 1999.

Table 1: RADARSAT images acquired during the winter of 1998-1999

Date	Beam	Orbit	Covering
7 November 1998	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
11 November 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
11 November 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South
14 November 1998	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
18 January 1999	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
22 January 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
22 January 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South
25 January 1999	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
7 March 1999	ScanSAR Wide	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscou
11 March 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou North
11 March 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscou South

For each acquisition period, a ground campaign (Gauthier *et al.*, 1998) have been done mainly in the LG4 sub-watershed. The November campaign allowed to measure the soil dielectric constant, the depth of the soil frost and the soil surface temperature on a few sampling sites. The same measurements were made in January and March, as well as about forty snow transects (snow depth, snow density, SWE) and five vertical profiles (snow pits) representative of the snow conditions of the region (snow density and depth of each layer, grain size and type, dielectric constant, temperature).

Table 2 gives a summary of the three ground campaigns. Between January 28 and March 8 1999, there is a 50 mm increase of the SWE due to new snow precipitation and a decrease of the Thermal Resistance (Th.Res.) of the snowpack due to its densification.

Table 2: Summary of the ground campaigns for winter 1998-1999

Period	Snow cover characteristics (mean values)				Soil (mean values)	
	Depth [cm]	SWE [mm]	Density [kg/m ³]	Th. Res. [°Cms/J]	T°C	Dielectric Constant
9 - 12 November 1998	10	-	-	-	0.2	8.4
25 - 28 January 1999	100	210	211	8.0	-0.7	3.5
8 - 11 March 1999	111	261	236	7.3	-1.1	3.2

Figure 2 shows the evolution of the meteorological parameters (air temperature, soil temperature, snow depth) during the winter of 1998-1999. First, we can notice the thermal isolation effect of the snow cover on the soil temperature starting at the end of November. Secondly, the air temperature during the week preceding the RADARSAT image acquisitions of late January and at the beginning of March are characteristic of mid-winter conditions for this region ($T_{\text{air}}^{\circ} < -15^{\circ}\text{C}$). Thirdly, the snow depth at the end of the winter (120 cm) is also the normal snow depth for this region but is higher than those of the previous two winters (70 to 80 cm as shown in Figure 3). Fourthly, the soil is frozen but the soil temperature at the snow/ground interface is a bit warmer than the last two years. Finally, there was an additional accumulation of 10 cm of snow between the two RADARSAT acquisitions of January 22 and January 25, 1999.

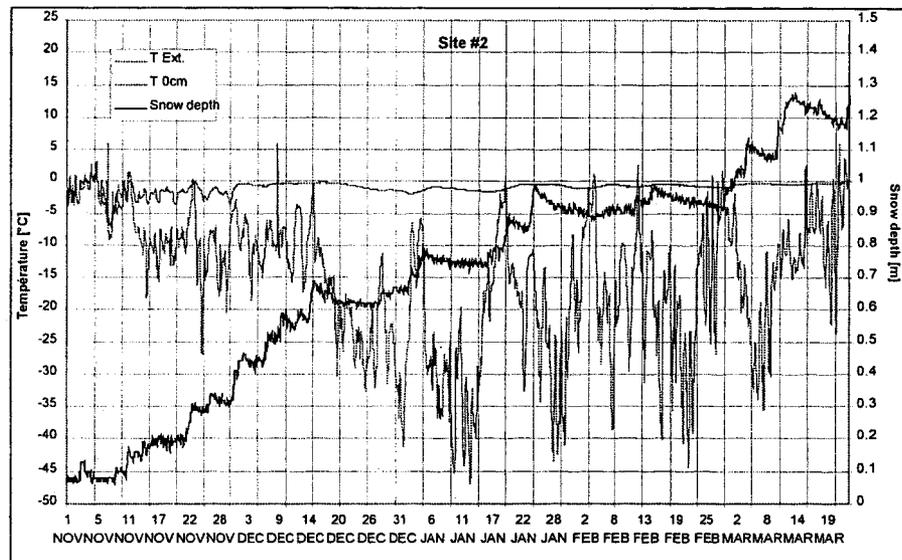


Figure 2 : Data for the winter of 1998-1999 from an automatic meteorological station installed on the LG4 sub-watershed (test site #2).

Finally, a land cover map of the three sub-watersheds was made from five Landsat-TM images. There are six distinct land cover classes: forest, open forest, open land, burned forest, bare soil/rock and water. This map has been integrated into the *EQeau* software since a few parameters of the algorithm are dependant of the land cover.

IMAGE PROCESSING

All calibrated Wide (W1) images were processed by VIASAT Géo-Technologie Inc. using both their own geometric correction software and the EASI/PACE image analysis software. The main steps for processing the RADARSAT SAR images are: inversion of the Look-up table (Altrix Systems, 1998), transformation of DN into power values, geometric correction using a DEM, image filtering and computation of the backscattering coefficient (σ°) for each pixel. Then, the image can be imported by *EQeau*, where the backscattering ratio between the winter image and the reference (snow-free) image are calculated. This ratio ($\sigma_w^{\circ} - \sigma_r^{\circ}$) is used to reduce the impact of vegetation and topography.

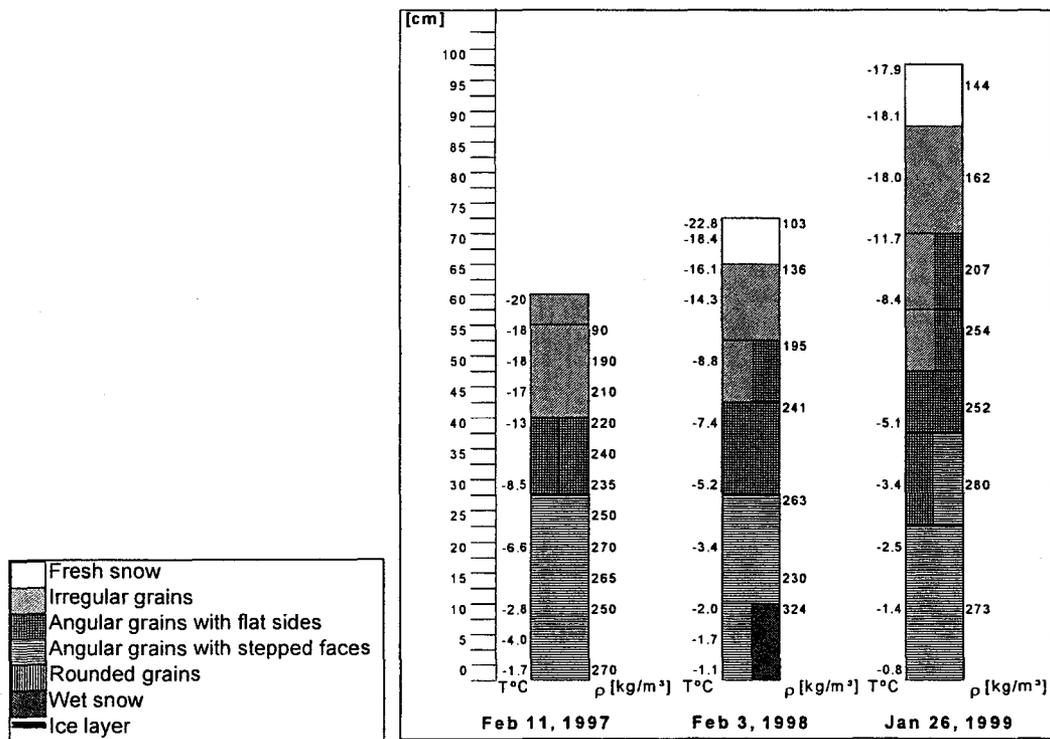


Figure 3 : Comparison of snow profiles measured on test site #2 in 1997, 1998 and 1999

VALIDATION OF THE ALGORITHM

The algorithm is based on studies conducted by INRS-Eau in a southern Québec agricultural area (Bernier and Fortin 1998) and in northern Québec (LG4 sub-watershed) with ERS-1 images (Bernier *et al.*, 1999a). The physical principles are the following:

- The snow cover characteristics (Thermal Resistance) influence the underlying soil temperature.
- The dielectric constant of the soil varies with the soil temperature under 0°C. The colder is the soil, the lower is the dielectric constant.
- The radar signal is influenced by the soil dielectric constant and the penetration depth of the frost in the soil.
- Consequently, the snow cover characteristics influence the signal recorded by the SAR sensor.

To recover the SWE from RADARSAT SAR data, the algorithm uses two equations (Bernier and Fortin 1998). The first one, is the linear relationship between the backscattering ratios and the snowpack Thermal Resistance. As mentioned earlier, the colder is the soil and the deeper is the frost, the lower is the backscattering ratio (Figure 4).

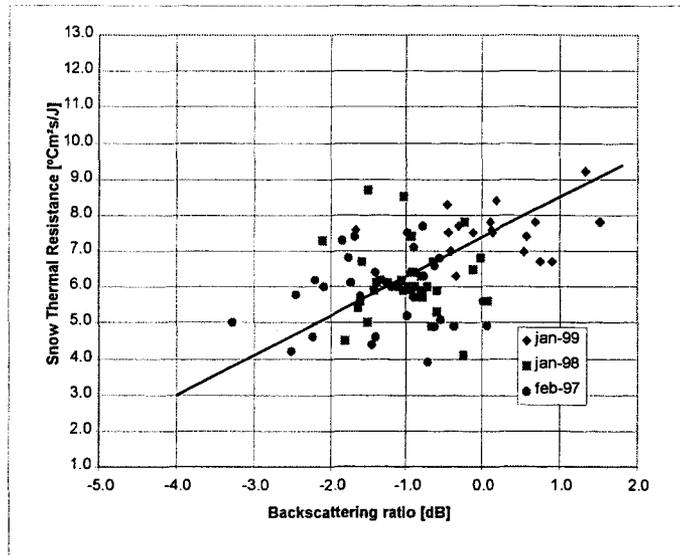


Figure 4 : Relationship between the backscattering ratios and the Thermal Resistance of the snow cover

The second equation infers the SWE from the estimated Thermal Resistance (derived from the first relationship) and the snow density (obtained from snow lines or snow models). The relationship between the SWE and the Thermal Resistance, as a function of density, is illustrated on Figure 5.

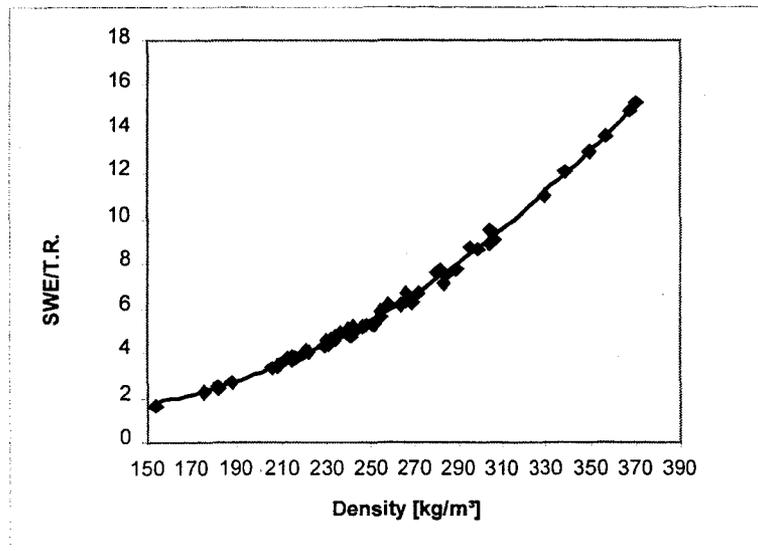


Figure 5 : Relationship between the SWE and the Thermal Resistance of the snow cover, as a function of density

For RADARSAT images acquired in mid-winter conditions, the first part of the algorithm has been developed previously from Standard images acquired in February 1997 and January 1998. The Thermal Resistance of the snow cover was computed from field measurements for about

twenty homogeneous sites. Those values have been related to the mean backscattering ratio of each homogeneous site extracted from the two Standard images (Figure 4). Then, the backscattering ratios of the sampling sites extracted from the Wide images acquired in January 1999 (table 1) and the corresponding Thermal Resistance of the snow cover, measured on site, were added to Figure 4 to confirm the previously established relationship (Bernier *et al.*, 1998).

The refined algorithm was first tested on the backscattering ratios extracted from the Wide images of January 1999, over the sampling sites. The resulting mean SWE, for those sampling sites, is 219 mm with a standard deviation of 25mm. Those values are similar to the mean SWE measured by snow transects for the same sampling sites during the field campaign (mean of 213 mm, standard deviation of 18 mm).

SWE MAPPING

Using the *EQeau* software, the algorithm was then applied to the three Wide images acquired in January 1999 in order to map the SWE over the three sub-watersheds (*LG4*, *Laforge* and *Caniapiscau*). The resultant maps are presented in Figure 6. There is a noticeable difference between the SWE estimated for the East images acquired on January 22 (Caniapiscau) and the West image acquired on January 25 (LG4). An analysis of the January 25 image revealed abnormally high backscattering coefficients at the lowest (18-24°) and highest (28-31°) incidence angles resulting in the overestimation of the SWE (250+ mm) for those areas (Bernier *et al.*, 1999b). However, the SWE estimated for the central part of the image are consistent with the values measured during the field campaign (~200 mm). On the Caniapiscau sub-watershed, the highest SWE values (201 to 250 mm) correspond to higher elevations the sub-watershed boundaries. The lowest SWE values (101 to 150 mm) can be found near the Caniapiscau reservoir.

The mean SWE over each sub-watershed were also computed by *EQeau*. Table 3 compares these values to the mean SWE derived from interpolation of the Hydro-Québec regular snow transects. The over-estimated SWE for a part of the LG4 image has affected the mean value calculated for that watershed. For the Caniapiscau watershed, it is important to note that the two Wide images were acquired a week before the HQ snow transects. A snow precipitation (SWE ~15-20 mm) was recorded during the interval and is the cause for the under-estimation seen in Table 3.

Table 3: Comparison of the estimated SWE and the measured SWE for January and March 1999.

Sub-watershed	Snow Water Equivalent	
	RADARSAT Images	Hydro-Québec Survey
	January 22 and 25	January 22 through January 30
LA1	216 mm (87% du bassin)	213 mm
LG4	225 mm (74% du bassin)	214 mm
Caniapiscau	189 mm (89% du bassin)	215 mm
	March 11	March 19 through March 21
Caniapiscau	312 mm (89% du bassin)	331 mm

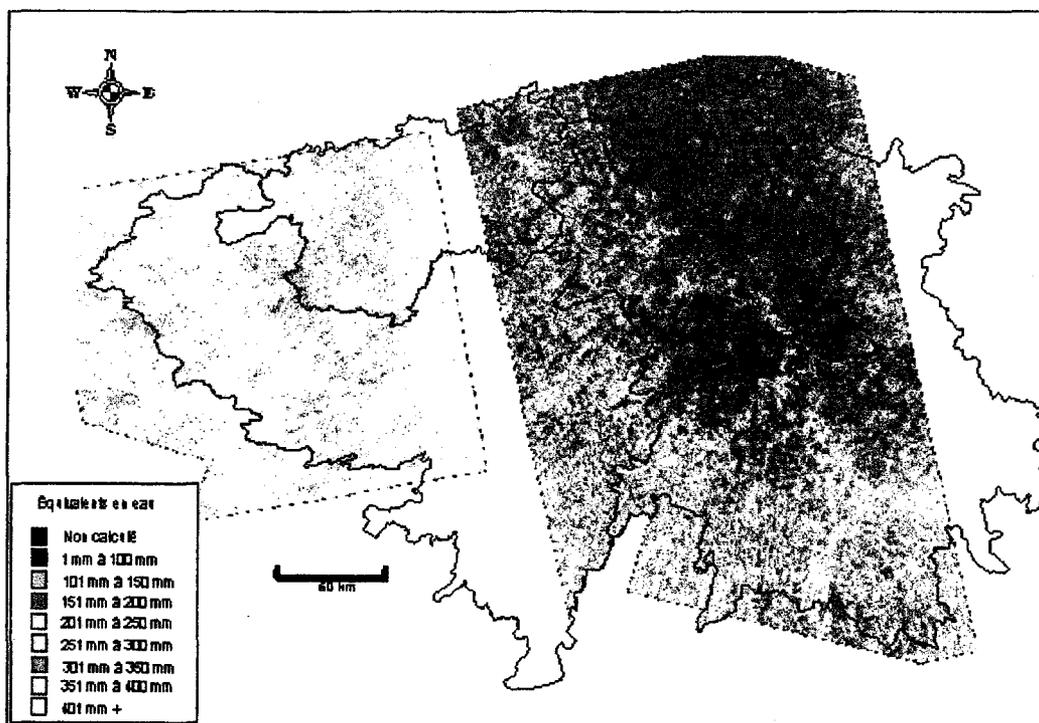


Figure 6 : SWE map derived from RADARSAT images acquired on January 22 and 25, 1999

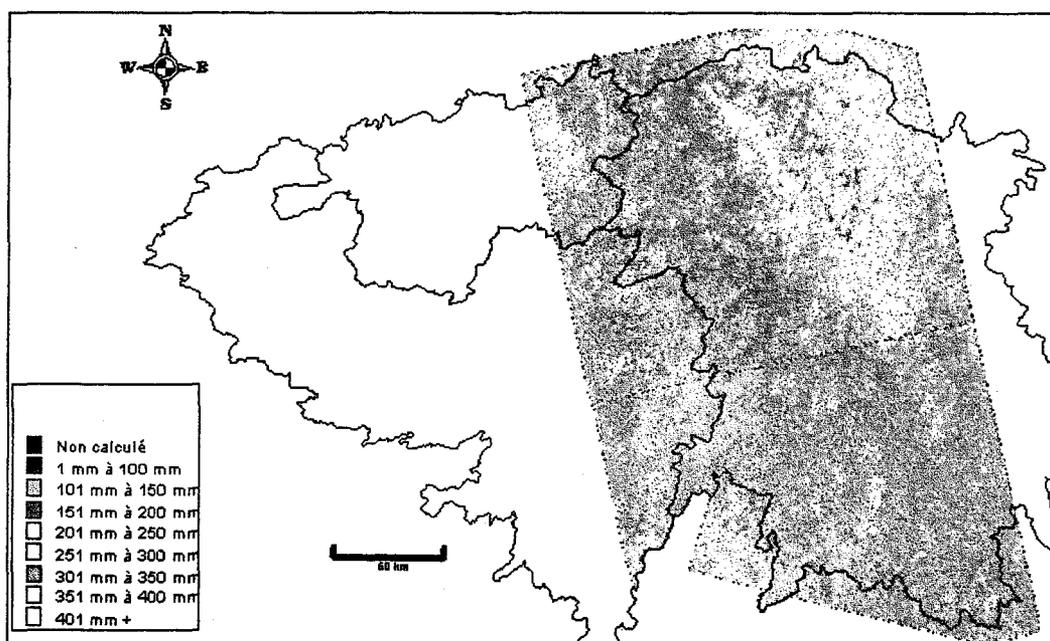


Figure 7 : SWE map derived from RADARSAT images acquired on March 11, 1999

The same algorithm (mid-winter conditions) has been applied by *EQeau* to the two Wide images acquired on March 11, 1999. The SWE map are shown on Figure 7. An important increase of the SWE was noticed and measured during the March field campaign (table 2). This increase is also

apparent on the map produced by *EQeau*. Again, the higher SWE are found on the hills and the lower SWE near the Caniapiscou reservoir. The mean SWE over the Caniapiscou sub-watershed have also been computed by *EQeau*. The result is shown on table 3. Again, the snow transects were done a week after the RADARSAT overpass.

CONCLUSION

The *EQeau* software was used successfully in pre-operational mode during the winter of 1999.

The RADARSAT algorithm has performed well either under normal snow cover conditions (1999) using Wide (W1) images or under snow conditions below normal (1997-1998) using Standard images (S1). The increase of the measured SWE from late January to the beginning of March is clearly detected on SWE maps produced by *EQeau*. The mean estimated SWE on each sub-watershed are comparable to values obtained by the interpolation of Hydro-Québec field surveys. However, there is an uncertainty on both ways to derive the mean SWE. We are presently working on the determination of these uncertainties for the RADARSAT approach.

Since the calibration of the ScanSAR images was not confirmed by the Canadian Space Agency until February 1st 1999, it was not planned to use them in the present demonstration of *operational feasibility*. However, the ScanSAR images are presently under analysis. Following this analysis, we will be able to assess the uncertainty on SWE estimations from both Wide and ScanSAR images. Then, knowing the corresponding economical advantages of these RADARSAT products (Martin *et al.*, 1999), we should be able to make recommendations to Hydro-Québec managers concerning the type of data which is best suited for an operational use of *EQeau* on the La Grande watershed.

REFERENCES

- ALTRIX SYSTEMS (1998). Extraction of Beta Nought and Sigma Nought from RADARSAT CDPF Products. Report No. AS97-5001, 22 May 1998, 8 pages.
- BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, J.L. BISSON et P. VINCENT (1999a) Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires, *Revue des sciences de l'eau*, 12 (2).
- BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY et P. VINCENT (1999b). Méthode opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige par imagerie RADARSAT pour la gestion des réservoirs du complexe la grande rivière. La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67^e Congrès de l'ACFAS, Université d'Ottawa, 10-12 mai 1999.
- BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER et P. VINCENT (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Symposium final du programme ADRO, 14-16 octobre 1998, Montréal, Canada (à paraître).
- BERNIER, M. et J.P. FORTIN (1998). The Potential of Times Series of C-band SAR Data to Monitor Dry and Shallow Snow cover. *IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 226-243.
- GAUTHIER, Y., M. BERNIER, J.P. FORTIN, R. GAUTHIER et M. LELIÈVRE (1997). Importance des mesures de terrain dans l'établissement d'algorithmes de suivi du couvert de neige à partir d'images radar. VII^e Journée Scientifique du Réseau de Télédétection de l'AUPELF-UREF. 13-17 octobre 1997, Sainte-Foy, Canada : 37-43.

MARTIN, D., BERNIER, M., SASSEVILLE, J.L. ET R. CHARBONNEAU (1999). Evaluation financière de l'intégration de technologies satellitaires pour le suivi du couvert nival, au sein d'une entreprise hydroélectrique, *International Journal of Remote Sensing (in press)*.

ARTICLE 3

**MÉTHODE OPÉRATIONNELLE D'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT
EN EAU DE LA NEIGE PAR IMAGERIE RADARSAT
POUR LA GESTION DES RÉSERVOIRS DU COMPLEXE
LA GRANDE RIVIÈRE**

(ACFAS, mai 1999)

MÉTHODE OPÉRATIONNELLE D'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE PAR IMAGERIE RADARSAT POUR LA GESTION DES RÉSERVOIRS DU COMPLEXE LA GRANDE RIVIÈRE

Monique Bernier¹, Jean-Pierre Fortin¹, Yves Gauthier¹,

Raymond Gauthier², René Roy² et Pierre Vincent³.

(1) INRS-Eau, 2800 rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada G1V 4C7
Tél. : (418) 654-2585, Fax : (418) 654-2600, e-mail : Monique_Bernier@inrs-eau.quebec.ca

(2) Hydro-Québec, Groupe Production, 75 ouest boul. René-Levesque, 9^e étage, Montréal (Qc), H2Z 1A4
Tél. : (514) 289-2211 poste 4062, e-mail : Gauthier.Raymond@hydro.qc.ca

(3) VIASAT Géotechnologies Inc. 419, boul. Rosemont, bureau 301, Montréal (Québec), H2S 1Z2
Tél. : (514) 495-6500, Fax : (418) 495-4191, e-mail : pvincent@viasat.qc.ca

RÉSUMÉ

Cette communication présente les résultats préliminaires d'un projet pilote, parrainé par le Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) de l'Agence spatiale canadienne. Le projet vise à développer la méthode et les outils afin que l'utilisation des images du satellite canadien RADARSAT pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige soit rapidement intégrée au système de prévision hydrologique d'Hydro-Québec et ce pour l'ensemble du bassin de la rivière La Grande (184 000 km²).

L'hiver 1999 marquait une étape importante du projet puisqu'il s'agissait d'évaluer l'efficacité des outils et de la méthode d'estimation de l'équivalent en eau de la neige en phase pré-opérationnelle, sur les trois sous-bassins amonts de la rivière La Grande (LG4, Laforge, Caniapiscau). Des images en mode Wide (W1) et ScanSAR Large ont été acquises en novembre 1998, janvier 1999 et mars 1999. Celles-ci ont été corrigées radiométriquement et géométriquement et transférées dans le prototype *EQeau* pour la production des cartes d'équivalent en eau. L'algorithme développé précédemment à partir de l'analyse des images RADARSAT en mode Standard (100 km X 100 km) et dans des conditions de faible enneigement a donc été validé et raffiné à l'aide des données en mode W1 et pour des conditions normales d'enneigement.

La méthode d'estimation permet de détecter l'augmentation de l'équivalent en eau de la neige au sol entre 1998 et 1999 et entre janvier et mars 1999. De plus, la moyenne des équivalents en eau estimée pour chacun des trois sous-bassins est comparée aux moyennes obtenues par interpolation des lignes de neige d'Hydro-Québec. La concordance est excellente sur la région de Caniapiscau alors que sur la région de LG4, les résultats de janvier 1999 sont affectés par une anomalie radiométrique.

Mots clés: RADARSAT, Équivalent en eau, neige

1. INTRODUCTION

Ce projet pilote, parrainé par le Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) de l'Agence spatiale canadienne, constitue la suite du projet ADRO #29 « *Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT* » dont l'objectif principal était le développement d'un logiciel (*EQeau*) pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige à partir des images RADARSAT (Bernier et al., 1998). Le projet pilote vise compléter le développement de la méthode et des outils afin que l'utilisation des images du satellite canadien RADARSAT soit rapidement intégrée au système de prévision hydrologique d'Hydro-Québec et ce, pour l'ensemble du bassin de la rivière La Grande (184 000 km²) dans le nord-ouest du Québec.

Pour que cet objectif soit réalisable, il faut entre autres:

- Parer aux difficultés de transfert technologique entre le mode expérimental et le mode opérationnel. Le projet implique donc trois intervenants, le développeur (INRS-Eau), le fournisseur de produits & services en télédétection (Viasat Géo-technologie Inc.) et l'utilisateur de la nouvelle technologie (Hydro-Québec).
- Déterminer les produits qui permettent d'obtenir des résultats optimaux. Les algorithmes développés à partir des images RADARSAT en mode Standard (S1) seront donc appliqués et adaptés aux images en mode Wide et éventuellement ScanSAR.
- Appliquer la méthode à un territoire suffisamment grand pour que les résultats puissent être validés. Le territoire étudié correspond à trois sous-bassins (LG4, Laforge et Caniapiscau) qui couvrent une superficie totale de plus de 77 000 km².

L'hiver 1999 marquait une étape importante du projet puisqu'il s'agissait d'évaluer l'efficacité des outils et de la méthode d'estimation de l'équivalent en eau de la neige en phase pré-opérationnelle. Le présent article présente donc les résultats obtenus par *EQeau* en janvier et mars 1999. On y fera le bilan des données acquises, l'analyse des images en mode Wide, la vérification de l'algorithme et son application pour les mois de janvier et de mars 1999.

2. BILAN DES DONNÉES ACQUISES

Pour l'hiver 1998-1999, trois périodes d'acquisition d'images RADARSAT ont été planifiées : novembre 1998, janvier 1999 et mars 1999. À chaque période et à l'intérieur de trois jours, trois images en mode Wide 1 (165 km X 165 km) ont été acquises pour couvrir 75% de la zone d'étude (Figure 1). De plus, une image en mode ScanSAR Large (500 km X 500 km) couvrant l'ensemble des trois sous-bassins a aussi été acquise à chaque période.

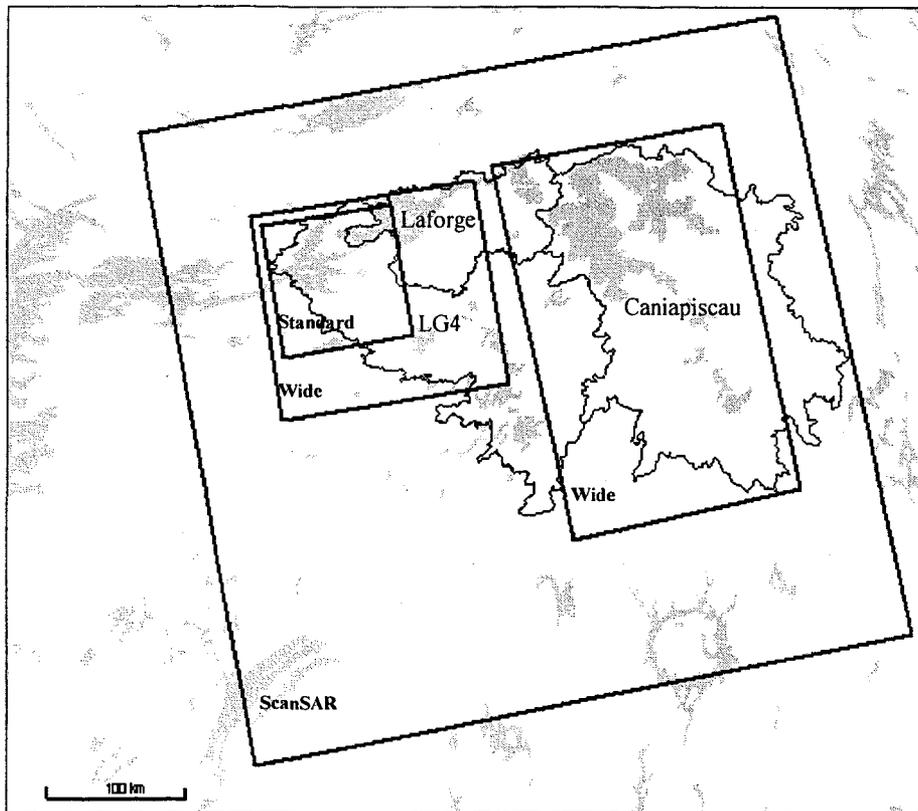


Figure 1 : Couverture des images

Le tableau 1 présente le bilan de ces acquisitions. À noter que l'image du 14 mars 1999 (W1) n'a pu être acquise en raison d'un problème technique avec le satellite.

Tableau 1 : Bilan des acquisitions d'images de l'hiver 1998-1999

Date	Mode	Orbite	Couverture
7 novembre 1998	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
11 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
11 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud
14 novembre 1998	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
18 janvier 1999	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
22 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
22 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud
25 janvier 1999	Wide 1	Ascendant	LG4 ouest, LA1
7 mars 1999	ScanSAR Large	Ascendant	LG4, LA1, Caniapiscau
11 mars 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Nord
11 mars 1999	Wide 1	Ascendant	Caniapiscau Sud

À chaque période d'acquisition d'images, une campagne de terrain est effectuée sur le territoire d'étude. La campagne de novembre 1998 a permis de mesurer la constante diélectrique, la profondeur de gel et la température du sol sur une vingtaine de sites d'échantillonnage. Les mêmes mesures ont été recueillies lors des campagnes de janvier et mars 1999 en plus, bien sûr, de la hauteur, de la densité et de l'équivalent en eau de la neige à chaque site et du profil vertical du couvert de neige sur cinq sites représentatifs du milieu (Bernier *et al.*, 1999; Gauthier *et al.*, 1997). Le tableau 2 présente un bilan de ces campagnes de terrain. Il est à noter que lors de la campagne de mars 1999, les mauvaises conditions climatiques du mercredi 10 mars (vents de 30 à 60 km/h, accumulation de 15 à 30 cm de neige) n'ont pas permis d'effectuer les échantillonnages sur 9 sites situés à l'extrême est du territoire habituellement couvert. Les moyennes ne comprennent donc pas ces sites. À remarquer, l'augmentation marquée de l'ordre de 50mm de l'équivalent en eau moyen du couvert de neige, entre le 28 janvier et le 8 mars 1999, suite à des chutes de neige significatives. La baisse de la résistance thermique du couvert résulte pour sa part d'une densification du profil.

Tableau 2 : Bilan des campagnes de terrain de l'hiver 1998-1999

Date des campagnes	Couvert de neige (valeurs moyennes)				Sol (valeurs moyennes)	
	H [cm]	Éq. Eau [mm]	Den. [kg/m ³]	R.Th. [°Cms/J]	T°C	Cte Diél.
9 au 12 novembre 1998	10	-	-	-	0.2	8.4
25 au 28 janvier 1999	100	210	211	8.0	-0.7	3.5
8 au 11 mars 1999	111	261	236	7.3	-1.1	3.2

En complément, la figure 2 présente les données d'une des stations climatiques installées sur le sous-bassin de LG4 et donne un aperçu général du climat de la région pour l'hiver 1998-1999.

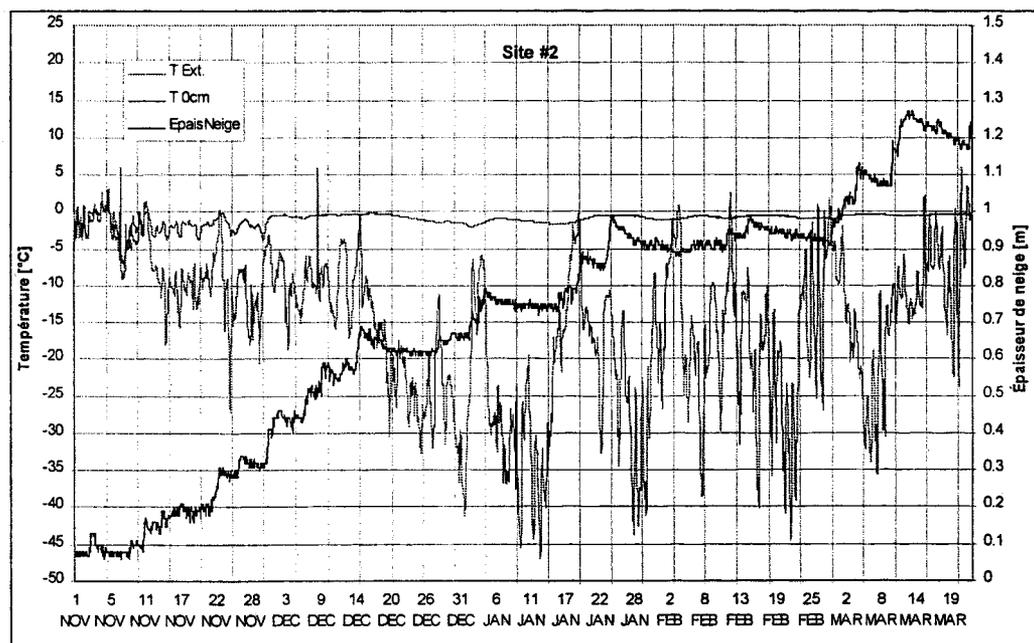


Figure 2 : Données de la station climatologique du site d'échantillonnage #2 sud pour l'hiver 1998-1999.

On y voit clairement l'importance des chutes de neige en novembre et décembre et leur effet isolant sur la température à la surface du sol. Ainsi, les conditions précédant l'acquisition des images de la fin janvier et du 11 mars 1999 sont caractéristiques du milieu de l'hiver ($T_{\text{air}} < -15^{\circ}\text{C}$), avec toutefois un couvert de neige plus épais que par les années passées (70-80 cm en 1997 et 1998) et un sol gelé, mais légèrement moins froid que par les années précédentes (-1 à -3°C en 1997 et 1998). Fait aussi à noter, une accumulation de 10 cm de neige entre les acquisitions du 22 et du 25 janvier 1999.

3. TRAITEMENT DES IMAGES RADARSAT EN MODE WIDE

Toutes les images acquises ont été traitées par VIASAT Géo-Technologie Inc. à l'aide de leur propre logiciel de correction géométrique et du logiciel de traitement d'images EASI/PACE. Le tableau 3 présente les différentes étapes de traitement radiométrique et géométrique précédant l'utilisation des images par le prototype *EQeau*.

Tableau 3 : Traitements appliqués aux images RADARSAT étalonnées

Lecture des images brutes
Calcul des angles d'incidence
Inversion du Look Up Table
Transformation des DN en puissances (intensités)
Changement de 32 bits à 16 bits pour la lecture par le logiciel de correction de VIASAT
Exportation en binaire
Correction géométrique, ré-échantillonnage, filtrage
Importation dans PCI
Remise de l'image en 32 bits
Transformation des intensités (I) en dB
Transformation des dB en 16 bits
Exportation en binaire pour utilisation par EQeau

4. ANALYSE DES IMAGES RADARSAT EN MODE WIDE

La plus grande gamme d'angles d'incidence permet au mode Wide (W1) de couvrir un plus grand territoire que le mode Standard (S1) mais, de façon générale, la radiométrie des deux modes devraient être comparable (Tableau 4).

Tableau 4 : Caractéristiques des modes W1 et S1 de RADARSAT

	W1	S1
Angles d'incidence	20°-31°	20°-26°
Couverture au sol	165 km X 165 km	100 km X 100 km
Résolution	30 m	30 m
Pixel	12.5 m	12.5 m

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons d'abord comparé les coefficients de rétrodiffusion moyens calculés le 19 novembre 1997 (S1) et le 14 novembre 1998 (W1) sur les sites d'échantillonnage communs aux deux années. La figure 3 montre que les valeurs sont tout à fait comparables. On ne distingue aucun patron régulier qui indiquerait un effet du changement de mode sur la radiométrie. Les variations aléatoires observées sont plutôt fonction des conditions du sol qui peuvent varier entre les deux années.

Afin de vérifier plus spécifiquement l'influence que peut avoir la plus grande gamme d'angles d'incidence du mode W1 sur la radiométrie, nous avons étudié le profil transversal des coefficients de rétrodiffusion. Il faut d'abord spécifier que les angles d'incidence des images W1, tels qu'estimés par le logiciel de traitement EASI/PACE, vont en fait de 18° à 31°. La figure 4 montre que sur l'image du 14 novembre 1998, le coefficient de rétrodiffusion peut passer de -9 à -11.5 dB selon l'angle d'incidence. Il y a une forte baisse entre 18° et 20°, ce qui est prévisible à ces angles d'incidence. Entre 20° et 26° (angles de S1), la variation est inférieure à 1 dB. Elle est aussi inférieure à 1 dB entre 26° et 31° (angles spécifiques à W1). Dans tous les cas, en effectuant le rapport de rétrodiffusion entre deux images, les valeurs obtenues pour la portion située entre 20° et 31° devraient être comparables.

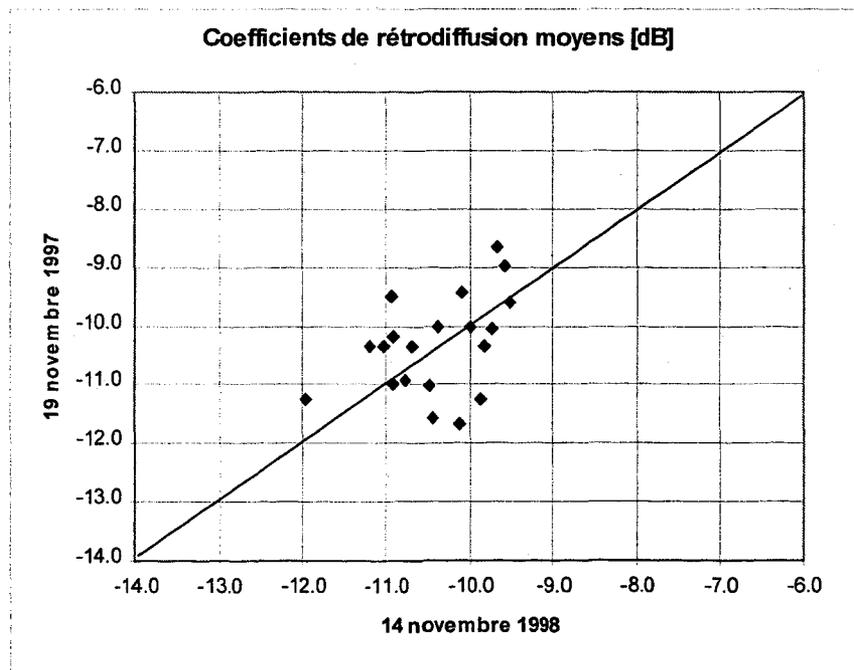


Figure 3 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion moyens calculés le 19 novembre 1997 (S1) et le 14 novembre 1998 (W1) sur les sites d'échantillonnage. La droite illustre où serait la concordance parfaite entre les deux dates.

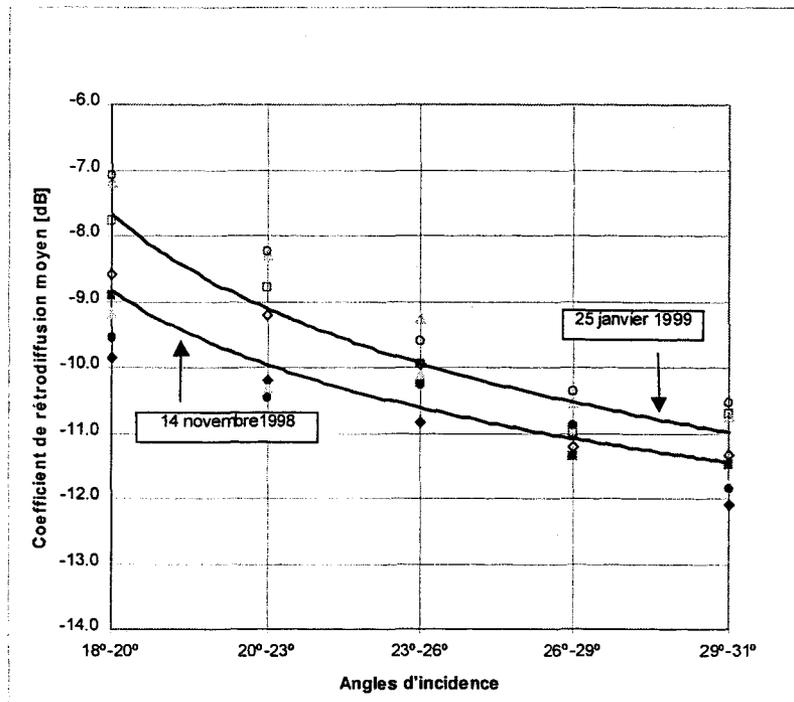


Figure 4 : Comparaison des variations du coefficient de rétrodiffusion selon l'angle d'incidence pour les images du 14 novembre 1998 et du 25 janvier 1999. Les coefficients sont moyennés par blocs de 3000 pixels et de 3000 lignes (symboles pleins = 25 jan 99; symboles vides = 14 nov 98). Le trait plein représente la régression entre ces points.

Toutefois, un problème survient lorsqu'une des deux images présente des variations plus élevées. C'est ce qui s'est produit dans le cas de l'image du 25 janvier 1999 (figure 4), où les valeurs sont significativement plus fortes dans la moitié ouest et l'extrême est de l'image et où la variation transversale atteint 3 dB. Les rapports calculés seront donc surestimés. La cause de ces fortes valeurs systématiques est pour l'instant inconnue et le phénomène n'est réellement apparent que sur une seule des cinq images W1 analysées, soit celle du 25 janvier 1999. Cette analyse préliminaire des images en mode W1 indique qu'il faudra interpréter avec soin les résultats de la cartographie des équivalents en eau dans deux cas : dans la portion de l'image correspondant aux faibles angles d'incidence (18° à 20°), soit l'extrémité ouest des images, et dans le cas général de l'image du 25 janvier 1999.

5. VÉRIFICATION DE L'ALGORITHME

L'algorithme principal de la méthode d'estimation de l'équivalent en eau est basé sur la relation entre la résistance thermique du couvert de neige et le rapport entre les coefficients de rétrodiffusion d'une image de référence (automne) et d'une image d'hiver (Bernier et Fortin, 1998). L'utilisation d'images en mode Wide (W1) et les conditions d'enneigement plus fortes de l'hiver 1999 nous amènent à vérifier si l'algorithme développé (Bernier *et al.*, 1998) à partir des données du mode Standard (S1) de février 1997 et janvier 1998 (milieu d'hiver) est toujours valable. Pour ce faire, nous juxtaposons les données de 1999 à la relation entre la résistance

thermique du couvert de neige et le rapport de rétrodiffusion de 1997-98 (Figure 5). À noter que pour le 25 janvier 1999, seuls les sites situés dans la partie centrale de l'image ont été utilisés. Pour ces sites, les plus fortes résistances thermiques du couvert nival mesurées en janvier 1999 se traduisent aussi par de plus forts rapports de rétrodiffusion qui viennent confirmer la relation. Avec cette plus grande dynamique des valeurs, on a pu aussi raffiner le polynôme utilisé jusqu'à maintenant (Bernier *et al.* 1998).

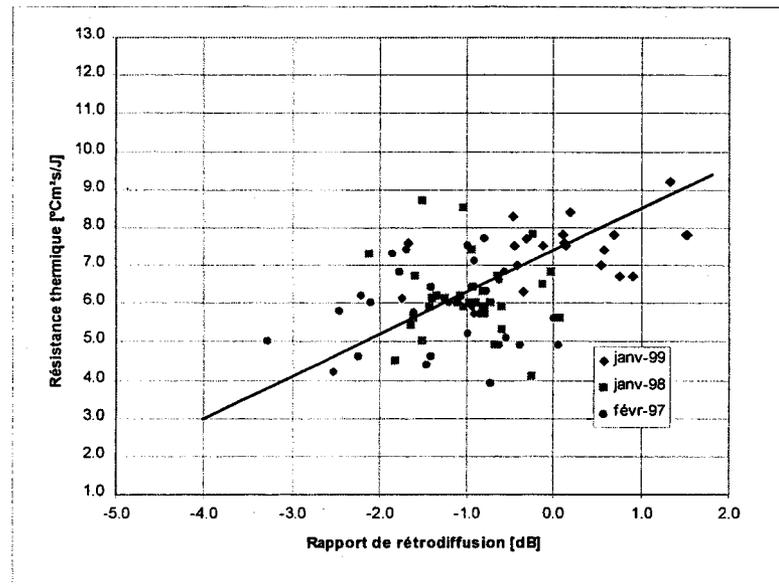


Figure 5 : Relation entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique en milieu d'hiver

Toutefois, l'image couvrant les sites d'échantillonnage n'ayant pu être acquise le 14 mars 1999, l'exercice de vérification n'a pu être effectué en mars.

6. APPLICATION DE L'ALGORITHME

L'algorithme a d'abord été appliqué directement aux rapports de rétrodiffusion extraits des sites d'échantillonnage des images de janvier 1999. Les résultats confirment la justesse de l'algorithme, bien que l'écart-type soit plus important sur les données de janvier 1999 (Figure 6). Ce phénomène est relié à l'incertitude qui prévaut sur l'image du 25 janvier 1999, où se retrouvent presque tous les sites d'échantillonnage au sol. Notons que les six sites de la partie ouest de l'image, la plus touchée, n'ont pas été utilisés pour vérifier la performance de l'algorithme.

Néanmoins, la moyenne des équivalents en eau estimés le 25 janvier 1999 sur les sites situés au centre de l'image est de 219 mm avec un écart-type de 25 mm, alors que la moyenne des équivalents en eau mesurés au sol lors de la campagne de terrain est de 213 mm, avec un écart-type de 18 mm.

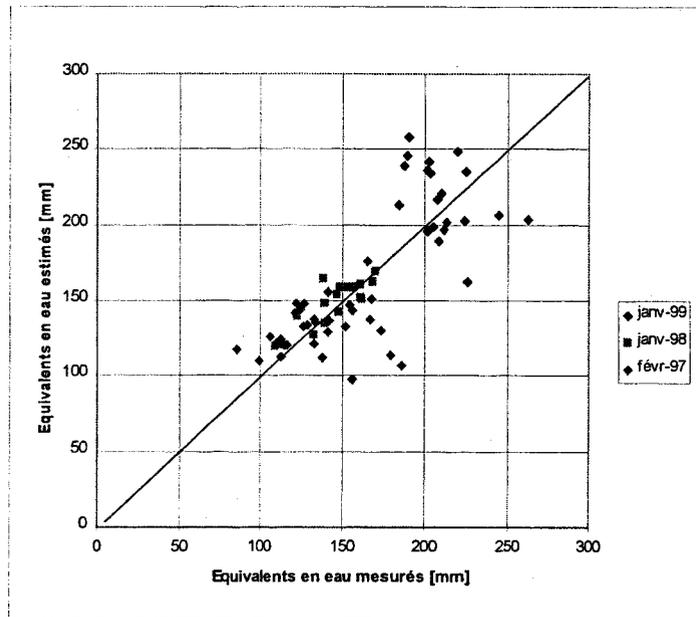


Figure 6: Comparaison des équivalents en eau mesurés et estimés aux sites d'échantillonnage en janvier 1999. Chaque site couvre environ 200m par 500 m.

À partir du logiciel *EQeau*, l'algorithme est ensuite appliqué à l'ensemble des trois images de janvier 1999. La figure 7 présente la carte résultante des équivalents en eau. On y remarque immédiatement une discordance entre les images acquises le 22 janvier (Caniapiscau) et l'image acquise le 25 janvier (LG4). Les anomalies sur l'image du 25 janvier se traduisent donc bel et bien par des équivalents en eau surestimés (250 mm et plus), surtout à l'ouest et à l'extrême est de l'image.

Par contre, les valeurs obtenues pour la partie centrale de l'image correspondent beaucoup mieux aux valeurs mesurées sur le terrain, soient des équivalents en eau entre 150 et 250 mm. Sur les images du bassin de Caniapiscau (22 janvier), on remarque que les plus grands équivalents en eau (201 à 250 mm) correspondent aux régions plus élevées qui délimitent le sous-bassin à l'ouest et au sud. Dans les régions moins accidentées du centre, les équivalents en eau sont de l'ordre de 151 à 200 mm. Il y a aussi une bande de plus faibles valeurs (101 à 150 mm) près du réservoir de Caniapiscau.

Pour établir la validité des résultats, la moyenne des équivalents en eau estimés est calculée pour chacun des trois sous-bassins et exprimée selon la superficie couverte. Ces valeurs peuvent alors être comparées aux moyennes obtenues par interpolation des lignes de neige d'Hydro-Québec (Tableau 5). Tel qu'anticipé, les valeurs obtenues pour LG4 (principalement couvert par l'image du 25 janvier) sont surestimées. Pour le sous-bassin de Caniapiscau, il est important de noter que les images W1 ont été acquises le 22 janvier 1999, et que les relevés d'Hydro-Québec ont été effectués la semaine suivante. Puisqu'il y a eu des chutes de neige significatives (au moins 15 à 20 mm d'équivalent en eau) après le 22 janvier (Figure 2), il est normal que la moyenne extraite des images RADARSAT soit inférieure aux relevés au sol pour ce bassin.

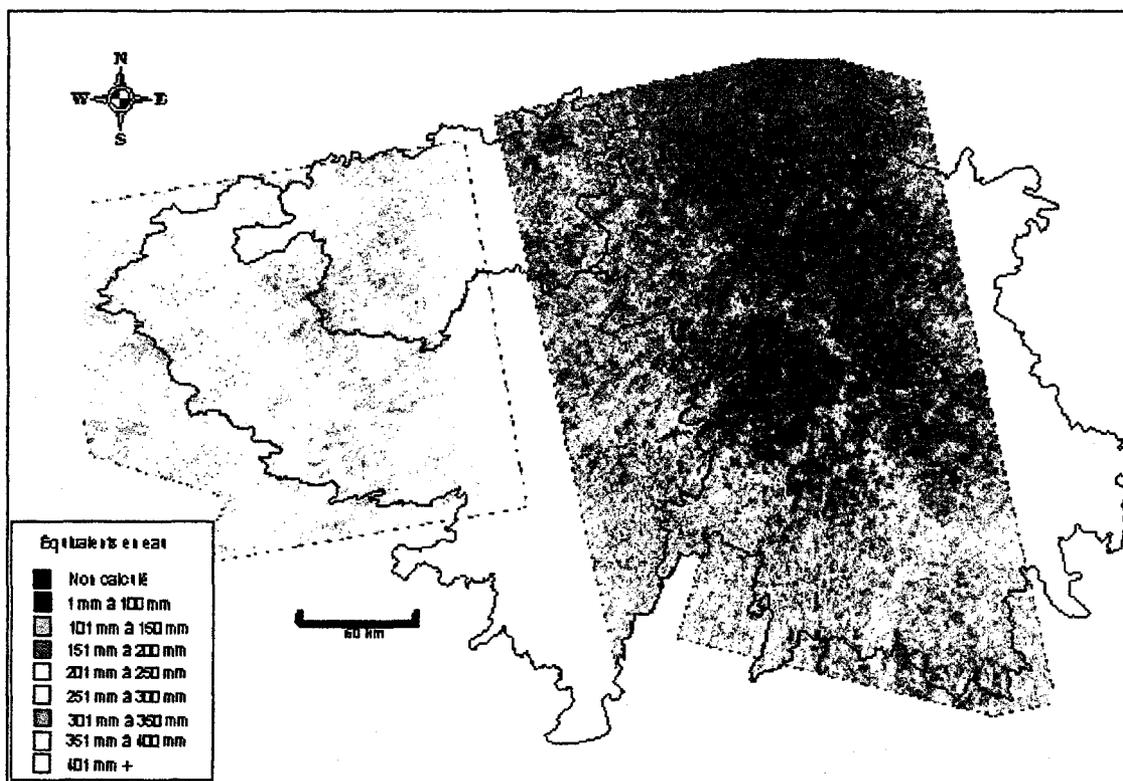


Figure 7: Cartographie des équivalents en eau pour les 22 janvier (sous-bassin LG4) et 25 janvier 1999 (sous-bassin Caniapiscau).

Tableau 5 : Comparaison des équivalents en eau estimés à partir des données de RADARSAT et estimés à partir des relevés d'Hydro-Québec pour janvier 1999

Sous-bassins	Moyenne des équivalents en eau	
	À partir des images RADARSAT (22 et 25 janvier 1999)	À partir des relevés d'Hydro-Québec (22 au 30 janvier 1999)
LA1	216 mm (87% du bassin)	213 mm
LG4	225 mm (74% du bassin)	214 mm
Caniapiscau	189 mm (89% du bassin)	215 mm

Lors de la seconde période d'acquisition de l'hiver 1999, l'algorithme a été appliqué sur les deux images du 11 mars, couvrant principalement le sous-bassin de Caniapiscau (figure 8). La forte augmentation des équivalents en eau mesurés sur le terrain se traduit aussi par de forts équivalents en eau calculés à partir des images RADARSAT. Comme sur la carte de janvier, ce sont dans les régions de plus hautes altitudes où l'on retrouve les plus forts équivalents en eau et le secteur du réservoir de Caniapiscau où l'on retrouve les plus faibles valeurs. Puisqu'il n'y a que trois sites d'échantillonnage sur ce secteur et qu'ils n'ont pu être visités en raison du mauvais temps, aucune validation par site n'est possible pour cette date. Par contre, comme précédemment, la moyenne des équivalents en eau estimés a été calculée pour chacun des trois sous-bassins et exprimée selon la superficie couverte. Toutefois, seulement 21 % et 27 % des

sous-bassins de LA1 et LG4 respectivement sont couverts par ces deux images. Le tableau 6 compare donc seulement l'estimé du sous-bassin de Caniapiscou à la moyenne obtenue par interpolation des lignes de neige d'Hydro-Québec prises du 19 au 21 mars 1999, soit après une nouvelle chute de 5 à 10 cm de neige.

Tableau 6 : Comparaison des équivalents en eau estimés à partir des données de RADARSAT et estimés à partir des relevés d'Hydro-Québec pour mars 1999

	Moyenne des équivalents en eau sur le sous-bassin	
	À partir des images RADARSAT (11 mars 1999)	À partir des relevés d'Hydro-Québec (19 au 21 mars 1999)
Sous-bassin de Caniapiscou	312 mm (89% du bassin)	331 mm

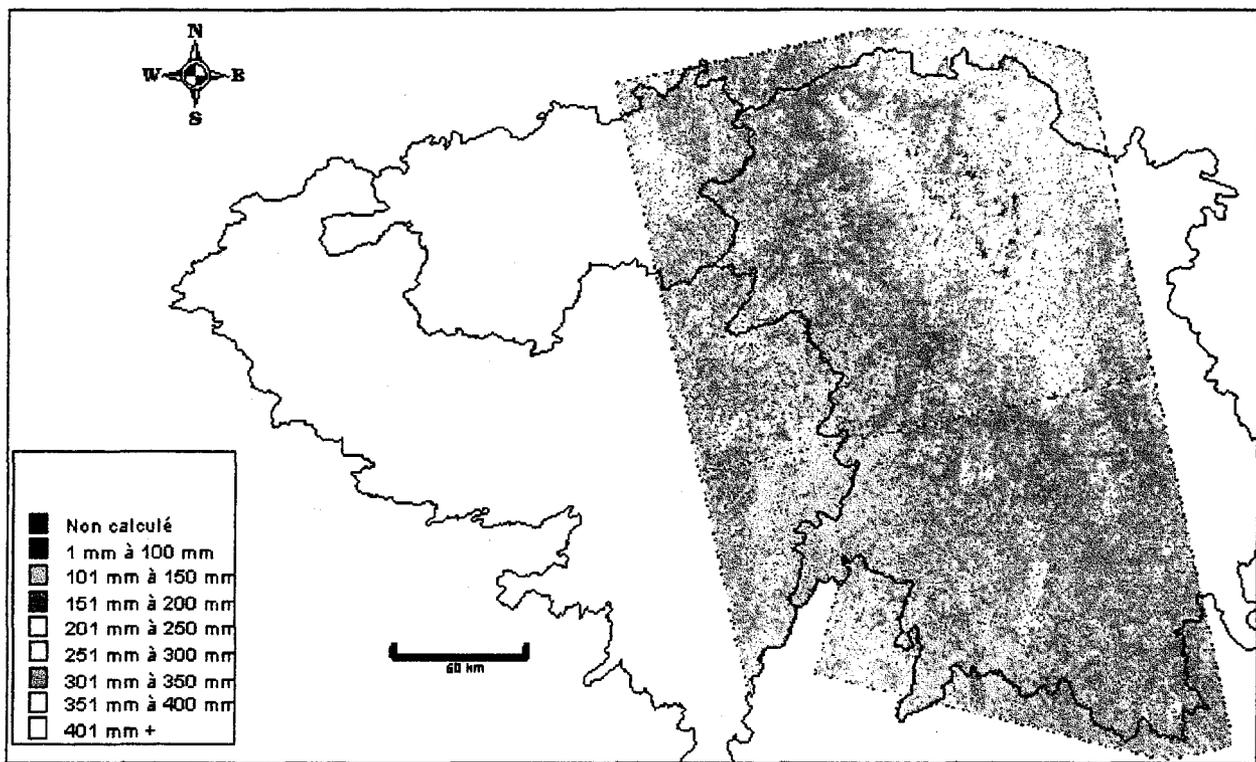


Figure 8 : Cartographie des équivalents en eau pour le 11 mars 1999 (sous-bassin Caniapiscou).

7. CONCLUSION

L'application de la méthode d'estimation de l'équivalent en eau de la neige dans un contexte pré-opérationnel s'est avérée une étape très positive du projet et a permis de tirer plusieurs conclusions :

1. L'algorithme développé à partir d'images en mode Standard (projet ADRO) est applicable sous des conditions normales d'enneigement et à partir des images en mode Wide (W1).
2. L'augmentation de l'équivalent en eau de la neige entre janvier et mars 1999 est clairement détectée sur les cartes produites par *EQeau*.
3. La moyenne des équivalents en eau estimés en janvier et mars 1999 pour chacun des trois sous-bassins concorde avec les moyennes obtenues par interpolation des lignes de neige d'Hydro-Québec. Une prochaine étape du projet consistera toutefois à établir de façon plus précise l'incertitude sur les équivalents en eau estimés.
4. Le prototype du logiciel *EQeau* a démontré son efficacité et la phase pré-opérationnelle a permis d'identifier quelques modifications à y apporter.
5. Nul n'est à l'abri des problèmes techniques et il est important de prévoir des scénarios alternatifs lors de la planification des acquisitions d'images.
6. Il est important de prévoir un mécanisme préalable de vérification des images pour s'assurer qu'aucune anomalie ne soit présente lors de l'application d'*EQeau*.

Enfin, l'évaluation des images ScanSAR nouvellement étalonnées que nous ferons dans les prochains mois, pourrait permettre d'établir un scénario alternatif pertinent pour la cartographie de l'équivalent en eau de la neige sur le bassin de la rivière La Grande.

RÉFÉRENCES

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, J.L. BISSON et P. VINCENT. (1999). Traitement d'images ERS-1 pour la prévision hydrologique dans la région de la Baie de James. *Revue des Sciences de l'eau* (sous presse).

BERNIER, M. et J.P. FORTIN (1998). The Potential of Times Series of C-band SAR Data to Monitor Dry and Shallow Snow cover. *IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 226-243.

BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER et P. VINCENT (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. *Symposium Final du Programme ADRO*, Montréal, Octobre 1998 (à paraître).

GAUTHIER, Y., M. BERNIER, J.P. FORTIN, R. GAUTHIER et M. LELIÈVRE (1997). Importance des mesures de terrain dans l'établissement d'algorithmes de suivi du couvert de neige à partir d'images radar. Actes des VII^e Journée Scientifique du Réseau de Télédétection de l'AUPELF-UREF. 13-17 octobre 1997, Sainte-Foy, Québec , pp. 37-43.