

Record Number: 24960
Author, Monographic: Bernier, M./Gauthier, Y.
Author Role:
Title, Monographic: Validation à moyen terme de l'approche EQeau
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau, Terre & Environnement
Date of Publication: 2002
Original Publication Date: 31 mai 2002
Volume Identification:
Extent of Work: xiv, 61
Packaging Method: pages incluant 2 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Terre & Environnement, rapport de recherche
Series Volume ID: 618 e1
Location/URL:
ISBN: 2-89146-481-8
Notes: Rapport annuel 2001-2002
Abstract: 10.00\$
Call Number: R000618 e1
Keywords: rapport/ ok/ dl

*Validation à moyen terme de l'approche
EQeau*

Rapport de recherche No R-618-e1

Mai 2002

Validation à moyen terme de l'approche EQeau

Rapport d'étape préparé pour

Pierre Ducharme

Hydro-Québec

Par

Monique Bernier

Yves Gauthier

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

Rapport de recherche No 618-e1

31 mai 2002

© INRS-Eau, 2002

ISBN: 2-89146-481-8

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
SOMMAIRE.....	ix
1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS.....	1
2. LES DONNÉES 2001-2002.....	5
2.1 LES IMAGES 2001-2002.....	5
2.2 LES DONNÉES TERRAIN ET MÉTÉO.....	7
3. LA PRÉPARATION ET L'ANALYSE DES DONNÉES D'ENTRÉE D'EQUEAU.....	13
3.1 LES DENSITÉS MOYENNES.....	13
3.2 L'ALGORITHME.....	13
3.3 LES IMAGES DE RÉFÉRENCE.....	13
3.4 LES IMAGES D'HIVER.....	22
4. L'APPLICATION D'EQUEAU.....	33
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	43
RECOMMANDATIONS À CETTE ÉTAPE DU PROJET:.....	46
RÉFÉRENCES.....	49
ANNEXES.....	51

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : IMAGES RADARSAT SCANSAR NARROW (SCN) PLANIFIÉES POUR LA SAISON 2001-2002.....	5
TABLEAU 2 : IMAGES RADARSAT SCANSAR NARROW (SCN) PLANIFIÉES POUR LA SAISON 2001-2002.....	6
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES DONNÉES DES OBSERVATEURS DE NOVEMBRE 2000 ET 2001.....	16
TABLEAU 4 : IMAGES DE L'HIVER 2002	22
TABLEAU 5 : COMBINAISONS D'IMAGES UTILISÉES POUR LE CALCUL DES ÉQUIVALENTS EN EAU DANS EQEAU	33

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 :	COUVERTURE DES ORBITES UTILISÉES EN 2001-2002.....	6
FIGURE 2 :	LOCALISATION DES SITES DE RELEVÉS DE L'HIVER 2002	8
FIGURE 3 :	RELEVÉS INRS-HQ POUR L'HIVER 2002	9
FIGURE 4 :	RELEVÉS HYDRO-QUÉBEC POUR L'HIVER 2002.....	10
FIGURE 5 :	COMPARAISON DES PROFILS DE L'HIVER 2002.....	12
FIGURE 6 :	COMPARAISON DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE ET DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DU COUVERT DE NEIGE AU SITE #2 DEPUIS 1994	12
FIGURE 7 :	HYPOTHÈSES CONSIDÉRÉES POUR LE CHOIX DES IMAGES DE RÉFÉRENCE	15
FIGURE 8 :	VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'OUEST	16
FIGURE 9 :	VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'OUEST, APRÈS RETRAITEMENT DE L'IMAGE DU 23 NOVEMBRE 2000.....	17
FIGURE 10 :	DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION (DB) ENTRE LE 11 NOVEMBRE 2001 ET LE 23 NOVEMBRE 2000, SUR L'IMAGE DE L'OUEST. UNE TEINTE ROUGE SIGNIFIE QUE LA RÉTRODIFFUSION DE 2001 EST D'AU MOINS 1 DB PLUS ÉLEVÉE QUE CELLE DE 2000.	18
FIGURE 11 :	VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DU CENTRE, APRÈS RETRAITEMENT DE L'IMAGE DU 20 NOVEMBRE 2000.....	19
FIGURE 12 :	IMAGE DU 15 NOVEMBRE 2001, SECTEUR LG4.....	20
FIGURE 13 :	VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'EST, APRÈS RETRAITEMENT DE L'IMAGE DU 17 NOVEMBRE 2000.....	20

FIGURE 14 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION (DB) ENTRE LE 12 NOVEMBRE 2001 ET LE 17 NOVEMBRE 2000, SUR L'IMAGE DE L'EST. UNE TEINTE ROUGE SIGNIFIE QUE LA RÉTRODIFFUSION DE 2001 EST D'AU MOINS 1 DB PLUS ÉLEVÉE QUE CELLE DE 2000.	21
FIGURE 15 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'OUEST.	23
FIGURE 16 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION (DB) ENTRE LE 23 NOVEMBRE 2000 ET LE 29 JANVIER 2002, SUR L'IMAGE DE L'OUEST. UNE TEINTE BLEU SIGNIFIE QUE LA RÉTRODIFFUSION DE JANVIER 2002 EST D'AU MOINS UN (1) DB PLUS ÉLEVÉE QUE CELLE DE NOVEMBRE 2000.	23
FIGURE 17 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DU CENTRE.	24
FIGURE 18 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION (DB) ENTRE LE 20 NOVEMBRE 2000 ET LE 26 JANVIER 2002, SUR L'IMAGE DU CENTRE. UNE TEINTE BLEU SIGNIFIE QUE LA RÉTRODIFFUSION DE JANVIER 2002 EST D'AU MOINS UN (1) DB PLUS ÉLEVÉE QUE CELLE DE NOVEMBRE 2000.	25
FIGURE 19 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'EST.	26
FIGURE 20 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION (DB) ENTRE LE 17 NOVEMBRE 2000 ET LE 30 JANVIER 2002, SUR L'IMAGE DU CENTRE. UNE TEINTE BLEU SIGNIFIE QUE LA RÉTRODIFFUSION DE JANVIER 2002 EST D'AU MOINS UN (1) DB PLUS ÉLEVÉE QUE CELLE DE NOVEMBRE 2000.	26
FIGURE 21 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION MOYENNE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR L'ORBITE DE L'EST, AVANT ET APRÈS CORRECTION RADIOMÉTRIQUE, SUR LES IMAGES DU 12 NOVEMBRE 2001 ET DU 30 JANVIER 2002.	27
FIGURE 22 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION ENTRE L'IMAGE NON-CORRIGÉE ET L'IMAGE CORRIGÉE DU 12 NOVEMBRE 2001, SUR L'ORBITE DE L'EST.	28
FIGURE 23 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION ENTRE L'IMAGE NON-CORRIGÉE ET L'IMAGE CORRIGÉE DU 30 JANVIER 2002, SUR L'ORBITE DE L'EST.	28

FIGURE 24 : DIFFÉRENCE ENTRE L'UTILISATION DES DEUX IMAGES ORIGINALES D'ORBITES DÉCALÉES OU L'UTILISATION DES DEUX IMAGES D'ORBITES DÉCALÉES POUR LESQUELLES A ÉTÉ APPLIQUÉ L'ALGORITHME DE CORRECTION TENANT COMPTE DES ANGLES D'INCIDENCE LOCAUX	29
FIGURE 25 : DIFFÉRENCE DE RÉTRODIFFUSION SUR TOUT LE BASSIN ENTRE JANVIER ET MARS 2002.....	31
FIGURE 26 : MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS DE JANVIER 2002.....	34
FIGURE 27 : MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS DE MARS 2002	35
FIGURE 28 : VALIDATION DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À L'ÉCHELLE DU BASSIN, POUR JANVIER ET MARS 2002 AINSI QUE POUR L'HIVER 2001.....	36
FIGURE 29 : MODÈLE NUMÉRIQUE PAR CLASSES D'ALTITUDES ET CARTE DES ÉQUIVALENTS EN EAU DE LA MI-MARS 2002. LE TRAIT BLEU REPRÉSENTE LA LIMITE D'ALTITUDE DE 500M.....	39
FIGURE 30 : MOYENNE DES ÉQUIVALENTS EN EAU PAR CLASSES D'ALTITUDES	40
FIGURE 31 : VARIATION DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS ET MESURÉS, AUX SITES D'ÉCHANTILLONNAGE, EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	40
FIGURE 32 : VALIDATION DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À L'ÉCHELLE LOCALE, POUR JANVIER ET MARS 2002	41
FIGURE 33 : SEGMENTATION DE LA RÉTRODIFFUSION PAR CLASSES POUR LA MOSAÏQUES DES IMAGES DE JANVIER 2002 ET COMPARAISON AVEC LA CARTE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS.....	42

SOMMAIRE

Rappelons d'abord que les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux) s'étant montrées radiométriquement fiables en 2001, suite à une comparaison avec des images en mode Wide (un faisceau), le même type d'images a été commandé pour 2002. Le principal problème rencontré à l'hiver 2001 a été la fiabilité des données au sol (lignes de neige) relevés par le personnel d'HQ, particulièrement des mesures de densité de la neige des secteurs à l'ouest de LG4. En 2002, pour pallier à ce problème, les campagnes de terrain conjointes INRS-HQ ont été menées vers l'ouest jusqu'à la centrale de LG3. Nous avons alors constaté qu'il y avait peu de différence entre la densité moyenne du couvert nival des secteurs de LG3 et de LG4/Caniaspicau. Ainsi, nous avons établi qu'une densité moyenne de 240 kg/m³ était représentative de l'ensemble du territoire de la rivière La Grande à la fin janvier et qu'une densité moyenne de 250 kg/m³ était représentative de l'ensemble du territoire à la mi-mars 2002.

En se basant sur l'hypothèse que les densités des secteurs à l'ouest de LG3 étaient aussi peu différentes de celles de LG4 à l'hiver 2001, nous avons aussi repris la cartographie du mois de janvier 2001 (annexe 2). Au lieu d'appliquer des valeurs moyennes entre 140 à 150 kg/m³ pour les sous bassins à l'ouest de LG3, nous avons alors appliqué les mêmes densités que LG4 soient 180 à 195 kg/m³. Nous pouvons ainsi voir disparaître la coupure nette visible sur les cartes d'équivalents en eau de l'hiver dernier laquelle mettait en doute la fiabilité des images RADARSAT et de la méthode EQeau mais soulignait effectivement des problèmes dans l'acquisition et la justesse des mesures au sol.

Ainsi, les mesures de terrain prises à l'hiver 2002 nous amènent à constater qu'en 2001, les résultats du projet de recherche EQeau (cartes d'équivalents en eau et statistiques par bassin) auraient pu être mieux exploitées dans le cadre opérationnel, si les valeurs des densités de LG4 avaient été employées pour les bassins à l'ouest de LG3 au lieu d'utiliser les valeurs tirées des lignes de neige d'HQ. Cela souligne encore une fois l'importance de pouvoir obtenir des estimés fiables de la densité de la neige tant pour l'application d'EQeau que pour les autres méthodes de prévisions de la production hydroélectrique utilisées par HQ et souligne le bien fondé de divers

projets de recherche en cours dans le programme Esprit tels que le projet canado-européen SNOWPOWER, les survols gamma aéroportés et celui de la station expérimentale de Radisson. Il demeure néanmoins que dans sa forme actuelle, le logiciel EQeau ne comporte pas de mécanisme pour appliquer une variation graduelle de la densité de neige au sol. Comme l'algorithme est très dépendant de ce paramètre d'entrée, s'il existait effectivement une forte disparité entre l'est et l'ouest, les cartes produites présenteraient encore de fortes coupures entre les sous-bassins.

En 2002, deux séries d'images hivernales ont été acquises entre la mi-janvier et la mi-mars afin de cartographier l'équivalent en eau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Les images déjà acquises les 17, 20 et 23 novembre 2000 devaient, à priori, être utilisées comme images de référence dans le logiciel EQeau (Version MapX). Toutefois, une seconde série automnale a été acquise en 2001 pour valider la fiabilité des images de référence. Quant aux conditions du couvert nival, on constate que les résistances thermiques de l'hiver 2002 sont légèrement sous la moyenne de la décennie (90%). Pour les équivalents en eau, elles sont à 103% de la moyenne en janvier 2002 et à 95% à la mi-mars 2002. Quant à la quantité de neige au sol, l'hiver 2002 est un hiver de conditions normales dans ce secteur.

Afin de choisir la bonne série d'images de référence, les conditions environnementales et les images de l'automne 2000 et de l'automne 2001 ont été comparées. Très visible en 2000, la baisse prononcée du signal observée à la limite des deux faisceaux qui composent le mode ScanSAR Narrow (vers 31°), n'est plus présente en 2001. Cela signifie que le fournisseur des images (RSI) a modifié le pré-traitement des données au cours de la dernière année, afin de diminuer la variation entre les deux faisceaux et de s'ajuster aux fluctuations inhérentes au vieillissement des instruments du satellite. Ces modifications sont apportées au moyen de ce que RSI appelle le « *payload file* ». Les trois images de l'automne 2000 ont donc été retraitées gracieusement par RSI, à partir du nouveau « *payload file* », afin que l'on puisse les comparer aux images de 2001-2002. Sur les images de 2000 retraitées et les images de 2001-2002, le signal est maintenant moins sensible à l'angle d'incidence et plus homogène d'un faisceau à l'autre (meilleure qualité). On constate également que sauf pour l'orbite du centre (neige humide et pluie), la moyenne de rétrodiffusion des images de novembre 2000 est assez similaire à celle du novembre 2001 et que les deux séries d'images pourraient éventuellement servir d'image de

référence. L'objectif initial étant d'utiliser, de préférence, les mêmes images de référence que lors de la saison 2001, cette option a été retenue et elle s'est montrée valide et viable. Néanmoins, à l'avenir, il serait possible d'éviter l'acquisition d'images par temps pluvieux, (image du 15 novembre pour l'orbite Centre), ou trop doux (neige humide) en adoptant l'option METEO lors de la commande des images RADARSAT.

D'autre part, nous avons aussi comparé le signal avant et après la correction de l'angle d'incidence local pour les deux images RADARSAT d'orbites légèrement décalées par rapport aux années antérieures (12 novembre 2001 et 30 janvier 2002). Nous avons constaté qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux combinaisons, sauf dans l'extrême sud de l'image. Cela implique que nous avons pu appliquer EQeau avec l'image originale du 30 janvier 2002 et l'image de référence du 17 novembre 2000, même si elles sont sur deux orbites légèrement décalées. Toutefois, dans le futur, pour des cas de décalage d'orbite plus significatif entre deux images, le logiciel de correction pour les angles d'incidence locaux développés par VIASAT avec l'appui de l'Agence spatiale canadienne pourrait être appliqué car il s'avère performant pour des pentes inférieures à 30 degrés (Bernier et al, 2002)

Concernant les images hivernales, les rétrodiffusions moyennes pour l'hiver 2002 sont de 1 à 2 dB plus élevées que celles de l'hiver 2001, ce qui est inusité vu les conditions de la neige au sol. Si on regarde la répartition spatiale de cette augmentation, on remarque que c'est dans le centre des trois images qu'elle est la plus forte. D'ailleurs, les cartes d'équivalents en eau montrent bien qu'il y a un phénomène affectant les résultats dans tout l'axe des réservoirs pour l'ensemble du bassin La Grande et ce tant en janvier qu'en mars 2002. La cause de cette répartition est environnementale, soit un réchauffement des températures de l'air jumelé à des précipitations liquides ayant causé la fonte de la neige et le dégel du sol sur les secteurs de basse altitude, après la mi-novembre 2001. En effet, les fortes valeurs de rétrodiffusion ne sont pas présentes sur les images d'automne 2001 et elles sont concentrées dans les zones inférieures à la limite des 500m d'altitude. Ainsi, là où le sol est dégelé et humide, les rétrodiffusions sont fortes et par conséquent, les équivalents en eau surestimés. On observe d'ailleurs une diminution des équivalents en eau estimés avec l'augmentation de l'altitude qui seraient dû à une diminution progressive de la teneur en eau des sols avec l'altitude. Cela démontre la sensibilité du signal des images RADARSAT à l'état du sol (humide ou gelé) tel que soutenu par l'approche EQeau.

En 2002, les cartes obtenues montrent les variations spatiales de l'humidité du sol (sols dégelés) et non celles de l'équivalent en eau de la neige et à des fins de prévisions, doivent être utilisées dans ce sens. En conclusion, l'information spatiale extraite des images RADARSAT, pour servir à améliorer les prévisions, doivent encore être utilisée en association avec d'autres sources d'information (relevés traditionnels, sondes ponctuelles et/ou modèles).

1. Introduction et objectifs

Ce rapport d'étape fait état des activités de R&D réalisées à l'INRS - Eau, Terre et Environnement, dans le cadre du projet EQeau depuis de début de l'année 2002. Ces activités se résument comme la poursuite d'une phase de validation de l'approche EQeau dans un contexte opérationnel, afin de mieux comprendre les limites d'application, et de modifier, si besoin, les paramètres de l'algorithme pour le rendre à la fois plus sensible et plus robuste.

En 2001, les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux) s'étant montrées radiométriquement fiables, le même type d'images a été commandé pour l'hiver 2002. Deux séries d'images hivernales ont été acquises entre la mi-janvier et la mi-mars 2002 afin de cartographier l'équivalent en eau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Les relevés de neige HQ-INRS et les relevés standards d'Hydro-Québec ont été planifiés pour les mêmes périodes hivernales. Les images déjà acquises les 17, 20 et 23 novembre 2000 doivent, à priori, être utilisées comme images de référence dans le logiciel EQeau (Version MapX). Toutefois, une nouvelle série d'images ScanSAR Narrow a été acquise à l'automne 2001 afin de s'assurer de la stabilité temporelle du système RADARSAT et de valider l'emploi des images de l'automne 2000. Aucune acquisition d'images en mode Wide n'a été prévue en 2002.

Le traitement des images acquises a été effectué par VIASAT Geo-Technologies selon la procédure opérationnelle établie en 1999, qui comprend la correction radiométrique et géométrique des images, la création des matrices d'entrée pour EQeau et la livraison des données à Hydro-Québec et à l'INRS-Eau. Hydro-Québec devait normalement prendre charge de la production des cartes d'équivalents en eau avec EQeau, en collaboration étroite avec l'INRS-Eau. À l'hiver 2002, un problème logistique interne a toutefois empêché le Service des Prévisions et Ressource Hydrique de réaliser cette tâche, laquelle a été effectuée à l'INRS-Eau. De plus, le personnel de l'INRS-Eau s'assure aussi de la qualité radiométrique des images et seconde Hydro-Québec dans la validation des résultats et dans l'évaluation continue du logiciel.

Les objectifs de l'année 2002 sont les suivants:

1. Analyser deux séries d'images d'automne (novembre 2000 et 2001) et sélectionner la meilleure série d'images de référence pour l'hiver 2002;
2. Vérifier la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow de l'hiver 2002;
3. Appuyer le personnel d'Hydro-Québec dans la production des cartes d'équivalents en eau de la neige au sol sur l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande à partir de trois séries d'images ScanSAR Narrow;
4. Tester une méthode de correction radiométrique des images tenant compte de l'angle d'incidence, des pentes locales et de l'orientation de ces pentes, dans le but d'évaluer l'impact de la topographie et du changement d'orbite sur le calcul des équivalents en eau;
5. Améliorer l'apparence de la représentation cartographique et la fiabilité de l'algorithme;
6. Tenter d'établir l'incertitude des résultats (cartes et moyennes);
7. Poursuivre l'amélioration continue du logiciel EQeau (version MapX): convivialité, fonctionnalités (production de diverses statistiques), correction des erreurs.

En date du 31 mai 2002, les quatre premiers objectifs ont été atteints et font l'objet de l'essentiel du présent rapport. Les objectifs 5 et 7 ont été partiellement réalisés:

Chapitre 2 - Les données 2001-2002

Chapitre 3 - La préparation et l'analyse des données d'entrée d'EQeau (objectifs 1, 2, et 4)

Chapitre 4 - L'application d'EQeau (objectifs 3 et 7)

Chapitre 5 - Conclusion

Vous trouverez aussi deux documents annexés:

Annexe 1 : La communication présentée à <International Geoscience and Remote Sensing Symposium>, 24 au 29 juin 2002, Toronto sur les corrections des effets de la topographie sur le signal radar (objectif 4)

Annexe 2 : Nouvelle cartographie de l'équivalent en eau du couvert nival pour les images de janvier 2001 (objectif 5) .

2. Les données 2001-2002

2.1 Les images 2001-2002

Les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux) s'étant montrées radiométriquement fiables en 2001, le même type d'images a été recommandé pour 2002. Deux séries d'images hivernales, en orbite ascendante, ont été programmées et acquises entre la mi-janvier et la mi-mars 2002 afin de cartographier l'équivalent en eau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Les images déjà acquises les 17, 20 et 23 novembre 2000 doivent, à priori, être utilisées comme images de référence dans le logiciel EQeau (Version MapX). Toutefois, une nouvelle série d'images ScanSAR Narrow a été acquise à l'automne 2001 afin de s'assurer de la stabilité temporelle du système RADARSAT et de valider l'emploi des images de l'automne 2000. Pour la saison 2001-2002, les images planifiées originalement sont présentées au tableau 1. Aucune acquisition d'images en mode Wide n'a été effectuée en 2002.

Tableau 1 : Images RADARSAT SCANSAR Narrow (SCN) planifiées pour la saison 2001-2002

Série	Image ouest (LG2)	Image centre (LG4)	Image est (Caniapiscau)
1	18 nov	15 nov	12 nov
2	29 jan	26 jan	23 jan
3	18 mrs	15 mrs	12 mrs

En raison d'un problème technique (météorites Léonides), l'image du 18 novembre 2001 a dû être reprogrammée pour le 11 novembre, sur une orbite légèrement décalée. En raison de problème de logistique des commandes, l'image du 23 janvier 2002 a été reprogrammée pour le 30 janvier, sur une orbite légèrement décalée. Le tableau 2 donne les images effectivement acquises cette saison. La figure 1 montre quant à elle, la couverture de ces images. Les orbites en

trait gras sont les orbites habituelles utilisées en 2000-2001 et en 2001-2002. Les orbites en trait fin sont les orbites décalées du 11 novembre 2001 (ouest) et du 30 janvier 2002 (est).

Tableau 2 : Images RADARSAT SCANSAR Narrow (SCN) planifiées pour la saison 2001-2002

Série	Image ouest (LG2)	Image centre (LG4)	Image est (Caniapiscau)
1	11 nov	15 nov	12 nov
2	29 jan	26 jan	30 jan
3	18 mrs	15 mrs	12 mrs

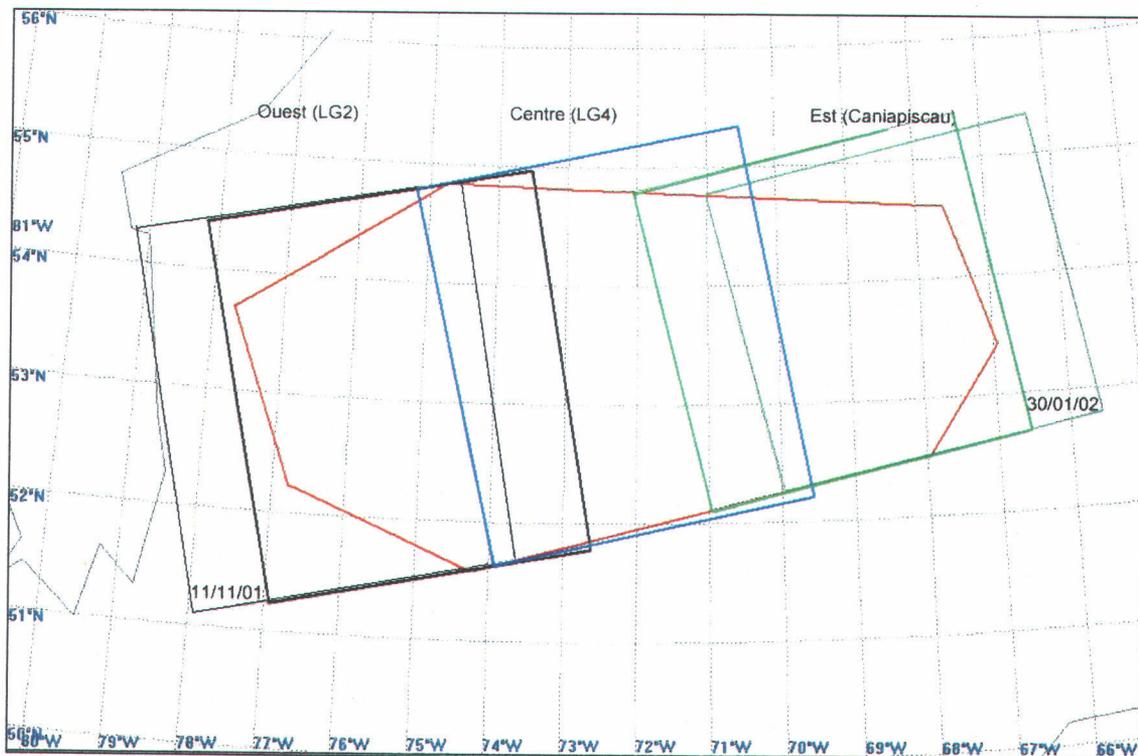


Figure 1 : Couverture des orbites utilisées en 2001-2002

Le traitement des images acquises est effectué par VIASAT Geo-Technologies selon la procédure opérationnelle établie en 1999, qui comprend la correction radiométrique et géométrique des images, la création des matrices d'entrée pour EQeau et la livraison des données à Hydro-Québec et à l'INRS-Eau. Le décalage des images du 11 novembre 2001 et du 30 janvier

2002 a de plus nécessité un traitement spécifique pour corriger les différences d'angles d'incidence locaux (dus aux pente). Il en sera question à la section 3.4.

2.2 Les données terrain et météo

Les relevés de terrain permettent l'étalonnage des algorithmes d'EQeau, fournissent les densités de neige moyenne utilisées comme paramètre d'entrée du logiciel et permettent la validation des cartes et statistiques résultantes. Les observations météorologiques fournissent un aperçu des conditions environnementales précédant les périodes d'acquisitions d'images RADARSAT et celles prévalant lors du passage du satellite.

En novembre 2001, une campagne de terrain a été tenue conjointement par l'INRS-Eau et le Service des Prévisions et Ressources Hydriques, afin de vérifier le matériel en place et de relever les conditions environnementales. Le compte-rendu complet de cette campagne a été présenté dans le rapport de décembre 2001 (rapport no. 609-e). À l'hiver 2002, deux campagnes de terrain ont eu lieu. La première s'est tenue du 21 au 25 janvier 2002 et la seconde s'est tenue du 11 au 15 mars 2002. Ces deux campagnes ont permis de mesurer la hauteur, la densité et l'équivalent en eau du couvert de neige sur vingt à trente sites, en plus de faire le profil détaillé du couvert de neige sur trois sites. Parallèlement, des observateurs ont noté les conditions environnementales prévalant au moment des acquisitions d'images. Finalement, les équipes régulières d'Hydro-Québec ont effectué des relevés de neige dans les mêmes périodes, soit du 18 au 27 janvier et du 16 au 23 mars 2002. La figure 2 indique la localisation des sites de relevés selon leur type.

Les relevés INRS-HQ ont établi la moyenne d'équivalent en eau sur le territoire couvert à 194 mm (densité moyenne de 242 kg/m³) du 21 au 25 janvier 2002 et à 250 mm (densité moyenne de 254 kg/m³) du 11 au 15 mars. La figure 3 présente le détail des mesures pour chaque site visité.

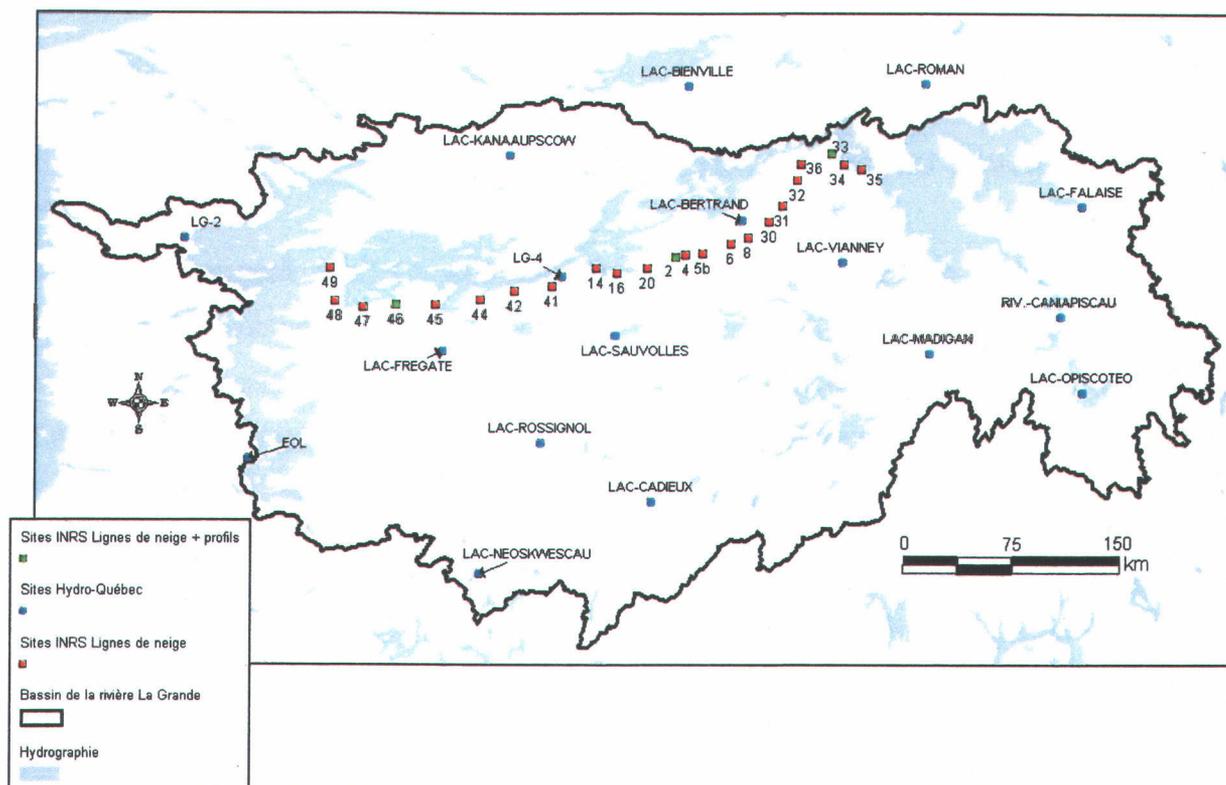


Figure 2 : Localisation des sites de relevés de l'hiver 2002

Pour leur part, les relevés Hydro-Québec (11 sites répartis sur l'ensemble du bassin), établissent une moyenne d'équivalent en eau sur le territoire couvert à 150 mm (densité moyenne de 209 kg/m³) du 18 au 27 janvier 2002 et à 200 mm (densité moyenne de 211 kg/m³) du 16 au 23 mars 2002. La figure 4 présente le détail des mesures pour chaque site visité et fait ressortir les disparités entre l'est et l'ouest. Il est à noter que Hydro-Québec entretient certains doutes quant à la fiabilité des mesures dans l'ouest du bassin de la Grande rivière.

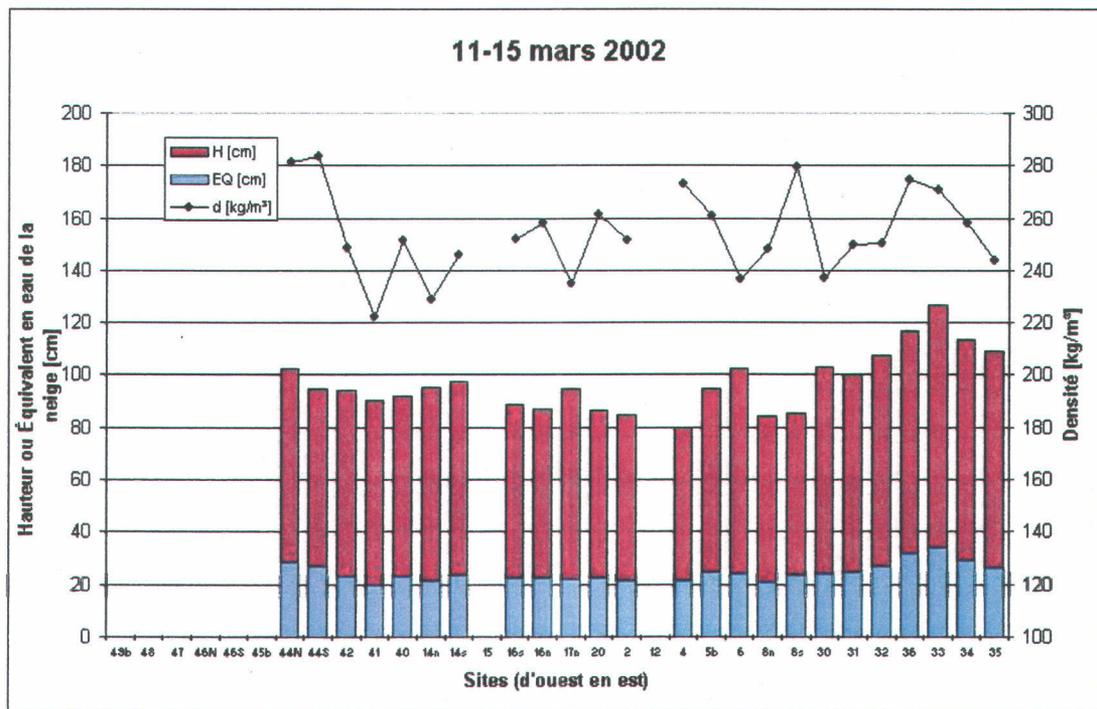
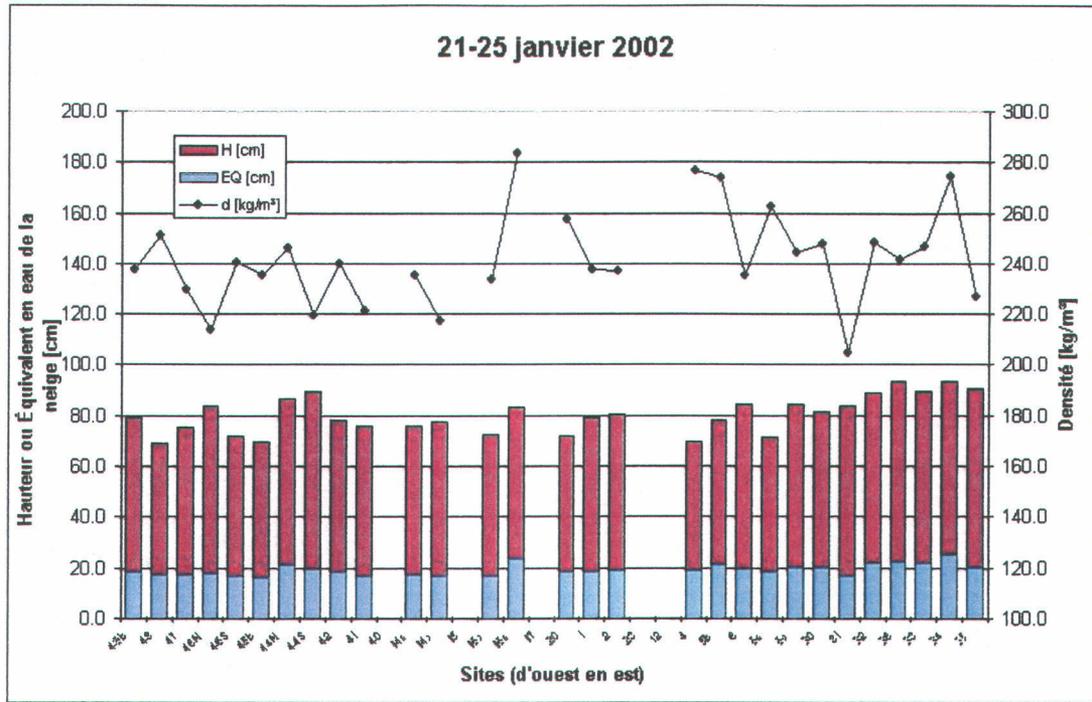


Figure 3 : Relevés INRS-HQ pour l'hiver 2002

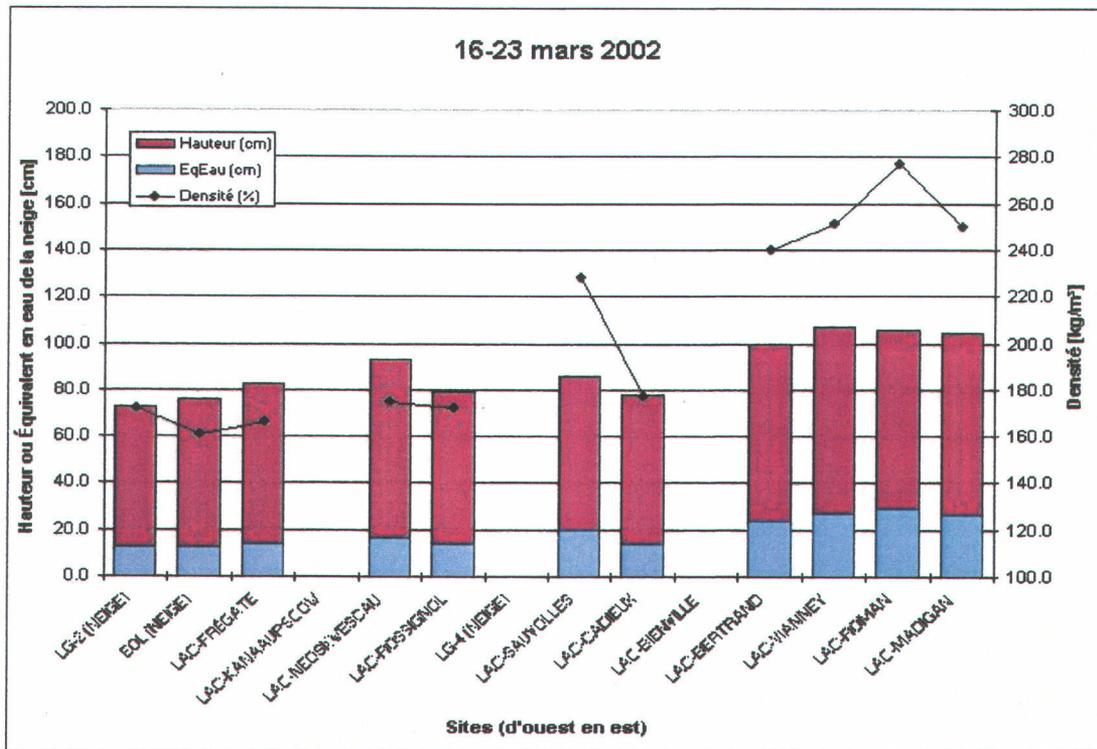
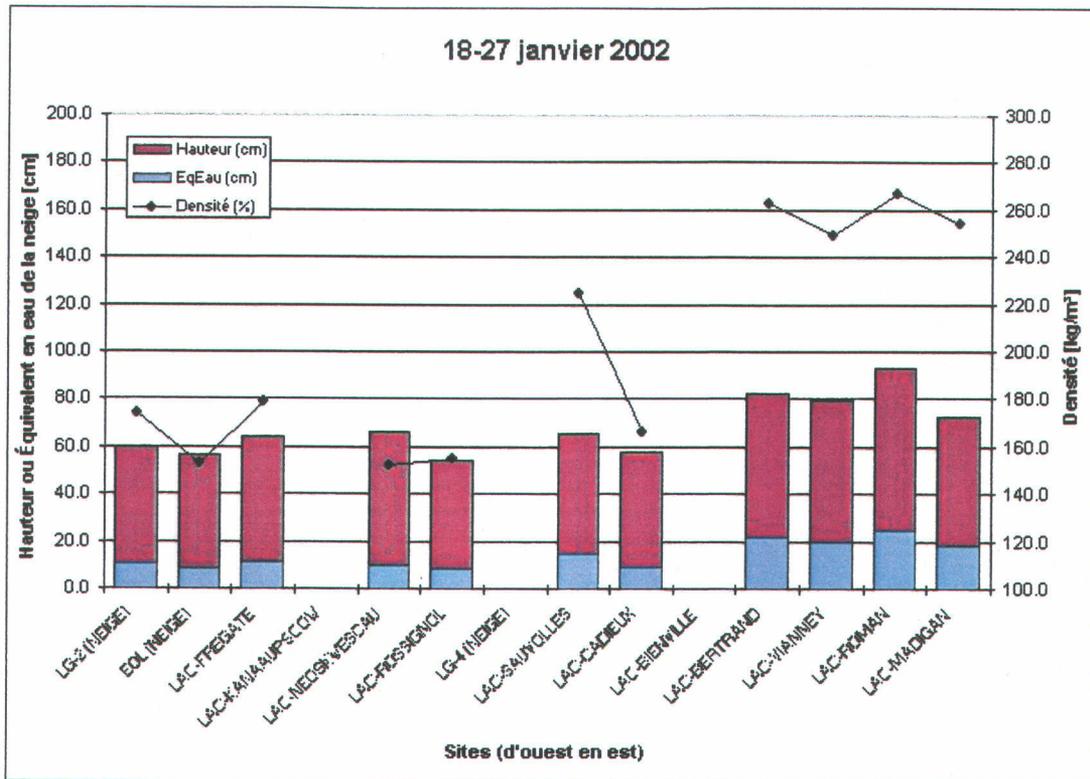


Figure 4 : Relevés Hydro-Québec pour l'hiver 2002

Les relevés des observateurs indiquent que lors des acquisitions de janvier, la température de l'air variait entre -25°C et -36°C . Lors des acquisitions de mars, elle variait entre -1°C et -20°C , selon la journée. Aucune présence de neige humide n'a été observée. Aucune précipitation, solide ou liquide n'a non plus été rapportée lors des différents passages du satellite. Enfin, on déclare le sol gelé dans les secteurs dégagés où sont effectuées les observations (landes). Des données de température du sol d'une station du Centre d'études nordiques (CEN) installée dans le secteur de Laforge indiquent que le sol n'a atteint le point de congélation que le 24 janvier 2002. Nous n'avons toutefois pas de détails sur la localisation précise de la station, ni sur l'environnement immédiat. Aucune donnée des trois stations météorologiques « Rneige » n'ont pu être recueillies ou récupérées à l'hiver 2002, ce qui laisse une grande incertitude sur les conditions environnementales prévalant lors des acquisitions ou entre les acquisitions d'images.

Les profils réalisées sur trois sites, lors des relevés INRS-HQ de janvier et de mars sont présentés à la figure 5. Les profils ne présentent pas d'anomalies, c'est-à-dire qu'on y retrouve généralement une neige fraîche sur une neige transformée, avec parfois une couche de glace. La neige au bas du profil a subi plus de transformation et présente de plus fortes densités. La température au niveau du sol varie de 0 à -3.5°C . La résistance thermique calculée varie entre 4 et $6^{\circ}\text{Cm}^2/\text{J}$. L'équivalent en eau est de 180 à 220 mm en janvier et de 210 à 370 mm en mars.

Afin de mettre en perspective les données de l'hiver 2002, nous présentons à la figure 6, la résistance thermique et l'équivalent en eau mesurés au site #2 (forêt ouverte) depuis 1994 (9 hivers). On constate alors qu'à ce site, les résistances thermiques de l'hiver 2002 sont légèrement sous la moyenne de la décennie (90%). Pour les équivalents en eau, on est à 103% en janvier 2002 et à 95% en mars 2002, quant à la quantité de neige au sol. L'hiver 2002 est donc un hiver de conditions normales dans ce secteur. Le site #2 est le seul site pour lequel nous avons une si longue série de profils. Sur cette série temporelle, on remarque que pour chaque année, l'équivalent en eau augmente toujours entre les mois de janvier et mars alors que la résistance thermique, elle, diminue. Il y a donc accumulation de nouvelle neige, jumelée à une densification du profil, qui en réduit la résistance thermique. La variable densité se révèle, une fois de plus, une donnée essentielle dans le processus d'estimation de l'équivalent en eau.

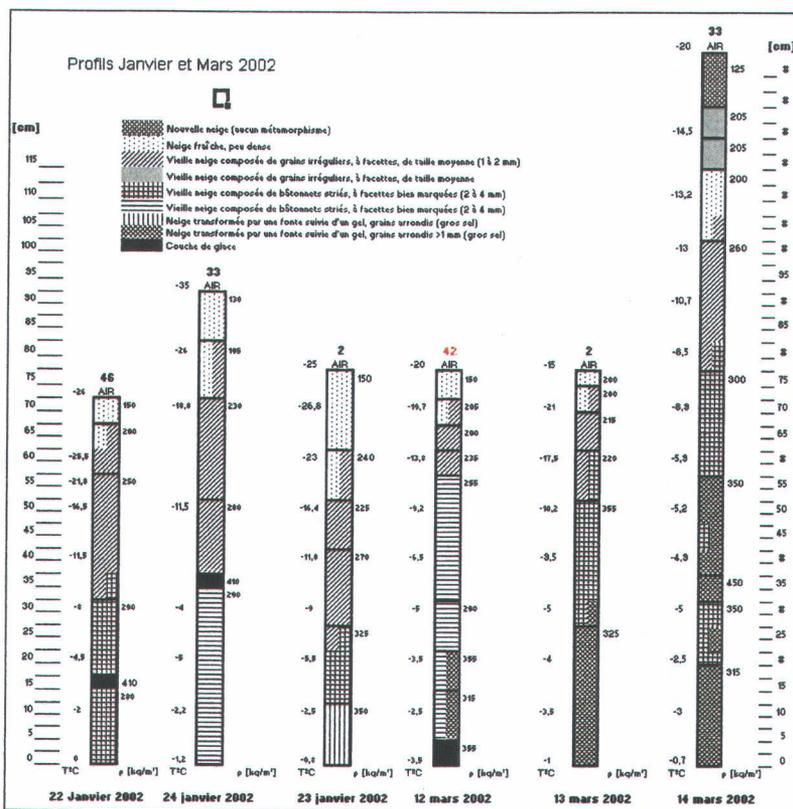


Figure 5 : Comparaison des profils de l'hiver 2002

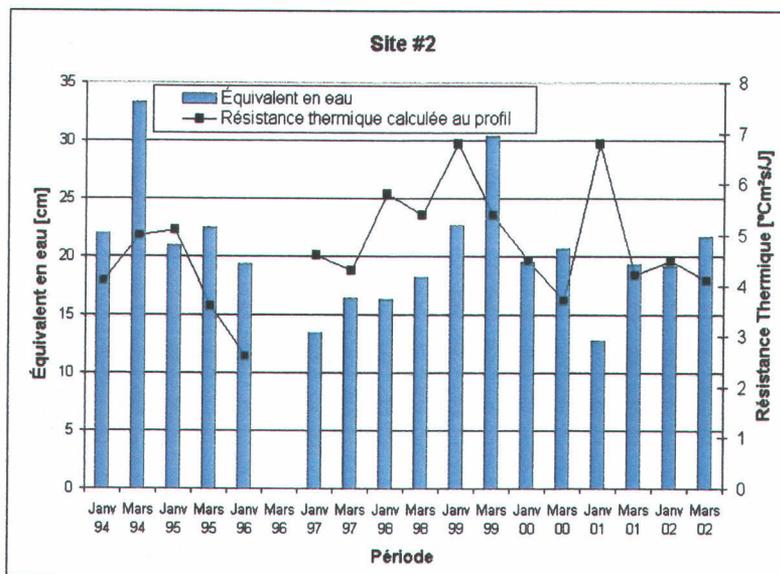


Figure 6 : Comparaison de la résistance thermique et de l'équivalent en eau du couvert de neige au site #2 depuis 1994

3. La préparation et l'analyse des données d'entrée d'EQueau

3.1 Les densités moyennes

À partir de l'ensemble des relevés de terrain, nous avons établi qu'une densité moyenne de 240 kg/m³ était représentative de l'ensemble du territoire à la fin janvier et qu'une densité moyenne de 250 kg/m³ était représentative de l'ensemble du territoire à la mi-mars. Il demeure toutefois que des variabilités locales existent (figure 3).

3.2 L'algorithme

Suite aux ajustements présentés dans le rapport de décembre 2001, et selon les observations terrain de l'automne 2001, l'algorithme sélectionné correspond à des conditions de sol gelé à l'automne et se présente sous la forme : $y = 1.1 x + 4.8$

3.3 Les images de référence

Il s'agit de choisir entre les images SCN de l'automne 2000, utilisées lors de la dernière saison et les images SCN de l'automne 2001, acquises cette année. Les hypothèses suivantes sont alors posées :

Si les conditions météorologiques des deux automnes sont relativement similaires et surtout, que les conditions d'humidité des sols au moment du gel sont comparables, le signal provenant du sol gelé sous un faible couvert de neige devrait être le même en 2000 qu'en 2001. Dans ce cas, la première question est de savoir si les deux séries d'images ont effectivement été prises dans ces conditions, soit lorsque le sol était gelé et sous un faible couvert de neige. Si oui (fig.7, cas 1), la

rétrodiffusion devrait être la même sur les deux séries d'images et l'une ou l'autre peut indépendamment servir de référence. Sinon (fig.7, cas 2), le signal sera différent d'une série d'images à l'autre et l'on devrait favoriser celle acquise lorsque le sol est gelé et sous un faible couvert de neige.

Si les conditions météorologiques des deux automnes ne se comparent pas et surtout, si les conditions d'humidité des sols au moment du gel sont différentes, le signal provenant du sol gelé sous un faible couvert de neige peut différer de 2000 à 2001. Dans ce cas (fig.7, cas 3 et 4), on devrait favoriser la série d'images de l'automne 2001 avec l'hiver 2002, supposant que la série d'images soit acquise lorsque le sol est gelé et sous un faible couvert de neige.

Les hypothèses précédentes sont valables pour une série d'images complète ou pour une image en particulier car il arrive qu'une image soit acquise dans des conditions qui diffèrent des deux autres. À ces considérations, s'ajoute le facteur de stabilité radiométrique des images, qui pourrait aussi influencer le choix des images de référence.

La première étape est donc la comparaison des conditions environnementales de l'automne 2000 et de l'automne 2001. On se rappellera qu'à l'automne 2000, aucune campagne de terrain n'avait eu lieu et les stations météorologiques « Rneige » ne fonctionnaient pas. Ces stations n'étaient toujours pas fonctionnelles pour l'automne 2001. Il nous est donc impossible de dresser un portrait comparatif de l'évolution des conditions environnementales du bassin de la Grande rivière pour les automnes 2000 et 2001. Les seules données disponibles en 2000 sont celles des observateurs, présentées dans le rapport de juin 2001 et résumées ici dans le tableau 3, où on les compare aux observations de novembre 2001.

Mis à part le 15 novembre 2001, les températures sont à chaque fois quelques degrés sous le point de congélation et la neige est sèche. Des hauteurs de neige un peu plus importantes sont observées en 2001 mais surtout dans le secteur est. On peut donc dire qu'à l'exception du 15 novembre 2001 dans le secteur de LG4, les observateurs ont relevé des conditions comparables lors des deux années. Toutefois, en 2001, nous disposons aussi de mesures effectuées lors de la campagne de terrain sur le secteur centre du 12 au 15 novembre (rapport de décembre 2001). Celles-ci corroborent les températures de l'air et l'état du couvert de neige des observateurs mais indiquent que le sol est uniquement gelé dans les zones dégagées. Il est donc fort possible qu'en

novembre 2001, le gel du sol ne soit que localisé. Par contre, la situation était peut-être la même en 2000. Dans un cas comme dans l'autre, il est difficile d'affirmer que les deux séries d'images aient été prises dans des conditions de sol gelé et sous un faible couvert de neige. Il est également impossible de savoir si les conditions d'humidité des sols étaient comparables au moment du gel.

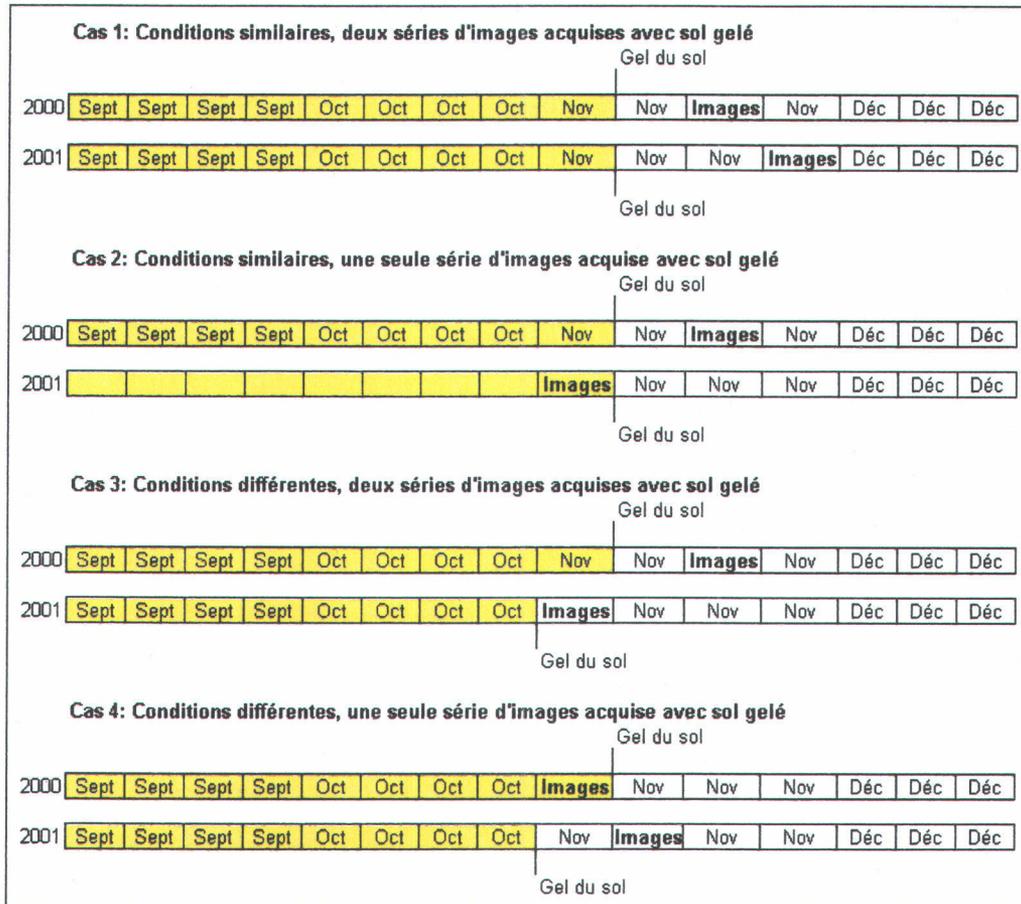


Figure 7 : Hypothèses considérées pour le choix des images de référence

Tableau 3 : Comparaison des données des observateurs de novembre 2000 et 2001

Orbite	Date d'acquisition	Température de l'air	Neige au sol	Gel du sol	Précipitations
Ouest	23 nov. 2000	-1°C à -4°C	<10cm / sèche	oui	Aucune
Ouest	11 nov. 2001	-5°C à -9°C	2 à 20cm / sèche	oui	Neige
Centre	20 nov. 2000	-8°C à -16°C	<10cm / sèche	oui	Faible neige
Centre	15 nov. 2001	-2°C à 6°C	0 à 28 cm / humide	oui	Pluie ou neige
Est	17 nov. 2000	-2°C à -5°C	<10cm / sèche	oui	Faible neige
Est	12 nov. 2001	-4°C à -9°C	2 à 20cm / sèche	oui	Neige par endroits

Il ne reste donc que la possibilité d'analyser directement les images en comparant plutôt leur rétrodiffusion moyenne. La figure 8 présente d'abord la variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'ouest en novembre 2000 et 2001. Nous y avons ajouté les valeurs d'octobre 2000, période où le sol est habituellement dégelé.

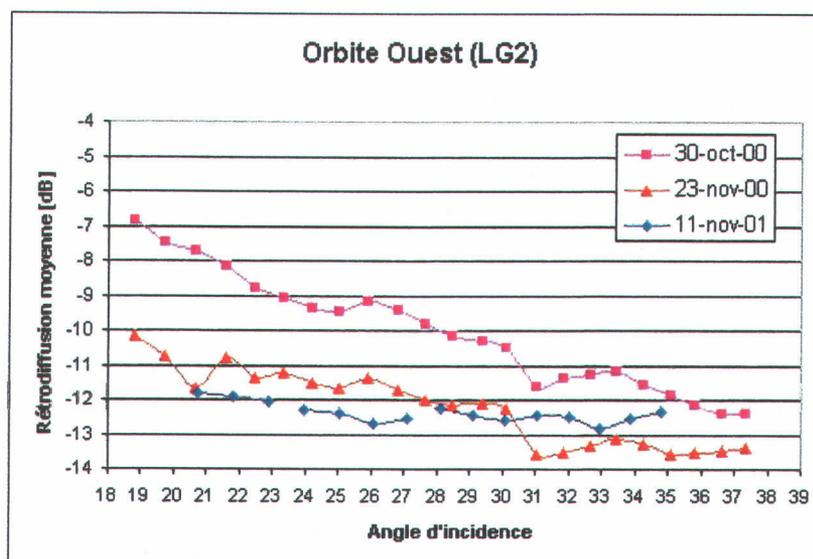


Figure 8 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'ouest

Très visible en 2000, la baisse prononcée du signal observée à la limite des deux faisceaux qui composent le mode ScanSAR Narrow (vers 31°), n'est plus présente en 2001. Ce phénomène a

été observé dès les premiers traitements effectués par l'INRS-Eau à l'hiver 2002, tant sur les images d'automne que sur les images d'hiver. L'hypothèse que nous posions alors était que le fournisseur des images (RSI) avait modifié le pré-traitement des données au cours de la dernière année, afin de diminuer la variation entre les deux faisceaux et de s'ajuster aux fluctuations inhérentes au vieillissement des instruments du satellite. Après discussion avec le personnel de RSI responsable du pré-traitement des images RADARSAT, l'hypothèse est confirmée. Ces modifications sont apportées au moyen de ce que RSI appelle le « payload file ». Bien que l'application du plus récent « payload file » rende les images ScanSAR Narrow de la saison 2001-2002 de meilleure qualité que celles de la saison 2000-2001, il empêche toutefois la comparaison quantitative entre les deux années. Les images de l'automne 2000 ont donc été retraitées gracieusement par RSI, à partir du nouveau « payload file », afin que l'on puisse au moins les comparer aux images de 2001-2002. Toutes les analyses ayant permis de justifier le retraitement des images à ce moment font partie intégrante du présent chapitre.

On voit donc sur la figure 9, que le signal retraité (en jaune) est maintenant moins sensible à l'angle d'incidence et plus homogène d'un faisceau à l'autre. On constate également que dans le cas de l'orbite Ouest, la moyenne de rétrodiffusion du 23 novembre 2000 est assez similaire à celle du 11 novembre 2001 et que les deux images pourraient éventuellement servir d'image de référence.

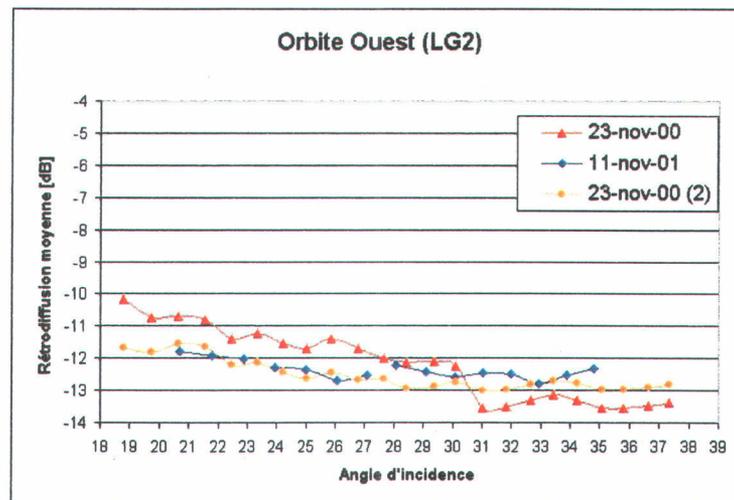


Figure 9 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'ouest, après retraitement de l'image du 23 novembre 2000.

Toutefois, en soustrayant les deux images, préalablement ré-échantillonnées à 500m, on se rend compte que des différences existent au niveau spatial (figure 10). Dans la partie nord, le 11 novembre 2001 présente des valeurs de rétrodiffusion en général plus élevées que le 23 novembre 2000 (teintes rouge > 1 dB). Le sol y est donc plus chaud ou plus humide en 2001. Dans la partie sud, la tendance est inverse (teintes bleu > -1 dB). Il y aura donc des différences au niveau spatial, selon que l'on utilise une image de référence ou l'autre. Cela démontre qu'il est difficile d'obtenir sur un si grand territoire, une image où les conditions automnales sont homogènes, avec un sol gelé et un couvert de neige minimum.

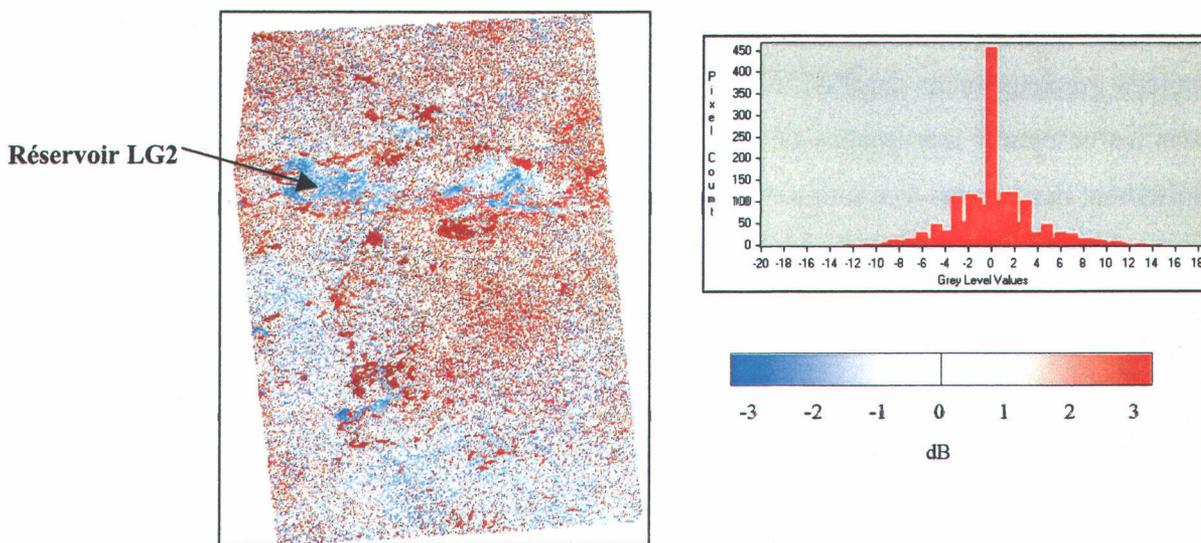


Figure 10 : Différence de rétrodiffusion (dB) entre le 11 novembre 2001 et le 23 novembre 2000, sur l'image de l'ouest. Une teinte rouge signifie que la rétrodiffusion de 2001 est d'au moins 1 dB plus élevée que celle de 2000.

Dans le cas de l'orbite centrale (LG4), l'image de novembre 2000 a également été retraitée. Sa comparaison avec novembre 2001 confirme toutefois que les conditions environnementales du 15 novembre 2001 étaient particulières et inadéquates dans l'ensemble (figure 11). Les valeurs de rétrodiffusion y sont plus élevées et correspondent plutôt à un sol dégelé et humide. En regardant l'image originale (figure 12), on constate que la portion nord est sous l'effet d'un couvert de neige humide au sol, tel qu'observé à LG4, alors que la portion sud est probablement sous l'effet de la pluie. Il est donc clair que l'image du 15 novembre 2001 ne peut être utilisée

comme image de référence. Pour l'orbite du centre, l'image retraitée du 20 novembre 2000 doit donc être utilisée.

Concernant l'orbite de l'est (Caniapiscau), la figure 13 montre qu'après retraitement de l'image du 17 novembre 2000, la rétrodiffusion moyenne du 12 novembre 2001 est généralement inférieure de 1 dB, par rapport à l'année précédente. Étant donné le peu de données climatiques et environnementales que nous avons, il est difficile de savoir si cette différence est due à un sol plus froid ou plus sec en 2001 ou à une instabilité du signal.

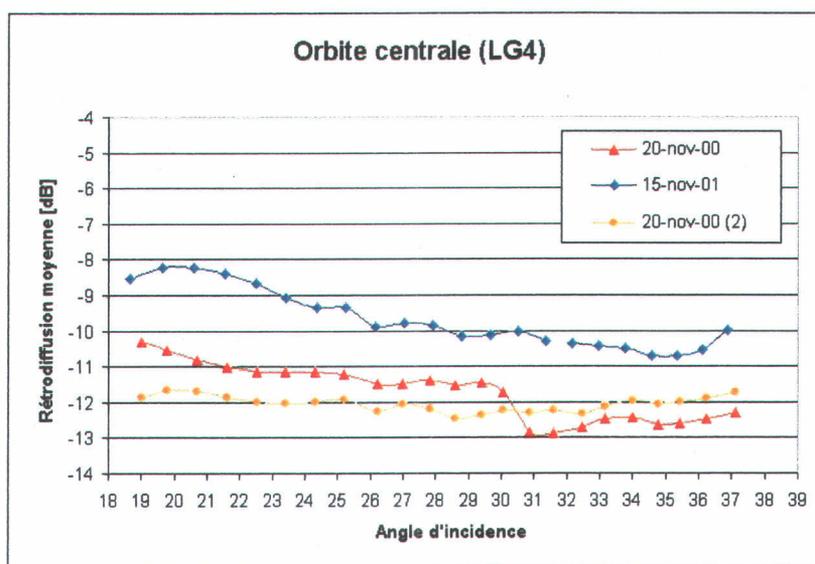


Figure 11 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite du centre, après retraitement de l'image du 20 novembre 2000.

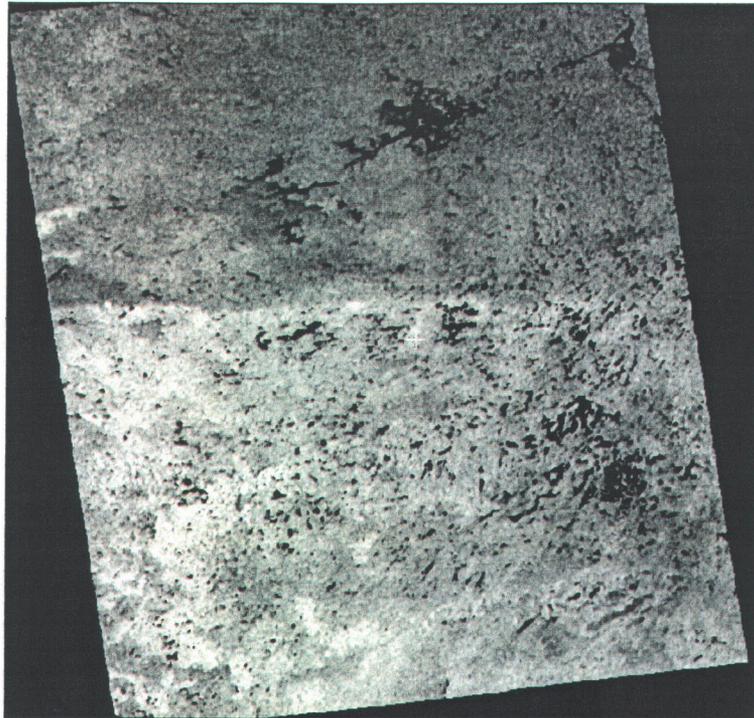


Figure 12 : Image du 15 novembre 2001, secteur LG4.

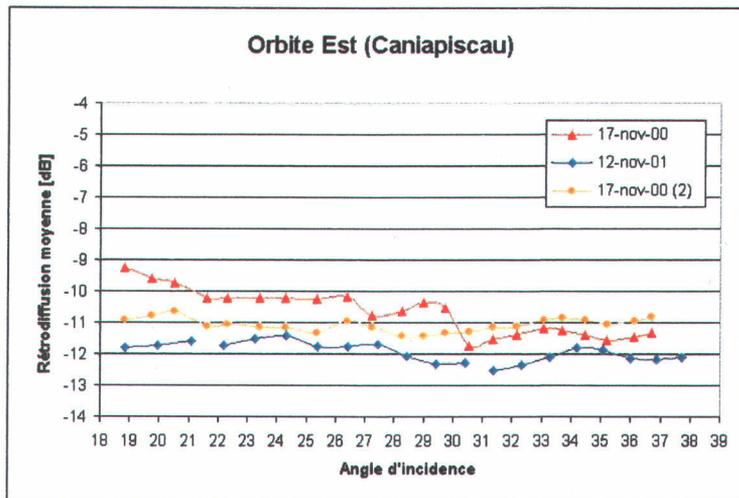


Figure 13 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'est, après retraitement de l'image du 17 novembre 2000.

Comme pour l'orbite de l'ouest, nous avons examiné la différence de rétrodiffusion entre les deux images ré-échantillonnées à 500m (figure 14). Bien qu'une bonne partie des pixels ne présente pas de changement significatif (blanc), on remarque que dans la partie ouest, le 12 novembre 2001 présente des valeurs de rétrodiffusion en général plus élevées que le 17 novembre 2000 (teintes rouge > 1 dB). Dans la partie est, la tendance est inverse (teintes bleu < -1 dB). Il y aura donc là aussi, des différences au niveau spatial, selon que l'on utilise une image de référence ou l'autre.

En résumé, bien que nous visions une série d'images de référence optimales, l'étendue du territoire, l'hétérogénéité des conditions environnementales, la stabilité du signal et les modifications apportées au traitement des images par RSI imposent certains compromis. L'objectif initial du contrat actuel étant de réutiliser les mêmes images de référence que lors de la saison 2001, cela demeure l'option priorisée. Suite aux hypothèses de départ, aux observations de terrain disponibles et à l'analyse des images, nous concluons qu'il s'agit d'une option valide et viable, bien que non optimale.

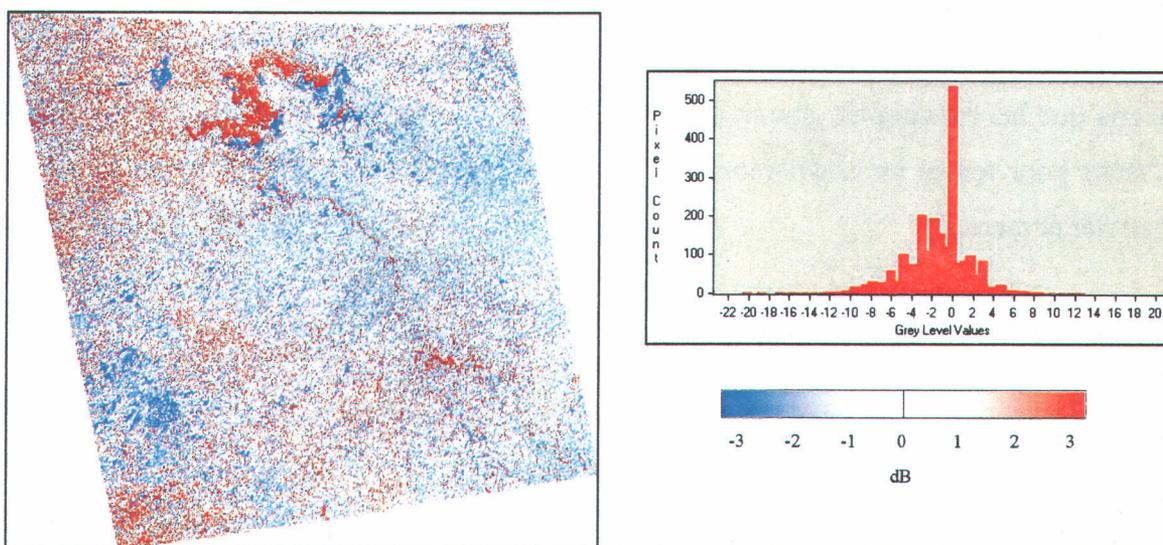


Figure 14 : Différence de rétrodiffusion (dB) entre le 12 novembre 2001 et le 17 novembre 2000, sur l'image de l'est. Une teinte rouge signifie que la rétrodiffusion de 2001 est d'au moins 1 dB plus élevée que celle de 2000.

3.4 Les images d'hiver

Le tableau 4 redonne la liste des images d'hiver acquises en 2002. Elles ont toutes été traitées avec le plus récent « payload file ». Rappelons que pour les orbites de l'ouest et du centre, les images d'hiver sont acquises sur l'orbite habituelle, tout comme les images de référence sélectionnée de novembre 2000. Par contre, pour l'orbite de l'est, l'image du 30 janvier 2002 a été acquise sur une orbite légèrement décalée. Dans ce cas, un algorithme de correction des rétrodiffusions en fonction de l'angle d'incidence local a été appliqué par VIASAT (Bernier *et al.*, 2002).

Tableau 4 : Images de l'hiver 2002

Orbite Ouest (LG2)	Orbite Centre (LG4)	Orbite Est (Caniapiscou)
29 janv 02 (payload 2)	26 janv 02 (payload 2)	<i>30 janv 02</i> (payload 2)
18 mars 02 (payload 2)	15 mars 02 (payload 2)	12 mars 02 (payload 2)

Rappelons que les mesures et observations disponibles (section 2.2) confirment la présence de neige sèche pour toutes les acquisitions de l'hiver et une augmentation de l'équivalent en eau entre janvier et mars.

Tout comme pour les images d'automne, nous avons d'abord procédé à une analyse de la rétrodiffusion moyenne des images d'hiver, afin de comparer leur patron de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence. Sur la figure 15, nous comparons les valeurs extraites des images de l'orbite de l'ouest. On y remarque des rétrodiffusions moyennes pour l'hiver 2002 de 2 à 3 dB supérieures à celles de l'automne 2000, ce qui est plus élevé que par les années passées. Comme les valeurs d'automne 2000 et 2001 sont similaires, ce sont donc les valeurs de l'hiver 2002 qui sont en fait 1 à 2 dB plus élevées que celles de l'hiver 2001. Étant donné que la quantité de neige au sol est dans la moyenne des dernières années (figure 6), une telle augmentation du signal est surprenante. Si on regarde la répartition spatiale de cette augmentation (figure 16), on remarque que c'est dans le centre de l'image qu'elle est la plus forte (teintes bleu). Il faut donc

s'attendre à ce que la carte des équivalents en eau présente de fortes valeurs pour ces régions. Dans la partie sud, la différence de signal entre l'image de référence et l'hiver est beaucoup plus faible (blanc). Si la cause de cette répartition est environnementale, elle peut être reliée à l'occupation du sol, à l'altitude et aux événements météorologiques survenus entre la mi-novembre 2001 et la fin janvier 2002.

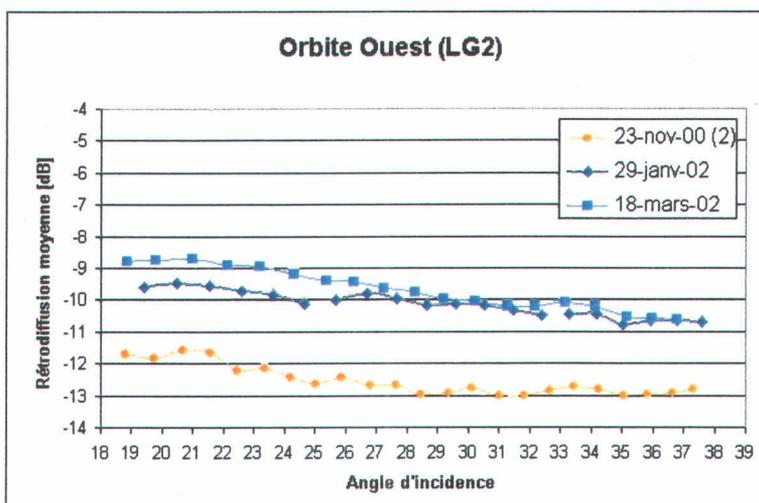


Figure 15 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'ouest.

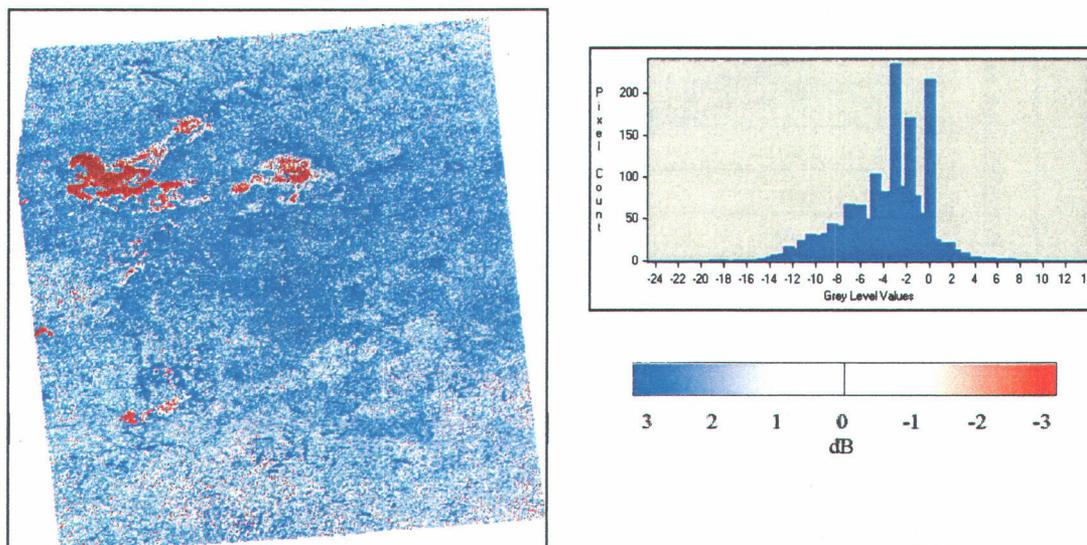


Figure 16 : Différence de rétrodiffusion (dB) entre le 23 novembre 2000 et le 29 janvier 2002, sur l'image de l'ouest. Une teinte bleu signifie que la rétrodiffusion de janvier 2002 est d'au moins un (1) dB plus élevée que celle de novembre 2000.

Pour l'orbite du centre, la figure 17 compare les valeurs extraites des images du 20 novembre 2000 et celles de l'hiver 2002. On remarque ici que les valeurs de l'hiver 2002 semblent beaucoup plus dépendantes de l'angle d'incidence, particulièrement pour le premier faisceau (jusqu'à 31°) où la différence des rétrodiffusions moyennes varie de 1 à 3 dB. Pour le deuxième faisceau, elle est stable à près de 1 dB. À nouveau, on examine la répartition spatiale des différences à la figure 18. La moyenne des différences est de 2.3 dB et l'augmentation du signal se concentre au nord de l'image, dans l'axe est-ouest des réservoirs. Il semble bien qu'il s'agit d'une variation des conditions de sol d'ouest en est. Dans les zones plus forestières du sud, on observe plutôt une baisse du signal. Les plus faibles différences de signal dans le deuxième faisceau sont visibles par une plus grande proportion de blanc dans la portion droite de l'image.

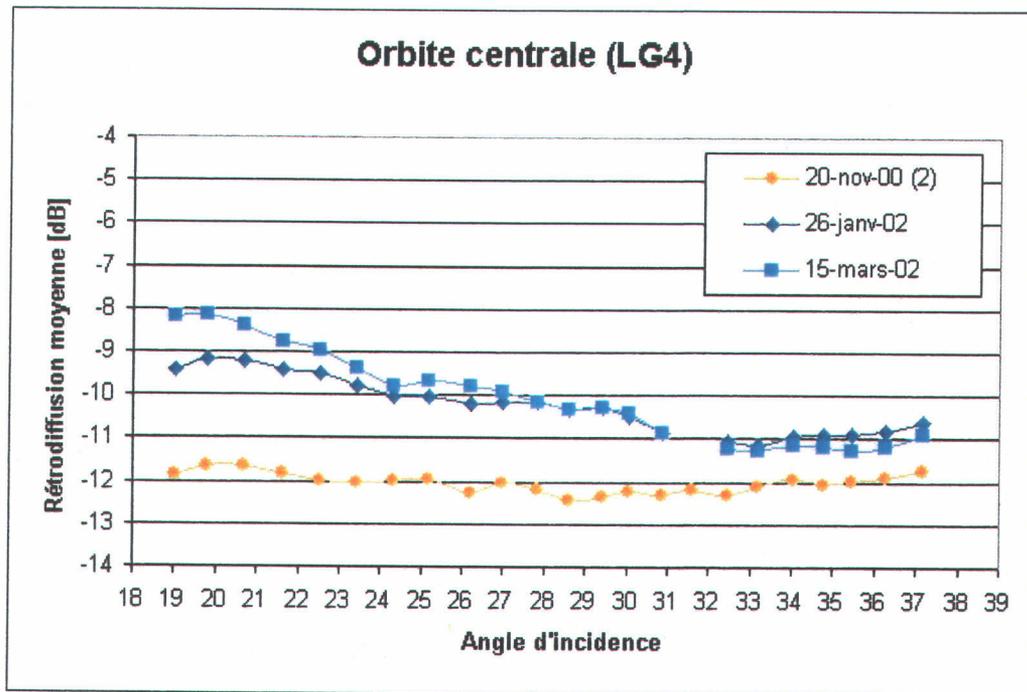


Figure 17 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite du centre.

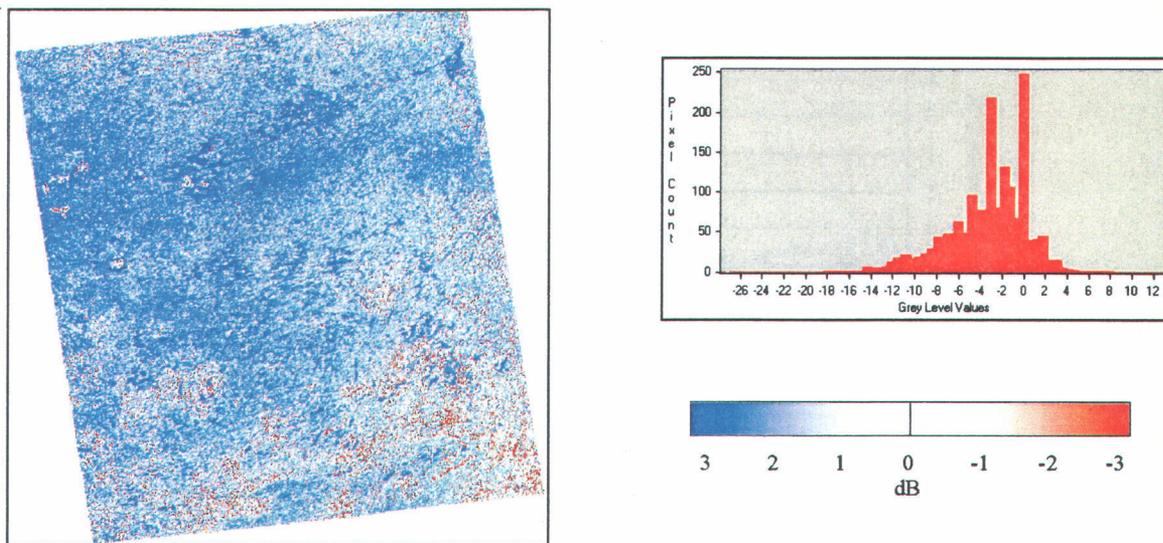


Figure 18 : Différence de rétrodiffusion (dB) entre le 20 novembre 2000 et le 26 janvier 2002, sur l'image du centre. Une teinte bleu signifie que la rétrodiffusion de janvier 2002 est d'au moins un (1) dB plus élevée que celle de novembre 2000.

Finalement, dans le cas de l'orbite de l'est, l'analyse de la rétrodiffusion moyenne (figure 19) démontre une différence de signal beaucoup plus faible entre novembre 2000 et l'hiver 2002. On note à nouveau des valeurs plus fortes (1 à 1.5 dB) pour le premier faisceau et même une baisse du signal pour le deuxième faisceau (-0.5 dB). Spatialement, la plus forte augmentation du signal à l'hiver provient encore de l'axe des réservoirs (figure 20). Par contre, toute la portion sud du bassin de Caniapiscou montre une tendance à la baisse.

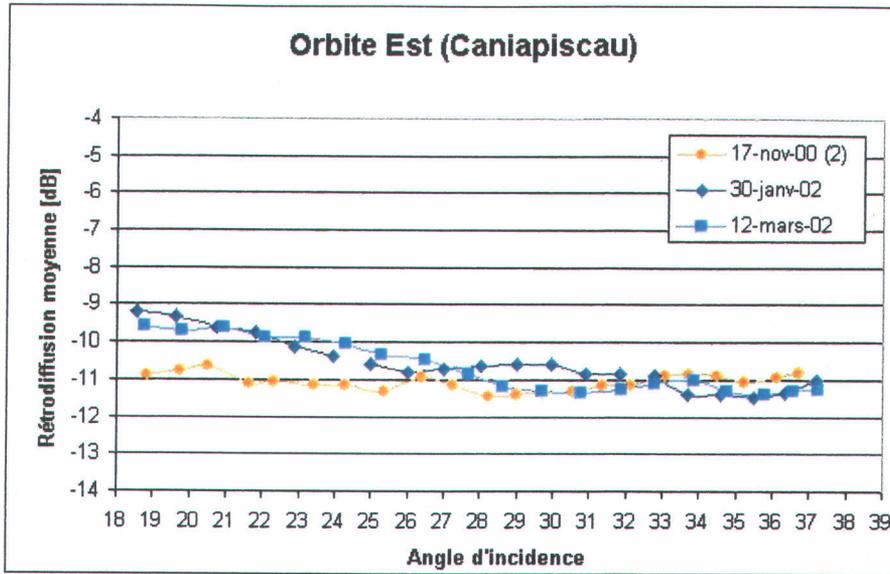


Figure 19 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'est.

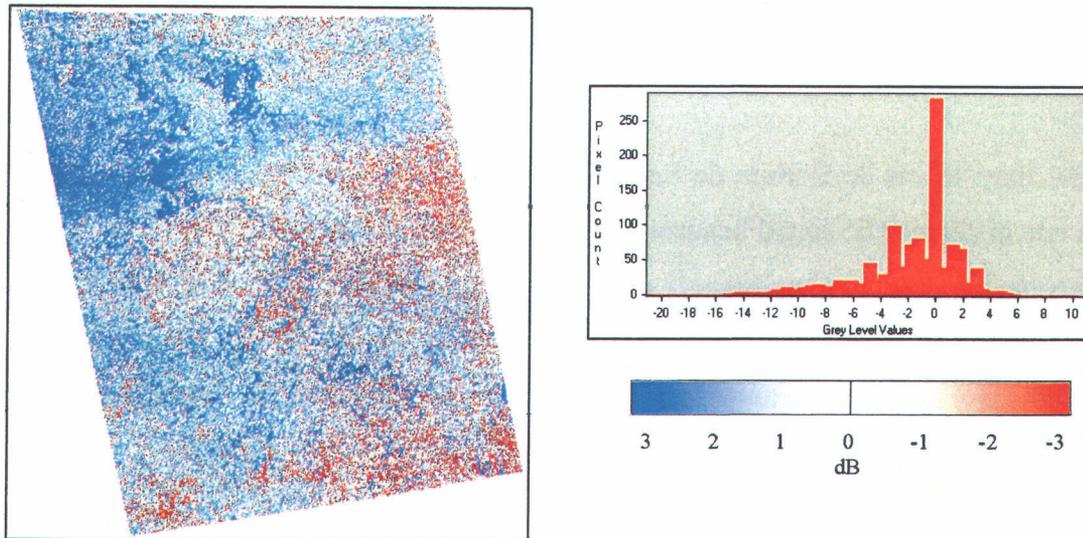


Figure 20 : Différence de rétrodiffusion (dB) entre le 17 novembre 2000 et le 30 janvier 2002, sur l'image du centre. Une teinte bleu signifie que la rétrodiffusion de janvier 2002 est d'au moins un (1) dB plus élevée que celle de novembre 2000.

Toutefois, il faut rappeler ici que l'image du 30 janvier 2002 a été acquise sur une orbite légèrement décalée par rapport à l'orbite habituelle, sur laquelle ont été acquises les images de novembre 2000 et 2001. Puisque ce secteur est celui dont le relief est le plus accentué, il se peut que certaines des variations observées sur la figure 20 soient plutôt dues au décalage des orbites. Afin de vérifier l'impact réel du décalage, les images du 12 novembre 2001 et du 30 janvier 2002 ont été traitées à l'aide d'un algorithme de correction radiométrique qui tient compte de l'effet de l'angle d'incidence local. (Bernier *et al.*, 2002 (annexe 1) ; RSI, 2002).

La moyenne des rétrodiffusions selon l'angle d'incidence pour les images avant et après la correction radiométrique est présentée à la figure 21. À première vue, la correction a peu d'effet, ce qui signifierait que le décalage des orbites n'a pas de conséquence significative. Toutefois, pour s'en assurer, nous examinerons aux figures 22 et 23, la répartition spatiale des différences de rétrodiffusion entre l'image non-corrigée et l'image corrigée.

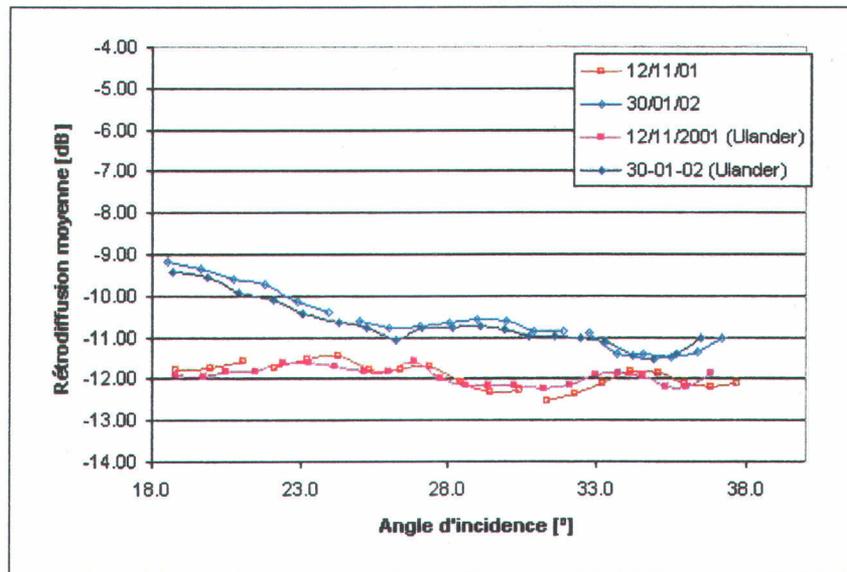


Figure 21 : Variation de la rétrodiffusion moyenne en fonction de l'angle d'incidence pour l'orbite de l'est, avant et après correction radiométrique, sur les images du 12 novembre 2001 et du 30 janvier 2002.

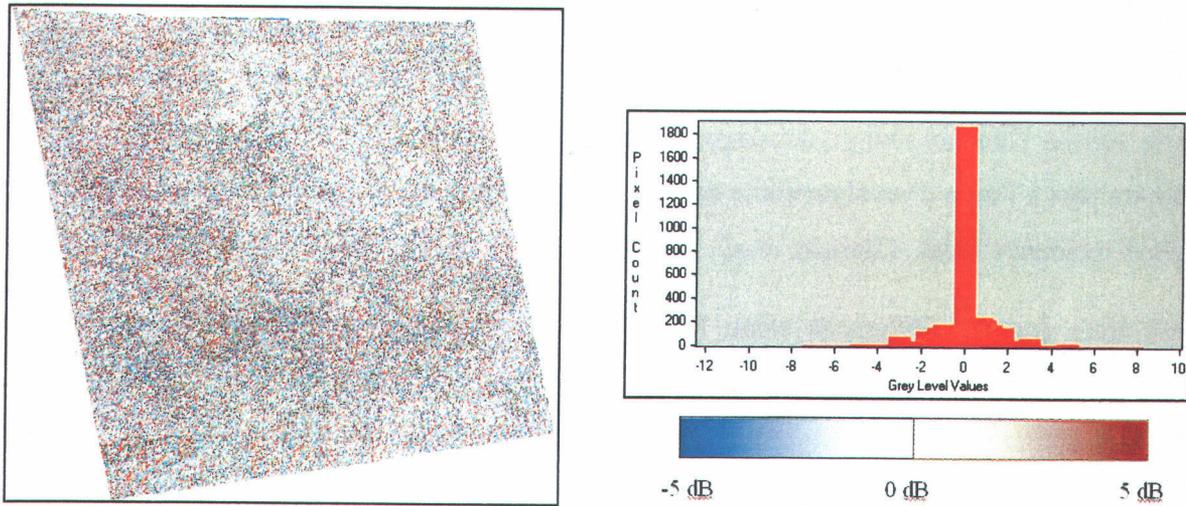


Figure 22 : Différence de rétrodiffusion entre l'image non-corrigée et l'image corrigée du 12 novembre 2001, sur l'orbite de l'est.

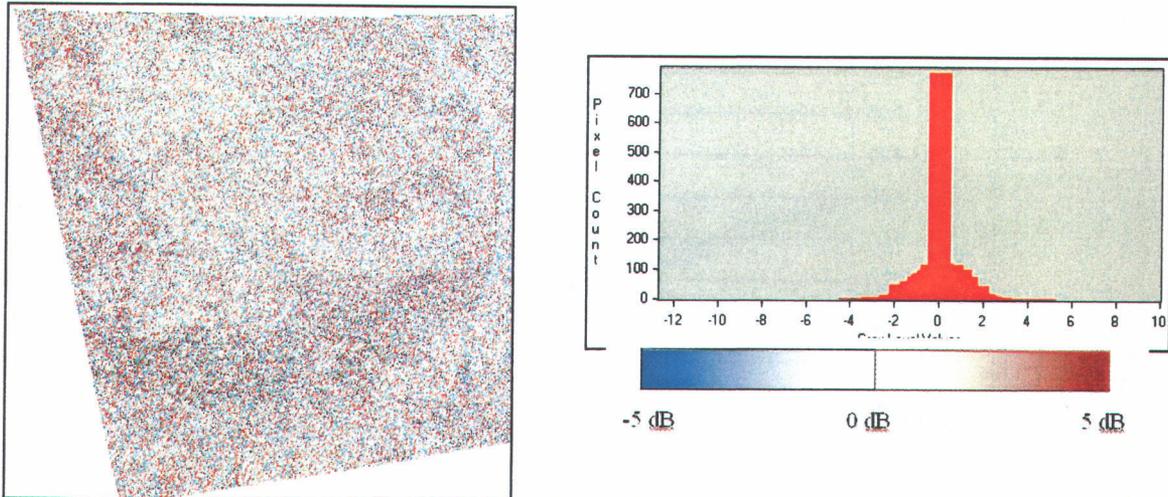


Figure 23 : Différence de rétrodiffusion entre l'image non-corrigée et l'image corrigée du 30 janvier 2002, sur l'orbite de l'est.

On y distingue une certaine variation demeurant dans 90% des cas, à l'intérieur de 2 dB. Plus important encore, ces changements sont généralement bien répartis sur l'ensemble de l'image, à l'exception du secteur sud-ouest, où l'on retrouve un relief plus accentué.

Finalement, nous comparons la différence entre les deux images d'orbites légèrement décalées (12 novembre 2001 et 30 janvier 2002) avant et après la correction de l'angle d'incidence local. Il s'agit donc de voir la différence pour EQueau, entre l'utilisation des deux images originales d'orbites décalées ou l'utilisation des deux images d'orbites décalées pour lesquelles a été appliqué l'algorithme de correction tenant compte des angles d'incidence locaux. Sur la figure 24, on constate que pour la très grande majorité des pixels, il n'y a pas de différence significative entre les deux combinaisons, sauf dans l'extrême sud de l'image. Nous appliquerons donc EQueau avec l'image originale du 30 janvier 2002 et l'image de référence du 17 novembre 2000, même si elles sont sur deux orbites légèrement décalées.

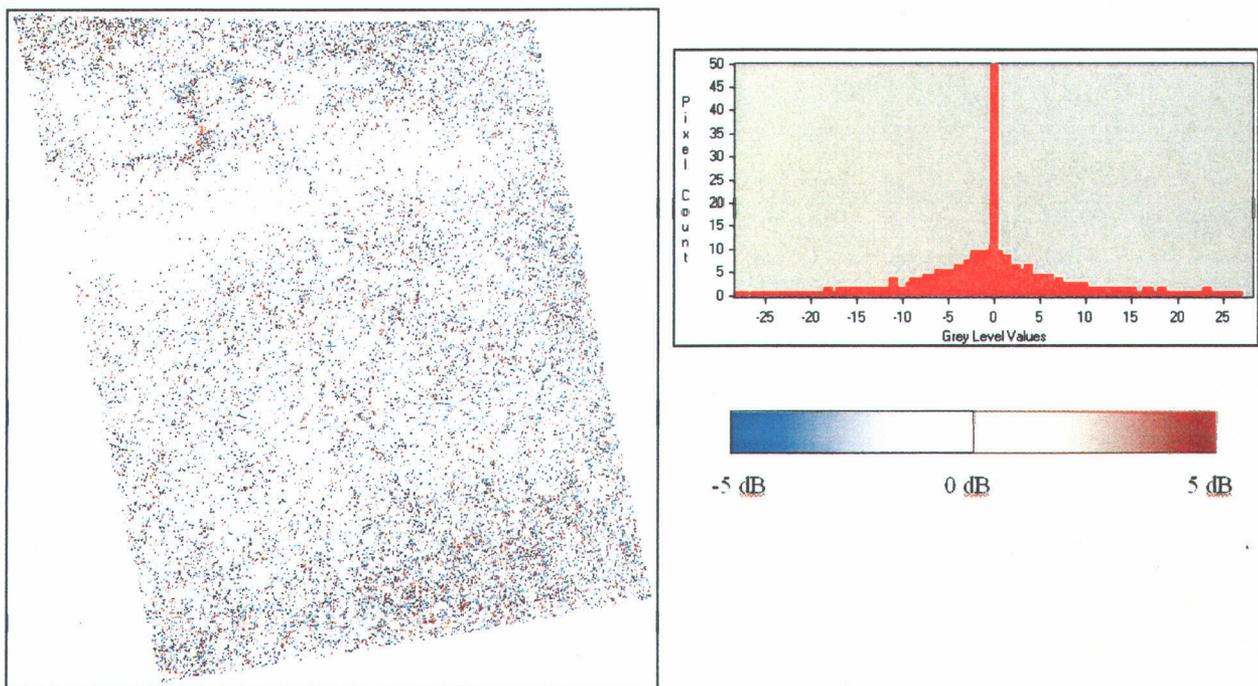


Figure 24 : Différence entre l'utilisation des deux images originales d'orbites décalées ou l'utilisation des deux images d'orbites décalées pour lesquelles a été appliqué l'algorithme de correction tenant compte des angles d'incidence locaux

Dans un dernier temps, nous regardons la différence de rétrodiffusion entre les images de janvier et de mars 2002. Dans un cas normal, où le sol est gelé et froid à l'automne et où il se réchauffe graduellement en hiver sous la protection du couvert de neige, on devrait avoir partout, une légère augmentation du signal entre janvier et mars. Sur la figure 25, nous voyons qu'au lieu d'une hausse généralisée entre les deux périodes d'acquisition, on observe plutôt une tendance à la baisse dans l'est et une tendance à la hausse dans l'ouest. C'est ce qui ressortait aussi des graphiques de rétrodiffusion moyenne présentés précédemment aux figures 15, 17 et 19. La carte montre aussi une forte augmentation de la rétrodiffusion (plus de 3dB) sur certains réservoirs et lacs (augmentation de la rugosité de la glace). Les causes de ces variations inattendues seront explorées au chapitre suivant.

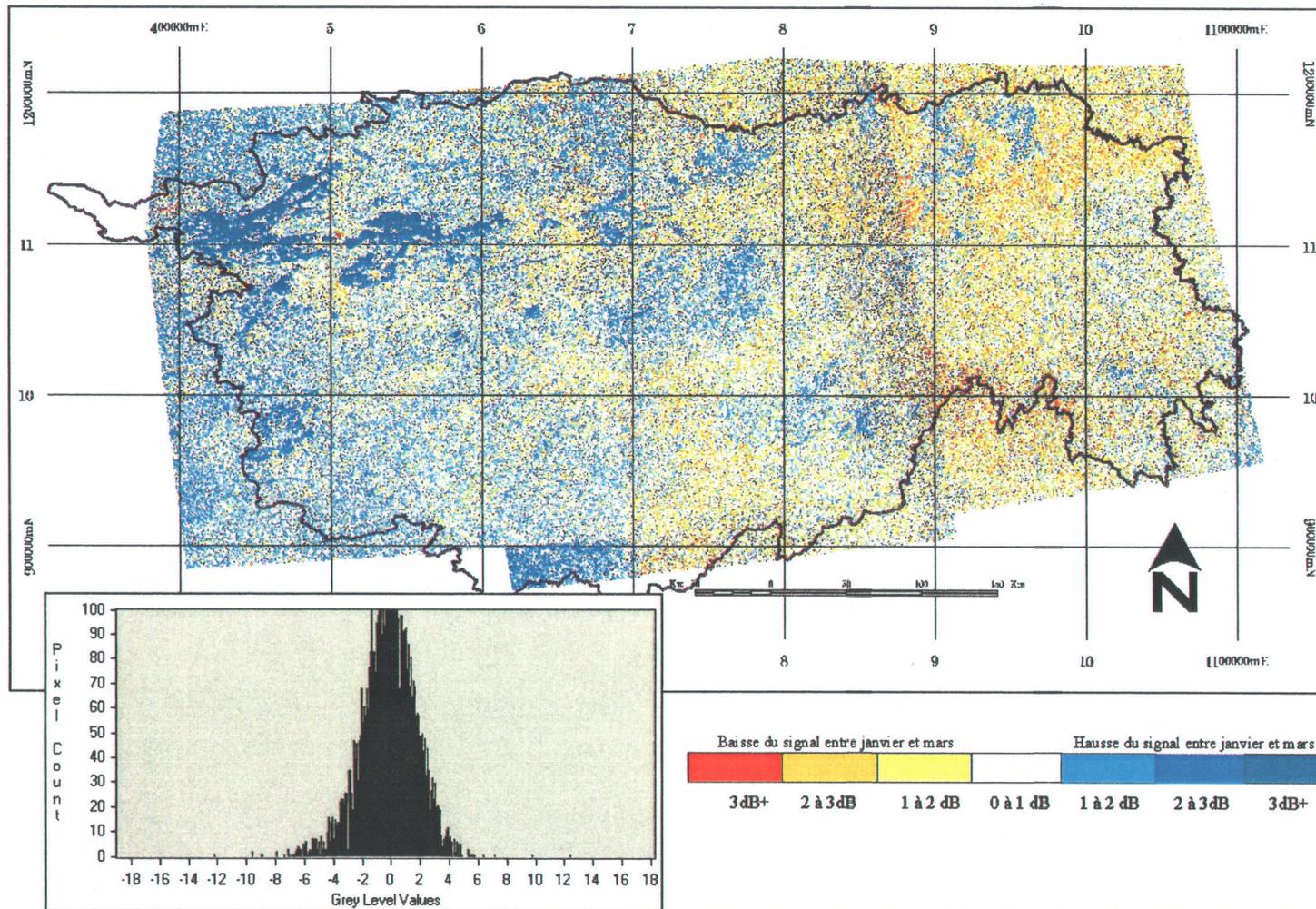


Figure 25 : Différence de rétrodiffusion sur tout le bassin entre janvier et mars 2002

4. L'application d'EQueau

Les combinaisons d'images utilisées sont présentées au tableau 5.

Tableau 5 : Combinaisons d'images utilisées pour le calcul des équivalents en eau dans EQueau

	Orbite Ouest	Orbite Centre	Orbite Est
Image de référence	23 nov. 2000 (payload 2)	20 nov. 2000 (payload 2)	17 nov. 2000 (payload 2)
Images d'hiver	29 janv. 2002 18 mars 2002	26 janv. 2002 15 mars 2002	30 janv. 2002 12 mars 2002

L'équivalent en eau est calculé à l'aide de la version 4.0 du logiciel EQueau, sur MapX. Une carte des équivalents en eau (maille de 50m) est produite pour chaque orbite et une mosaïque des trois orbites est réalisée. Les statistiques par bassin sont calculées sur cette mosaïque, qui est ensuite ré-échantillonnée à une maille de 500m pour affichage.

La figure 26 présente la mosaïque des équivalents en eau de janvier 2002, produite à partir des images du 29 janvier, 26 janvier et 30 janvier et ré-échantillonnée à une maille de 500m. La figure 27 présente la mosaïque des équivalents en eau de mars 2002, produite à partir des images du 18 mars, 15 mars et 12 mars et ré-échantillonnée à une maille de 500m. Dans les deux cas, on remarque immédiatement les valeurs anormalement élevées dans tout l'ouest du bassin, particulièrement dans l'axe des réservoirs.

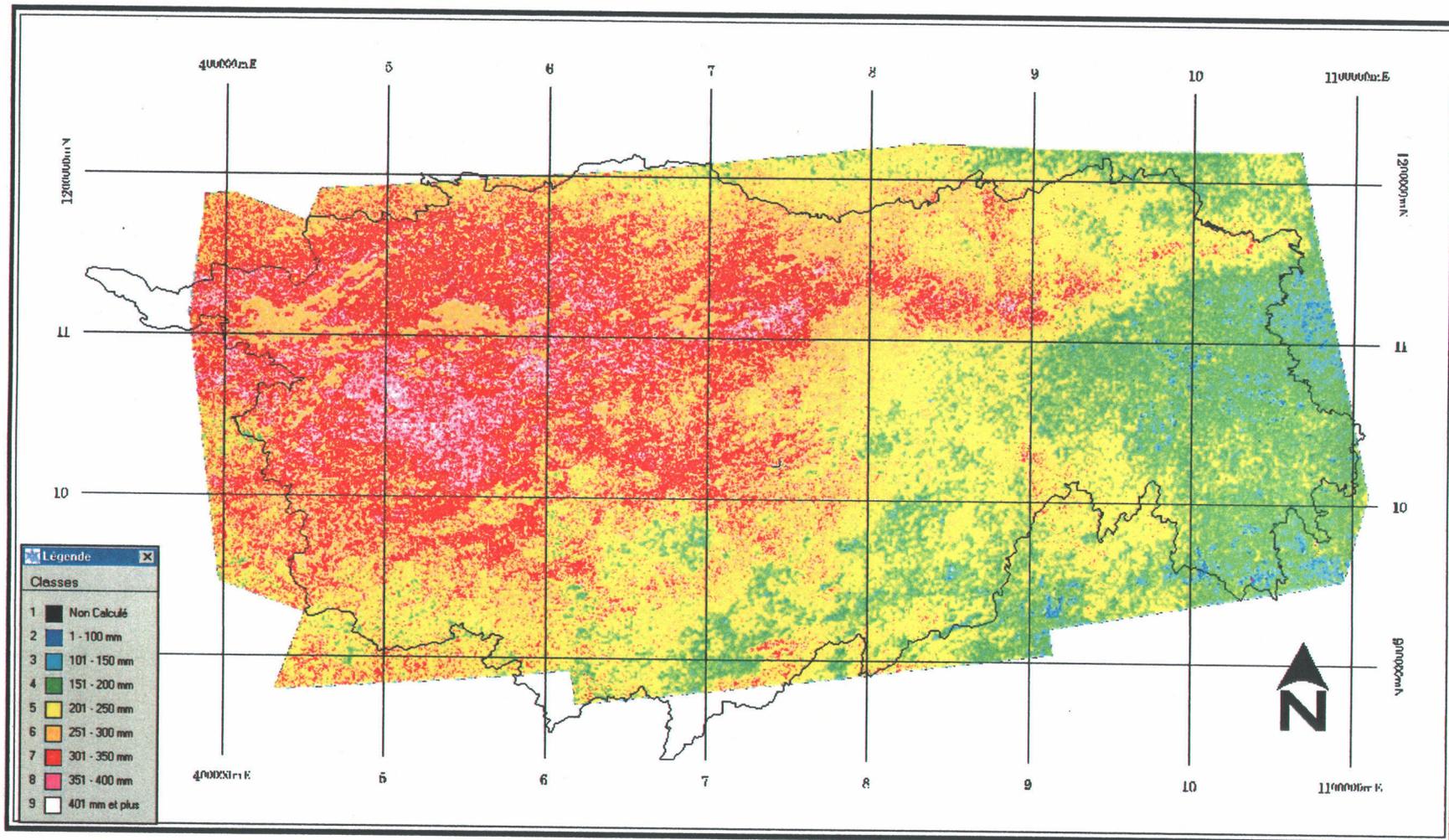


Figure 26 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de janvier 2002

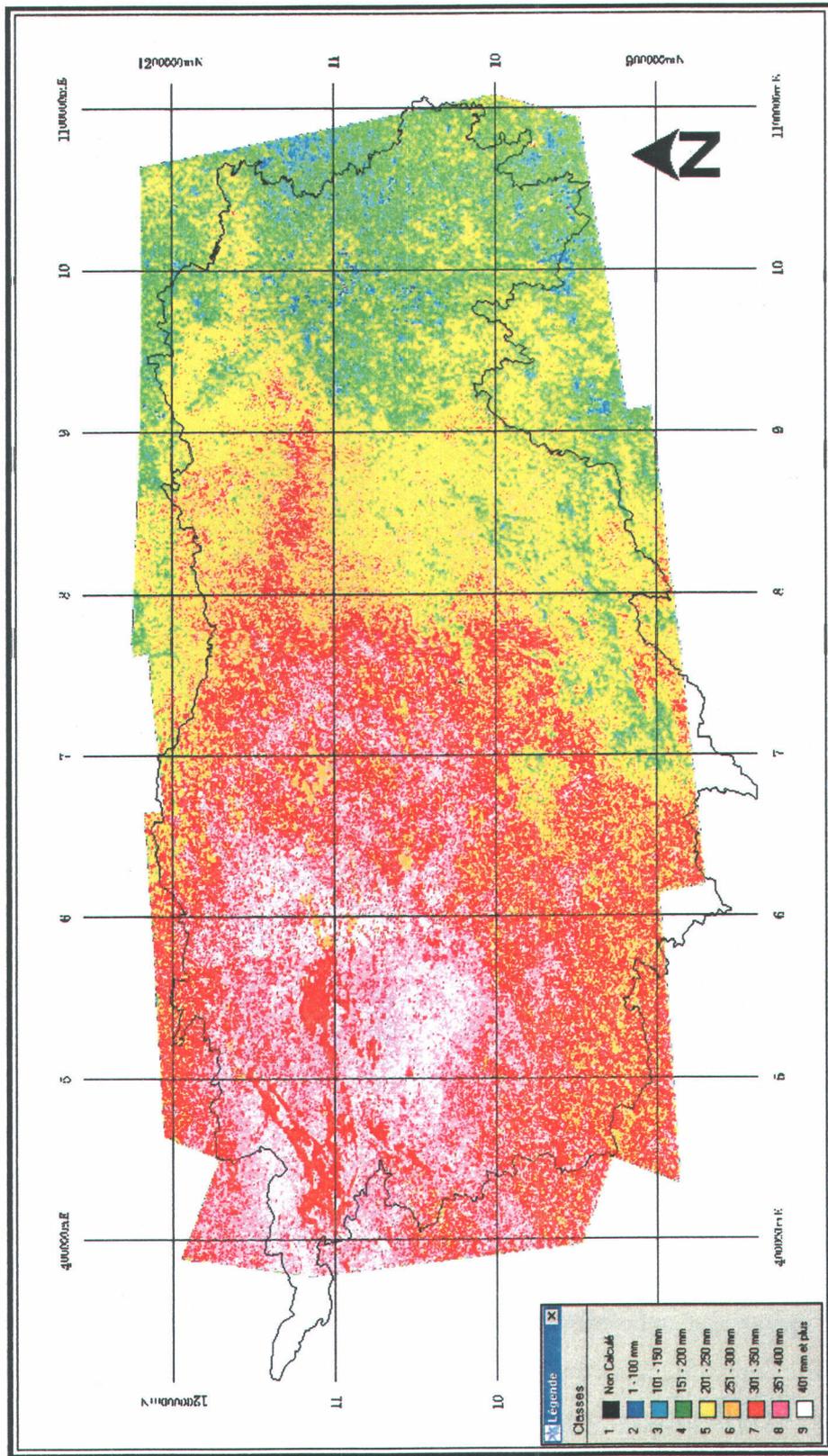


Figure 27 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de mars 2002

À l'échelle globale, les moyennes d'équivalents en eau par bassin en 2002, estimées par EQeau, sont présentées à la figure 28 et comparées aux moyennes interpolées à partir des relevés de terrain d'Hydro-Québec. Pour des fins de comparaison, les résultats de l'hiver 2001 sont aussi présentés.

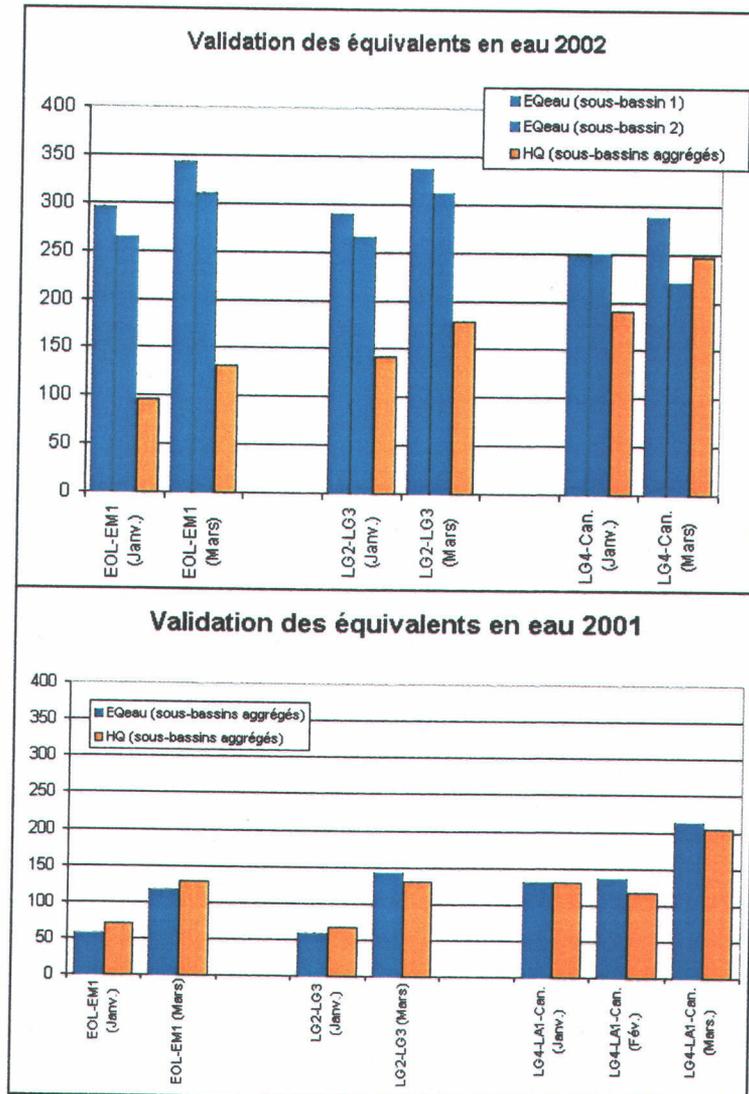


Figure 28: Validation des équivalents en eau estimés à l'échelle du bassin, pour janvier et mars 2002 ainsi que pour l'hiver 2001.

En 2001, les estimés d'EQeau par sous-bassins concordaient avec les valeurs interpolées par Hydro-Québec (figure 28). Toutefois, une coupure nette était visible sur les cartes d'équivalents en eau entre les bassins de LG3 et LG4 (annexe 2). Cette coupure mettait en doute la fiabilité des

images RADARSAT et la méthode d'EQeau mais résultait du fait que nous avons utilisé des valeurs moyennes de densité très différentes pour les sous bassins à l'ouest de LG3 (140 à 150 kg/m³) que pour ceux de l'est (180 à 195 kg/m³). Les valeurs de l'ouest provenaient des données des lignes de neige d'Hydro-Québec, celles de l'est des relevés conjoints INRS-HQ. Nous avons alors émis des réserves sur la fiabilité des données de l'ouest. En 2002, nous avons menées les campagnes de terrain conjointes INRS-HQ plus à l'est, jusqu'à la centrale de LG3 et nous avons alors constaté qu'il n'y avait peu de différence entre la densité moyenne des secteurs LG3 et LG4/Caniaspiscou (section 2.2, figure 3). La cartographie du mois de janvier 2001 a alors été reprise (Annexe 2) en faisant l'hypothèse que les densités du couvert nival à l'ouest du bassin étaient aussi peu différentes de celles à l'est du bassin. Les cartes sont alors plus homogènes mais, les valeurs moyennes des équivalents en eau estimés par EQeau doublent pour les bassins d'EOL et de LG2-LG3 (125 mm vs 56 mm). Il demeure néanmoins que dans sa forme actuelle, le logiciel EQeau ne comporte pas de mécanisme pour appliquer une variation graduelle de la densité de neige au sol. Comme l'algorithme est très dépendant de ce paramètre d'entrée, s'il existait effectivement une forte disparité entre l'est et l'ouest, les cartes produites présenteraient encore de fortes coupures entre les sous-bassins.

Pour revenir à l'hiver 2002, de façon prévisible, les moyennes estimées aux bassins sont deux à trois fois plus élevées que celles interpolées par Hydro-Québec. Il est certain qu'EQeau surestime les valeurs mais il est aussi possible que les relevés d'Hydro-Québec sous-estiment quelque peu les conditions réelles. La combinaison des deux expliquerait cet écart important entre les deux méthodes. D'autre part, l'analyse des images (sections 3.3 et 3.4) et les cartes d'équivalents en eau (figures 26 et 27) montrent bien qu'il y a un phénomène affectant les résultats dans tout l'axe des réservoirs. **Une hypothèse plausible serait un réchauffement des températures de l'air jumelé à des précipitations liquides ayant causé la fonte de la neige et le dégel du sol sur les secteurs de basse altitude en particulier, après la mi-novembre 2001.** En effet, les fortes valeurs de rétrodiffusion ne sont pas présentes sur les images d'automne 2001, comme on a pu le constater à la section 3.3. Ainsi, le sol de l'hiver 2002 serait très humide et dégelé puisque le couvert de neige a dû s'installer rapidement par la suite et agir comme isolant. Dans un pareil cas, les fortes rétrodiffusions et par conséquent, les équivalents en eau surestimés seraient concentrés dans des zones de moindre altitude. Pour appuyer cette hypothèse,

nous avons donc recalculé les moyennes d'équivalent en eau par bassin, en tenant compte de 7 classes d'altitudes (1-100m, 101-200m, 201-300m, 301-400m, 401-500m, 501-600m, 600m+). Les résultats présentés à la figure 29 démontrent bien qu'il existe effectivement une relation linéaire inverse entre les deux paramètres et que les équivalents en eau décroissent avec l'altitude. L'hypothèse émise est donc valable.

D'autant plus que si l'on compare le Modèle Numérique d'Altitudes (MNA) et une carte des équivalents en eau (figure 30), on remarque que la limite des fortes valeurs (>300mm) correspond approximativement à la limite (trait bleu) des 500m d'altitude. Comme le bassin LG4-LA1-Caniapiscau est généralement au-dessus de 500m, voilà pourquoi les moyennes estimées par EQeau sont plus près des moyennes interpolées par Hydro-Québec pour ce bassin. **Il demeure néanmoins que les conditions particulières du sol à l'hiver 2002 ne se limitent pas uniquement aux bassins de l'ouest puisque même au-dessus de 500m d'altitude, les équivalents en eau estimés diminuent d'ouest en est.** Ce phénomène est particulièrement évident sur la figure 31, où les équivalents en eau mesurés et estimés des sites d'échantillonnage (Sites HQ et Sites INRS) sont mis en relation avec l'altitude du site en question. Normalement, les équivalents en eau mesurés augmentent avec l'altitude. Dans le cas des équivalents en eau estimés à partir des images RADARSAT de l'hiver 2002, la relation est totalement inversée. Cela se répercute évidemment dans la validation à l'échelle locale. Si l'on compare l'équivalent en eau mesuré sur le terrain et l'équivalent en eau estimé par EQeau sur le pixel de 500m contenant le site d'échantillonnage (figure 32), on constate très peu de concordance.

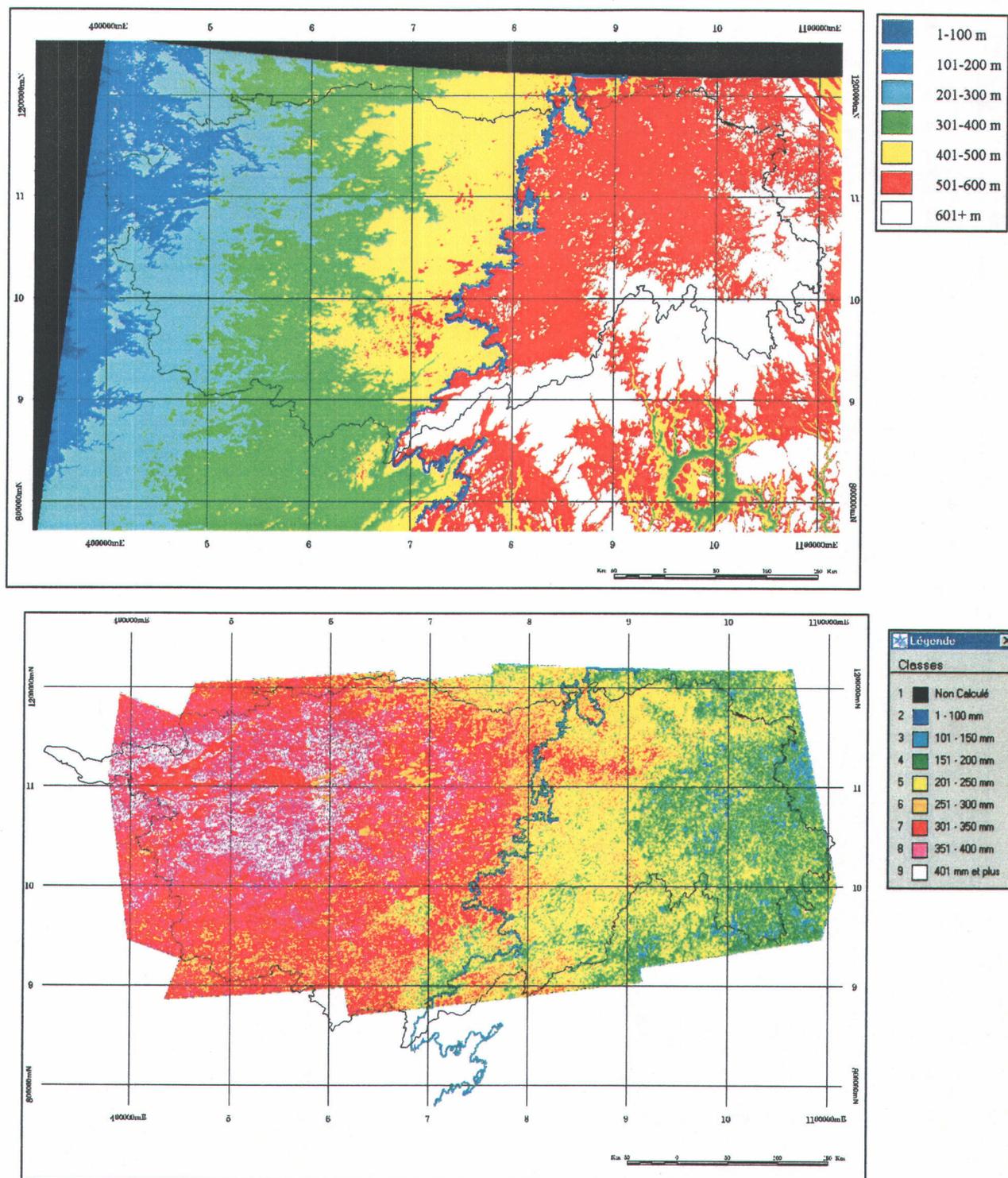


Figure 29 : Modèle numérique par classes d'altitudes et carte des équivalents en eau de la mi-mars 2002. Le trait bleu représente la limite d'altitude de 500m.

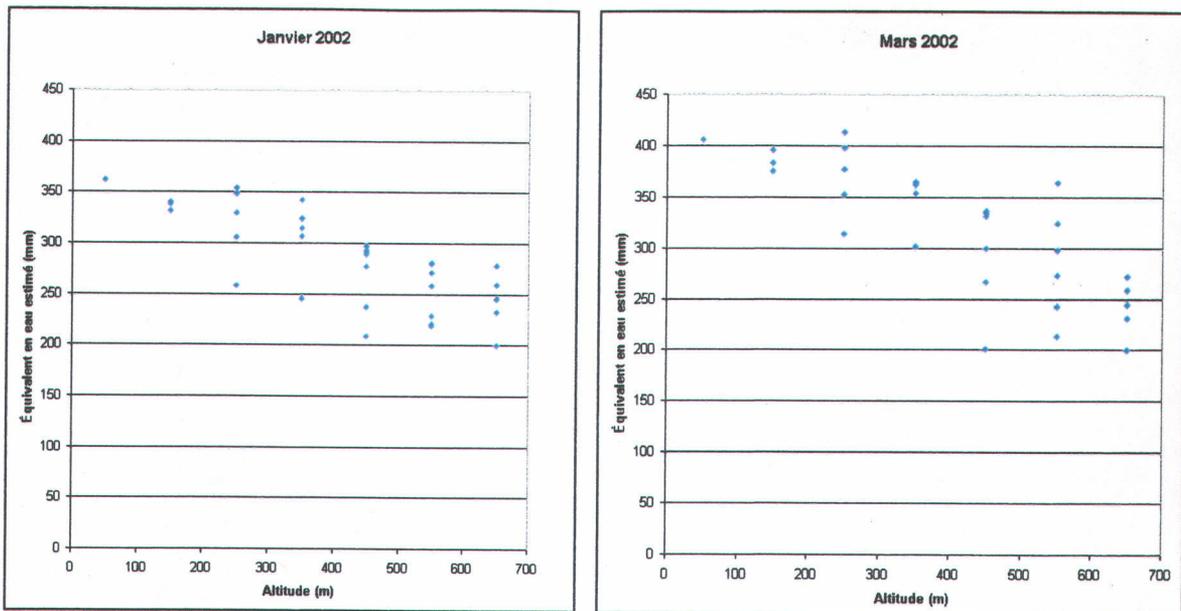


Figure 30 : Moyenne des équivalents en eau par classes d'altitudes

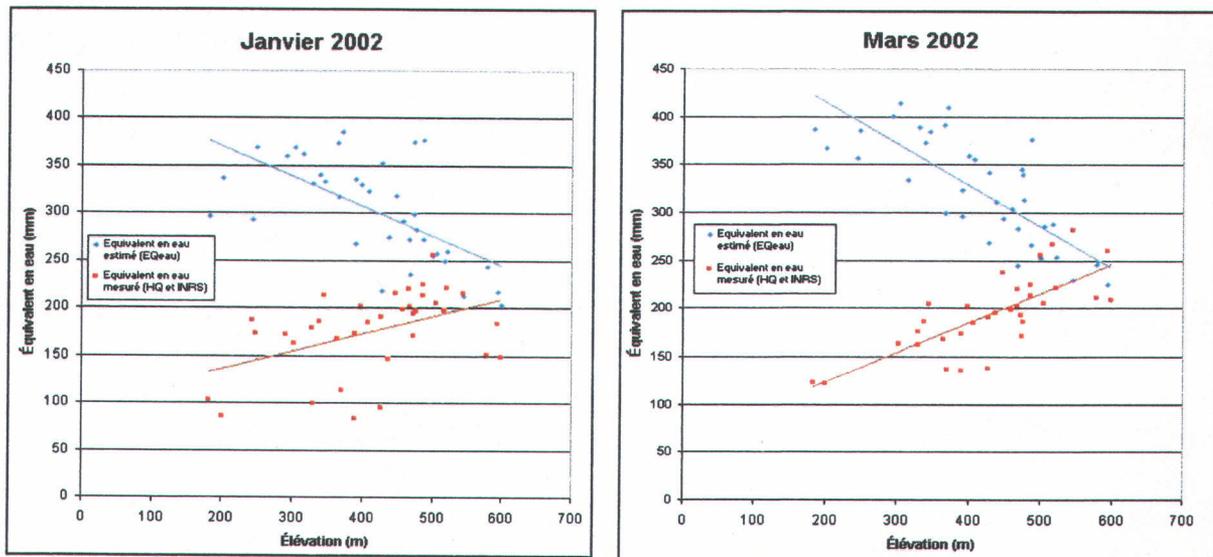


Figure 31 : Variation des équivalents en eau estimés et mesurés, aux sites d'échantillonnage, en fonction de l'altitude.

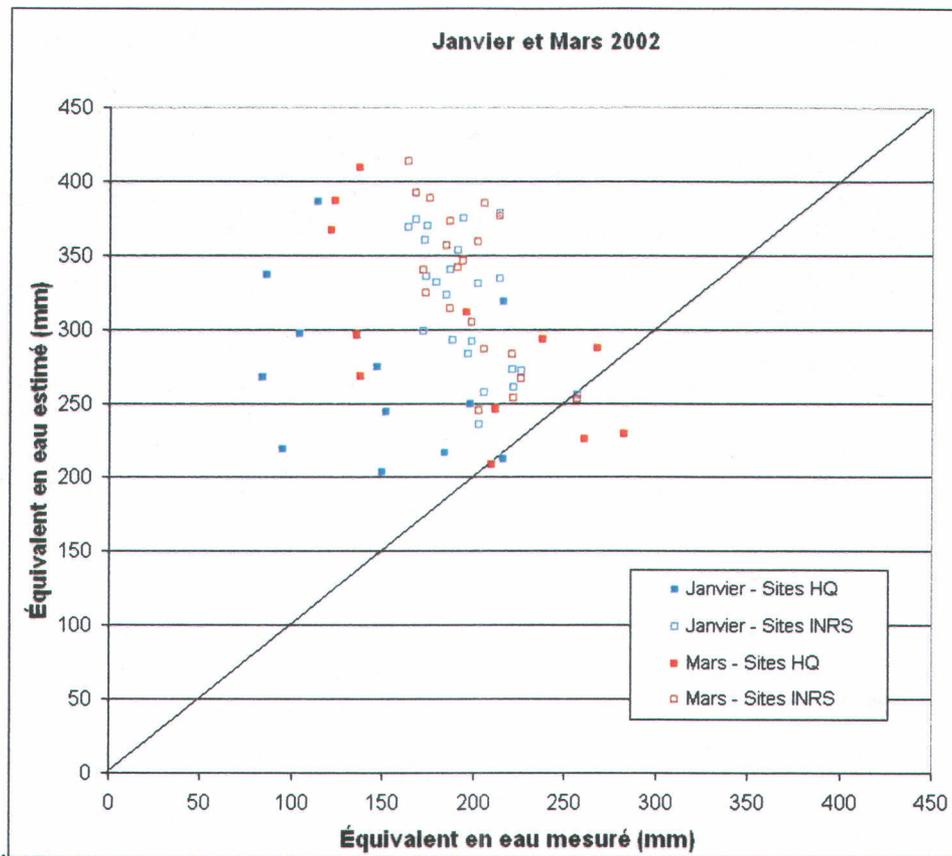


Figure 32 : Validation des équivalents en eau estimés à l'échelle locale, pour janvier et mars 2002

Les cartes d'équivalents en eau produites en 2002 ne représentent donc pas réellement cette caractéristiques de la neige puisque les conditions nécessaires à l'application d'E_{Qeau} n'étaient pas réunies. Les cartes sont plutôt un reflet des caractéristiques particulières du sol suite à un réchauffement tardif et qui se traduit par de fortes rétrodiffusions. On le démontre par la figure 33, où l'on a simplement regroupé les coefficients rétrodiffusions en grandes classes. Les zones rouges (rétrodiffusion plus élevées que la normale en hiver) et mauves (rétrodiffusion très élevées) correspondraient selon nos hypothèses, à des valeurs de rétrodiffusion pour un sol dégelé et très humide (>-10 dB). Ce sont ces mêmes zones qui ressortent en rouge et en blanc sur les cartes d'équivalents en eau estimés. Voilà pourquoi nous affirmons qu'elles ne représentent pas l'équivalent en eau de la neige.

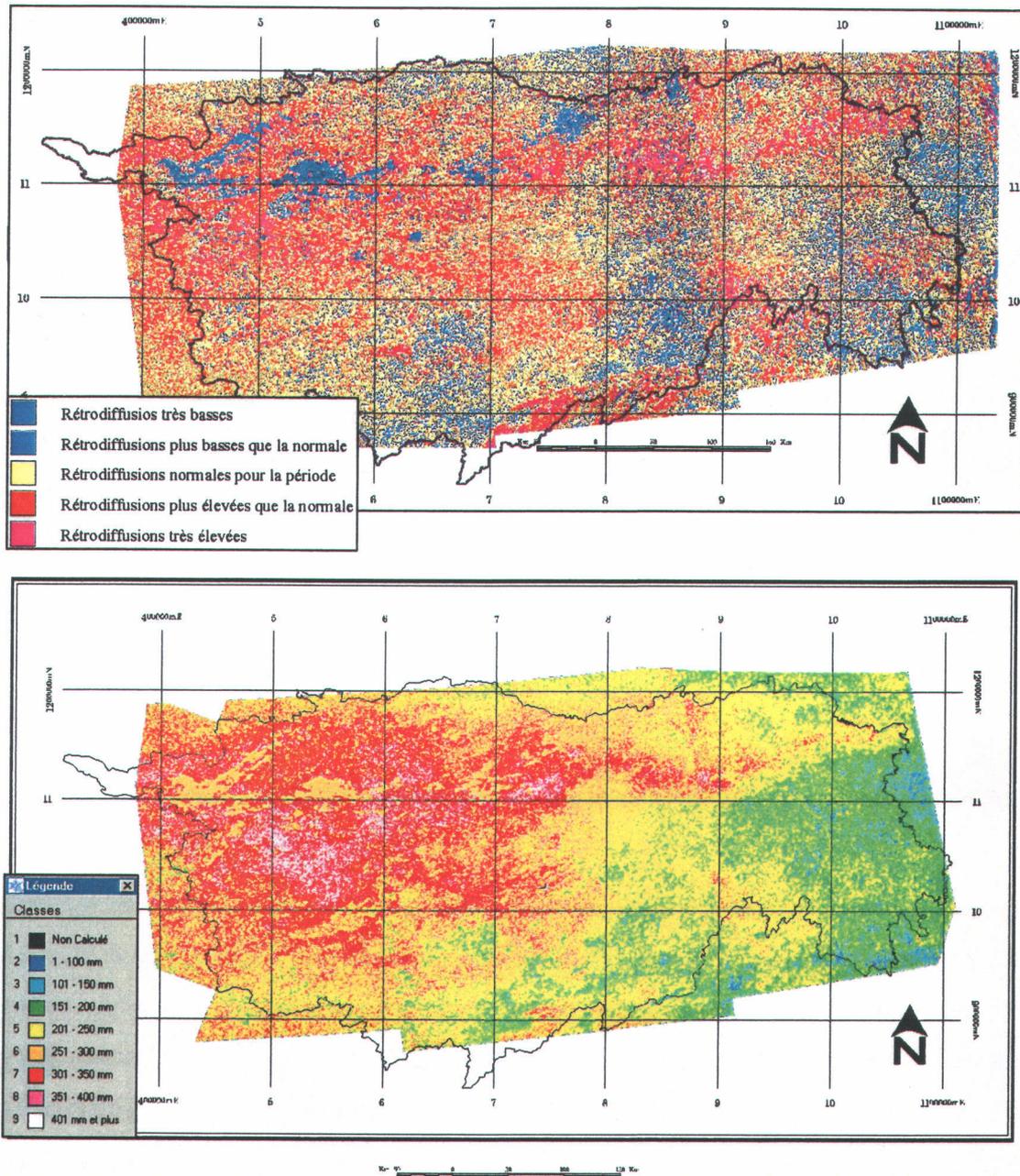


Figure 33 : Segmentation de la rétrodiffusion par classes pour la mosaïque des images de janvier 2002 et comparaison avec la carte des équivalents en eau estimés.

5. Conclusions et recommandations

Dans le cadre du volet R&D du projet EQeau, sept objectifs avaient été établis de concert avec Hydro-Québec pour l'année 2002. En date du 31 mai 2002, les quatre premiers objectifs ont été complétés et ont fait l'objet de l'essentiel du présent rapport.

Le premier objectif était l'analyse de deux séries d'images d'automne (novembre 2000 et 2001) et la sélection de la meilleure série d'images de référence pour l'hiver 2002. Afin de choisir la série d'images de référence, les conditions environnementales et les images de l'automne 2000 et de l'automne 2001 ont été comparées. Très visible en 2000, la baisse prononcée du signal observée à la limite des deux faisceaux qui composent le mode ScanSAR Narrow (vers 31°), n'est plus présente en 2001. Cela signifie que le fournisseur des images (*RSI*) a modifié le pré-traitement des données au cours de la dernière année. Ces modifications sont apportées au moyen de ce que *RSI* appelle le « *payload file* ». Les trois images de l'automne 2000 ont donc été retraitées gracieusement par *RSI*, à partir du nouveau « *payload file* », afin que l'on puisse les comparer aux images de 2001-2002. Sur les images de 2000 retraitées et les images de 2001-2002, le signal est maintenant moins sensible à l'angle d'incidence et plus homogène d'un faisceau à l'autre (meilleure qualité). On constate également que sauf pour l'orbite du centre (neige humide et pluie), la moyenne de rétrodiffusion des images de novembre 2000 est assez similaire à celle de novembre 2001 et que les deux séries d'images peuvent servir d'image de référence. L'objectif étant d'utiliser, de préférence, les mêmes images de référence que lors de la saison 2001, cette option a été retenue et elle s'est montrée valide.

Le second objectif était de vérifier la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow de l'hiver 2002. Tel que discuté ci-dessus, les images acquises durant la saison hivernale 2001-2002 sont de meilleure qualité que celles de la saison 2000-2001 (lesquelles étaient radiométriquement fiables), suite à l'utilisation d'un nouveau « *payload file* » qui rend le signal maintenant moins dépendant de l'angle d'incidence et plus homogène d'un faisceau à l'autre (meilleure qualité). D'autre part, les rétrodiffusions moyennes pour l'hiver 2002 sont de 1 à 2 dB plus élevées que

celles de l'hiver 2001. Bien qu'il y ait sensiblement plus de neige en janvier 2002 qu'en janvier 2001, ces valeurs sont plus élevées que ce qui a été observé par le passé. Nous avons démontré que cette augmentation était principalement concentrée dans les zones inférieures à la limite des 500m d'altitude et selon l'axe ouest-est des réservoirs et ce, tant en janvier qu'en mars 2002. Comme ces fortes valeurs de rétrodiffusion ne sont pas présentes sur les images d'automne 2000 ou 2001, les cartes des équivalents en eau présentent de fortes valeurs pour ces régions. L'hypothèse mise de l'avant pour expliquer ce phénomène est de nature environnementale : un réchauffement des températures de l'air, jumelé à des précipitations liquides ayant causé la fonte de la neige, le dégel et l'humidification du sol sur les secteurs de basse altitude en particulier, après la mi-novembre 2001. Ceci suivi de chutes de neige protégeant le sol contre les plus froides températures. Les sols dégélés et humides produisent de fortes rétrodiffusions. Cette situation particulière montre la forte sensibilité du signal des images radar à l'état du sol (humide ou gelé) tel que mis de l'avant par l'approche EQeau.

Le troisième objectif était d'assister le personnel d'Hydro-Québec dans la production des cartes d'équivalents en eau de la neige au sol sur l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande à partir des deux séries d'images hivernales. En raison de problèmes logistiques internes à Hydro-Québec, la nouvelle version du logiciel EQeau n'a pu être fonctionnelle cet hiver au service de Prévision et Ressources Hydriques. Donc toutes les cartes ont été entièrement produites à l'INRS. Ces cartes confirment qu'il y a un phénomène affectant les résultats dans tout l'axe des réservoirs pour l'ensemble du bassin La Grande et ce tant en janvier qu'en mars 2002. Ainsi, là où le sol est dégélé et très humide, les rétrodiffusions sont fortes et par conséquent, les équivalents en eau surestimés. De plus, la limite des fortes valeurs (>300mm d'équivalent en eau) correspond approximativement à la limite des 500m d'altitude. Ainsi, comme le bassin LG4-LA1-Caniapiscou est généralement au-dessus de 500m, les moyennes estimées par EQeau sont plus près des moyennes interpolées par Hydro-Québec pour ce bassin. Il demeure néanmoins que les conditions particulières du sol à l'hiver 2002 ne se limitent pas uniquement aux bassins de basse altitude (de l'ouest) puisque même au-dessus de 500m d'altitude, les équivalents en eau estimés diminuent avec l'altitude. Il y a donc peu de concordance entre les valeurs mesurées sur le terrain et les équivalents en eau estimés par EQeau. En 2002, les cartes obtenues montrent la distribution spatiale de l'humidité du sol (sols dégélés) et à des fins de prévisions, doivent être utilisées dans ce sens (figure 3).

Le quatrième objectif se voulait une validation d'une méthode de correction radiométrique des images tenant compte de l'angle d'incidence, des pentes locales et de l'orientation de ces pentes, dans le but d'évaluer l'impact du changement d'orbite sur le calcul des équivalents en eau. Nous avons comparé le signal avant et après la correction de l'angle d'incidence local pour deux images RADARSAT d'orbites légèrement décalées (4.5°) (12 novembre 2001 et 30 janvier 2002). Nous avons constaté qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux combinaisons, sauf dans l'extrême sud de l'image (un peu plus accidentée). Cela implique que nous avons pu appliquer EQeau avec l'image non corrigée du 30 janvier 2002 et l'image de référence non corrigée du 17 novembre 2000, même si elles sont sur deux orbites légèrement décalées.

Le cinquième objectif a aussi été partiellement réalisé. Il s'agissait d'améliorer l'apparence de la représentation cartographique et la fiabilité de l'algorithme d'EQeau. Rappelons que deux problèmes ont été rencontrés à l'hiver 2001. Premièrement, la fiabilité des données au sol (lignes de neige) relevées par le personnel d'HQ, particulièrement des mesures de densité de la neige des secteurs à l'ouest de LG4. Deuxièmement, une coupure nette dans les trois représentations cartographiques de l'équivalent en eau entre les bassins de LG4 et LG3 en particulier. En 2002, pour pallier au premier problème, les campagnes de terrain conjointes INRS-HQ ont été menées plus à l'ouest jusqu'à la centrale de LG3. Nous avons alors constaté qu'il y avait peu de différence entre la densité moyenne du couvert nival des secteurs de LG3 et de LG4/Caniaspicau tant en janvier qu'en mars. En se basant sur l'hypothèse que les densités des secteurs à l'est de LG3 étaient aussi peu différentes de celle de LG4 à l'hiver 2001, nous avons aussi repris la cartographie du mois de janvier 2001. Ainsi, au lieu d'appliquer des valeurs moyennes entre 140 à 150 kg/m³ pour les sous bassins à l'ouest de LG3, nous avons appliqué les mêmes densités que LG4 soient 180 à 195 kg/m³ (annexe 2). Nous constatons que la coupure visible sur les cartes d'équivalents en eau de l'hiver dernier, laquelle mettait en doute la fiabilité des images RADARSAT et de la méthode EQeau, a disparu. Cette coupure mettait en relief une incertitude au niveau des mesures au sol. Il demeure toutefois qu'EQeau ne peut, dans sa forme actuelle, répartir spatialement les densités de neige au sol de façon graduelle. Néanmoins, cette nouvelle carte rend mieux justice à la fiabilité radiométrique des images ScanSAR et elle est selon nous,

plus représentative de la distribution réelle des équivalents en eau sur le bassin de la rivière La Grande en janvier 2001.

D'ici la fin de novembre, nos efforts porteront sur la représentativité des cartes, la fiabilité de l'algorithme (objectif 5) et l'établissement de l'incertitude des résultats d'EQeau (objectif 6). Pour se faire, nous utiliserons les valeurs de rétrodiffusion des images ScanSAR de l'hiver 2001 et si besoin des données des hivers 1997, 1998 et 1999. Nous étudierons les variations temporelles du signal des brûlis et des tourbières et évalueront l'impact de ces classes sur les estimés d'équivalent en eau. Nous déterminerons aussi les limites de validité de l'algorithme EQeau en précisant la quantité de neige au sol maximale détectable et les conditions environnementales rendant l'algorithme inapplicable.

Quant au dernier objectif, l'amélioration du logiciel EQeau, il se fait sur une base continue. Depuis janvier 2002, la version MapX du logiciel EQeau a été utilisée sans difficulté pour produire les cartes et les statistiques présentées dans ce rapport. Cette version dispose maintenant d'outils pour calculer les moyennes par bassins, par occupations du sol et par classes d'altitudes.

Recommandations à cette étape du projet:

- Étant donné que la moyenne de rétrodiffusion des images de novembre 2000 est assez similaire à celle du novembre 2001 et que les deux séries automnales peuvent servir d'images de référence, nous recommandons d'utiliser les trois images SCANSAR Narrow des 17, 20 et 23 novembre 2000 comme images de référence pour l'hiver prochain (2003). Toutefois, à l'automne 2002, il faudra s'assurer que le « *payload file* » qui sera employé à l'hiver 2003 demeure celui du « *payload 2002* ». S'il est modifié, il faudrait alors retraiter les trois images de l'automne 2000 servant de référence.
- Afin d'éviter l'achat d'images acquises par temps pluvieux, tel que l'image du 15 novembre 2001, ou bien par temps trop doux (neige humide) non utiles à des fins opérationnelles, nous recommandons de recourir dorénavant à l'option METEO lors de la commande des images RADARSAT. Cette option coûte 405\$ et consiste à programmer trois dates différentes, pour n'en retenir qu'une seule si désiré.

- Bien qu'il soit préférable d'utiliser des images ScanSAR Narrow provenant de la même orbite relative, il est aussi viable d'utiliser des images provenant d'orbites relatives légèrement différentes si les conditions environnementales (par exemple, des conditions de neige humide au sol lors de la journée d'acquisition prévue) des problèmes techniques ou des besoins opérationnels le justifient. De plus, étant donné le faible relief du bassin La Grande, la correction pour les angles d'incidence locaux n'est pas nécessaire pour un décalage de l'ordre de 4 ou 5 degrés.
- Lorsque le décalage d'orbite est plus significatif entre l'image à analyser et l'image de référence, le logiciel de correction pour les angles d'incidence locaux développé par VIASAT avec l'appui de l'Agence spatiale canadienne devrait être appliqué car il s'avère performant pour des pentes inférieures à 30 degrés (Briand *et al.*, 2002; Annexe 1)
- Étant donné l'importance de pouvoir obtenir des estimés fiables de la densité réelle de la neige tant pour l'application d'EQeau que pour les autres méthodes de prévisions de la production hydroélectrique utilisées par HQ, nous recommandons la poursuite de divers projets de recherche en cours tels que le projet canado-européen SNOWPOWER, les survols gamma aéroportées, les images SSM/I et la station expérimentale de Radisson. Selon les résultats obtenus, ces différentes approches pourront être intégrées à l'approche EQeau afin d'améliorer la qualité des prévisions.

Références

Bernier, M., Y.Gauthier, P.Briand, J.Coulombe-Simoneau, J. Hurley, F. Weber, 2002. Radiometric correction of RADARSAT-1 images for mapping the snow water equivalent (SWE) in a mountainous environment, Comptes-rendus de IGARSS, Toronto, 24-29, juin 2002, 5 pages.

Bernier, M. et Y. Gauthier, 2001. Implantation d'EQeau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Rapport de recherche No. 609-e1, INRS-Eau, 29 pages, décembre 2001.

Briand, P., Bernier, M., Gauthier, Y. Hurley, J., Coulombe-Simoneau, J., 2002. The Assessment of RADARSAT-1 for Snow Water Equivalent in Mountainous Terrain, RSI, Report #CSA-ST-CR-2001-0024, January 2002, 118 pages.

ANNEXES

ANNEXE 1

Radiometric correction of RADARSAT-1 images for mapping the snow water equivalent (SWE) in a mountainous environment

Monique Bernier¹, Yves Gauthier¹, Paul Briand², Judith Coulombe-Simoneau², Jeff Hurley³
and Frank Weber⁴

¹INRS-EAU, 2800 rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy (Quebec), Canada, G1V 4C7,
Monique_Bernier @inrs-eau.quebec.ca

²VIASAT Géo-Technologies, 4101 rue Molson, Montréal (Quebec), Canada, H1Y 3L1

³RSI, Vancouver, 13800 Commerce Parkway, Richmond (BC), Canada, V6V 2J3

⁴BC Hydro, 6911 Southpoint Drive, Burnaby (BC), Canada, V3N 4X8

Abstract - When trying to monitor the snow characteristics from RADARSAT-1 SAR data in a mountainous environment like the Coast Mountains (B.C. Canada), radiometric corrections must first be applied to correct for the distortions induced by the slant projection of SAR systems and by the highly variable terrain. This paper presents and discusses the results obtained from the implementation of two radiometric slope correction methods on Fine beam RADARSAT-1 images. For slope less than 30°, both algorithms have almost the same effect. But, for very steep slopes, both algorithms are deficient and may not compensate enough.

I. INTRODUCTION

This study* is part of a project about using RADARSAT SAR images for snow water equivalent estimation on Mount Sproatt, Coast Mountains, B.C., Canada. However, when trying to monitor the snow characteristics from RADARSAT SAR data in a mountainous environment, radiometric corrections must first be applied to correct for the distortions induced by the slant projection of SAR systems and by the highly variable terrain. The approach developed [1,2] to estimate the SWE from SAR data is based on the fact that the snow cover characteristics influence the underlying soil temperature which in turn influences the dielectric properties of the soil and consequently, the recorded backscattering signal. A linear relationship between the

backscattering ratio of a winter image and a snow-free image, and the snowpack thermal resistance (thermal insulation properties) is used. In fact, this ratioing images could help to eliminate the radiometric distortions due to topography (except layover and shadowing) as well as minimise the effect of soil roughness on the signal. Then, the algorithm infers the SWE from the estimated thermal resistance and a measure of the mean density of the snowpack. Since its development, this approach, named Equeau [EKO], has only been applied for dry snow cover less than 1.3 m deep and in cold winter conditions [1,2]. To apply Equeau in a mountainous environment, the effects of this new environment on both the SAR signal and the Equeau principles (algorithm) have to be evaluated. The critical variables to study are the effect of severe topography, the forest density and the snow cover characteristics (depth >2m).

Besides, due to the slant projection of SAR systems, radar images have specific geometric and radiometric distortions. The geometric distortions are associated with radar sensor

*This study have been financed by the Canadian Space Agency

viewing geometry, satellite movement, earth curvature and rotation. The radiometric distortions depend strongly on the terrain (slope) and increase significantly in mountainous areas (shadowing, layover effects). In the case of radar shadow, there is no signal to normalise, and no improvement is to be expected. The radiometric slope correction is only possible by the use of high resolution digital elevation models (DEM) or radar interferometry [3]. However, since DEM data contain some uncertainties in the height information, it is conceivable that more noise could be introduced when the local slopes are calculated [4]. Following a literature review, two algorithms have been implemented, the ones suggested by Ulander [3] and Van Zyl [4] for the radiometric slope correction of the RADARSAT-1 images acquired over Mount Sprouatt.

II. METHODOLOGY

A. Data Sets

The data sets consists of topographic database, land cover database and remote sensing data. TRIM (Terrain Resource Information Management) 1:20 000 maps and BTM Land cover database (20 classes) were used to correct the geometry of images and support land cover classification and interpretation. The horizontal and vertical accuracy of TRIM data is 4 and 5 meters, respectively. The cartographic projection of TRIM is in UTM, zone10, Datum NAD83. A Digital Elevation Model (DEM) is required in this study for orthorectifying the satellite imagery and for determining the local surface orientation. The DEM comes from the TRIM database and were generated from 1:20 000 scale maps. The spatial resolution (posting) of the DEM is 25 meters, with a vertical accuracy of 10 meters. The DEM posting were

resampled to 10m to be the same resolution as the RADARSAT imagery.

Two winter and one summer RADARSAT-1 images were acquired and provided by RADARSAT International, Vancouver, as Path Image (SGF) products in CEOS format. In addition, a Landsat ETM+ image was used to produce in parallel a land cover classification for Equeau (Table 1).

Table 1
Characteristics of Remote Sensing Data Utilized

Date	Type	Resolution	Mode	Orbite
23 Sept. 2000	LANDSAT-7/ETM+	30 m, 15 m		
03 March 2001	RADARSAT-1	8 m	F2	Desc.
27 March 2001	RADARSAT-1	8 m	F2	Desc.
18 March 2001	RADARSAT-1	8 m	F2	Desc.

B. Field data

In order to observe the environmental conditions prevailing on Mount Sprouatt at the time of the RADARSAT image acquisitions (table 1), three field surveys were conducted. On March 3, the snow had already melted at low altitudes but higher on the mountain, the snow cover was still in place and generally dry (about 2m depth). Snow sampling was done on three sites and detailed snow pits were done on two sites. On March 28, the snow cover was already in the melting process. On upper altitudes, only the top 30 cm was isothermal and moist, according to the surveyors. The data collected were the same as in March 3 but since the snow was wet, the profile was done on the top layers only. On August 17, soil samples were taken from two sites. Both sites were fairly moist with 43% (Site #1) and 55% (Site #2) of water.

Those data give good idea of the conditions prevailing at the time of image acquisitions but they are representative of one slope aspect only

(West) and therefore may not completely describe the whole situation.

C. Backscattering coefficients calculation

The first processing step for SAR images is converting digital values to backscatter coefficients. In order to calculate the backscatter coefficient and later correct the radiometric effects associated with topographically distorted radar images, the angle of incidence of the radar beam is calculated for each pixel of the image. Calculation is carried out in EASI PACE™ using the SARINC function. The look-up table inversion is carried out using SARBETA function to create an image of brightness expressed in power (Beta). To obtain the values of Sigma, which represent the backscattering coefficient, we use SARSIGM function. The latter uses the segment of radar incidence angles described previously. Since both the radiometric methods used in this project to correct the relief effect require Beta nought (Ulander) and the backscattering coefficient (Van Zyl), these values were calculated and orthorectified for each image.

D. Geometric correction and Orthorectification

Orthorectification was completed on the RADARSAT imagery and Landsat imagery in order to correct for relief displacement and distortion induced by viewing geometry. Georeferencing for orthorectification was obtained using 1:20 000 TRIM road and hydrology vectors and a 10 m digital elevation model (DEM) created by BC Government. Orthorectification was performed using a DEM and rigorous geometric correction model provided in Ortho-Engine™. The first step in the orthorectification of RADARSAT and Landsat imagery is the extraction of orbital information and ephemeris data from the

header file. This information is used with ground control points (GCPs) to generate the orthorectification model (radargrammetric approach).

GCPs matching the TRIM vector data with corresponding points on the RADARSAT imagery were collected. Once collected, these points were tagged with an elevation obtained from a file containing the TRIM DEM. During the process, the mathematical model was updated automatically and reported the RMS error. In this way, it was easier to define and improve a solid geometric model. Using this approach, an error coming from a bad GCP can be easily identified and corrected or rejected. Also, to ensure a perfect overlap between the three RADARSAT images, GCPs common to each image were identified and measured.

For each image, 20 ground control points and 15 to 16 check points were measured on each RADARSAT images. The RMS error of 4 to 6 meters was obtained for control points and around 8 meters on check points. The residual obtained from check points are more significant than those obtained from the GCP, since they represent a real measure of the model on the image. Image resampling was done using a Gamma filter of 5 X 5 in order to reduce speckle.

The Landsat multispectral bands 3, 4, and 5 was orthorectified in a manner similar to that of the RADARSAT imagery.

E. Radiometric Correction of Topographic Effects

For the radiometric correction of the topographic effects on RADARSAT images acquired of Mount Sproatt, we applied two methods (1,2): These methods consider the inclination of the backscattering surface in azimuth and in range, in order to achieve more accurate corrections. The first, by Van Zyl [3] uses the $\sin \eta_r$ as the projection factor, while the second formulation, established by Ulander

[4] uses the $\cos \psi$ as the projection factor. The ψ is complementary to the smallest angle between the surface normal and the image plan.

$$\text{Van Zyl method : } I = K \frac{\sin(\eta_r)}{\sin(\eta_r)} \quad (1)$$

Where :

I is the intensity of the signal in the image;
 η_r is the local incidence angle of the surface;
 η is the incidence angle of the radar;

$$\text{Ulander method : } \sigma^\circ = \beta^\circ \cos \psi \quad (2)$$

Where :

σ° is the backscattering coefficient per unit ground area;
 β° is the brightness coefficient per unit image area;
 ψ is complementary to the smallest angle between the surface normal and the image

The preliminary step in the process of radiometric correction is the creation of intermediate images of angles. To reduce processing steps and error of manipulation, Viasat developed a software which carries out the radiometric correction and which creates and makes it possible to save all intermediate images, namely the various angle images (fig.1, fig. 2).

RESULTS

Both radiometric correction methods reduced the difference between the mean backscattering coefficient of slopes facing the radar and those looking away, by about 5 to 6 dB. With both methods, backscatter is significantly lowered on the slopes facing the radar. With the Ulander method, it is also decreased by 1 dB on slopes to the left and right, where the Van Zyl method has no effect.

This was expected since the Ulander method better describes the angular variation of the surface in relation to the look direction of the radar (full 3-D geometry). However, on slopes looking away, both methods only increased the signal by less than 1 dB.

For slopes under 30° , both algorithms have almost the same effect. The Ulander correction has more impact for slopes higher than 30° . The Van Zyl method has no effect on very steep slopes ($>45^\circ$) while the Ulander method does a drastic correction. This could be related to the fact that these slopes are on the order of the radar incidence angle (39° - 42°). Nevertheless, it is clear that for steep slopes ($>30^\circ$), using the Ulander method will yield very different results than with the Van Zyl method. Consequently, these algorithms may be not appropriate for very steep slopes (fig.3).

If we now look at backscatter values after correction for all categories of aspect and slope on each image, the backscattering coefficients are significantly higher on facing slopes and significantly lower on opposite slopes, particularly for slopes between 16° and 45° . Although the Ulander method successfully attenuates the effect of local slopes and describes well the angular variation of the surface in relation to the look direction of the radar (right and left slopes) it may not compensate enough in such a mountainous environment (very steep slopes).

We have also compared the mean ratio between the backscattering coefficients of the winter dry snow image and the summer image (March 3 / August 18) using original values and after applying the Ulander radiometric slope correction on each image. The mean backscattering ratio between the uncorrected images is not generally correlated to the slope angle and the difference between aspects is generally under 1 dB (Fig. 4). Comparing the backscattering ratio after applying the Ulander correction, the only significant changes are with the facing steep slopes. This may be due

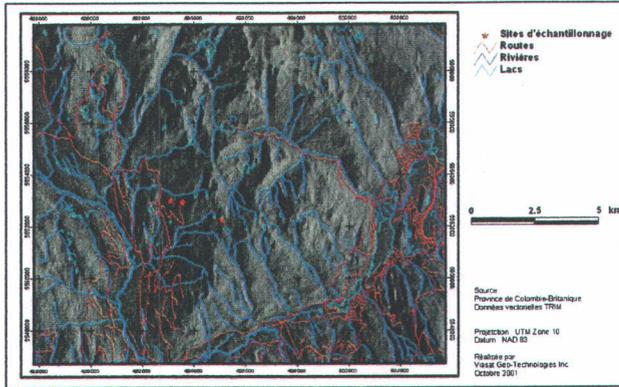


Fig. 1 - Image of angle ψ , between the local surface normal and the image normal generated from the DEM and RADARSAT imaging geometry. The image is used for converting the radar reflectivity into radar cross section

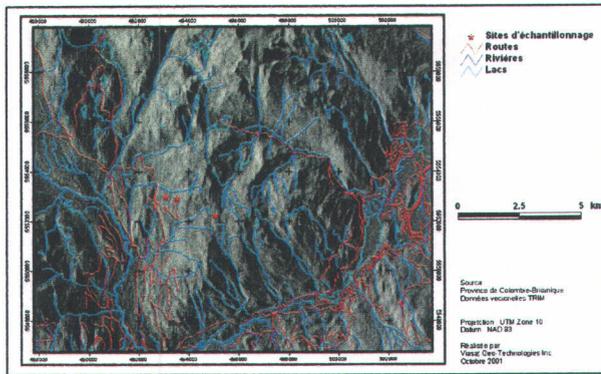


Fig. 2 - Local incidence angle η_r image generated from DEM and RADARSAT geometry. The image is used by the Van Zyl method to applied radiometric correction.

to the fact that the radiometric correction algorithm is not a linear function. Therefore, for most aspects, it seems that the local slope effects (except layover and shadowing) are well compensated with a backscattering ratio using original images when the images are acquired in the same relative orbit (cycle of 24 days for RADARSAT). Consequently, the radiometric correction is not necessary for EQeau application in mountainous area. However, to study the effect of the geographical or environmental parameters on a given image (a particular acquisition date), we

have used the backscatter values of the Ulander corrected images.

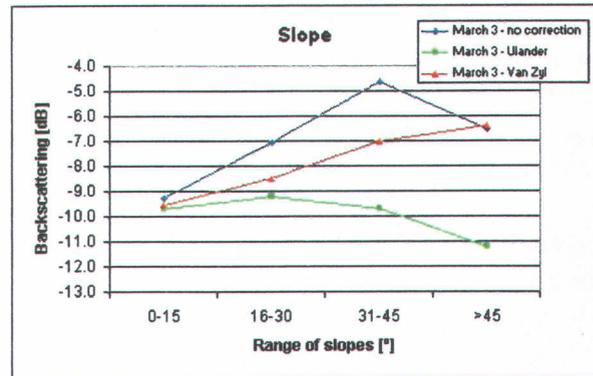


Fig. 3 - Effect of radiometric correction as a function of the slope steepness

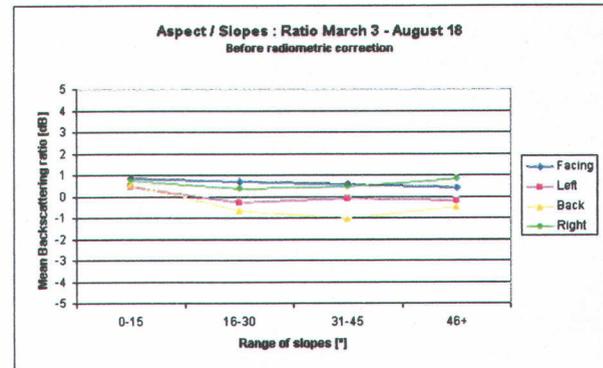


Fig. 4 - Variation of the non-corrected backscattering ratio as a function of aspect and slope.

CONCLUSIONS

For the radiometric slope correction of the RADARSAT-1 images acquired over Mount Sproatt in the Coast Mountains, we have implemented the algorithms suggested by Van Zyl [3] and Ulander [4]. For slope less than 30°, both algorithms have almost the same effect. But, for steep slopes (>30°), using the Ulander method will yield very different results than with the Van Zyl method. Consequently, both algorithms may be deficient for very steep slopes. The Ulander method successfully attenuates the effect of

local slopes and describes well the angular variation of the surface in relation to the look direction of the radar (right and left slopes). But it may not compensate enough in such a mountainous environment (very steep slopes). However, it would be very interesting to apply the Ulander method in a more moderate environment (Eastern Canada) to be able to use images from two different relative orbits (different local incidence angle) in EQeau or others multitemporal applications.

The EQeau [eko] algorithm performs a ratio between two SAR images (a winter and a snow-free image). This ratio could be applied in mountainous areas and should eliminate the radiometric distortions due to topography (except layover and shadowing) as well as minimise the effect of soil roughness on the signal. The mean backscattering ratio between the uncorrected images is not generally correlated to the slope angle and the difference between aspects is generally under 1 dB. Therefore, for most aspects, it seems that the local slope effects (except layover and shadowing) are well compensated with a backscattering ratio using original images when the images are acquired in the same relative orbit (cycle of 24 days). Therefore, radiometric correction is not essential for EQeau application in a mountainous area, as long as the reference image do not induce too much variation. The radiometric correction is however needed to study the effect of the geographical or environmental parameters on a single image.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] BERNIER, M., J.P. FORTIN, Y. GAUTHIER, R. GAUTHIER, R. ROY ET P. VINCENT, 1999. «Determination of Snow Water Equivalent using RADARSAT Data in Eastern Canada» Hydrological Processes, vol 13, pp. 3041-3051.
- [3] VAN ZYL, J. J., CHAPMAN, B.D., DUBOIS, P., SHI, J., 1993. The effect of Topography on SAR Calibration, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-31, No. 5, September 1993.
- [4] ULANDER M. H., 1996, Radiometric Slope Correction of Synthetic-Aperture Radar Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-34, No. 5, September 1996.

ANNEXE 2

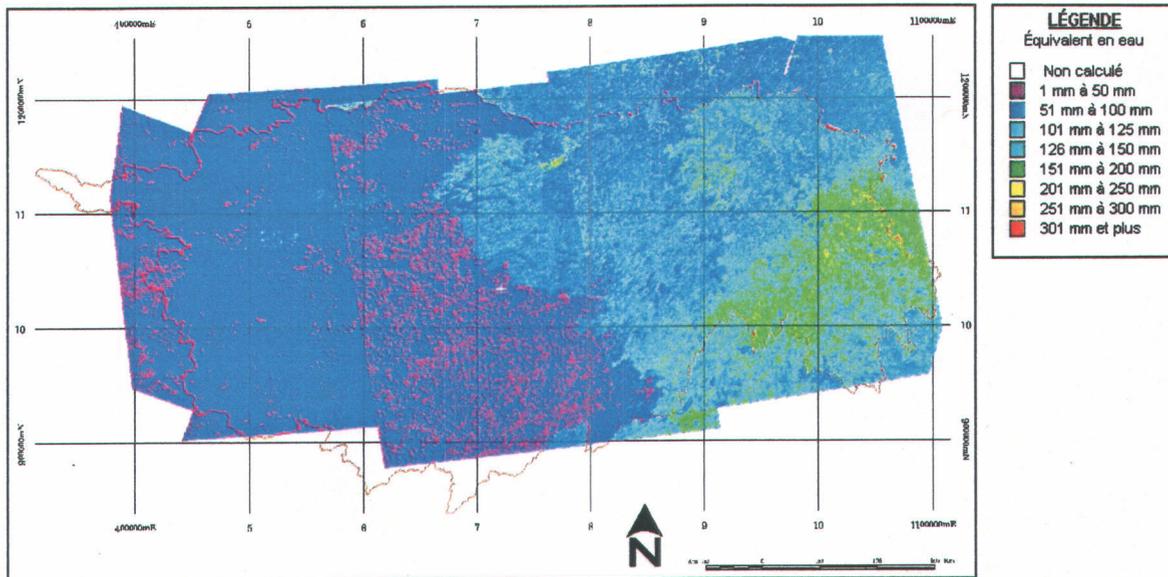


Figure 34 : Carte des équivalents en eau du 4, 7 et 10 janvier 2001 avec densités faibles à l'ouest

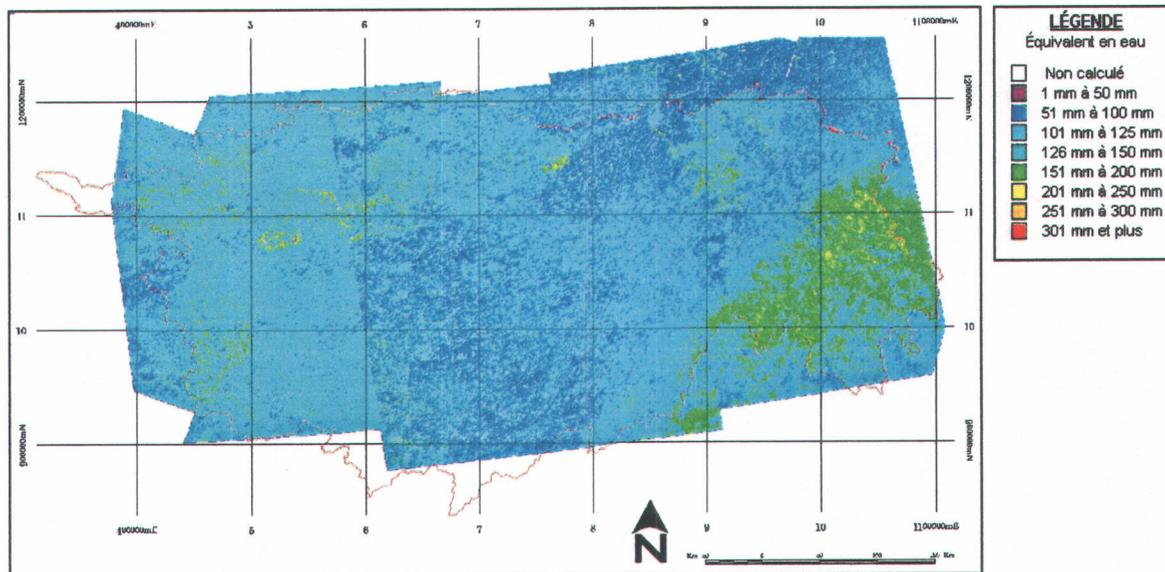


Figure 35 : Reprise de la carte des équivalents en eau du 4, 7, 10 janvier 2001 en utilisant des densités plus homogènes