

**Record Number:** 16310  
**Author, Monographic:** Bernier, M.//Fortin, J. P.//Gauthier, Y.//Turcotte, R.//Royer, A.  
**Author Role:**  
**Title, Monographic:** Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport final  
**Translated Title:**  
**Reprint Status:**  
**Edition:**  
**Author, Subsidiary:**  
**Author Role:**  
**Place of Publication:** Québec  
**Publisher Name:** INRS-Eau  
**Date of Publication:** 1999  
**Original Publication Date:** 15 janvier 1999  
**Volume Identification:**  
**Extent of Work:** xi, 56  
**Packaging Method:** pages  
**Series Editor:**  
**Series Editor Role:**  
**Series Title:** INRS-Eau, rapport de recherche  
**Series Volume ID:** 523 f  
**Location/URL:**  
**ISBN:** 2-89146-264-5  
**Notes:** Rapport annuel 1998-1999  
**Abstract:** Rapport rédigé pour Prévisions et ressources hydriques, Hydro-Québec  
Porte le numéro R523f en couverture  
10.00 \$  
**Call Number:** R000523 f  
**Keywords:** rapport/ ok/ dl

**SUIVI DU COUVERT NIVAL À L'AIDE  
DES DONNÉES DE RADARSAT**

**Rapport final pour**

**Prévisions et Ressources Hydriques  
Hydro-Québec**

**par**

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

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

**Rapport de recherche No R523f**

**15 janvier 1999**

© INRS-Eau, 1999

ISBN: 2-89146-349-8

## **L'ÉQUIPE DE RECHERCHE :**

Monique Bernier, professeure en télédétection

Jean-Pierre Fortin, professeur en hydrologie

Yves Gauthier, agent de recherche en télédétection et géomatique

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

Alain Royer, technicien en informatique



# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>vii</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJECTIFS DU PROJET.....</b>	<b>3</b>
<b>3. DEUXIÈME VERSION DU PROTOTYPE EQEAU .....</b>	<b>5</b>
3.1 NOMEMCLATURE DES FICHIERS .....	5
3.2 LÉGENDE DU BITMAP.....	5
3.3 DÉCOUPAGE DE LA MATRICE D'OCCUPATION DU SOL .....	6
3.4 MODULE « ISOLIGNE ».....	7
3.5 INTÉGRATION PAR MAILLES .....	7
3.6 INTÉGRATION PAR BASSIN .....	7
3.7 CALCUL DE L'ÉQUIVALENT EN EAU SUR LES LACS .....	7
<b>4. ALGORITHMES POUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU ET ANALYSE DE LA PRÉCISION DES ESTIMÉS .....</b>	<b>9</b>
4.1 ALGORITHMES POUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU À PARTIR DES IMAGES RADARSAT.....	9
4.2 PRÉCISION DES ESTIMÉS EXTRAITS DES IMAGES RADARSAT VERSUS LES RELEVÉS DES SITES EXPÉRIMENTAUX.....	11
4.3 PRÉCISION DES ESTIMÉS EXTRAITS DES IMAGES VERSUS LES RELEVÉS DES STATIONS NIVOMÉTRIQUES D'HYDRO-QUÉBEC.....	12
4.4 CONCLUSION .....	13
<b>5. CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE.....</b>	<b>19</b>
5.1 IMAGES PRINTANIÈRES DISPONIBLES.....	19
5.2 ALGORITHMES DE CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE .....	19
5.3 RÉSULTATS.....	21
5.4 CONCLUSION .....	23

<b>6.</b>	<b>SUIVI DE L'ÉTENDUE DU GEL DU SOL.....</b>	<b>25</b>
6.1	IMAGES AUTOMNALES DISPONIBLES .....	25
6.2	ANALYSE DES IMAGES .....	25
6.3	CONCLUSION .....	27
<b>7.</b>	<b>ANALYSE DES IMAGES SCANSAR.....</b>	<b>29</b>
7.1	INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DES IMAGES SCANSAR .....	29
7.2	CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES SCANSAR.....	29
7.3	BILAN DES ACQUISITIONS .....	31
7.4	INTÉGRATION DES IMAGES SCANSAR DANS EQEAU .....	31
7.4.1	<i>Pré-traitements</i> .....	31
7.4.2	<i>Utilisation dans EQeau</i> .....	32
7.5	ANALYSE DE LA QUALITÉ RADIOMÉTRIQUE DES IMAGES.....	32
7.5.1	<i>Variation du signal à l'intérieur d'une image</i> .....	32
7.5.2	<i>Variation du signal entre plusieurs images</i> .....	36
7.6	CONCLUSION .....	37
<b>8.</b>	<b>DÉLIMITATION DES TROIS SOUS-BASSINS AMONTS DE LA RIVIÈRE LA GRANDE PAR PHYSITEL.....</b>	<b>39</b>
8.1	ÉTAPES DE PRODUCTION.....	39
8.2	PROBLÈMES RENCONTRÉS .....	39
8.3	SOLUTIONS APPORTÉES.....	39
8.4	RÉSULTATS.....	40
<b>9.</b>	<b>CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL DES SOUS-BASSINS DE LG4, LAFORGE ET CANIAPISCAU.....</b>	<b>43</b>
9.1	CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES LANDSAT-TM.....	43
9.2	CORRECTION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES LANDSAT-TM EFFECTUÉE PAR VIASAT .....	45
9.3	CLASSIFICATION DES CINQ IMAGES LANDSAT-TM .....	45
9.4	VALIDATION DE LA CLASSIFICATION .....	48
<b>10.</b>	<b>CAMPAGNES DE TERRAIN.....</b>	<b>51</b>
10.1	CAMPAGNE D'OCTOBRE 1998.....	51
10.2	CAMPAGNE DE NOVEMBRE 1998 .....	51
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>53</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>55</b>

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1 : PROTOCOLE CONCERNANT LA NOMENBLATURE DES FICHIERS .....	6
TABLEAU 4.1 : VARIATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN D'HIVER ET DES ACQUISITIONS D'IMAGES .....	10
TABLEAU 4.2 : COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS ET MESURÉS (MODE S1).....	11
TABLEAU 5.1 : VALEURS MOYENNES DES COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION DES TROIS PRINCIPALES OCCUPATIONS DU SOL .....	20
TABLEAU 5.2 : POURCENTAGE DES PIXELS DE L'IMAGE DU PRINTEMPS CLASSÉS COMME NEIGE HUMIDE VARIATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN D'HIVER ET DES ACQUISITIONS D'IMAGES .....	21
TABLEAU 6.1 : SOMMAIRE DES ACQUISITIONS D'IMAGES.....	25
TABLEAU 7.1 : CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES RADARSAT ACQUISES SELON TROIS MODES DIFFÉRENTS .....	30
TABLEAU 7.2 : BILAN DES ACQUISITIONS EN MODE SCANSAR POUR L'ANNÉE 1997-1998 .....	31
TABLEAU 7.3 : SOMMAIRE DES DISCONTINUITÉS OBSERVABLES .....	33
TABLEAU 8.1 : SUPERFICIES COMPARÉES DES DIFFÉRENTES LIMITES DES SOUS-BASSINS.....	40
TABLEAU 9.1 : CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES LANDSAT-TM .....	43
TABLEAU 9.2 : CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES GÉORÉFÉRENCÉES .....	45
TABLEAU 9.3 : PROPORTION DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.....	47
TABLEAU 9.4 : PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION - MATRICES DE CONFUSION .....	49
TABLEAU 10.1 : IMAGES ACQUISES EN NOVEMBRE 1998 .....	52
TABLEAU 10.2 : DONNÉES DE LA STATION #2 SUD LORS DE L'ACQUISITION DES IMAGES .....	52

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 4.1 : PRÉCISION DE L'ALGORITHME D'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DU COUVERT DE NEIGE .....	14
FIGURE 4.2 : CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU – HIVER 1998. LES RÉSULTATS SONT INTÉGRÉS SELON DES MAILLES DE 500M DE CÔTÉ .....	15
FIGURE 4.3 : LOCALISATION DES STATIONS NIVOMÉTRIQUES D'HYDRO-QUÉBEC ET DES SITES EXPÉRIMENTAUX OÙ L'INRS-EAU EFFECTUE SES LIGNES DE NEIGE .....	16
FIGURE 4.4 : COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU INTERPOLÉS À PARTIR DES MESURES AUX STATIONS NIVOMÉTRIQUES AVEC LES MESURES AUX SITES EXPÉRIMENTAUX .....	17
FIGURE 5.1 : AUGMENTATION DU CONTRASTE SUR TROIS IMAGES RADARSAT (S1) DE L'HIVER ET DU PRINTEMPS 1998.....	22
FIGURE 6.1 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION À L'AUTOMNE 1996 POUR LES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE .....	26
FIGURE 6.2 : VARIATION DE LA RÉTRODIFFUSION ASSOCIÉE AU REFROIDISSEMENT DU SOL OU AU GEL DE L'EAU .....	28
FIGURE 7.1 : IMAGES SCANSAR DU 9 MAI 1998 .....	34
FIGURE 7.2 : VARIATION DU SIGNAL SELON UNE COUPE TRANSVERSALE (1 PIXEL SUR 10) À LA LIGNE 5861 .....	35
FIGURE 7.3 : VARIATION TEMPORELLE DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION MOYEN.....	36
FIGURE 8.1 : LIMITES DES TROIS SOUS-BASSINS AMONTS DE LA RIVIÈRE LAGRANDE .....	41
FIGURE 9.1 : IMAGES LANDSAT-TM NÉCESSAIRES À LA CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL.....	44
FIGURE 9.2 : CARTE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	48
FIGURE 10.1 : DONNÉES DE LA STATION CLIMATOLOGIQUE DU SITE #2 SUD POUR L'AUTOMNE 1998 .....	52

## SOMMAIRE

RADARSAT-I, le premier satellite de télédétection canadien, a été lancé le 4 novembre 1995 et a été déclaré opérationnel le 1er avril 1996. Il a été conçu pour répondre aux besoins des scientifiques et des utilisateurs canadiens et internationaux en leur fournissant rapidement des images au moyen d'un radar à synthèse d'ouverture (RSO) pour une multitude d'applications. Le programme RADARSAT constitue l'une des composantes majeures du Programme spatial canadien. D'ailleurs, l'Agence spatiale canadienne travaille actuellement à la mise en place de RADARSAT- II afin de garantir la continuité des données RSO et, via le programme ADRO (Application Development and Research Opportunity), a offert les 20 images RADARSAT-I nécessaires à la réalisation de ce projet de deux ans (1997 et 1998): *Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT.*

Durant la première année du projet RADARSAT, l'analyse des relevés de terrain et des images Standard en mode S7 (45°-49°) et en mode S1 (20°-27°) de l'hiver 1997 a permis d'établir un algorithme RADARSAT provisoire. Cet algorithme ne diffère de celui d'ERS que par la valeur des paramètres. De plus, le livrable clé de la première année a été la réalisation conjointe par Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau de la première version du *prototype EQeau*. Ce prototype intègre les algorithmes développés par l'INRS-Eau pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige à partir des images RADARSAT et il est implanté dans l'environnement MapInfo™. Trois sous-modules de calcul ont été programmés sous forme de DLL par l'INRS-Eau (Calcul de l'équivalent en eau, intégration par mailles, intégration par sous-bassin) ainsi qu'un module de transformation d'une matrice binaire en Bitmap. De son côté, VIASAT Géo-Technologie a intégré les quatre DLL et a développé une première version de l'interface avec le logiciel MapInfo™.

Durant la seconde année, suite à l'analyse des images Standard (mode S1) et des données de terrain de l'hiver 1998, les paramètres de l'algorithme RADARSAT ont été modifiés, afin d'obtenir une meilleure évaluation de l'équivalent en eau moyen, particulièrement à la fin de l'hiver (mars). En effet, les estimés de l'équivalent en eau dérivés des images en mode S1 sont meilleurs que ceux dérivés des images en mode S7 et sont comparables à la moyenne des valeurs mesurées au sol (sites d'échantillonnage) aussi bien en janvier qu'en mars. Les équivalents en eau dérivés des images RADARSAT (mode S1) pour les hivers 1997 et 1998 ont aussi été comparés aux valeurs mesurées aux stations nivométriques permanentes d'Hydro-Québec. Cette analyse a montré que les images RADARSAT en plus de fournir des valeurs moyennes d'équivalent en eau

comparables aux valeurs mesurées au sol par carottage, permettent de mieux connaître la distribution spatiale du couvert nival sur le territoire de la Rivière La Grande.

L'analyse des images Standard d'avril 1997 et 1998 a montré que l'algorithme extrait de la littérature et utilisé habituellement pour distinguer automatiquement la neige humide de la neige sèche ne s'applique pas aux caractéristiques physiques de cette région (forêts ouvertes et landes). Toutefois, les changements du signal des surfaces due à la présence de neige humide sont visibles sur les images RADARSAT ce qui permet une interprétation correcte de l'état de la neige au sol. Néanmoins, la neige humide a pu être distinguée automatiquement des surfaces sans neige (sol très humide) sur l'image en mode S1 du 6 mai 1998. La carte réalisée montre que, mis à part les plans d'eau, seulement 4% du territoire était encore couvert de neige humide (fin de la période de fonte) ce qui correspond aux observations recueillies sur le terrain. D'autre part, sur les images Standard en mode S1 de l'automne 1996, il a aussi été possible de détecter le refroidissement progressif du sol entre le début d'octobre (dégelé) et la fin de novembre (gelé en surface) par une baisse moyenne du signal de 2 dB.

Vu l'immensité du bassin de la rivière La Grande, une analyse bénéfices-coûts a montré l'intérêt économique d'utiliser les images ScanSAR (500 km) au lieu des images Standard (100 km). L'information contenue dans les images ScanSAR s'apparente à celle des images Standard et la variation temporelle des coefficients de rétrodiffusion semble correspondre aux conditions environnementales observées. Ces observations pourraient indiquer une certaine stabilité temporelle du mode ScanSAR et permettre éventuellement la création de rapports de rétrodiffusion (image d'hiver – image de référence) valables. De tels rapports pourraient également amoindrir les discontinuités entre les faisceaux. Il semblerait donc raisonnable d'appliquer l'algorithme de l'équivalent en eau sur les images ScanSAR même si elles ne sont pas encore étalonnées.

Durant la deuxième année, des modifications ont été aussi apportées par l'équipe de l'INRS-Eau aux différents modules de calcul du *prototype EQeau* afin de le rendre mieux adapté aux différents types d'images RADARSAT et plus performant. De même, l'équipe de Viasat Géo-Technologie a modifié son interface afin de la rendre plus conviviale et fonctionnelle pour l'utilisateur. Cela constitue la deuxième version du *prototype EQeau* qui sera livré ce mois-ci (janvier 1999) à Hydro-Québec.

Parallèlement, Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau ont préparé en décembre 1997 avec l'appui d'Hydro-Québec, une proposition pour le Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3) de l'Agence Spatiale canadienne, administré par le Centre canadien de télédétection. Cette proposition visait à obtenir du financement complémentaire (150 000\$) pour la démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT sur la moitié amont du bassin de la Rivière La Grande et la faisabilité opérationnelle du prototype EQeau à l'hiver 1999. La proposition EQeau a été retenue et financée par EOP3 et a officiellement débutée en avril 1998 et se poursuivra toute l'année 1999. Dans le cadre d'EQeau, un plan d'acquisition d'images a été préparé par l'INRS-Eau pour l'hiver 1999. Trois images RADARSAT en mode Wide (W1) et une image ScanSAR ont été acquises en novembre 1998 et quatre autres images seront aussi acquises en janvier et en mars 1999. La cartographie d'occupation du sol à partir d'images Landsat et le contour détaillé des trois sous-bassins amonts (LG4, La Forge et Caniapiscau) à l'aide de PHYSITEL ont aussi été réalisés à l'automne 1998. Cette cartographie et ces contours détaillés seront utilisés dans le *prototype* EQeau en février et en mars 1999 afin de démontrer l'efficacité de l'approche RADARSAT.

# 1. INTRODUCTION

---

Trois objectifs avaient été établis pour ce projet RADARSAT. Les deux premiers objectifs étaient (1) d'adapter aux données de RADARSAT (bande C-polarisation HH) les algorithmes empiriques développés à partir d'ERS-1 (bande C- polarisation VV) afin d'estimer l'équivalent en eau de la neige au sol, ainsi que d'autres variables reliées au suivi du couvert nival, et (2) de trouver le ou les modes d'images adaptés au contexte du bassin de la rivière La Grande. En effet, le satellite RADARSAT offre la possibilité d'acquérir les images sous différents modes. Par exemple, les images en mode Standard (résolution au sol de 30 m et une couverture de 100 km de largeur) peuvent être acquises dans sept gammes d'angles d'incidence entre 20° et 49°. RADARSAT possède aussi le mode Wide (résolution au sol de 30 m) qui peut balayer une couverture de 150 km de largeur et le mode ScanSAR (résolution au sol de 100 m) qui peut balayer une largeur de 350 km et même 500 km par orbite. Le troisième objectif qui découle des deux autres était la mise en place d'un *prototype fonctionnel* pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige via des images satellitaires. Notons que Viasat Géo-Technologie collabore avec l'INRS-Eau à la réalisation du projet et particulièrement à celle du troisième objectif.

Ce rapport discute de l'ensemble des activités réalisées depuis deux ans et des principaux résultats obtenus. La majorité des activités sont reliées au développement de l'algorithme pour estimer la distribution spatiale de l'équivalent en eau du couvert nival à partir d'images RADARSAT et la mise en place d'un *prototype fonctionnel*. Plusieurs livrables accompagnent ce rapport, mais l'essentiel est la seconde version du *prototype EQeau*, une réalisation conjointe de Viasat Géo-Technologie et de l'INRS-Eau. Les livrables attendus sont:

- 1) La seconde version (version fonctionnelle) du *prototype EQeau* et une démonstration conjointe (Viasat-INRS) du logiciel *EQeau* chez Hydro-Québec prévue à la mi-janvier (Chapitre 3).
  - 2) Les algorithmes pour l'estimation de l'équivalent en eau à partir des images RADARSAT intégrés dans *EQeau* et une analyse de la précision de ces estimés (Chapitre 4).
  - 3) La cartographie de la neige humide du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT (Standard) d'avril et de mai 1998 (Chapitre 5).
-

- 4) Le suivi du gel du sol du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT (Standard) de l'automne 1996 (Chapitre 6).
- 5) L'analyse des images ScanSAR (Chapitre 7).
- 6) Le contour détaillé du sous-bassin de *LG4* pour utilisation par *EQeau* (Chapitre 8).

Dans le cadre du projet pilote *EQeau*, des activités additionnelles ont été réalisées par l'INRS-Eau durant l'automne 1998, en préparation de la démonstration de l'hiver 1999:

- 7) Le contour détaillé des sous-bassins *Laforge* et *Caniapiscou* pour utilisation par *EQeau* (Chapitre 8).
  - 8) La cartographie de l'occupation du sol (projection Lambert) de la moitié amont (*LG4*, *Laforge* et *Caniapiscou*) du bassin de la Rivière La Grande à partir de cinq images TM du satellite Landsat pour utilisation par *EQeau* (Chapitre 9).
  - 9) Une première campagne de terrain du 12 au 15 octobre 1998 pour vérifier l'instrumentation au sol et une seconde campagne du 9 au 12 novembre 1998 pour connaître les conditions environnementales lors de l'acquisition des images RADARSAT (Wide et ScanSAR) de référence (Chapitre 10).
-

## **2. OBJECTIFS DU PROJET**

---

Rappelons ici les trois objectifs du projet RADARSAT (1997 et 1998):

- 1) Estimation de la distribution spatiale, à une date donnée, des paramètres suivants:
  - a) l'équivalent en eau du couvert nival;
  - b) la neige humide (neige sèche vs neige humide ou neige humide et absence de neige);
  - c) le sol gelé;

et cela à des fins de prévisions hydrologiques pour la gestion des stocks énergétiques, la planification de la production hydroélectrique et la détermination des risques d'inondation.

- 2) Détermination du produit ou de la combinaison de produits du satellite RADARSAT susceptible(s) de fournir les estimations définies ci-dessus avec la précision souhaitée.
- 3) Mise en place d'un prototype fonctionnel (EQeau) pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige via des images satellitaires (ERS-1 ou RADARSAT).

Le but ultime de cette recherche est de faire en sorte que les nouvelles méthodes utilisant les produits du satellite canadien RADARSAT soient intégrées au système de prévision hydrologique d'Hydro-Québec et ce pour l'ensemble du bassin de la rivière La Grande dans les prochaines années.

---



## **3. Deuxième version du prototype EQeau**

---

Ce chapitre résume les modifications apportées durant l'année 1998 au *prototype EQeau* (Bernier et al., 1998) par l'équipe de l'INRS-Eau. Ces modifications concernent principalement les modules de calcul, soient les DLL. Elles ont été faites afin de rendre le *prototype EQeau* mieux adapté aux différents types d'images RADARSAT ainsi que plus performant. Des modifications ont aussi été apportées à l'interface par l'équipe de Viasat Géo-Technologie mais elles seront discutées dans leur rapport (Guide de l'utilisateur). L'intégration de l'ensemble de ces modifications constitue la deuxième version du *prototype EQeau* (objectif 3). Une démonstration de la fonctionnalité du logiciel *EQeau* conjointe Viasat-INRS sera faite prochainement chez Hydro-Québec.

### **3.1 Nomenclature des fichiers**

Le calcul des équivalents en eau nécessite plusieurs couches de données d'entrées (image d'hiver, image de référence, occupation du sol, densité moyenne de la neige), pour différentes dates et pour différentes régions et le résultat peut être intégré à différentes échelles et visualisé par classes. Le nombre de fichiers impliqués grossit donc rapidement et il est essentiel de déterminer un protocole des noms de fichiers (Tableau 3.1). Ce protocole a été déterminé par Viasat Géo-Technologie, Hydro-Québec et l'INRS-Eau. *EQeau* a alors été modifié pour recevoir en paramètres, tous les noms de fichiers d'entrées et de sorties. De même, *EQeau* prend aussi en paramètres, le nom des fichiers d'en-tête. Ces fichiers contiennent les informations sur la dimension, la résolution, la localisation et la projection des matrices.

### **3.2 Légende du bitmap**

*EQeau* a été modifié de façon à recevoir aussi en paramètre la légende permettant de créer le bitmap à partir de la matrice 16 bits des équivalents en eau. Le nombre et l'intervalle des classes pourront donc être fixés par l'utilisateur.

---

### 3.3 Découpage de la matrice d'occupation du sol

Les étapes de calcul de l'équivalent en eau seront effectuées image par image. Toutefois, à partir de 1999, elles seront basées sur une matrice d'occupation du sol qui couvre l'ensemble des trois sous-bassins (voir figure 9.2). *EQeau* a été modifié pour être en mesure d'utiliser la portion de la carte d'occupation du sol qui correspond à la zone couverte par l'image radar. Il utilise pour ce faire, les fichiers en-tête des images radar concernées. Auparavant, *EQeau* devait recevoir une matrice d'occupation du sol positionnée au même endroit et de même dimension que les images radar.

Tableau 3.1 : Protocole concernant la nomenclature des fichiers

Préfixe	Tous les fichiers	
AAJJTTO (an, jour julien, type, ordinal)		
Suffixe	Fichiers d'entrées	En-tête
.ref	image de référence	.hdr
.rad	image radar	.hdd
.occ	image d'occupation du sol	.hdo
.den	fichier de densité	
	Fichiers de sorties	
.eq*	matrice des Équivalents en eau	.hq*
.bq*	bitmap des Équivalents en eau	
.ma*	matrice des Équivalents en eau intégrés par maille	.hm*
.bm*	bitmap des Équivalents en eau intégrés par maille	
.sb*	fichier texte des résultats de l'intégration par sous-bassin	
.pm*	grille ASCII provenant de la matrice intégrée.	
Note : * est un nombre de 1 à 9 selon les essais effectués		

### **3.4 Module « isoligne »**

Une fonction a été rajoutée dans *EQeau* pour créer une matrice ASCII à partir des centroïdes de chaque maille de la matrice intégrée des équivalents en eau. Cette matrice ASCII pourra alors être importée dans un logiciel tel que *Surfer*, pour la création d'isolignes. Cette fonction remplace le module « Isoligne » préalablement envisagé.

### **3.5 Intégration par mailles**

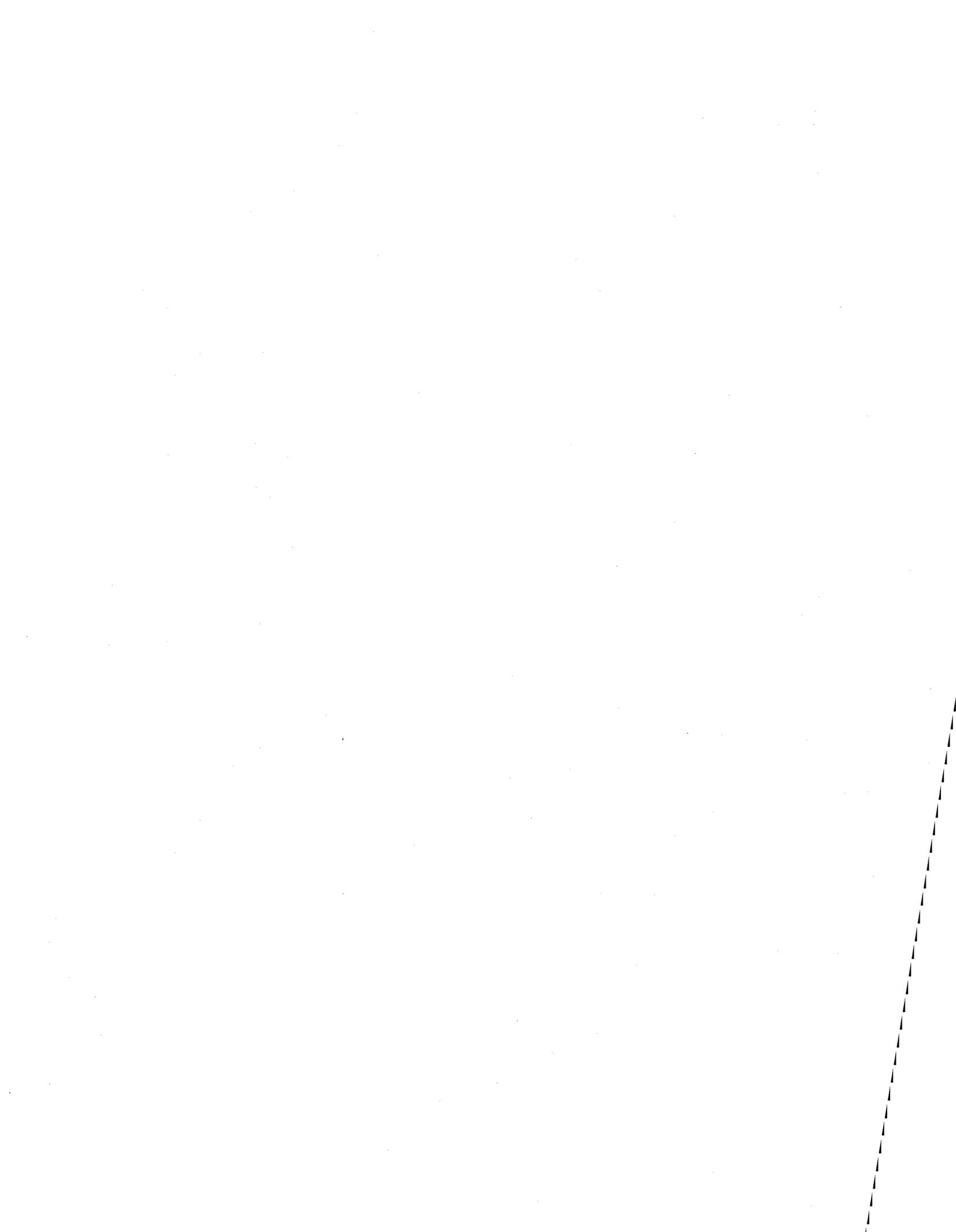
Le module d'intégration par mailles a été modifié pour créer automatiquement un fichier contenant les nouvelles coordonnées et la nouvelle dimension de la matrice intégrée. On s'assure ainsi que le bitmap créé pour affichage sera conforme à la matrice intégrée.

### **3.6 Intégration par bassin**

L'algorithme du module d'intégration par bassin a été corrigé car nous nous sommes aperçus que le calcul de la moyenne ne se faisait pas toujours correctement.

### **3.7 Calcul de l'équivalent en eau sur les lacs**

Dans la première version d'*EQeau*, la valeur d'équivalent en eau attribuée aux lacs était la moyenne calculée pour les pixels terrestres. Il avait été convenu d'utiliser plutôt 75% de la valeur calculée sur les landes, afin de se rapprocher de l'équivalent en eau réel mesuré sur les plans d'eau gelés. Toutefois, suite à la production de la carte d'occupation du sol, il s'avère que la classe lande n'est pas bien répartie sur tout le territoire et que la valeur calculée n'y serait probablement pas toujours représentative. D'autres alternatives seront éventuellement envisagées. Par exemple, la classe la plus commune (forêt ouverte) pourrait être utilisée, avec une pondération de 60% puisqu'on y trouve généralement plus de neige que dans les landes. Pour l'instant, la deuxième version d'*EQeau* va continuer à attribuer aux lacs la moyenne calculée pour les pixels terrestres.



## 4. ALGORITHMES POUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU ET ANALYSE DE LA PRÉCISION DES ESTIMÉS

---

### 4.1 Algorithmes pour l'estimation de l'équivalent en eau à partir des images RADARSAT

L'algorithme d'estimation de l'équivalent en eau comporte deux équations (Bernier et Fortin, 1998; Bernier *et al.*, accepté). Dans un premier temps, la résistance thermique du couvert de neige ( $R_{est}$ ) est estimée à partir des rapports des coefficients de rétrodiffusion extraits des images:

$$R_{est} = m (\sigma_h^\circ / \sigma_a^\circ) + b \quad (1)$$

où  $m$  et  $b$  sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la relation linéaire entre la résistance thermique du couvert de neige et le rapport de rétrodiffusion.

Afin d'obtenir les rapports des coefficients de rétrodiffusion, les coefficients de rétrodiffusion des images d'hiver ( $\sigma_h^\circ$ ) sont soustraits d'une image de référence ( $\sigma_a^\circ$ ). Généralement, l'image de référence est une image d'automne où le sol est gelé ou complètement saturé, afin d'éviter les variations du signal dues à la teneur en eau.

Dans un second temps, l'équivalent en eau ( $E_{est}$ ) est calculé à partir de la résistance thermique estimée du couvert de neige ( $R_{est}$ ) et d'une densité moyenne de ce couvert représentative du secteur :

$$E_{est} = \alpha R_{est} \quad (2)$$

où  $\alpha$  varie en fonction de la densité de la neige.

Afin d'adapter aux données de RADARSAT, l'algorithme empirique développé à partir d'ERS-1 (objectif 1a), il a fallu sélectionner une image de référence pour chaque mode et redéfinir la pente et l'ordonnée à l'origine de l'équation (1). Pour le mode S7, l'image du 24 novembre 1996 a été sélectionnée et celle du 19 novembre 1997 pour le mode S1 (tableau 4.1). Idéalement, les paramètres de l'équation (1) seraient établis avec une longue série temporelle d'images ou une

---

vaste étendue de conditions du couvert de neige. Dans le cas actuel, nous ne possédons que trois images en mode S1 et deux images en mode S7 acquises dans des conditions hivernales à peu près similaires (tableau 4.1).

**Tableau 4.1: Sommaire des campagnes de terrain d'hiver et des acquisitions d'images**

Date des campagnes	Date d'acquisition des images RADARSAT	Sites d'échantillonnage			
		Hauteur [cm] Moy.	Eq.Eau [mm] Moy.	Densité [kg/m <sup>3</sup> ] Moy.	R.Th. [°Cm <sup>2</sup> /J] Moy.
29 oct. - 1 nov 1996	7 oct, 31 oct, 24 nov. 1996 (S1) 13 oct., 6 et 30 nov. 1996 (S7)	0 à 10	Non-mesuré		
10 - 13 février 1997	4 février 1997 (S1) 10 février 1997 (S7)	69	131	191	6.4
24 - 27 mars 1997	30 mars 1997 (S7)	80	179	224	5.4
17 - 20 nov. 1997	19 novembre 1997 (S1) 22 novembre 1997 (ScanSAR)	25	Non-mesuré		
2 - 6 février 1998	30 janvier 1998 (S1) 2 février 1998 (ScanSAR)	75	153	204	6.6
16 -19 mars 1998	19 mars 1998 (S1) 22 mars 1998 (ScanSAR)	78	177	226	5.2

L'algorithme d'estimation de l'équivalent en eau faisant appel à la résistance thermique du couvert de neige, il est dépendant des conditions de température de l'air prévalant lors des jours et même des semaines précédant l'acquisition de l'image. En fonction des données et des images recueillies jusqu'à maintenant, deux algorithmes ont été définis pour l'équation 1 et sont intégrés dans  $E_{Qeau}$  :

- a) Pour des conditions typiques de milieu d'hiver (janvier et février) , avec des températures de l'air généralement très basses et un couvert de neige moyen, les paramètres déterminés sont :  
m= 1.25, b= 8.
- b) Pour des conditions typiques de mars, avec des températures moins extrêmes et un couvert de neige à son maximum, les paramètres sont : m= 1.1, b= 6.5.

Il faut noter que ces valeurs sont optimisées pour les secteurs de forêts ouvertes et par conséquent, il pourrait sous-estimer la résistance thermique du couvert de neige dans les forêts denses et inversement, la surestimer sur les landes.

Dans le cas de l'équation 2, la densité de la neige variant selon l'occupation du sol, l'algorithme utilise une densité moyenne propre à chaque classe d'occupation du sol. Pour les images de l'hiver 1998, les densités moyennes sont celles mesurées lors des campagnes de terrain correspondantes.

## 4.2 Précision des estimés extraits des images RADARSAT versus les relevés des sites expérimentaux

La figure 4.1 compare les valeurs estimées à chacun des sites avec les valeurs mesurées (lignes de neige) à chacun des sites expérimentaux. À partir des deux images en mode S7, ayant une faible dynamique, l'algorithme surestime l'équivalent en eau moyen de 15 à 30 mm (12 à 17%), avec un écart-type de 30 à 40 mm (20 à 25%). Par contre, à partir des trois images en mode S1, les estimés moyens sont à moins de 10 mm de la moyenne des mesures de terrain. Des écart-types observés de +/- 20 à 30 mm (12 à 24%) sont toutefois dus à l'utilisation d'une densité moyenne dans l'algorithme, à l'incertitude sur les mesures de terrain elles-mêmes (+/- 20 à 30 mm), aux variations de la densité des arbres à l'intérieur même d'une classe d'occupation du sol et bien sûr, à la sensibilité du radar aux variations des propriétés diélectriques du sol.

Tableau 4.2: Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés (Mode S1)

Dates	Estimation sur les sites		Mesures aux sites (carottage)		Estimation sur l'ensemble de l'image		Mesures HQ (carottage)
	Moy [mm]	É-T [mm]	Moy [mm]	É-T [mm]	Moy [mm]	É-T [mm]	Moy [mm]
04/02/97	131	21	131	16	154	50	
03/03/97							135-195
30/01/98	157	17	148	15	169	44	
24/02/98							100-150
19/03/98	174	26	171	24	192	56	
04/04/98							180

D'ailleurs, le tableau 4.2 présente les équivalents en eau moyens estimés pour les sites d'échantillonnage à partir des trois images en mode S1, ainsi que les équivalents en eau mesurés sur le terrain par l'INRS-Eau (35 lignes de neige). Les estimés moyens sur l'ensemble des sites d'échantillonnage sont à moins de 10 mm (6 à 8%) de la moyenne des mesures de terrain ( +/- 20 à 30 mm ).

### **4.3 Précision des estimés extraits des images versus les relevés des stations nivométriques d'Hydro-Québec**

Le tableau 4.2 donne aussi les équivalents en eau moyens estimés pour l'ensemble des trois images Standard et les valeurs mesurées par Hydro-Québec à quatre stations nivométriques permanentes (La Grande 4, Lac Bertrand, Lac Kanaaupscow, Lac Frégates). Autant à l'hiver 1997 qu'à l'hiver 1998, les équivalents en eau moyens estimés pour chaque image complète sont supérieurs aux valeurs estimées ou mesurées sur les sites d'échantillonnage car les accumulations de neige au sol sont effectivement plus importantes au nord et à l'est du secteur d'étude (Figure 4.2). Les relevés d'Hydro-Québec du 3 mars 1997 donnent d'ailleurs un équivalent en eau moyen de 135 mm à la station nivométrique de LG4 alors que 195 mm ont été mesurés au Lac Bertrand (nord du secteur) et au Lac Kanaaupscow ( au nord-est).

Une autre façon de comparer les valeurs estimées par satellite et les valeurs mesurées au sol est d'interpoler les valeurs des stations nivométriques d'Hydro-Québec aux 35 sites expérimentaux. Cette interpolation est faite en utilisant les trois stations nivométriques les plus proches d'un site donné et en pondérant en fonction de la distance entre la station et le site expérimental (figure 4.3). Nous avons donc interpolé les équivalents en eau à partir des relevés de neige effectués entre le 28 mars et le 1<sup>er</sup> avril 1998. Comme le montre la figure 4.4, les valeurs interpolées sont généralement supérieures aux valeurs mesurées lors de la campagne du 16 au 19 mars même s'il n'y a pas eu de précipitation de neige entre la mi-mars et le 1<sup>er</sup> avril 1998. Cela signifie que l'équivalent en eau moyen de la neige au sol pour le secteur expérimental serait surestimé si l'on utilisait les valeurs mesurées aux stations nivométriques pour le déterminer. Par contre, tel que souligné précédemment les équivalents en eau extraits de l'image RADARSAT du 18 mars 1998 sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées.

---

## **4.4 Conclusion**

En somme, l'imagerie RADARSAT, en mode Standard (1), fournit un bon estimé de l'équivalent en eau moyen sur un territoire donné et produit une information très utile sur la distribution spatiale de la neige au sol sur ce territoire (figure 4.2). Nous espérons obtenir des résultats aussi valables avec les images en mode Wide (W1) à l'hiver 1999.

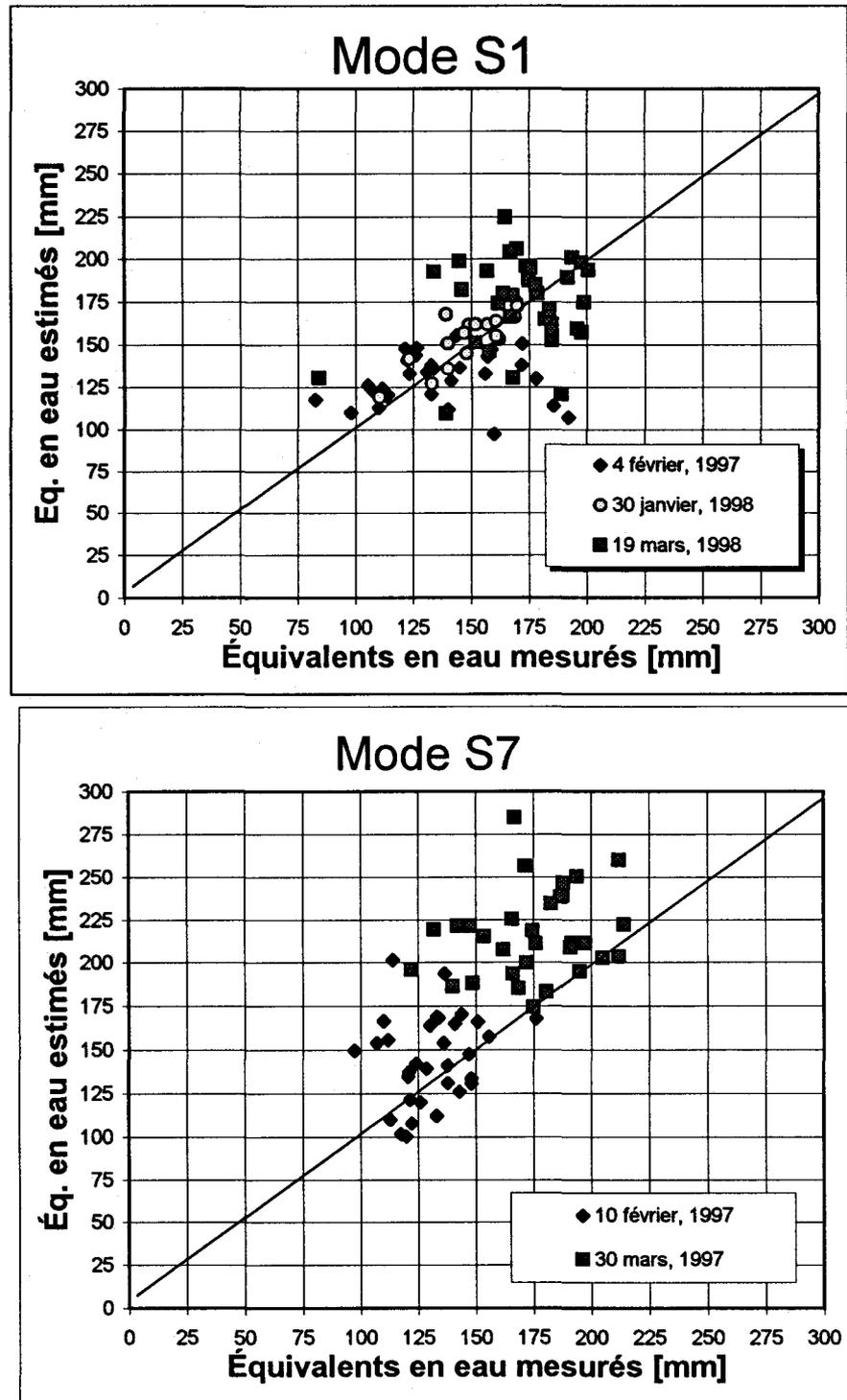


Figure 4.1 : Précision de l'algorithme d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige.

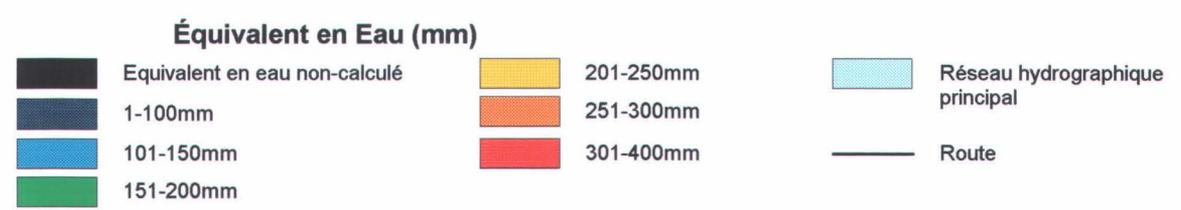
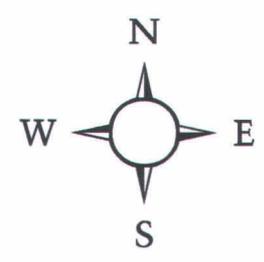
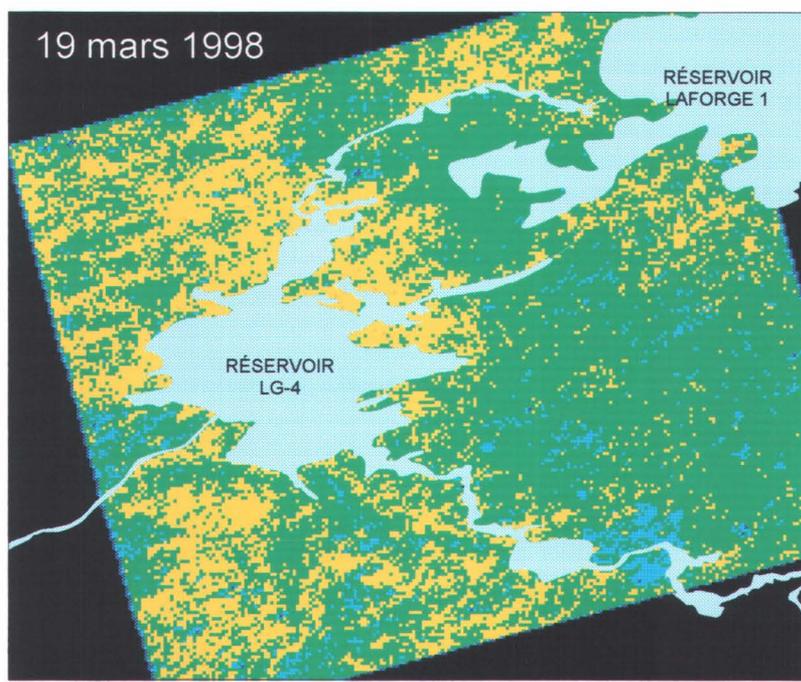
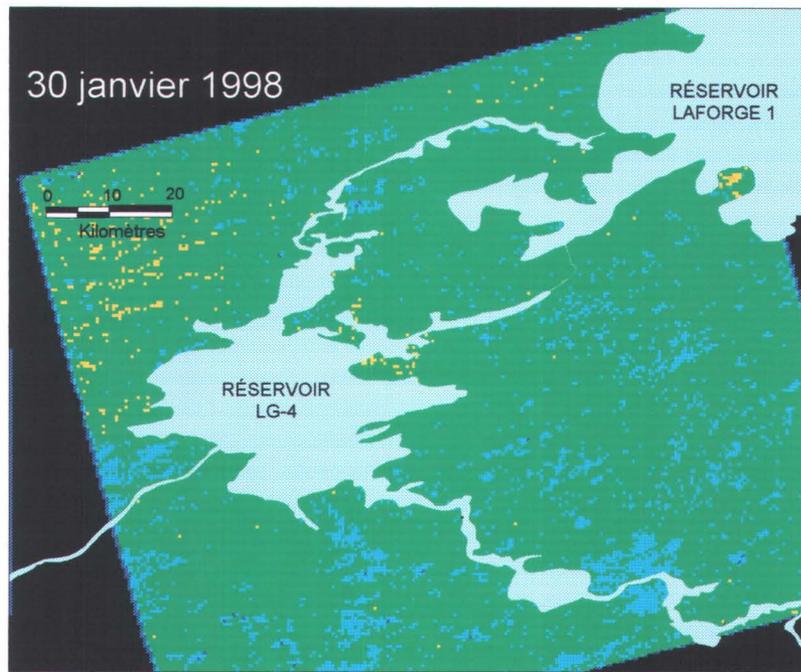


Figure 4.2: Cartographie de l'équivalent en eau de la neige pour l'hiver 1998. Les résultats sont rééchantillonnés à 500m.

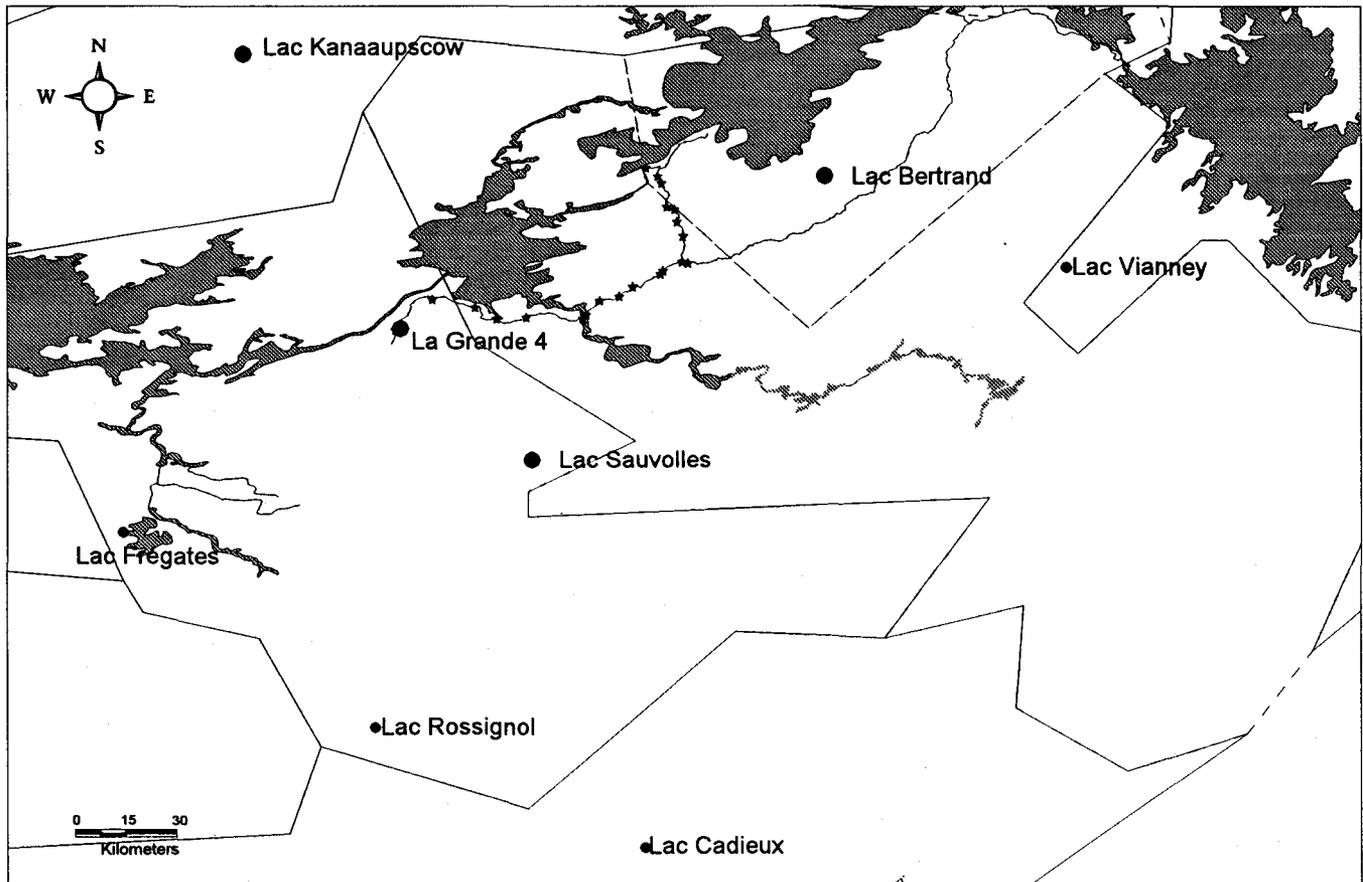


Figure 4.3 : Localisation des stations nivométriques d'Hydro-Québec et des sites expérimentaux où l'INRS-Eau effectue ses lignes de neige.

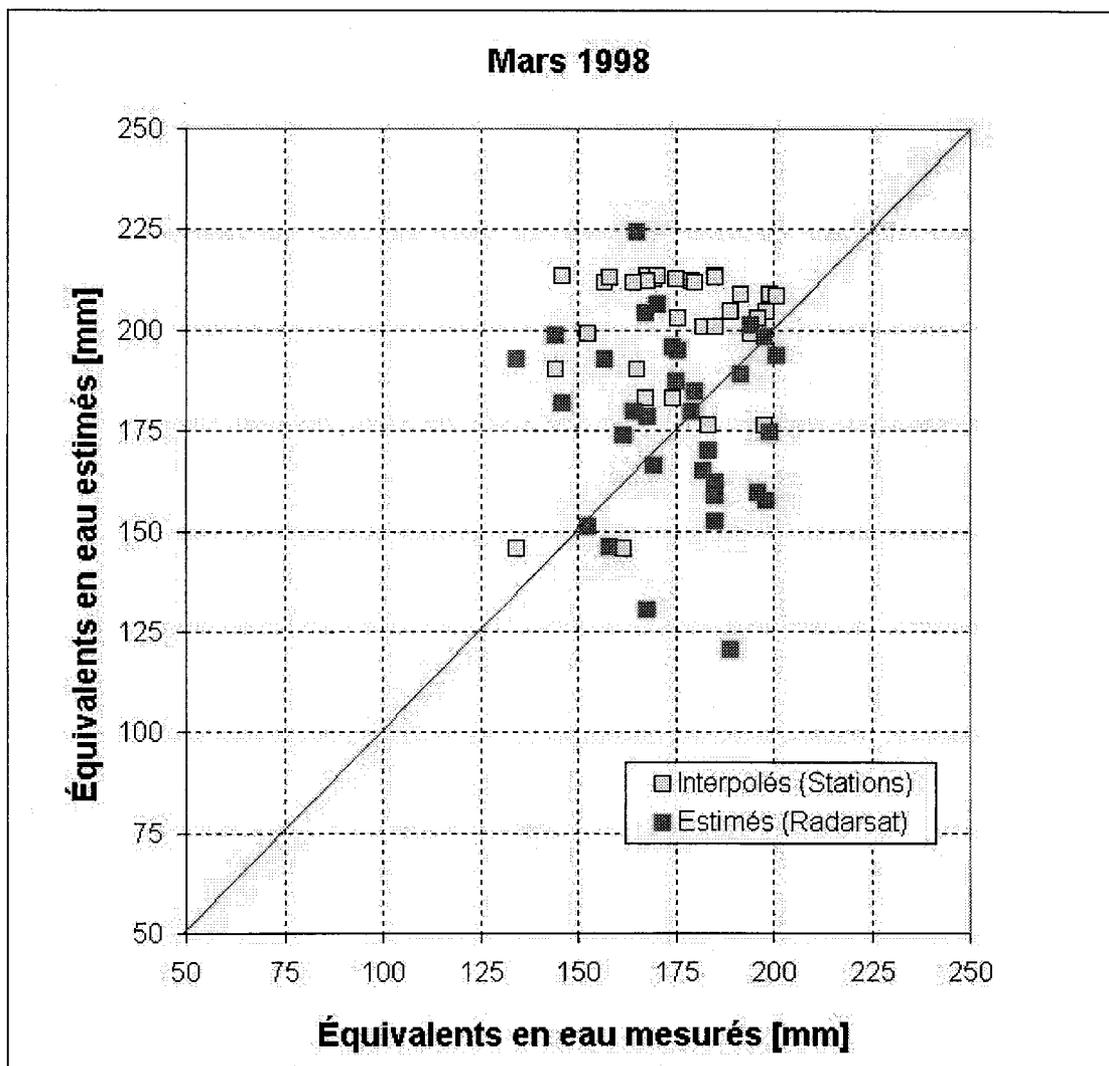


Figure 4.4 : Comparaison des équivalents en eau interpolés à partir des mesures aux stations nivométriques avec les mesures aux sites expérimentaux.



## 5. CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE

---

### 5.1 Images printanières disponibles

Trois images Standard ont été acquises dans le but de cartographier l'étendue de la neige humide (objectif 1b) : une image en mode S7 (23 avril 1997) et deux images en mode S1 (12 avril et 6 mai 1998). Le 23 avril 1997, le couvert de neige était complet et très humide en surface ( $W_v=7\%$ ). Le 12 avril 1998, c'est le début de la fonte, la neige est peu humide. Mais, suite à un mois d'avril chaud et ensoleillé (figure 5.1) , il ne reste que quelques plaques de neige humide ( $W_v=5\%$ ) sur les versants nord des collines le 6 mai 1998. Deux images ScanSAR ont aussi été acquises les 15 avril et 9 mai 1998, leur analyse est discutée au chapitre 7.

### 5.2 Algorithmes de cartographie de la neige humide

Rott et Nagler (1995) et Baghdadi *et al*, (1997) ont publié une approche pour cartographier la neige humide en utilisant le rapport des coefficients de rétrodiffusion entre une image ERS-1 hivernale (r) et une image ERS-1 printanière (p) acquise selon la même géométrie. Cependant, cette approche ne fonctionne pas pour cartographier la neige humide sous une forêt dense (Koskinen *et al*, 1997.). Ainsi, selon Baghdadi *et al*, (1997), un pixel en milieu non forestier est dit recouvert de neige humide, si :

$$\sigma_r - \sigma_p \geq 3 \text{ dB} \quad (3)$$

$$-11 \text{ dB} < \sigma_p < -18 \text{ dB} \quad (4)$$

où:

$\sigma_r$  représente les coefficients de rétrodiffusion de l'image de référence (image d'hiver).

$\sigma_p$  représente les coefficients de rétrodiffusion de l'image de printemps (neige humide).

À partir de simulations d'images RADARSAT en mode Standard, Baghdadi *et al* (sous presse) ont aussi suggéré un autre algorithme pour cartographier la neige humide. Cet algorithme est toujours basé sur le rapport des coefficients de rétrodiffusion entre une image de référence (r) et une image printanière (p) :

---

Si la teneur en eau liquide de la neige est susceptible d'être  $\geq 4\%$ :

$$\sigma_r^\circ - \sigma_p^\circ \geq \alpha_{\text{moyen}} - 2.0\text{dB} \quad (5)$$

Si la teneur en eau liquide de la neige est susceptible d'être  $\geq 2\%$  :

$$\sigma_r^\circ - \sigma_p^\circ \geq \alpha_{\text{moyen}} - 1.0\text{dB} \quad (6)$$

Si la teneur en eau liquide de la neige est susceptible d'être  $\geq 1\%$  :

$$\sigma_r^\circ - \sigma_p^\circ \geq \alpha_{\text{moyen}} - 0.5\text{dB} \quad (7)$$

où :  $\alpha_{\text{moyen}}$  est la valeur moyenne des rapports de rétrodiffusion entre l'image d'hiver et l'image printanière.

Toutefois, tel que rapporté dans un rapport antérieur (Bernier *et al*, 1997), le comportement des trois principales classes d'occupation du sol (lacs, milieux ouverts, milieux semi-fermés) en présence de neige humide est différent pour les deux images d'avril. La rétrodiffusion diminue de façon significative pour les lacs dont la surface du couvert de neige semble plutôt lisse, mais elle diminue peu pour les milieux ouverts (landes, brûlis) dont la surface du couvert nival paraît rugueuse alors qu'elle augmente légèrement pour les forêts semi-fermées et les forêts ouvertes (tableau 5.1). Ainsi, il en résulte une augmentation du contraste entre ces trois occupations du sol par rapport à une image d'hiver (figure 5.1). Ce comportement est aussi bien observé sur une image en mode S1 qu'une image en mode S7. Nous avons donc tenté d'utiliser pour les images d'avril une valeur  $\alpha_{\text{moyen}}$  spécifique à chacun des trois groupes d'occupation du sol, soient : les lacs et réservoirs, les milieux ouverts, et les milieux semi-ouverts.

**Tableau 5.1 : Valeurs moyennes des coefficients de rétrodiffusion des trois principales occupations du sol**

	Hiver 97 (S7)	Avril 97(S7)	Hiver 98(S1)	Avril 98(S1)	Mai 98(S1)
<b>Lacs</b>	-15.0 dB	-20.7 dB	-11.7 dB	-12.9 dB	-13.1 dB
<b>Milieux ouverts</b>	-13.8 dB	- 15.0 dB	-11.3 dB	-11.3 dB	-8.2 dB
<b>Milieux fermés</b>	-13.2 dB	- 12.5 dB	-11.0 dB	-10.1 dB	-7.8 dB

Sur l'image du 6 mai 1998 (S1), les coefficients de rétrodiffusion des sites d'échantillonnage sont plus élevés en moyenne de 2.4 dB par rapport au 30 janvier 1998. (Tableau 5.1). Tel que discuté dans le rapport du 30 juin 1998, cette différence significative s'explique par l'absence quasi totale de neige au sol et par un sol dégelé et saturé d'eau le 6 mai, tel que confirmé par les mesures de terrain. Afin d'identifier sur l'image les secteurs où il y a une baisse de rétrodiffusion marquée, typique de la présence de neige humide, nous avons fait le rapport entre l'image du 30 janvier 1998 ( $\sigma_r^\circ$ ) et celle du 6 mai 1998 ( $\sigma_p^\circ$ ). Pour l'image du 6 mai 1998 (S1), c'est 26% des pixels

de l'image qui connaissent une baisse de rétrodiffusion. En comparant ce résultat à la classification de l'occupation du sol, on constate que 85% de cette superficie correspond aux lacs, rivières, réservoirs et tourbières (couverts de « slush »). Les 15% restant sont à part égale des forêts ouvertes, des brûlis et des landes ce qui constitue à environ 4% de la superficie de l'image.

Nous avons supposé que tous les pixels où il y avait une baisse de rétrodiffusion étaient des pixels de neige humide. Donc, un pixel est dit couvert de neige humide si :

$$\sigma_p^\circ < \sigma_r^\circ \quad (8)$$

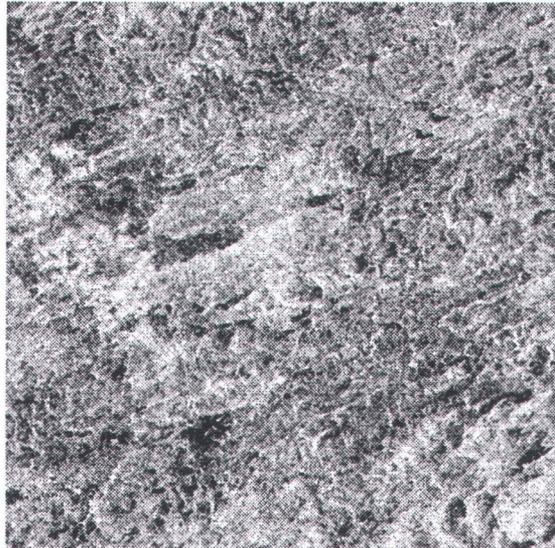
### 5.3 Résultats

Pour l'image du 23 avril 1997, en mode S7, l'algorithme de Baghdadi *et al* (1997) a d'abord été appliqué tout en diminuant de 2 dB les valeurs de l'équation 4 pour tenir compte de l'augmentation de l'angle d'incidence entre ERS-1 et le mode S7. Seulement 14 % de l'image a été classé comme étant de la neige humide (tableau 5.2), alors que selon les observations de terrain, la neige était humide sur l'ensemble de l'image. En laissant tomber les seuils de l'équation 4, cette proportion a augmenté à 31%. Le second algorithme (équation 5) a aussi été appliqué à l'ensemble de l'image. Les résultats sont bien meilleurs mais pas encore entièrement satisfaisants. C'est en appliquant une valeur  $\alpha_{\text{moyen}}$  spécifique à chacun des trois groupes d'occupation du sol que la grande proportion des pixels de neige humide a été obtenue.

**Tableau 5.2 : Pourcentage des pixels de l'image du printemps classés comme neige humide**

Algorithmes	AVRIL 97	AVRIL 98
Équations 3 et 4	14%	9%
Équation 3 uniquement	31%	10%
Équation 5 ou 6	66%	61%
Équation 5 ou 6 avec un $\alpha_{\text{moyen}}$ spécifique par classe :		
Lacs	76%	64 %
Milieux ouverts	77%	66%
Milieux semi-fermés	82%	69%

30 jan. 98



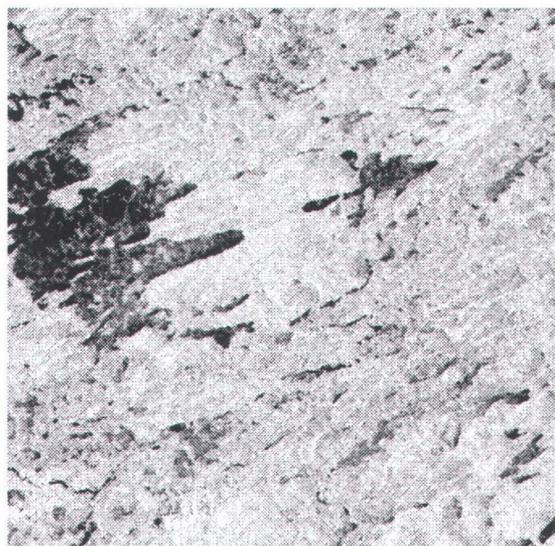
Neige sèche

12 avr. 98



Neige humide

6 mai 98



Sans neige  
(sols saturés)

Figure 5.1: Variation du contraste pour une image avec neige sèche, avec neige humide et sans neige.

Pour l'image du 22 août 1998 ayant été prise en mode S1, les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont plus élevées que celles du 23 avril 1997 en mode S7 et ils diffèrent peu de celles de janvier 1998. (tableau 5.1). Ce 12 avril 1998, étant vraiment la première journée de la période de fonte d'après les trois stations climatiques mobiles installées sur le secteur expérimental, la neige est présumée peu humide (2% à 3%) sur l'ensemble de l'image (figure 5.3). Ici aussi, les trois algorithmes ont été appliqués. Comme pour l'image d'avril 1997, c'est l'application d'un  $\alpha_{\text{moyen}}$  spécifique (équation 6) pour les trois principales classes d'occupation du sol qui donne les meilleurs résultats.

## 5.4 Conclusion

Trois essais de cartographie de l'étendue de la neige humide à partir des images Standard des printemps 1997 et 1998 ont été réalisés. Ces essais montrent que l'approche habituelle ne s'applique pas aux caractéristiques physiques de cette région (forêts ouvertes et landes). Bien que le changement de rétrodiffusion des trois principales classes d'occupation du territoire due à la présence de neige humide soit visible sur les images RADARSAT ce qui permettrait une interprétation correcte du changement d'état de la neige au sol, les trois algorithmes n'ont pu détecter et classer correctement ces changements. Pour ces images d'avril, d'autres approches devront être envisagées. Ce sera d'ailleurs l'objet d'un des objectifs de recherche d'une stagiaire post-doctorale de l'INRS-Eau, pour l'année 1999.

Néanmoins, pour l'image du 6 mai 1998 prise à la fin de la période de fonte, il semble que nous avons pu bien cartographier la distribution de la neige humide versus l'absence de neige, en classant les pixels où il y avait baisse de rétrodiffusion comme pixels de neige et ceux où il y avait hausse comme surface dégagée (sol dégelé et saturé).



## 6. Suivi de l'étendue du gel du sol

---

### 6.1 Images automnales disponibles

Trois images Standard en mode S1 et trois images Standard en mode S7 ont été acquises pour suivre l'étendue du gel du sol (objectif 1c) entre le début d'octobre et la fin de novembre 1996 (tableau 6.1). Les données des trois stations climatologiques installées sur le site d'étude indiquent un refroidissement constant du sol entre les trois périodes d'acquisition des images RADARSAT. Au début d'octobre, le sol est dégelé sur les sites d'échantillonnage, à la fin d'octobre, il est très près du point de congélation et à la fin de novembre, le sol est partiellement gelé en surface.

Tableau 6.1 : Sommaire des acquisitions d'images

Date d'acquisition des images RADARSAT	Mode	Condition du sol	Hauteur de neige
7 octobre 1996	S1	Sol dégelé	-
13 octobre 1996	S7		
31 octobre 1996	S1	Température du sol voisine de 0° C	5 cm
6 novembre 1996	S7		
24 novembre 1996	S1	Sol gelé	10 cm
30 novembre 1996	S7		

### 6.2 Analyse des images

Sur toutes ces images en mode Standard, les valeurs numériques ont été transformées en coefficients de rétrodiffusion et les images ont été géocodées.

L'analyse des coefficients de rétrodiffusion montre une baisse progressive sur les sites d'échantillonnage entre les trois périodes d'acquisition (Figure 6.1) ce qui reflète le refroidissement progressif du sol. Dans le cas des images S1, cette baisse peut atteindre 4 dB, particulièrement dans les zones de brûlis. Dans le cas des images S7, la baisse n'atteint au maximum qu'1.5 dB. C'est que les angles d'incidence faibles du mode S1 sont plus sensibles aux

---

variations des propriétés diélectriques du sol, qui elles, dépendent de son humidité et de sa température.

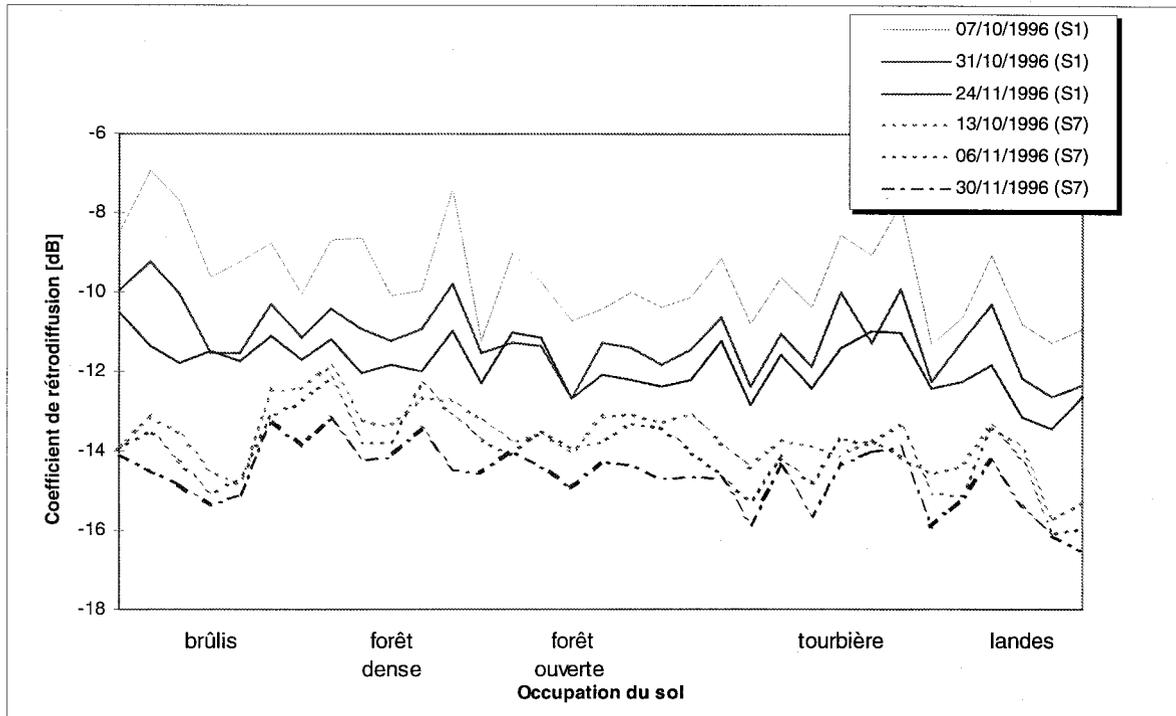


Figure 6.1 : Variation de la rétrodiffusion à l'automne 1996 pour les sites d'échantillonnage.

La variation de la rétrodiffusion entre le début d'octobre et la fin de novembre est d'ailleurs illustrée à la figure 6.2. La baisse de la rétrodiffusion est nettement plus grande en mode S1. L'ampleur du refroidissement a aussi été analysé en fonction de l'occupation du sol pour le mode S1. La chute des coefficients de rétrodiffusion est de 1.3 dB en moyenne entre le début et la fin d'octobre et de 0.6 dB entre la fin d'octobre et la fin de novembre. Pour chaque occupation du sol terrestre, la chute moyenne finale est donc de 2 dB (bleu pâle sur la figure 6.2) mais atteint 4dB pour les brûlis (bleu foncé). Dans le cas de l'eau, il s'agit plutôt d'une augmentation de rétrodiffusion de 6 dB (en rouge) reliée à la formation de la glace sur les lacs et les réservoirs. Par contre, pour le mode S7, la baisse de rétrodiffusion notable sur le réservoir de LG4 (bleu foncé) est due à la présence de vagues causées par le vent le 13 octobre 1996.

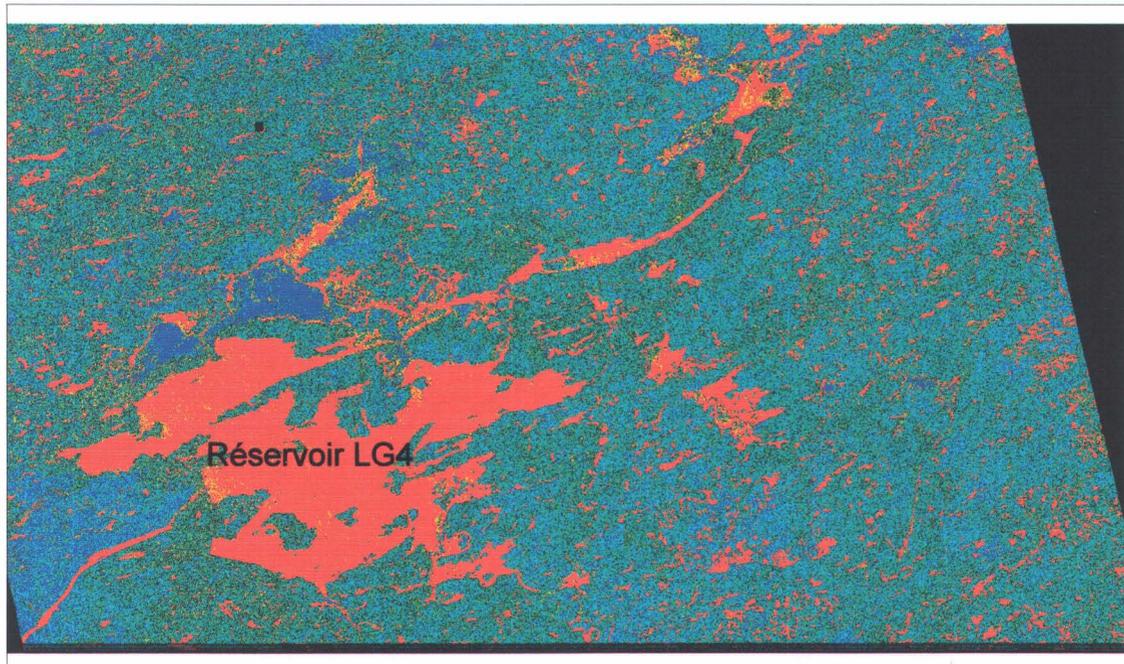
### **6.3 Conclusion**

L'effet du gel du sol sur le signal est plus facilement détectable en mode S1 qu'en mode S7 (amplitude de 4 dB vs 1.5 dB). Le refroidissement progressif du sol peut donc être suivi sur les images Standard en mode S1. Lorsque le sol est gelé, le coefficient de rétrodiffusion du sol est de l'ordre de -12 dB pour le mode S1.

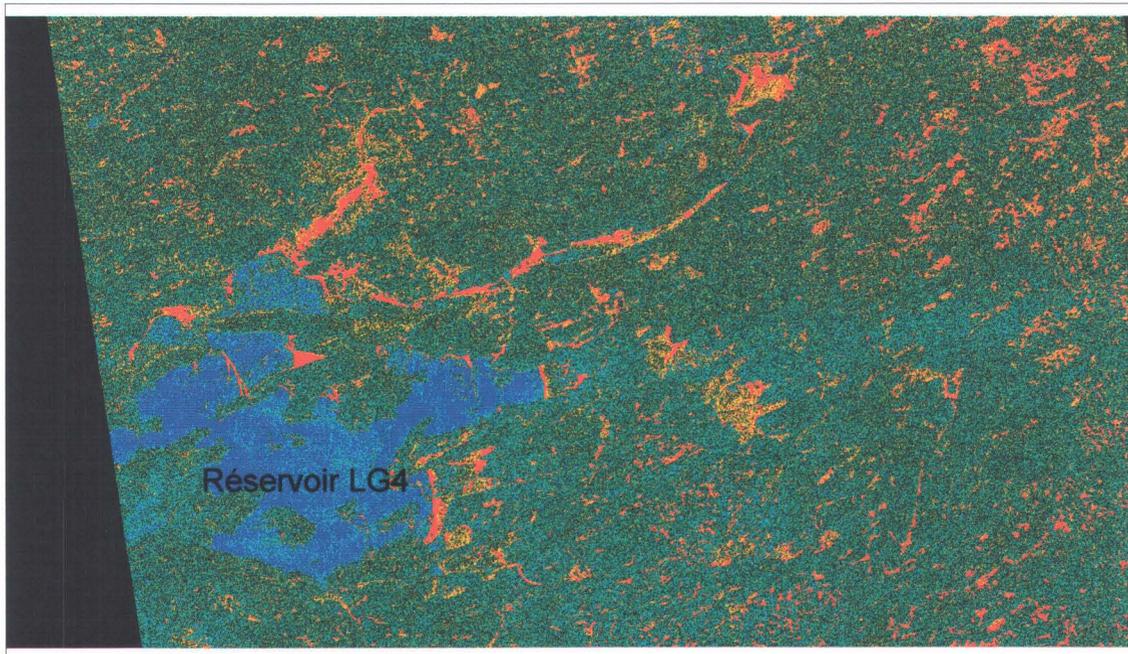
De façon opérationnelle, il faudrait se tourner vers des images couvrant un plus grand territoire et offrant un meilleur cycle de revisite (3 jours) comme les images ScanSAR Narrow (350 km) ou Wide (500 km) ou même des images de type micro-ondes passives (SSM/I).

Une étude visant à montrer la faisabilité d'utiliser l'un ou l'autre de ces types d'images pour le suivi du gel saisonnier du sol vient d'ailleurs de débiter à l'INRS-Eau dans le cadre d'une maîtrise de recherche. Cette étude est parrainée par le projet CRYISIS d'Environnement Canada.

S1: 7 octobre et 24 novembre 1996



S7: 13 octobre et 30 novembre 1996



### Différence de rétrodiffusion

Hausse



0.6 à 2 dB



2.1 à 4 dB



4.1 dB et plus

Baisse



Aucun changement



+/- 0.5 dB

Figure 6.2: Variation de la rétrodiffusion associée au refroidissement du sol ou au gel de l'eau

## **7. Analyse des images ScanSar**

---

### **7.1 Intérêt économique des images ScanSAR**

Vu l'immensité du bassin de la rivière La Grande, une analyse bénéfices-coûts (Martin *et al.*, accepté) a montré l'intérêt économique d'utiliser les images ScanSAR dont la largeur de balayage est de 500 km au lieu des images Standard qui couvrent seulement 100 km. En effet, avec le mode Standard, le nombre d'images à acquérir pour couvrir le territoire fait grimper les coûts d'exploitation, affectant ainsi les bénéfices nets. Avec le mode d'acquisition ScanSAR, les ratios bénéfices-coûts, en se fondant sur l'hypothèse d'une réduction de l'écart-type prévisionnel de 4% ( $0.96\sigma$ ), varient entre 2.3 : 1 (état initial du réservoir : 60 TWh et 100% de couverture du territoire) et 3.9 : 1 (état initial du réservoir : 44 TWh et 80% de couverture du territoire). Toutefois, ces images multi-faisceaux n'ayant pas encore été étalonnées nous avons des réserves sur leur potentiel pour estimer l'équivalent en eau. Si leur qualité radiométrique ne permettrait pas d'estimer l'équivalent en eau de la neige ou de détecter la neige humide, une autre avenue économiquement intéressante serait offerte au gestionnaire du bassin de la Rivière La Grande soit la couverture de 75% du bassin par des images en mode Wide (W1), ce mode uni-faisceau ayant aussi été étalonné et couvrant un secteur de 150 km par 150 km. Les ratios bénéfices-coûts obtenus (1.5 : 1 et 2 : 1) confirment l'intérêt d'approfondir cette éventualité, pour une réduction de l'écart-type prévisionnel de 4%. Si la réduction de l'écart-type prévisionnel atteint 10%, les ratios bénéfices-coûts seraient alors de l'ordre de 4 : 1 (Martin *et al.*, accepté). C'est pourquoi, des images en mode Wide ont été commandées pour la saison hivernale 1998-1999 en plus des images ScanSAR.

### **7.2 Caractéristiques des images ScanSAR**

Le mode ScanSAR du satellite RADARSAT a été conçu pour les études où l'échelle de travail varie de 1 : 250 000 à 1 : 5 000 000. Une seule image *ScanSAR Wide* couvre en effet un territoire de 500 km par 500 km, ce qui représente un avantage évident pour un grand secteur comme le bassin de la rivière La Grande. Cette large couverture est effectuée en combinant quatre faisceaux simples du mode Standard et Wide. Le tableau 7.1 compare les caractéristiques des images *ScanSAR Wide* avec celles des images *Standard 1* utilisées jusqu'à maintenant dans le cadre de ce projet et avec les images *Wide 1* qui seront aussi acquises lors de la saison hivernale 1998-1999.

---

Tableau 7.1 : Caractéristiques des images RADARSAT acquises selon trois modes différents

	Mode		
	ScanSAR Wide	Wide 1	Standard 1
<b>Couverture</b>	500 km X 500 km	150 km X 150 km	100 km X 100 km
<b>Résolution nominale</b>	100m	30m	30m
<b>Dimension du pixel</b>	50 m	12.5 m	12.5 m
<b>Nombre de faisceaux et Angles d'incidence</b>	4 W1 (20°-31°) W2 (31°-38°) W3 (39°-45°) S7 (45°-49°)	1 W1 (20°-31°)	1 S1 (20°-27°)
<b>Format d'enregistrement</b>	8 bits	16 bits	16 bits
<b>Données étalonnées</b>	Non	Oui	Oui

La différence au niveau du format d'enregistrement vise à réduire la quantité de données à traiter. Les niveaux de gris d'une image en 8 bits varient de 0 à 255 alors qu'ils peuvent aller de 0 à 65 535 sur une image en 16 bits. Cette différence se traduit par une précision radiométrique un peu moindre dans le cas des images ScanSAR mais par une taille de fichier réduite de moitié.

La différence au niveau de l'étalonnage est critique. L'étalonnage permet au fournisseur de s'assurer que les valeurs des images reflètent bien les conditions environnementales du milieu étudié en compensant pour les erreurs relatives au mouvement du satellite, à l'antenne radar et à la station de réception. On s'assure ainsi de la qualité constante des données à l'intérieur même d'une image et aussi d'une image à l'autre. Dans le cas des images ScanSAR, le fournisseur n'est toujours pas en mesure de produire des données étalonnées, ce qui rend toute étude quantitative hasardeuse. Cette situation est en partie reliée aux faisceaux multiples qui composent l'image.

À l'intérieur de l'objectif 2, on prévoyait donc évaluer la performance des images ScanSAR pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige sur le bassin de LG4 et éventuellement, sur ceux de Laforge et de Caniapiscau. Sans étalonnage des données, cette évaluation ne peut être complétée sans une analyse rigoureuse de la qualité radiométrique des images. La présente analyse fera un bilan des acquisitions en mode ScanSAR effectuées pour ce projet, traitera de la procédure nécessaire pour intégrer ce type de données au *prototype EQeau* et évaluera les conséquences des problèmes d'étalonnage sur les images acquises.

### 7.3 Bilan des acquisitions

Au cours de la saison 1997-1998, cinq images RADARSAT en mode ScanSAR Wide ont été acquises sur le bassin de LG4 soit une image d'automne, deux images d'hiver et deux images de printemps (Tableau 7.2). Toutes les images ont été prises selon l'orbite ascendante, vers 22h35 TU.

**Tableau 7.2 :** Bilan des acquisitions en mode ScanSAR pour l'année 1997-1998:

Date	Orbite	Conditions
22 novembre 1997	Ascendante	Sol partiellement gelé, couvert de neige sèche mince et partiel
2 février 1998	Ascendante	Sol gelé, couvert de neige sèche
22 mars 1998	Ascendante	Sol gelé, couvert de neige sèche
15 avril 1998*	Ascendante	Sol gelé, couvert de neige humide
9 mai 1998	Ascendante	Sol partiellement dégelé et humide, couvert très partiel de neige humide

\* Image acquise par Hydro-Québec dans le cadre du projet EQeau

### 7.4 Intégration des images ScanSAR dans EQeau

#### 7.4.1 Pré-traitements

Tout comme les images Standard, les images ScanSAR sont détectées en intensités et une table de rehaussement est appliquée sur les valeurs (non-étalonnées) par le fournisseur. Les mêmes pré-traitements radiométriques doivent donc être appliqués aux images ScanSAR avant leur utilisation dans EQeau soient : lecture de l'image (8 bits), inversion de la table de rehaussement, transformation des DN en coefficients de rétrodiffusion (32 bits), compression (16 bits), exportation en format binaire (16 bits).

Par la suite, les images sont corrigées géométriquement et filtrées. D'ailleurs la compatibilité des données ScanSAR et du logiciel de correction géométrique des images radar implanté chez Viasat Géo-Technologie lequel est utilisé pour les images en mode Standard a été vérifié à l'automne 1998. Les matrices en format binaire 16 bits sont alors prêtes à être utilisées par EQeau.

#### **7.4.2 Utilisation dans EQeau**

Les matrices en format binaire 16 bits étant similaires à celles produites par les images en mode Standard, la procédure de calcul développée actuellement dans EQeau peut être utilisée telle quelle. Bien entendu, les paramètres de l'algorithme (pente et ordonnée à l'origine) devront être ajustés en fonction de la précision radiométrique et du comportement des données ScanSAR étalonnées. Par contre, il est essentiel de s'assurer que la résolution de travail soit la même pour les images radar de référence, d'hiver et la matrice d'occupation du sol. Actuellement, la carte d'occupation du sol a été produite avec un pixel de 50 m. Comme une image ScanSAR est sur-échantillonnée à 50m, les images sont compatibles.

### **7.5 Analyse de la qualité radiométrique des images**

La présente analyse a été faite avec les images ayant été pré-traitées (section 7.4.1) mais avant la correction géométrique.

#### **7.5.1 Variation du signal à l'intérieur d'une image**

Une inspection visuelle permet de détecter des variations transversales du signal sur certaines images. La figure 7.1 présente un exemple typique de ce cas. On y observe une discontinuité à la colonne ~6400 (A), qui correspond à l'angle d'incidence  $39^\circ$ , soit le passage du faisceau W2 à W3. Une autre discontinuité (B), plus subtile et surtout visible en pleine résolution, est présente à la colonne ~3600, qui correspond approximativement à l'angle d'incidence  $31^\circ$ , soit le passage du faisceau W1 à W2. Plus évidente par contre, est la ligne blanche (C) très visible à la colonne ~7900 (angle d'incidence  $\sim 43^\circ$ ). Nous ne possédons pour l'instant aucune explication pour cette anomalie. Le tableau 7.3 résume les discontinuités observables sur les images.

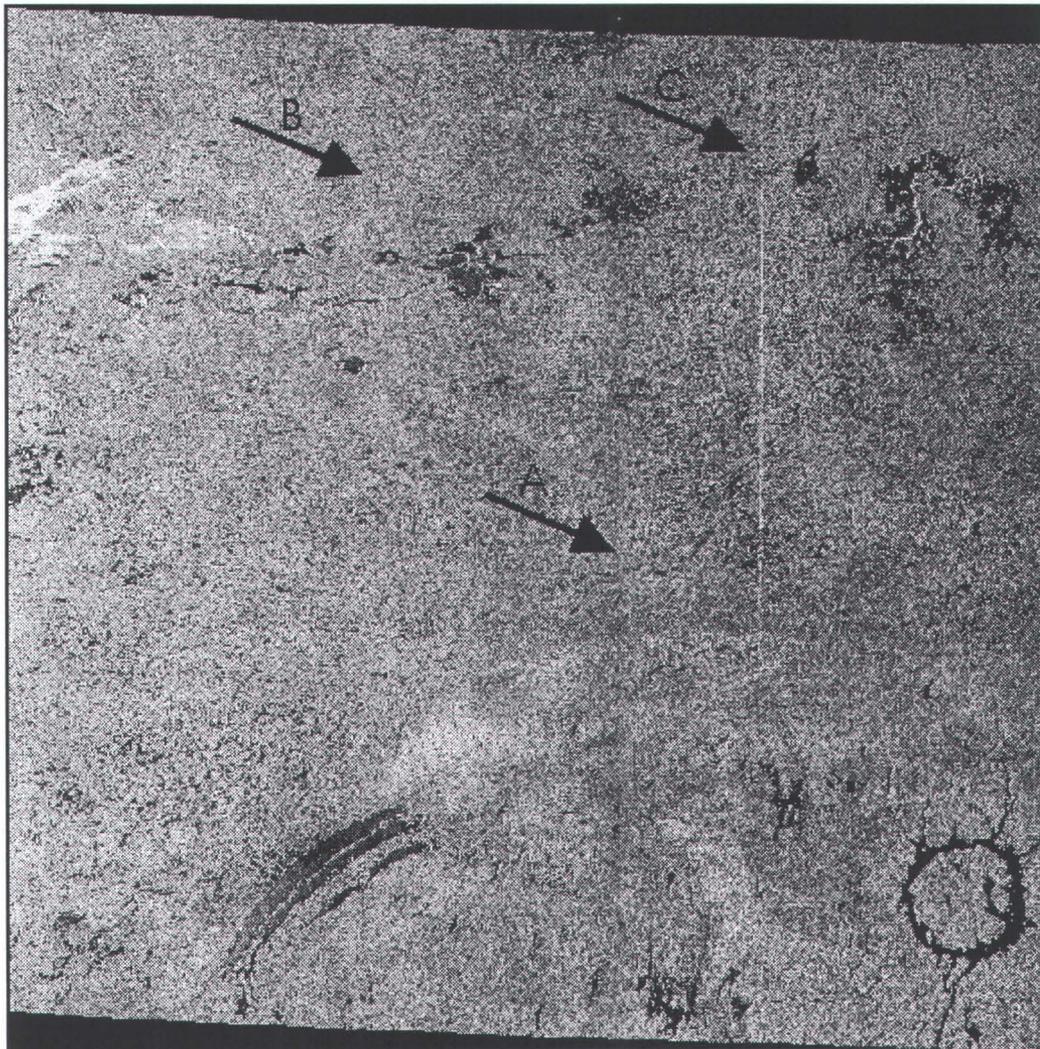
---

Tableau 7.3 : Sommaire des discontinuités observables

Image	Discontinuités observables		
22 novembre 1997	-	39°	42.8°
2 février 1998	30.3°	39°	42.8°
22 mars 1998	30.3°	39°	42.8°
15 avril 1998	-	-	42.8°
9 mai 1998	30.5°	39°	42.5°

Un autre phénomène visible sur la figure 7.1, est la diminution du signal de gauche à droite, c'est-à-dire des faibles angles d'incidence vers les forts angles d'incidence. Cette variation est normale, en fonction de la gamme d'angle d'incidence.

Afin de quantifier ces observations, des coupes transversales ont été effectuées sur chacune des images et les valeurs ont été extraites à tous les 10 pixels. La figure 7.2 présente ces transects. On y remarque immédiatement l'effet « poivre et sel » (*speckle*) des images non filtrées qui se traduit par une très grande variance des coefficients de rétrodiffusion. On y observe aussi la baisse générale de la rétrodiffusion en fonction de l'augmentation de l'angle d'incidence. Cette baisse est de l'ordre de 5 dB entre 20° et 49°. Quant aux discontinuités entre les faisceaux, la démarcation n'est pas toujours remarquable et l'ampleur du phénomène varie d'une image à l'autre. Par exemple, sur l'image du 2 février 1998, il semble y avoir un saut de quelques 2 dB entre les faisceaux alors que sur l'image du 9 mai, la démarcation est très subjective. En fait, ce qui semble constant, c'est un léger creux du signal à la limite approximative entre deux faisceaux. Finalement, l'anomalie de la ligne blanche à 43° n'est pas visible sur cette figure parce qu'elle se situe plus haut dans l'image.



**Figure 7.1 : Image ScanSAR du 9 mai 1998**

---

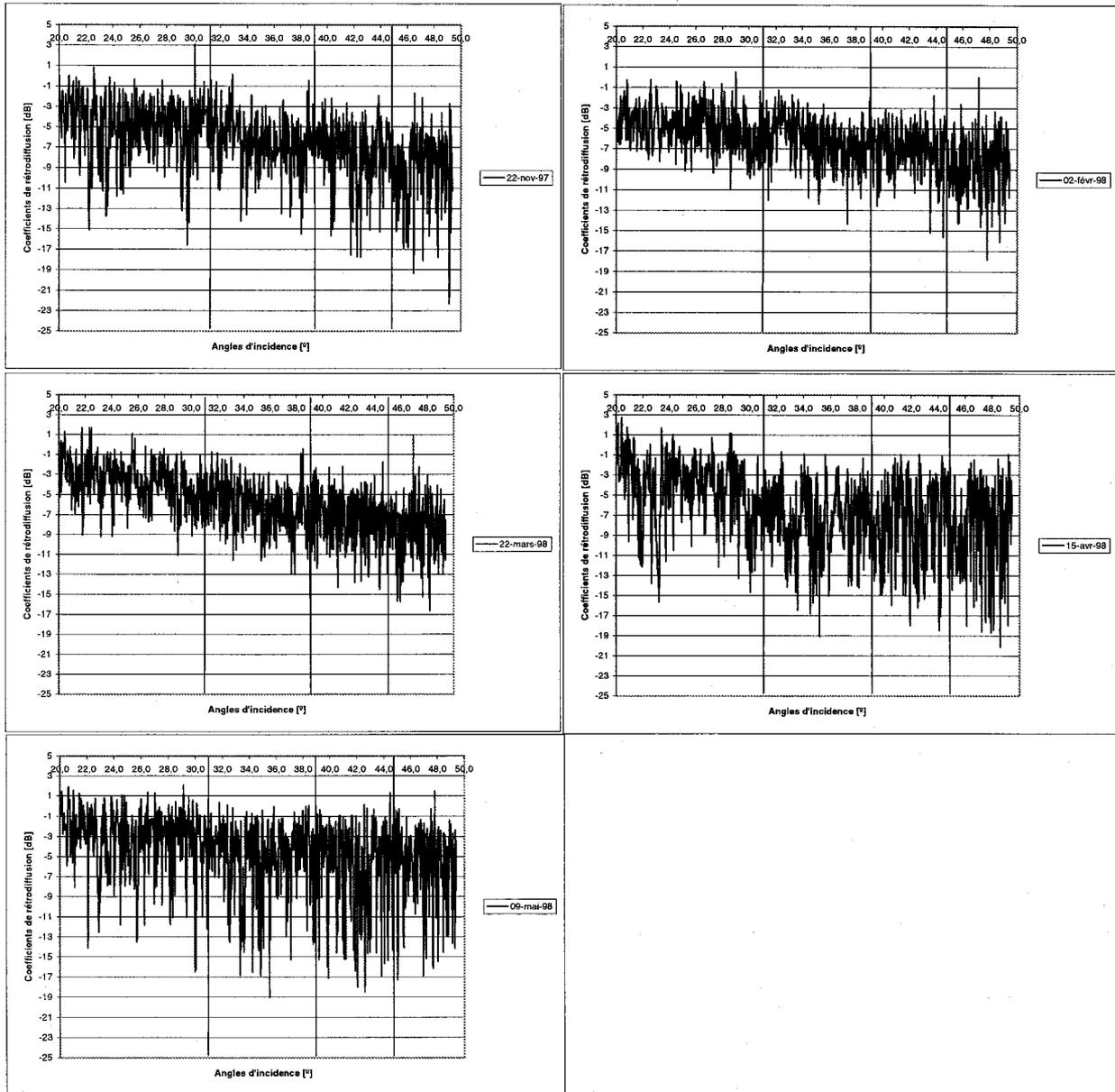


Figure 7.2 : Variation du signal selon une coupe transversale (1 pixel sur 10) à la ligne 5861

### 7.5.2 Variation du signal entre plusieurs images

Afin de comparer la radiométrie de plusieurs images ScanSAR, nous avons calculé le coefficient de rétrodiffusion moyen de chaque image et le coefficient de rétrodiffusion moyen d'un secteur situé sur la zone d'étude, entre le réservoir de LG4 et le lac des Vœux ( $\theta=36^\circ$ ). Nous avons également ajouté la valeur moyenne calculée sur les sites expérimentaux de ce secteur, extraite des images acquises en mode Standard trois jours plutôt. La variation temporelle de ces coefficients de rétrodiffusion moyens est présentée à la figure 7.3.

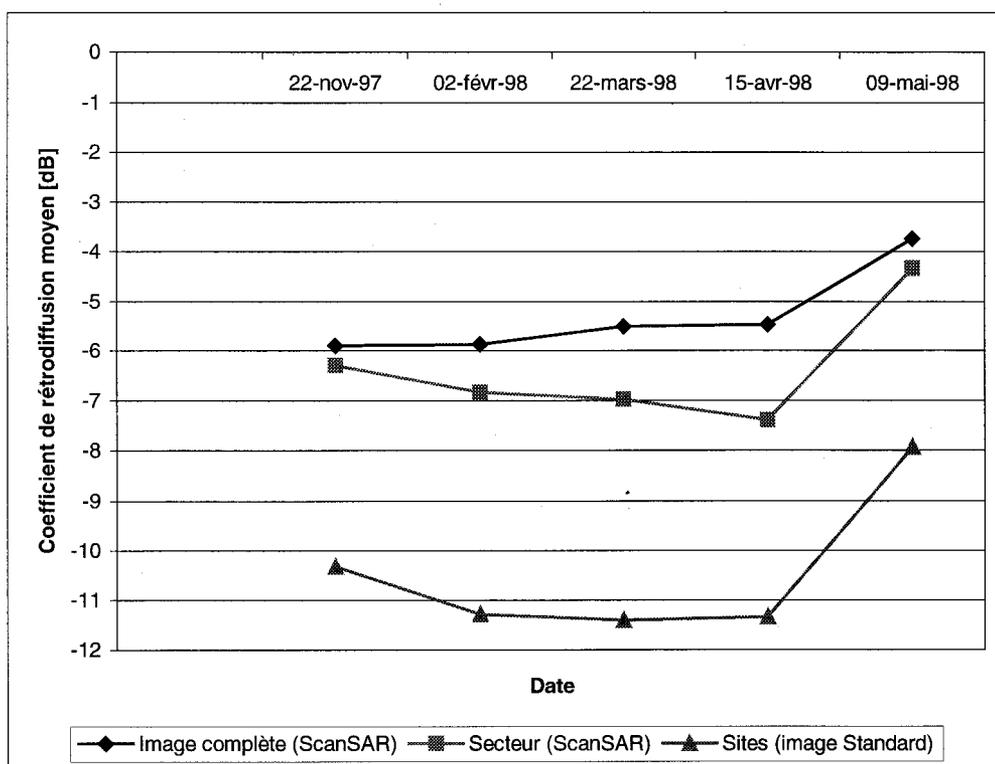


Figure 7.3 : Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion moyen

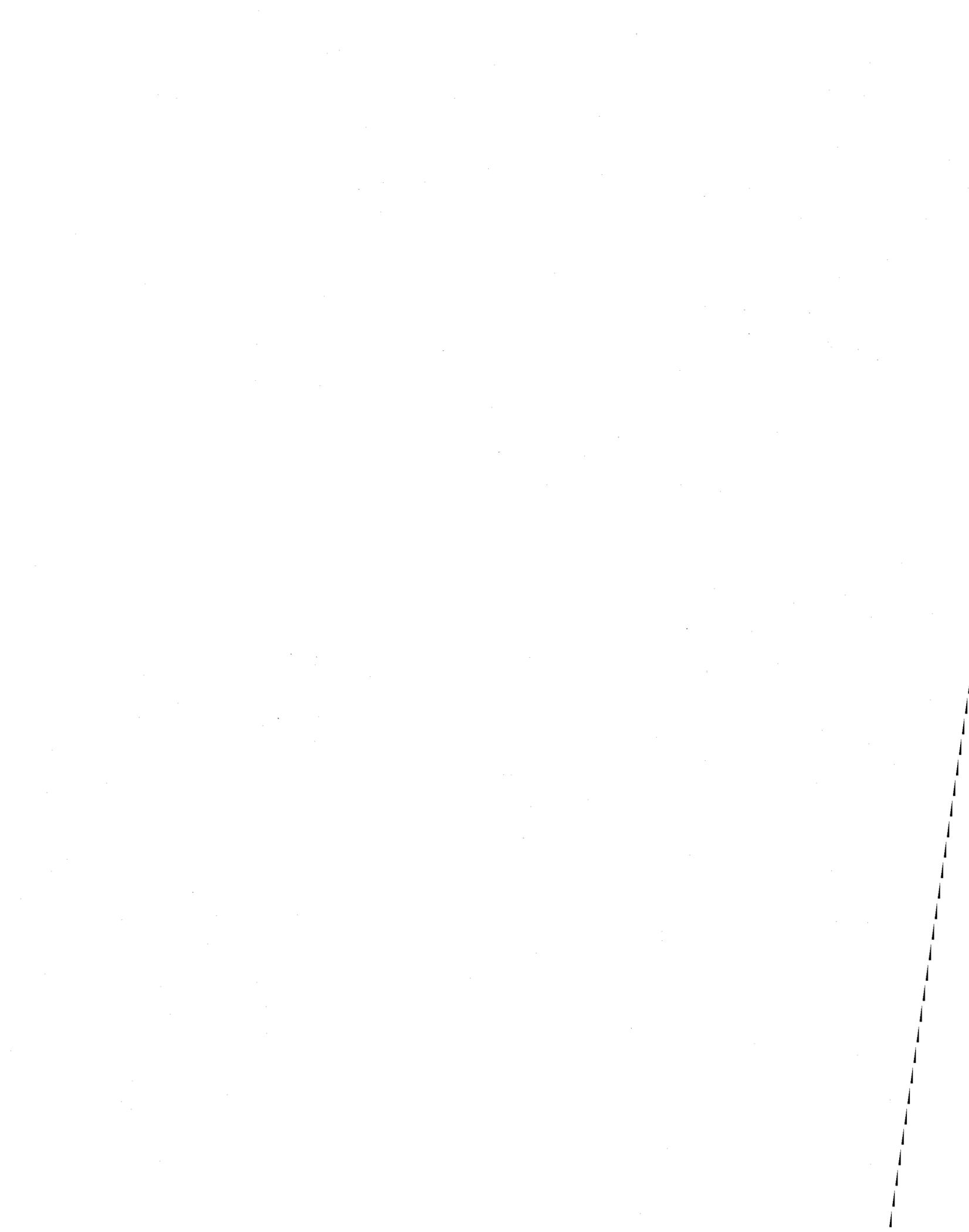
Dans le cas de l'image complète, la rétrodiffusion est stable à l'automne et à l'hiver, avec une forte hausse en mai, alors que la neige est généralement disparue, que le dégel du sol est bien amorcé et que ces mêmes sols sont gorgés d'eau de fonte. On ne retrouve toutefois pas de baisse marquée le 15 avril, journée où il y a de la neige humide au sol. Dans le cas du secteur du lac des Vœux, on voit une légère baisse du signal en hiver et les valeurs encore plus faibles en avril. On voit également la remontée caractéristique de la rétrodiffusion en mai. Quant aux valeurs moyennes extraites des images en mode Standard, elles présentent un comportement similaire aux

images ScanSAR, avec des valeurs toutefois plus faibles. Ces différences s'expliquent par le fait que les images Standards sont étalonnés et que les ScanSAR ne le sont pas.

## **7.6 Conclusion**

L'information contenue dans les images ScanSAR s'apparente à celle des images Standard et la variation temporelle des coefficients de rétrodiffusion semble correspondre aux conditions environnementales observées. Ces observations pourraient indiquer une certaine stabilité temporelle du mode ScanSAR et permettre éventuellement la création de rapports de rétrodiffusion (image d'hiver – image de référence) valables. De tels rapports pourraient également amoindrir les discontinuités entre les faisceaux.

Il semblait donc raisonnable d'appliquer l'algorithme de l'équivalent en eau (chapitre 3) sur les images ScanSAR même si elles ne sont pas encore étalonnées. Cette étape de l'analyse sera faite pour les images ScanSAR de 1998 en même temps que les images de l'hiver 1999. Finalement, ce n'est qu'en comparant les résultats de l'application de l'algorithme aux estimés des images Standard de l'hiver 1998 ou aux estimés des images Wide de l'hiver 1999 ainsi qu'aux mesures au sol que nous pourrons établir la précision de ces estimés ScanSAR. Néanmoins, nous espérons que ces images puissent être étalonnées dans un prochain avenir.



## **8. Délimitation des trois sous-bassins amonts de la rivière La Grande par PHYSITEL**

---

Tel que détaillé dans le rapport de septembre 1998, la détermination des limites des sous-bassins de LG4, Laforge et Caniapiscau a été réalisée avec succès par PHYSITEL. Voici en résumé, les étapes de production du contour automatique dans PHYSITEL, les problèmes rencontrés et les solutions apportées.

### **8.1 Étapes de production**

- Obtention d'un modèle numérique d'altitude (MNA) au 1 :250 000 ;
- Calcul des pentes et des orientations du MNA ;
- Identification des replats (lacs, plateaux, etc.) ;
- Attribution « forcée » d'une orientation d'écoulement à chacune des mailles du MNA ;
- Localisation de l'exutoire du bassin ;
- Identification des mailles se drainant vers l'exutoire.

### **8.2 Problèmes rencontrés**

- Discontinuités entre les feuillets cartographiques ayant servis à produire le MNA ;
- Région à très faible relief, sensible à l'imprécision du MNA et à son échelle ;
- Présence de milliers de lacs entraînant la création d'un nombre astronomique de replats ;
- Présence de lacs se déversant dans plus d'une direction ;
- Présence de barrages et de digues modifiant les écoulements naturels identifiés sur le MNA ;
- Utilisation limite des ressources matérielles due à l'ampleur et la complexité des sous-bassins ;
- Absence d'un outil de validation satisfaisant.

### **8.3 Solutions apportées**

- Obtention d'un MNA contenant moins de discontinuités ;
-

- Attribution au projet d'un ordinateur Pentium II 400 MHz permettant de réduire significativement les temps de calcul ;
- Optimisation des algorithmes de PHYSITEL pour réduire encore le temps de traitement des replats par PHYSITEL;
- Création d'une limite manuelle de validation des sous-bassins à partir des images satellitaires Landsat-TM, du réseau hydrographique vectoriel au 1 :250 000 et du MNA.
- Numérisation de l'emplacement des digues et barrages ;
- Développement d'une méthode de traitement des digues et barrages par itération.

## 8.4 Résultats

La figure 8.1 montre les limites des trois sous-bassins hydrographiques produites par PHYSITEL et intégrées dans le logiciel MapInfo<sup>TM</sup> utilisé par Hydro-Québec. La performance de PHYSITEL pour le traitement de bassins hydrographiques aussi complexes est jugée très satisfaisante et même exceptionnelle en tenant compte de la précision du MNA. Certaines portions du tracé pourraient être améliorées avec un MNA plus précis mais ce sont toutes des corrections mineures. Le tableau 8.1 présente les superficies comparatives des sous-bassins.

Tableau 8.1 : Superficies comparées des différentes limites des sous-bassins

Sous-bassin	Superficies (km <sup>2</sup> ) avec les limites approximatives de validation	Superficies (km <sup>2</sup> ) avec les limites manuelles de validation	Superficies (km <sup>2</sup> ) avec les limites PHYSITEL
LG4	30 000	27 110	27 790
Laforge	9 212	9 791	9 958
Caniapiscau	37 930	38 480	36 770

Toutes ces limites seront intégrées dans EQeau afin de comparer leur influence sur le calcul de l'équivalent en eau moyen par sous-bassin.

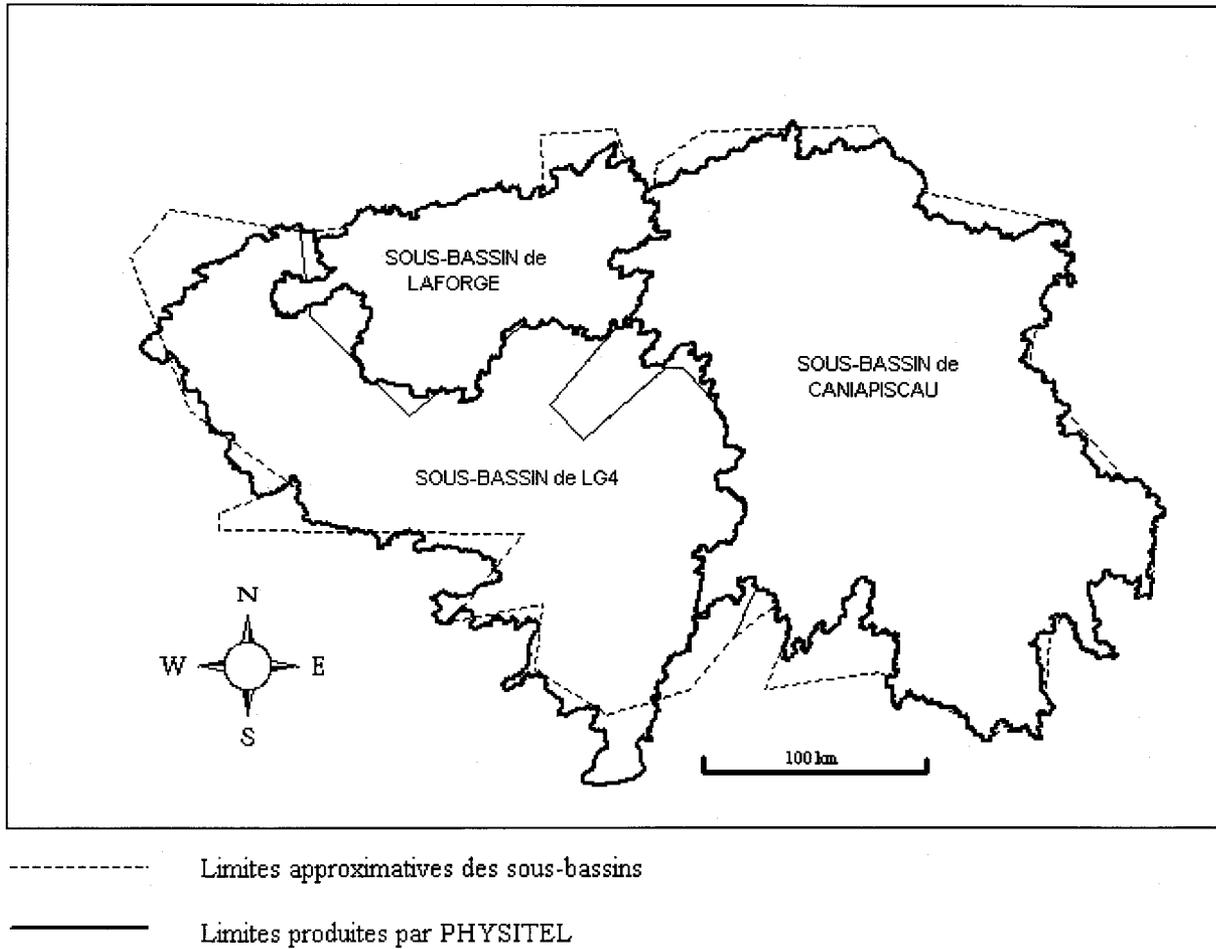
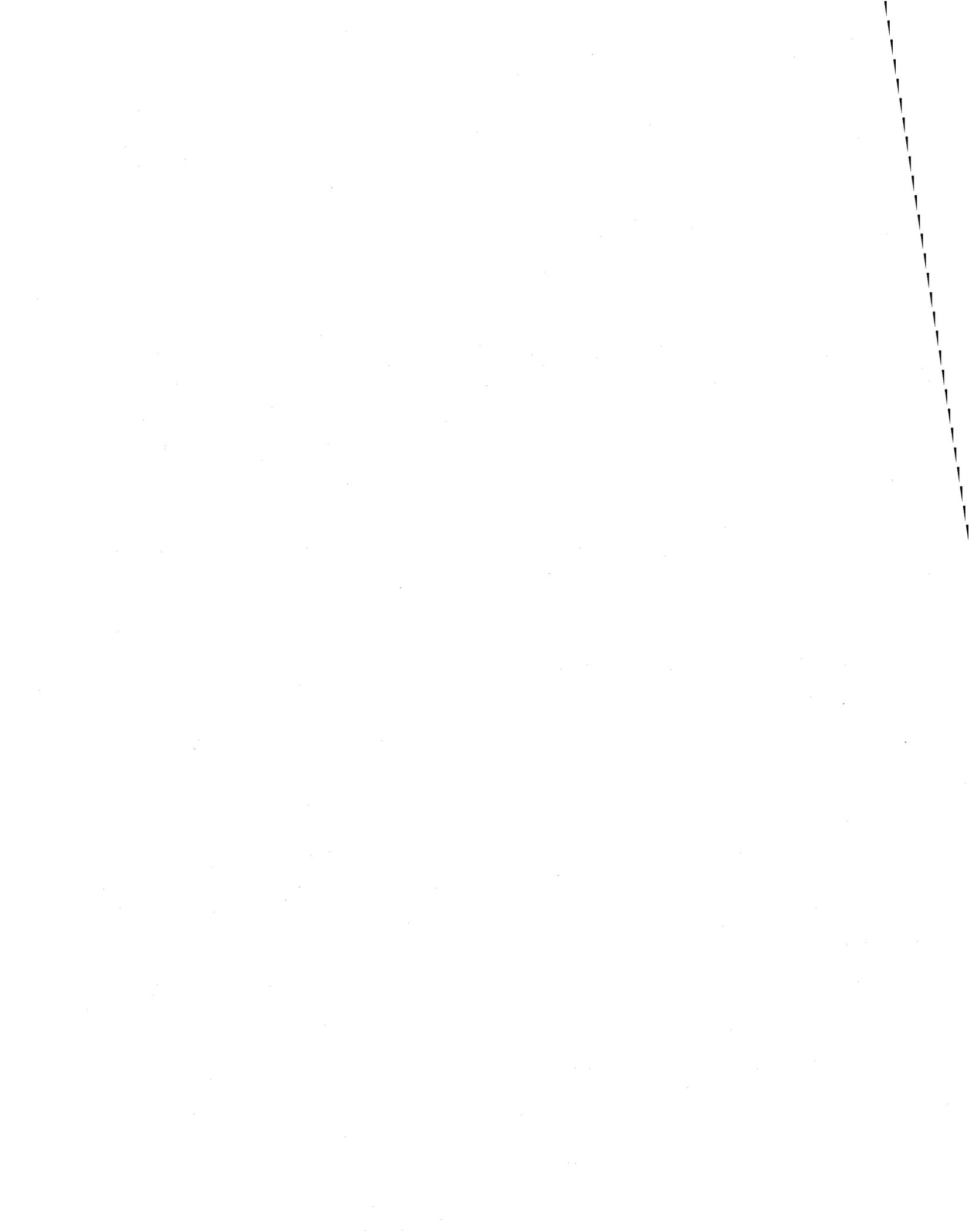


Figure 8.1 : Limites des trois sous-bassins amonts de la rivière La Grande



## 9. Classification de l'occupation du sol des sous-bassins de LG4, Laforge et Caniapiscau

---

### 9.1 Caractéristiques des images Landsat-TM

Afin d'obtenir une classification de l'occupation du sol pour l'ensemble des trois sous-bassins amont de la rivière La Grande, cinq images Landsat-TM sont nécessaires (figure 9.1). Les images couvrant le sous-bassin de LG4 (#1 et #3) avaient déjà été acquises et classifiées au début du projet RADARSAT (rapport de janvier 1998). Toutefois, suite à l'ajout des sous-bassins de Laforge et de Caniapiscau et par conséquent, du choix d'une nouvelle projection de travail (Lambert) et d'une nouvelle résolution de travail (50m), le traitement des images #1 et #3 a été repris et trois nouvelles images (#2, #4 et #5) ont été acquises par Hydro-Québec. Il est à noter que 1% du territoire, surtout à l'extrême nord-est, n'est pas couvert par ces images. L'information sera éventuellement dérivée des images ScanSAR de 1999. Le tableau 9.1 résume les caractéristiques des images.

Tableau 9.1 : Caractéristiques des images Landsat-TM

	Date	Fauchée	Centre d'image	Bandes
#1	14 juin 1995	16/22	54°01'N, 72°46'W	3,4,5 (MIR, PIR, R)
#2	14 juillet 1997	15/22	54°44'N, 70°42'W	3,4,5 (MIR, PIR, R)
#3	14 juillet 1997	15/23	53°25'N, 71°20'W	3,4,5 (MIR, PIR, R)
#4	7 juillet 1997	14/22	54°15'N, 69°12'W	3,4,5 (MIR, PIR, R)
#5	15 septembre 1996	13/22	53°18'N, 68°05'W	3,4,5 (MIR, PIR, R)

---

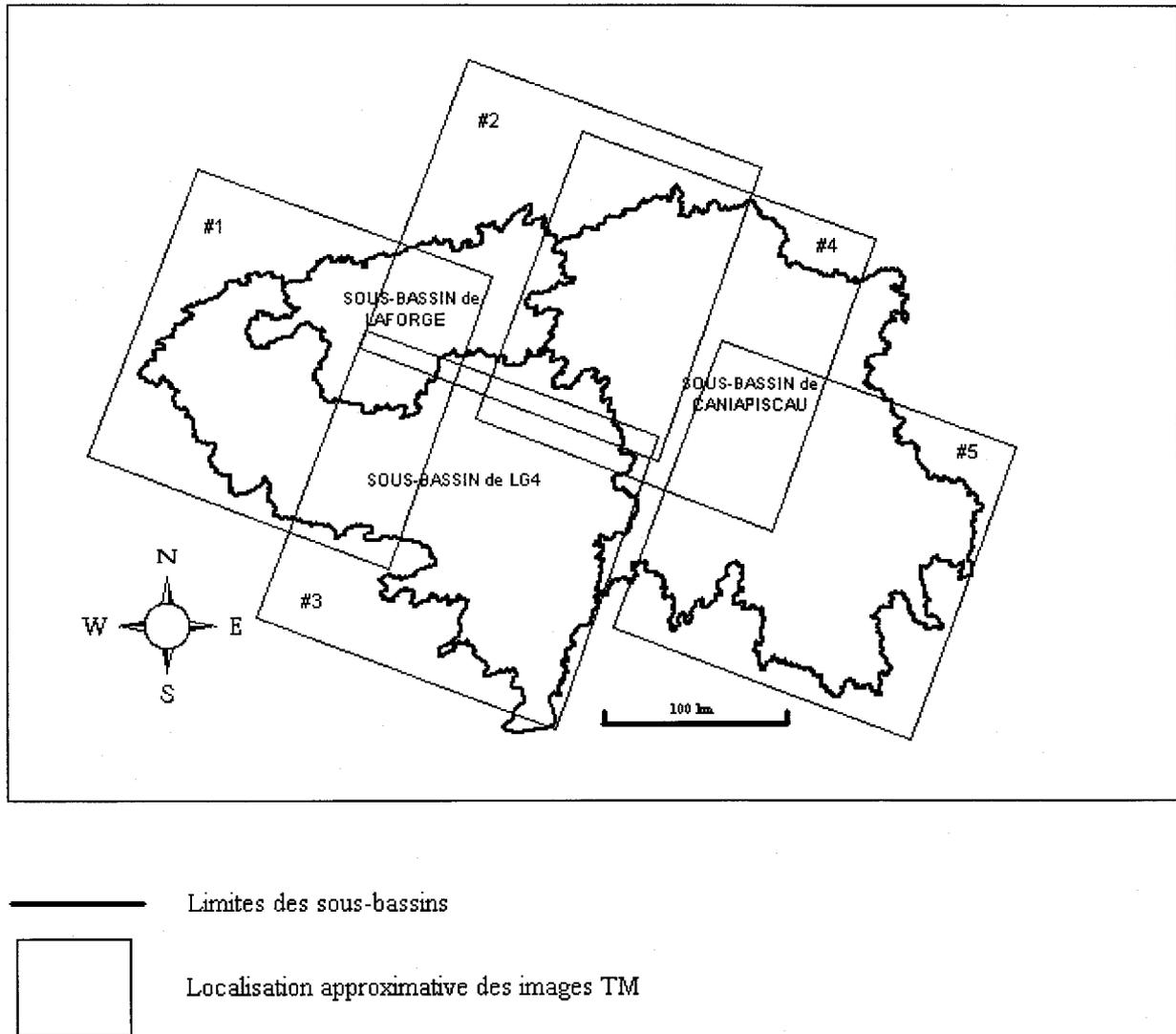


Figure 9.1 : Images Landsat-TM nécessaires à la classification de l'occupation du sol

## 9.2 Correction géométrique des images Landsat-TM effectuée par VIASAT

Le territoire des trois sous-bassins de LG4, Laforge et Caniapiscou couvre plusieurs fuseaux de la projection UTM, ce qui complique la géoréférenciation des images. La projection Lambert, mieux adaptée aux grands territoires, a donc été retenue pour la suite du projet. De plus, afin de réduire la dimension des fichiers et de correspondre à la dimension des pixels établie pour les images Radarsat, les images Landsat-TM ont été rééchantillonnées de 25 à 50m. Le tableau 4.2 présente les caractéristiques des images géoréférencées.

Tableau 9.2 : Caractéristiques des images géoréférencées

<b>Projection</b>	Lambert Conique Conforme
<b>1<sup>er</sup> parallèle transverse</b>	44°
<b>2<sup>ème</sup> parallèle transverse</b>	46°
<b>Méridien central</b>	60°
<b>Datum</b>	NAD83 (Canada)
<b>« False Easting »</b>	1 000 000
<b>Résolution spatiale</b>	50m

## 9.3 Classification des cinq images Landsat-TM

La principale difficulté de la classification réside dans la variation saisonnière de la réflectance du sol et de la végétation due à la disparité entre les dates d'acquisition des images. Trois images ont été acquises en été (juillet 1997), une au printemps (juin 1995) et l'autre à l'automne (septembre 1996). Certaines classes se distinguent bien à une date et se confondent totalement à une autre. Par contre, la variation annuelle n'est pas apparente, mis à part l'apparition de quelques nouveaux brûlis et la baisse du niveau des lacs et réservoirs.

L'autre problème majeur provient de la nature même de l'occupation du sol. Le secteur d'étude est majoritairement dominé par une forêt ouverte où la densité d'arbres varie constamment. Il n'y a donc pas de limites de classes claires et précises mais plutôt une gradation des teintes observées. Par exemple, en juillet, un lichen à découvert possède une très forte réflectance et le pixel paraît blanc sur le composé couleur des bandes spectrales MIR (moyen infrarouge), PIR (proche infrarouge) et R (rouge). S'il y a présence d'épinettes avec le lichen, le pixel paraît alors bleu

pâle. L'intensité et la teinte de ce bleu varieront graduellement en fonction de la proportion lichen-épinettes sur le pixel. Dans le cas où la sphaigne remplace le lichen, le pixel passera alors d'un vert pâle à un vert sombre. Enfin, la présence d'arbustes feuillus viendra aussi modifier la teinte.

En tenant compte de ces facteurs et à partir de la connaissance du territoire, les classes suivantes ont été établies :

A. Forêt (Densité d'arbres moyenne (40%) à forte (60%))

Généralement, le sol de ces forêts plus denses est humide et recouvert de sphaigne et d'arbustes feuillus. Ces derniers ne paraissent presque pas sur l'image du printemps, sont très verts à l'été et rougissent à l'automne.

B. Forêt ouverte (Densité d'arbres moyenne (40%) à faible (10%))

Généralement, lorsque la densité d'arbres diminue, le sol est plutôt recouvert d'un lichen blanc ou vert clair et il y a moins d'arbustes feuillus.

C. Landes (Densité d'arbres < 10%)

Les landes sont généralement d'anciens brûlis régénérés où le sol est maintenant complètement recouvert de lichen et où il peut y avoir quelques arbres. Les sommets de plusieurs collines sont aussi recouverts de lichen et peu d'arbres y poussent.

D. Brûlis (récents et plus anciens)

De grands secteurs ont subis les ravages du feu. Ces secteurs se distinguent des landes par le fait que la végétation n'a pas encore repris sa place. Le sol est recouvert d'un lichen brûlé et séché, avec une régénération plus ou moins avancée selon l'âge du brûlis.

E. Sols nus

Les sols nus comprennent tous les sols sans végétation, à l'exception des brûlis. Les routes, gravières, affleurements rocheux, sommets de collines dénudés, zones anciennement inondées et maintenant asséchées, etc.

---

## F. Eau

Il s'agit bien sûr des lacs, rivières et réservoirs. Dans le cas des rivières, seules celles suffisamment larges (50m) seront classées comme telle.

La classification de l'image est un processus itératif où l'on ajuste et modifie constamment les sites d'entraînement et les paramètres statistiques afin d'obtenir un résultat satisfaisant et homogène entre les cinq images. L'algorithme utilisé est celui du maximum de vraisemblance. La carte d'occupation du sol résultante est présentée à la figure 9.2. Le tableau 9.3 présente quant à lui les pourcentages des superficies propres à chaque classe.

Note : Il est clair par expérience, qu'il existe sur le territoire une classe *Tourbières*. Toutefois, celle-ci ne se distingue pas suffisamment sauf peut-être au printemps. En fait, cette classe est composée d'un plan d'eau, généralement entourée de zones de sphaigne et de quelques bosquets d'arbres. Il s'agit donc d'un mélange de plusieurs classes.

Tableau 9.3 : Proportion des classes d'occupation du sol

Classes	Proportions (arrondies) [%]			
	LG4	Laforge	Caniapiscou	Tout le territoire
<b>Eau</b>	25	28	24	25
<b>Forêt</b>	19	16	33	26
<b>Forêt ouverte</b>	35	38	27	31
<b>Lande</b>	10	8	4	6
<b>Brûlis</b>	10	7	4	6
<b>Sol nu</b>	1	2	7	4
<b>Aucune donnée</b>	0	0	2	1

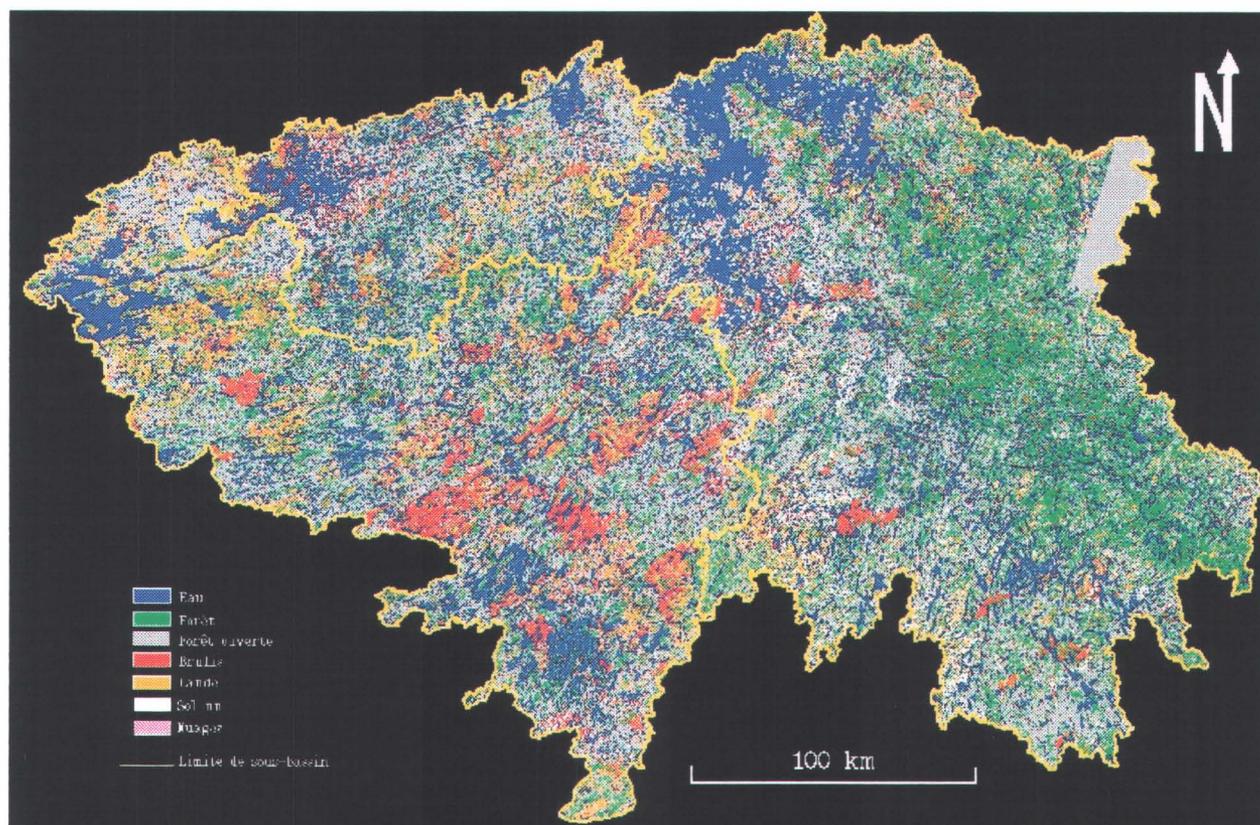


Figure 9.2 : Carte de l'occupation du sol

Ce tableau permet de constater que les forêts du sous-bassin de Caniapiscou sont plus denses que sur les deux autres sous-bassins. Le nombre de brûlis y est toutefois moindre et par conséquent les landes y sont aussi moins nombreuses. La plus forte proportion de sols nus peut quant à elle s'expliquer par un relief plus accentué et donc par les nombreux sommets de collines dénudés. Un petit secteur au nord-est de Caniapiscou n'est pas couvert par les images. Il sera complété à partir de l'information fournie par une image ScanSAR de l'automne 1998.

#### 9.4 Validation de la classification

Le 14 octobre 1998, un survol de la région en hélicoptère a permis de recueillir des informations indispensables pour l'interprétation des images. Une série de photos a également permis d'établir plusieurs sites pour valider la classification. Le tableau 9.4 présente les matrices de confusion pour les trois images couvrant les secteurs survolés. Ces matrices indiquent la proportion de pixel bien classés par rapport aux observations in situ.

De cette validation, on retient d'abord que la principale confusion se retrouve entre la forêt et la forêt ouverte. Cette situation était prévisible, puisque ces deux classes se chevauchent naturellement. De plus, la saison joue un rôle important. En juin, moment où le lichen est au début de sa saison végétative, plusieurs pixels de forêt ouverte sont plus sombres et se classent dans la forêt plus dense (22%). Par contre, en juillet et même en septembre, le lichen est très visible et fait paraître plus clairs les pixels de forêt plus dense, qui se retrouvent alors dans la classe forêt ouverte (47% et 30%).

Une autre confusion est observable entre les classes de landes et de sols nus. Là encore c'est compréhensible, puisque le lichen peut avoir une réflectance très forte, similaire à celle d'un sol nu. Cette situation survient surtout sur les sommets de collines.

En bref, la précision de la classification est au minimum à 70% et généralement près de 80%. En réalité, elle est probablement supérieure puisque les sites de validation ne sont pas précis à 100% et que la confusion entre les deux classes de forêts ne peut être considérée comme une erreur absolue puisque la limite entre ces deux classes est graduelle. Le seul problème qui persiste est l'impossibilité de déterminer en tout temps la classe tourbière.

Tableau 9.4 : Précision de la classification - Matrices de confusion

Image #1	14 juin 1995						
	Classes obtenues à partir des images						
		Eau	Forêt	Forêt ouverte	Lande	Brûlis	Sol nu
<i>Sites de validation</i>	<b>Eau</b>	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	<b>Forêt</b>	0.5%	87%	12%	0.3%	0.2%	0.2%
	<b>Forêt ouverte</b>	0.5%	22.2%	68%	7.5%	0.3%	1.1%
	<b>Lande</b>	0.3%	5.5%	6.6%	86%	0.6%	0.6%
	<b>Brûlis</b>	1.1%	2.1%	0.0%	0.1%	95%	2.1%
	<b>Sol nu</b>	0.7%	3.1%	6.8%	9.0%	5.9%	75%
	<b>Moy : 85%</b>						
	<b>Globale : 81%</b>						

Image #2		14 juillet 1997					
		<i>Classes obtenues à partir des images</i>					
		Eau	Forêt	Forêt ouverte	Lande	Brûlis	Sol nu
<i>Sites de validation</i>	Eau						
	Forêt	0.8%	50.8%	47.4%	0.3%	0.5%	0.2%
	Forêt ouverte	0.1%	6.9%	90.1%	1.5%	1.3%	0.2%
	Lande	0.0%	1.4%	2.1%	86.9%	9.6%	0.0%
	Brûlis	0.0%	0.3%	1.2%	10.5%	88.0%	0.0%
	Sol nu	1.3%	0.2%	34.8%	7.8%	12.2%	43.8%
	Moy : 72%						
	Globale : 69%						

Image #5		15 septembre 1996					
		<i>Classes obtenues à partir des images</i>					
		Eau	Forêt	Forêt ouverte	Lande	Brûlis	Sol nu
<i>Sites de validation</i>	Eau						
	Forêt	0.4%	65.8%	30.1%	0.4%	0.9%	2.4%
	Forêt ouverte	0.4%	4.5%	90.6%	0.0%	1.3%	3.2%
	Lande	0%	0%	0%	65.0%	0%	35.0%
	Brûlis						
	Sol nu	0%	0%	12%	6.6%	0.8%	80.6%
	Moy : 75%						
	Globale : 77%						

## **10. Campagnes de terrain**

---

### **10.1 Campagne d'octobre 1998**

Une première campagne de terrain s'est tenue du 12 au 15 octobre 1998. Elle a permis de vérifier le matériel de mesure en place et d'effectuer certaines réparations. Les sondes diélectriques ont aussi été réinstallées à une plus grande profondeur afin d'obtenir des mesures plus représentatives du sol, sans être influencées par le couvert de lichen. C'est aussi lors de cette campagne que le territoire a été survolé en hélicoptère pour la validation de l'occupation du sol.

### **10.2 Campagne de novembre 1998**

La deuxième campagne de terrain s'est tenue du 9 au 12 novembre 1998. Elle avait pour but de déterminer les conditions environnementales lors de l'acquisition des quatre images de référence (Tableau 10.1) pour la suite du projet. Les valeurs des sondes permanentes de température et de constante diélectrique du sol ont été relevées, de même que l'épaisseur de neige et la profondeur du gel du sol. La figure 10.1 présente un sommaire des conditions enregistrées entre octobre et décembre 1998 par la station climatologique permanente du site #2 sud localisée sur le sous-bassin LaForge. On y remarque qu'en octobre et au début de novembre, la température du sol fluctue fortement et simultanément à celle de l'air, puisqu'il n'y a pas encore de couvert de neige. À partir de la mi-novembre, la température du sol fluctue beaucoup moins que celle de l'air puisque les accumulations de neige sont régulières et importantes. Lorsque le couvert atteint 40 à 50 cm d'épaisseur, la température du sol est stable. À la mi-décembre, la température de l'air baisse radicalement, les chutes de neige diminuent, la neige au sol se tasse et la température du sol descend de quelques degrés en raison du froid intense.

---

Le tableau 10.2 résume les conditions prévalants au site #2 sud lors des dates spécifiques de l'acquisition des images.

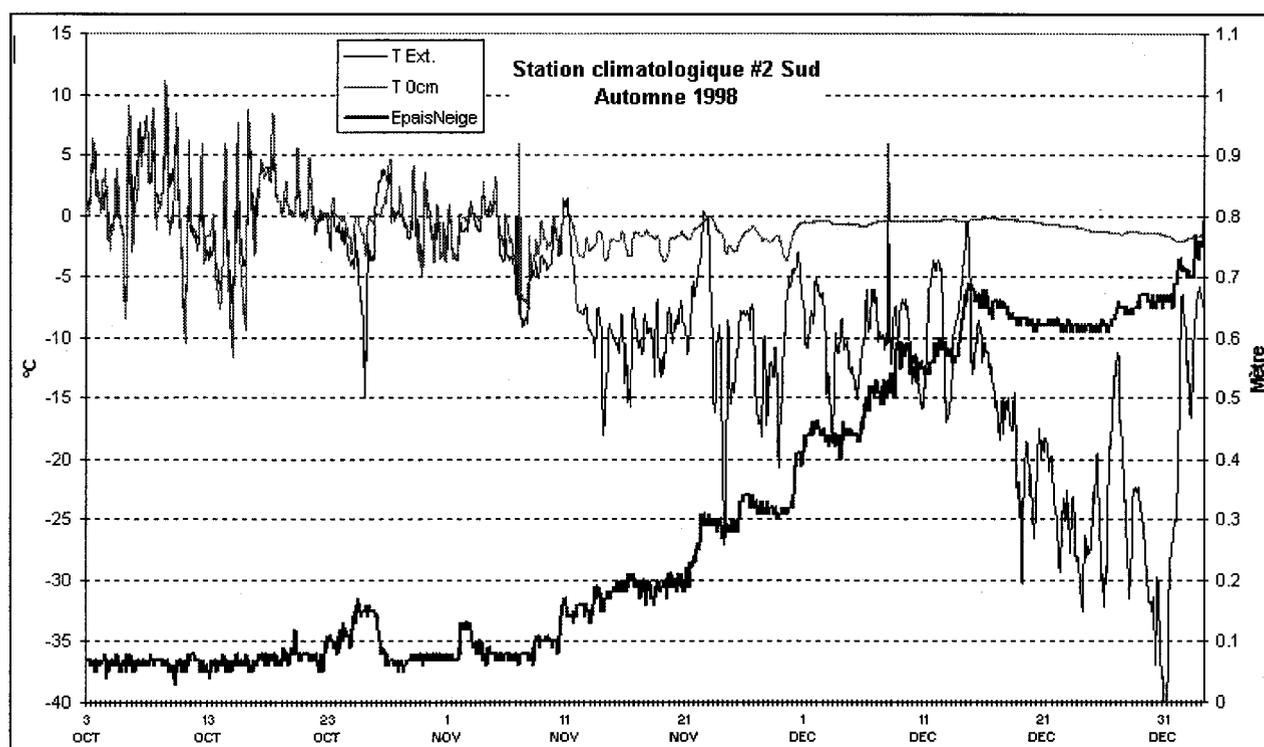


Figure 10.1 : Données de la station climatologique du site #2 sud pour l'automne 1998

Tableau 10.1 : Images acquises en novembre 1998

Dates	Modes		Nombre d'images	Heure d'acquisition	Couverture
7 novembre 1998	ScanSAR	Wide	1	17h35	500 km x 500 km
11 novembre 1998	Wide 1	(20° - 31°)	2	?	150 km x 300 km
14 novembre 1998	Wide 1	(20° - 31°)	1	?	150 km x 150 km

Tableau 10.2 : Données de la station #2 sud lors de l'acquisition des images

Dates	Heure	Tair	Tsol surface	Épaisseur neige
7 novembre 1998	18h	-8	-6	<10 cm
11 novembre 1998	18h	1.1	0	10 à 15 cm
14 novembre 1998	18h	-8.9	-1.4	15 à 20 cm

## Conclusion

---

Les trois objectifs du projet « *Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT* » ont été atteints.

Premièrement, des cartographies de l'équivalent en eau du couvert nival, de la neige humide et du sol gelé ont été réalisées à partir des images RADARSAT, en mode Standard acquises durant les saisons hivernales 1996-1997 et 1997-1998 dans le cadre du programme ADRO.

Deuxièmement, il s'est avéré que les images Standard étalonnées, en mode S1, sont mieux adaptées que celles en mode S7 pour suivre l'évolution du couvert nival dans une région au relief peu accidenté et dominée par la taïga (forêt ouverte). L'effet du gel du sol sur le signal est plus facilement détectable en mode S1 qu'en mode S7 ( amplitude de 4 dB vs 1.5 dB). L'estimé de l'équivalent en eau moyen extrait des images en mode S1 est comparable à la moyenne des valeurs mesurées à nos sites d'échantillonnage au sol et il est plus précis que l'estimé dérivé des images en mode S7 qui surestime l'équivalent en eau moyen de 15 à 30 mm. La carte réalisée à partir de l'image en mode S1 du 6 mai 1998 a pu montrer que mis à part les plans d'eau seulement 4% du territoire était encore couvert de neige humide (fin de la période de fonte) ce qui correspond aux observations recueillies sur le terrain.

Vu l'immensité du bassin de la rivière La Grande, une analyse bénéfices-coûts a montré l'intérêt économique d'utiliser les images ScanSAR (500 km) au lieu des images Standard (100 km). L'information contenue dans les images ScanSAR s'apparente à celle des images Standard et la variation temporelle des coefficients de rétrodiffusion semble correspondre aux conditions environnementales observées. Ces observations pourraient indiquer une certaine stabilité temporelle du mode ScanSAR et permettre éventuellement la création de rapports de rétrodiffusion (image d'hiver – image de référence) valables. De tels rapports pourraient également amoindrir les discontinuités entre les faisceaux. Il semblerait donc raisonnable d'appliquer l'algorithme de l'équivalent en eau sur les images ScanSAR même si elles ne sont pas encore étalonnées. Cette étape de l'analyse sera faite pour les images ScanSAR de 1998 en même temps que les images ScanSAR de l'hiver 1999. Finalement, ce n'est qu'en appliquant comparant les résultats de l'application de l'algorithme à ces images aux estimés et en des images Standard de l'hiver 1998 ou aux estimés des images Wide de l'hiver 1999 ainsi qu'aux mesures au sol que nous pourrions établir la précision de ces estimés. Néanmoins, nous espérons que ces images puissent être étalonnées dans un prochain avenir.

---

Troisièmement, un prototype intégrant les algorithmes développés par l'INRS-Eau pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige à partir des images RADARSAT a été développé conjointement par Viasat Géo-technologie et l'INRS-Eau dans l'environnement MapInfo™. La deuxième version du *prototype EQeau* accompagne le dépôt de ce rapport tel que prévu (janvier 1999).

Le but ultime de ce projet était de faire en sorte que les méthodes utilisant les produits RADARSAT soient intégrés au système de prévision hydrologique d'Hydro-Québec et ce pour l'ensemble du bassin de la rivière La Grande dans les prochaines années. Pour se faire, une démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT et de la faisabilité opérationnelle du *prototype EQeau* sera faite à l'hiver 1999 avec le support d'Hydro-Québec et du *Programme des projets pilotes d'observation de la terre (EOP3)* de l'Agence Spatiale canadienne. Des images ScanSAR et Wide 1 seront alors utilisées. En effet, si la qualité radiométrique des images ScanSAR ne permet pas d'estimer l'équivalent en eau de la neige avec une précision suffisante, une autre avenue économiquement intéressante est offerte au gestionnaire du bassin de la rivière La Grande soit la couverture de 75% du bassin par des images en mode Wide (W1), ce mode uni-faisceau étant déjà étalonné.

## Références

---

Baghdadi, N., Fortin J.P. et M. Bernier, (sous-presse) Accuracy of Wet snow Mapping using Simulated Backscattering Coefficients from Observed Snow Cover Characteristics, *International Journal of Remote Sensing*.

Bernier M. et J.P. Fortin (1998). The Potential of Times Series of C-Band SAR data to Monitor Dry and Shallow Snow Cover, *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no 1, janvier, pp 226-243.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, J-L. Bisson et P. Vincent (accepté en sept. 98). Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires. *Revue des sciences de l'eau*.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Turcotte et A. Royer (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport rédigé pour l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec. INRS-Eau rapport de recherche No RE-523c, septembre 1998.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, A. Royer et M. Lelièvre (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport rédigé pour l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec. INRS-Eau rapport de recherche No RE-523b, juin 1998.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, F. Gendron, et A. Royer (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport rédigé pour l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec. INRS-Eau rapport de recherche No R523, janvier 1998.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, M. Lelièvre, J. Fitzback et N. Baghdadi (1997). Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport rédigé pour l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec. INRS-Eau rapport de recherche No R508, juillet 1997.

Koskinen, J.T., Pulliainen, J.T., et M.T. Hallikainen, (1997) The Use of ERS-1 SAR Data in Snow Melt Monitoring, *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-35, no 3, pp 601-610.

---

Martin, D., Bernier, M., Sasseville, J.L. et R. Charbonneau (accepté en juin 98). Evaluation financière de l'intégration de technologies satellitaires pour le suivi du couvert nival, au sein d'une entreprise hydroélectrique, *International Journal of Remote Sensing*.

Rott H. et J. Nagler (1995) Monitoring Temporal Dynamics of Snowmelt with ERS-1 SAR. Comptes-rendus de IGARS'95, Firenze, Italy, Juillet, pp 1747-1749.

---