

**Record Number:** 15270  
**Author, Monographic:** Bernier, M.//Fortin, J. P.//Gauthier, Y.//Royer, A.//Lelièvre, M.  
**Author Role:**  
**Title, Monographic:** Suivi du couvert nival à l'aide des données de RADARSAT. Rapport d'étape 2  
**Translated Title:**  
**Reprint Status:**  
**Edition:**  
**Author, Subsidiary:**  
**Author Role:**  
**Place of Publication:** Québec  
**Publisher Name:** INRS-Eau  
**Date of Publication:** 1998  
**Original Publication Date:** 30 juin 1998  
**Volume Identification:**  
**Extent of Work:** iii, 38  
**Packaging Method:** pages  
**Series Editor:**  
**Series Editor Role:**  
**Series Title:** INRS-Eau, rapport de recherche  
**Series Volume ID:** 523 e2  
**Location/URL:**  
**ISBN:** 2-89146-349-8  
**Notes:** Rapport annuel 1998-1999  
**Abstract:** Rapport d'étape du 30 juin 1998 pour Prévisions et ressources hydriques, Hydro-Québec  
Porte le numéro R523b en couverture

**Call Number:** R000523 e2  
**Keywords:** rapport/ ok

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

**Rapport d'étape pour**

**Prévisions et Ressources Hydriques  
Hydro-Québec**

**par**

**Monique Bernier, Jean-Pierre Fortin, Yves Gauthier  
Alain Royer et Manon Lelièvre**

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

**Rapport de recherche No RE-523b**

**30 juin 1998**

© INRS-Eau, 1998

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

Alain Royer, technicien en informatique

Manon Lelièvre, stagiaire

# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJECTIFS DU PROJET.....</b>	<b>5</b>
<b>3. DÉLIMITATION DU CONTOUR DU SOUS-BASSIN DE LG4.....</b>	<b>7</b>
3.1 MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE .....	7
3.2 DÉDUCTION AUTOMATIQUE DU CONTOUR DU SOUS-BASSIN .....	7
<b>4. CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DU COUVERT NIVAL À PARTIR DES IMAGES RADARSAT DE FÉVRIER ET MARS 1998.....</b>	<b>13</b>
4.1 CAMPAGNE DE TERRAIN .....	13
4.2 CARTOGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE.....	21
4.3 CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE .....	28
<b>5. TRAVAUX À VENIR ET ÉCHÉANCIER.....</b>	<b>31</b>
5.1 LIVRABLES À DÉPOSER AU 30 DÉCEMBRE 1998.....	31
5.2 ACTIVITÉS COMPLÉMENTAIRES.....	31
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>33</b>



## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Sommaire des campagnes de terrain pour chaque acquisition d'images.....	13
Tableau 2 : Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés.....	22

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Délimitation automatique du sous-bassin de LG-4 (1 <sup>er</sup> essai).....	11
Figure 2 : Sommaire mensuel des conditions climatologiques.....	14
Figure 3 : Conditions environnementales prévalant lors des jours précédant l'acquisition d'images.....	16
Figure 4a : Profils typiques du couvert de neige au début février 1998.....	17
Figure 4b : Profils typiques du couvert de neige à la mi-mars 1998.....	18
Figure 4c : Profils typiques du couvert de neige au début mai 1998.....	19
Figure 5 : Détermination de la sous-estimation des équivalents en eau mesurés en février 1998 en comparant les équivalents en eau prévus et mesurés en mars 1998.....	20
Figure 6 : Comparaison des équivalents en eau prévus et mesurés en mars 1998 après correction des mesures de février 1998.....	20
Figure 7 : Coefficients de rétrodiffusion des images en mode S1.....	24
Figure 8 : Relation entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique du couvert de neige au milieu de l'hiver.....	25
Figure 9 : Précision des estimations de l'équivalent en eau de la neige pour les 35 sites d'échantillonnages.....	25
Figure 10: Cartographie de l'équivalent en eau du secteur de LG4 pour le 30 janvier et le 19 mars 1998, à une résolution de 500m par 500m.....	26
Figure 11 : Conditions climatologiques enregistrées en avril 1998, au site #2Sud.....	27
Figure 12 : Augmentation des coefficients de rétrodiffusion lors du dégel du sol et de sa saturation en eau.....	29
Figure 13 : Variation de la rétrodiffusion entre janvier et mai 1998.....	30

# 1. INTRODUCTION

---

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*) offre les 20 images RADARSAT-I nécessaires à ce projet.

En préparation à RADARSAT-1, de décembre 1993 à décembre 1995, l'équipe de télédétection de l'INRS-Eau évalua le potentiel des images RSO du satellite ERS-1 pour estimer l'équivalent en eau du couvert nival dans la région de la Baie James. Rappelons que les images ERS-1 ont alors été offertes par le Centre canadien de télédétection. Cette phase ERS-1 a démontré qu'il était possible de dériver un algorithme pour estimer l'équivalent en eau à partir d'une image hivernale et d'une image automnale et de la densité moyenne du couvert nival (Collectif 1996; Bernier *et al*, soumis). L'algorithme développé "*algorithme ERS*" sous-estime l'équivalent en eau mesuré lors des campagnes intensives de terrain de 10 à 30 mm (5 à 15%), avec une erreur type de 20 à 40 mm. ( $\pm 10$  à 20%).

La phase RADARSAT, en cours de réalisation, vise à adapter aux données de RADARSAT (bande C-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 de trouver le ou les modes d'images adaptés au contexte du bassin de la rivière La Grande. En effet, le satellite RADARSAT (bande C- polarisation HH) 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) peuvent être acquises dans sept gammes d'angles d'incidence entre 20° et 59°. Par opposition, ERS-1 opérait à un angle d'incidence médian de 23° (RSI, 1995). RADARSAT possède aussi le mode SCANSAR (résolution au sol de 100 m) qui peut balayer 350 km et même 500 km par orbite.

---

Durant les six premiers mois de la phase RADARSAT (février à juillet 1997), l'analyse des données terrain et des images RADARSAT 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. Ainsi, *l'algorithme RADARSAT* appliqué aux deux images Standard en mode S7 (45-49°) surestime l'équivalent en eau mesuré lors des campagnes intensives de 15 à 30 mm (12 à 18%) avec un erreur type de 26 à 32 mm. Ce même algorithme appliqué à l'image en mode S1 (20-27°) du 4 février 1997 estime bien l'équivalent en eau moyen du couvert nival avec une erreur type de 28 mm. De plus, l'analyse fonctionnelle du prototype EQeau qui permet d'intégrer et d'utiliser les algorithmes développés par l'INRS-Eau a été réalisée conjointement par VIASAT Géo-Technologie et l'INRS-Eau.

D'ailleurs, le livrable clé de la deuxième étape (août 1997 à janvier 1998) 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 réalisés sous forme de DLL par l'INRS-Eau (Calcul de l'équivalent en eau, intégration par mailles d'une matrice, 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™.

Ce troisième rapport d'étape résume les activités réalisées de février à juin 1998 par l'INRS-Eau. Il constitue, par lui-même, l'un des livrables du projet et décrit aussi les trois autres livrables attendus au 30 juin 1998 :

- 1) Le contour et la structure du sous-bassin de LG4 (Chapitre 3);
  - 2) La cartographie de l'équivalent en eau du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT de février et mars 1998 (Chapitre 4).
  - 3) La cartographie de la neige humide du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT d'avril et/ou mai 1998 (Chapitre 5).
-

---

De plus, en décembre 1997, Viasat Géo-Technologie et l'INRS-Eau ont préparé en collaboration avec 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 afin d'obtenir du financement complémentaire pour la démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT et la faisabilité opérationnelle du prototype EQeau à l'hiver 1999. Le 31 mars dernier, Travaux publics et Services gouvernementaux, annonçait à Viasat Géo-Technologie que notre projet avait été retenu. Le marché (contrat) a été signé le 16 juin 1998. Ce projet pilote s'étale sur 21 mois, soit d'avril 1998 à décembre 1999.

Ce financement octroyé à Viasat Géo-Technologie et à l'INRS-Eau (sous-contractant) par EOP3 (68 160\$ en 1998 et 81 840\$ en 1999), permettra aux deux partenaires de voir à l'acquisition de nouvelles images RADARSAT pour la saison 1998-1999, de réaliser la cartographie de l'utilisation du sol et le contour des sous-bassins de la moitié amont (77 114 km<sup>2</sup>) du bassin de la Rivière La Grande ainsi que de raffiner les algorithmes et le progiciel EQeau durant l'automne 1998 en vue de la démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT durant les premiers mois de l'année 1999.

---



## **2. OBJECTIFS DU PROJET**

---

Rappelons ici les trois objectifs de la phase RADARSAT (février 1997 à décembre 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 Grande dans les prochaines années.

---



### **3. DÉLIMITATION DU CONTOUR DU SOUS-BASSIN DE LG4**

---

#### **3.1 Modèle numérique d'altitude**

Un modèle numérique d'altitudes (MNA) représentatif de la topographie réelle du terrain est primordial pour la détermination automatique du contour du sous-bassin de LG4 à l'aide du logiciel PHYSITEL. Tel que mentionné dans le rapport d'étape du 31 janvier 1998, le MNA provenant de la Base Nationale de Données Topographiques présentait trop de discontinuités entre les feuillets pour être utilisé directement. VIASAT Géotechnologie a pu obtenir de Forêt Canada, un MNA de meilleure qualité et a donc pu générer un nouveau MNA unifié du sous-bassin de LG4 sous forme matricielle, avec une maille de 50m X 50m. Quelques discontinuités sont encore présentes, mais elles sont plutôt ponctuelles. De manière à diminuer la taille importante du fichier (>100Mb), nous avons rééchantillonné le MNA selon une maille de 100m. Cette résolution permet d'obtenir un contour précis tout en optimisant les temps de calcul et la taille des fichiers à manipuler.

#### **3.2 Déduction automatique du contour du sous-bassin**

La déduction automatique du contour du sous-bassin à partir du MNA s'effectue en trois étapes. Dans une première étape, chacune des mailles de la matrice se voit attribuée une orientation d'écoulement. L'orientation d'écoulement est égalée à la direction qui permet d'obtenir la pente descendante la plus prononcée parmi les huit pentes définies par (1) la maille dont on évalue l'orientation et (2) les huit mailles qui en sont voisines. Ainsi, pour une maille donnée, seulement huit orientations discrètes sont possibles soient les orientations nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest et nord-ouest. C'est lors de cette étape qu'une discontinuité entre deux feuillets topographiques peut induire une mauvaise direction de l'écoulement aux limites des feuillets.

---

La détermination de l'orientation selon l'approche définie au paragraphe précédent ne permet pas toujours qu'une orientation d'écoulement puisse être attribuée à chacune des mailles constituant le bassin. En effet, dans les secteurs du bassin où l'élévation du terrain est constante (lacs, replats) et dans les secteurs où le MNA définit une dépression, il est impossible de déterminer, pour une maille donnée, une orientation valable par l'utilisation exclusive des altitudes des mailles qui lui sont immédiatement voisines. Cette situation survient fréquemment sur le sous-bassin de LG4 puisqu'il s'y trouvent des centaines de lacs et que la topographie est généralement peu accidentée (100 m de dénivelé). Comme il est essentiel que toutes les mailles du bassin possèdent une orientation d'écoulement, la seconde étape de traitement consiste à forcer une orientation de la manière suivante:

- (1) on regroupe, sous forme de zones, les mailles concomitantes qu'on ne peut orienter correctement,
- (2) on trouve un ou des exutoires pour chacune des zones et
- (3) on réoriente les mailles de chaque zone de manière à ce que chacune des mailles puisse se drainer par l'exutoire (ou par l'un des exutoires). À cette étape, faute de renseignements plus précis, PHYSITEL suppose que l'écoulement à l'intérieur des zones d'orientations indéterminées s'effectue suivant un parcours qui mène directement vers le ou les exutoires de la zone.

Lorsqu'une orientation d'écoulement est attribuée à chacune des mailles du MNA, il est possible de réaliser la troisième étape du traitement. Pour cette étape, il est essentiel de connaître la position de la maille qui inclut l'exutoire du bassin (maille-exutoire). Dans le cas du sous-bassin qui nous intéresse, la maille comprenant le barrage de LG4 a été utilisée. Il suffit ensuite d'identifier toutes les mailles qui se drainent directement ou indirectement dans la maille-exutoire du bassin en suivant les parcours définis précédemment par les orientations d'écoulement. La totalité des mailles qui se drainent dans la maille-exutoire sont alors réputées faire partie du bassin versant. Inversement, les mailles qui ne se jettent pas dans la maille-exutoire sont exclues de la définition du bassin. Cette troisième étape de traitement permet ainsi de définir les limites du bassin versant.

---

Le cas d'application du sous-bassin de LG4 est un défi de taille pour toute méthode de délimitation automatisée, tant pour les logiciels que pour les algorithmes et les machines. La superficie du territoire, la dimension des fichiers, la précision du MNA et les caractéristiques particulières de la région (lacs, topographie, rivières détournées) sont des facteurs qui entraînent un processus d'essais-erreurs très important. Les images Landsat-TM, utilisées pour la classification de l'occupation du sol (rapport du 31 janvier 1998), les cartes topographiques (1 :250 000) et la limite grossière du bassin fournie par Hydro-Québec ont été et seront utilisées pour valider nos essais.

La figure 1 montre la première limite de bassin obtenue par PHYSITEL en comparaison de la limite générale utilisée jusqu'à maintenant dans le cadre de ce projet. La forme obtenue lors de ce premier essai montre que notre logiciel et nos algorithmes performant assez bien mais qu'il reste plusieurs ajustements à faire. Quatre secteurs du sous-bassin LG4 semblent problématiques:

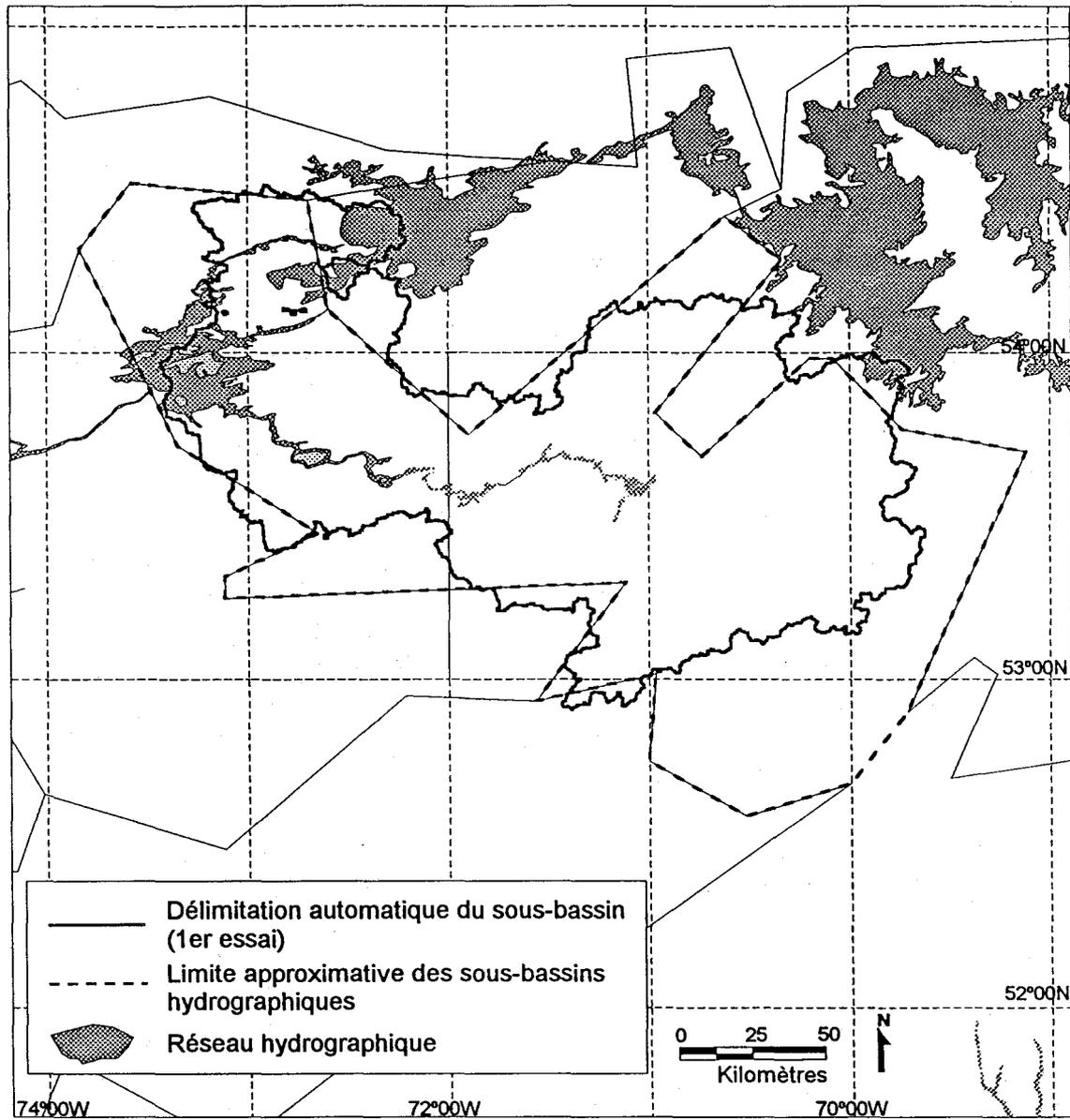
- Dans le cas du sud du bassin, le problème est causé par une discontinuité à la limite des feuillets 23E et 23D. Aux endroits où l'écoulement doit se faire vers le nord, une mauvaise concordance des altitudes à deux points situés à la limite des feuillets introduit une orientation inverse des pentes, ce qui amène alors tout ce secteur à se drainer vers le sud. Un rétablissement manuel des bonnes orientations devra être effectué.
  - Dans le cas du nord du bassin, on remarque deux phénomènes : (1) une mauvaise localisation automatique de l'exutoire et (2) une limite du bassin trop à l'est. Une fois de plus, ce secteur est affecté par la limite de deux feuillets située directement dans le réservoir de LG4. Une mauvaise orientation des pentes peut affecter significativement la délimitation du sous-bassin, surtout dans un secteur où des digues artificielles viennent compliquer notre tâche. L'étude approfondie de ce secteur devra être poursuivie.
  - L'indentation nord-est, observable sur la limite grossière, n'est pas reproduite sur la limite automatique. Il s'agit d'un secteur relativement plat et il faudra analyser des cartes à plus
-

grande échelle (1 : 50 000) pour bien comprendre le phénomène. Il existe encore une limite de feuillets à proximité mais elle ne semble pas présenter de problème à première vue.

- Le quatrième secteur mal délimité est l'extrusion située au centre-ouest du bassin. Ici aussi l'analyse de cartes topographiques plus précises est requise.

En résumé, un des problèmes majeurs semble être relié à la précision des données numériques disponibles. Lors de la prochaine étape, nous évaluerons l'ampleur des corrections manuelles nécessaires et nous tenterons d'utiliser un réseau hydrographique vectorisé pour orienter l'écoulement des zones problématiques et pour valider le résultat. Cette validation est un autre aspect difficile puisque la délimitation utilisée comme comparaison est très approximative.

---



fond de carte  
Source: Hydro-Québec

Figure 1 : Délimitation automatique du sous-bassin de LG-4 (1<sup>er</sup> essai)



## 4. Cartographie de l'équivalent en eau du couvert nival à partir des images RADARSAT de février et mars 1998

---

### 4.1 Campagnes de terrain

Quatre campagnes de terrain ont eut lieu lors de la saison 1997-1998 : une à l'automne, deux à l'hiver et une au printemps (Tableau 1).

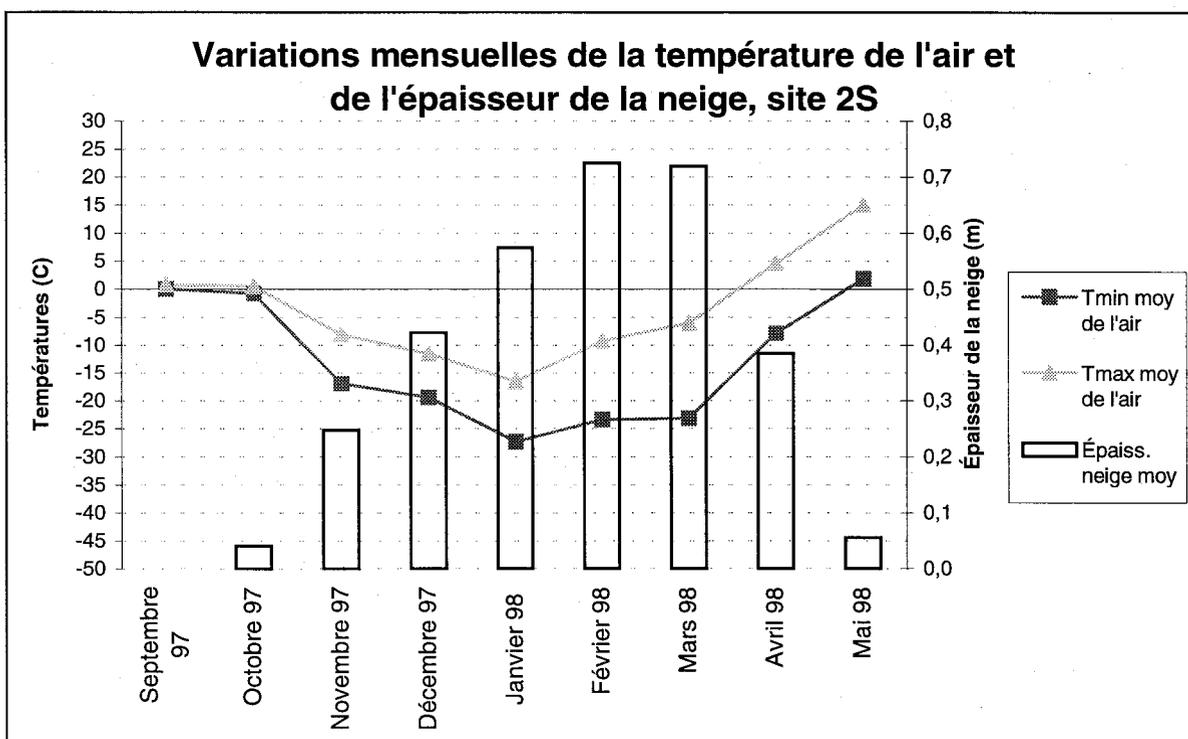
**Tableau 1 : Sommaire des campagnes de terrain pour chaque acquisition d'images**

Date des campagnes	Date d'acquisition d'images	Sites d'échantillonnage			
		Hauteur	Eq.Eau	Densité	R.Th.
		[cm] Moy.	[mm] Moy.	kg/m <sup>3</sup> Moy.	
17 au 20 novembre 1997	19 novembre 1997 (S1) 22 novembre 1998 (ScanSAR)	25	Non-mesuré		
2 au 6 février 1998	30 janvier 1998 (S1) 2 février 1998 (ScanSAR)	75	153	204	6.6
16 au 19 mars 1998	19 mars 1998 (S1) 22 mars 1998 (ScanSAR)	78	177	226	5.2
4 au 7 mai 1998	6 mai 1998 (S1) 9 mai 1998 (ScanSAR)	0	Quelques rares plaques de neige humide (versants nord)		

Cette année encore, lors des campagnes d'hiver, des mesures de carottage ont été effectuées sur 35 sites d'échantillonnage et des profils détaillés du couvert de neige ont été fait sur 6 sites. De plus, deux des trois stations climatologiques ont fourni des données en continu et les sondes de température et de constante diélectrique sont pour leur part relevées à chaque visite. La 3<sup>ème</sup> station climatologique (#11<sup>E</sup>) n'a pu enregistrer de données depuis février 1998.

---

Toutes ces données témoignent d'un hiver comparable à 1997, avec un couvert maximal de 60 à 80 cm de neige et un sol dont la température en surface se maintient généralement entre -1 et -4°C. La figure 2 présente un aperçu mensuel des températures et des accumulations de neige moyennes de octobre à mai, telles que relevées à la station climatologique du site #2 Sud. La figure 3 présente par ailleurs les conditions environnementales (moyennes journalières) prévalant lors des jours précédant l'acquisition d'images, toujours selon les données de la station climatologique du site #2 Sud. Enfin, les figures 4a à 4c présentent les profils détaillés du couvert de neige tels que mesurés lors des campagnes de terrain.



**Figure 2 : Sommaire mensuel des conditions climatologiques**

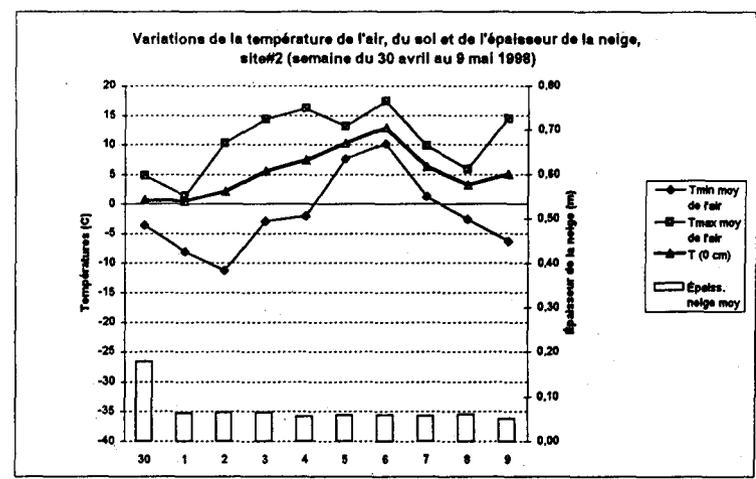
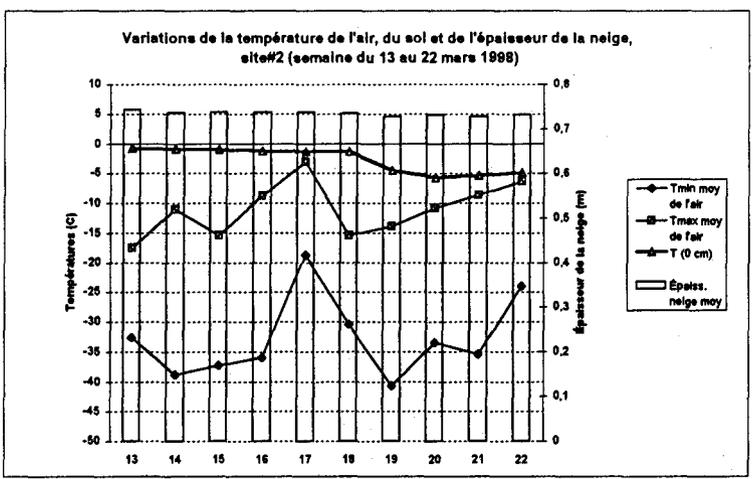
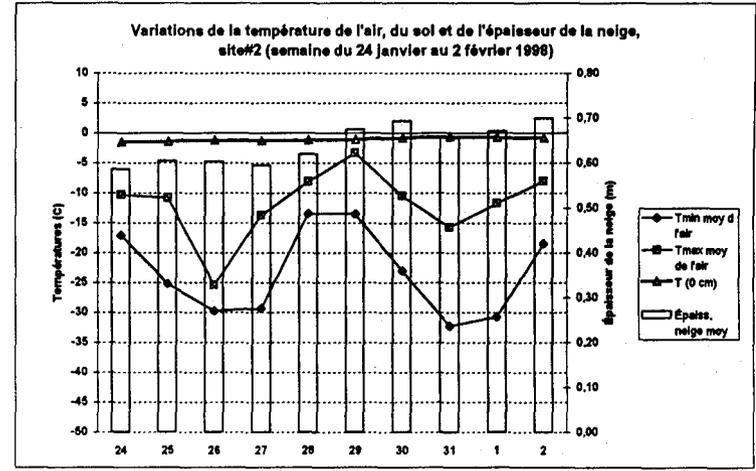
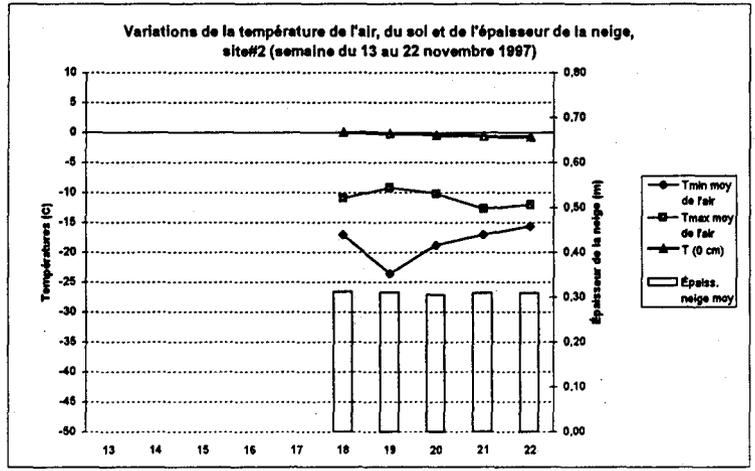
Selon les données journalières des stations des sites #2 Sud et #19 Est, l'accumulation de neige au sol entre les deux acquisitions d'images est d'environ 20 cm. À partir des profils du site 2S (figure 4b) et du site 19E, on estime la densité originale de cette neige à 140 kg/m<sup>3</sup>. On obtient alors une augmentation prévisible de l'équivalent en eau d'environ 28 mm entre les deux dates.

Cette information est essentielle pour valider les valeurs mesurées lors de la campagne de février puisque les conditions particulières de cette période ont causé quelques difficultés lors des carottages. En effet, les récentes accumulations de neige et l'absence inhabituelle de vent depuis plusieurs jours ont entraîné la formation d'un couvert de neige très peu dense, surtout en surface, et dont les grains peuvent s'échapper par les fentes des carottiers. Les équivalents en eau (poids total des carottes) et les densités de certains sites sont alors sous-estimés. Pour établir quels sites sont sous-estimés, on ajoute à l'équivalent en eau mesuré en février, le 28 mm calculé plus haut. On obtient alors les équivalents en eau prévus pour le 19 mars. En comparant ces valeurs aux mesures réelles de mars, on peut voir de façon générale, les sites qui sont sous-estimés (figure 5).

Afin de corriger cette sous-estimation, les densités de neige mesurées lors des profils détaillés sont comparées aux densités moyennes des carottes sur ces même sites. Une régression est alors établie pour obtenir un facteur de correction. Ainsi la densité moyenne de la neige mesurée en février 1998 est passée de 183 à 197 kg/m<sup>3</sup> et la moyenne des équivalents en eau mesurés est passée de 138 mm à 148 mm (figure 6).

---

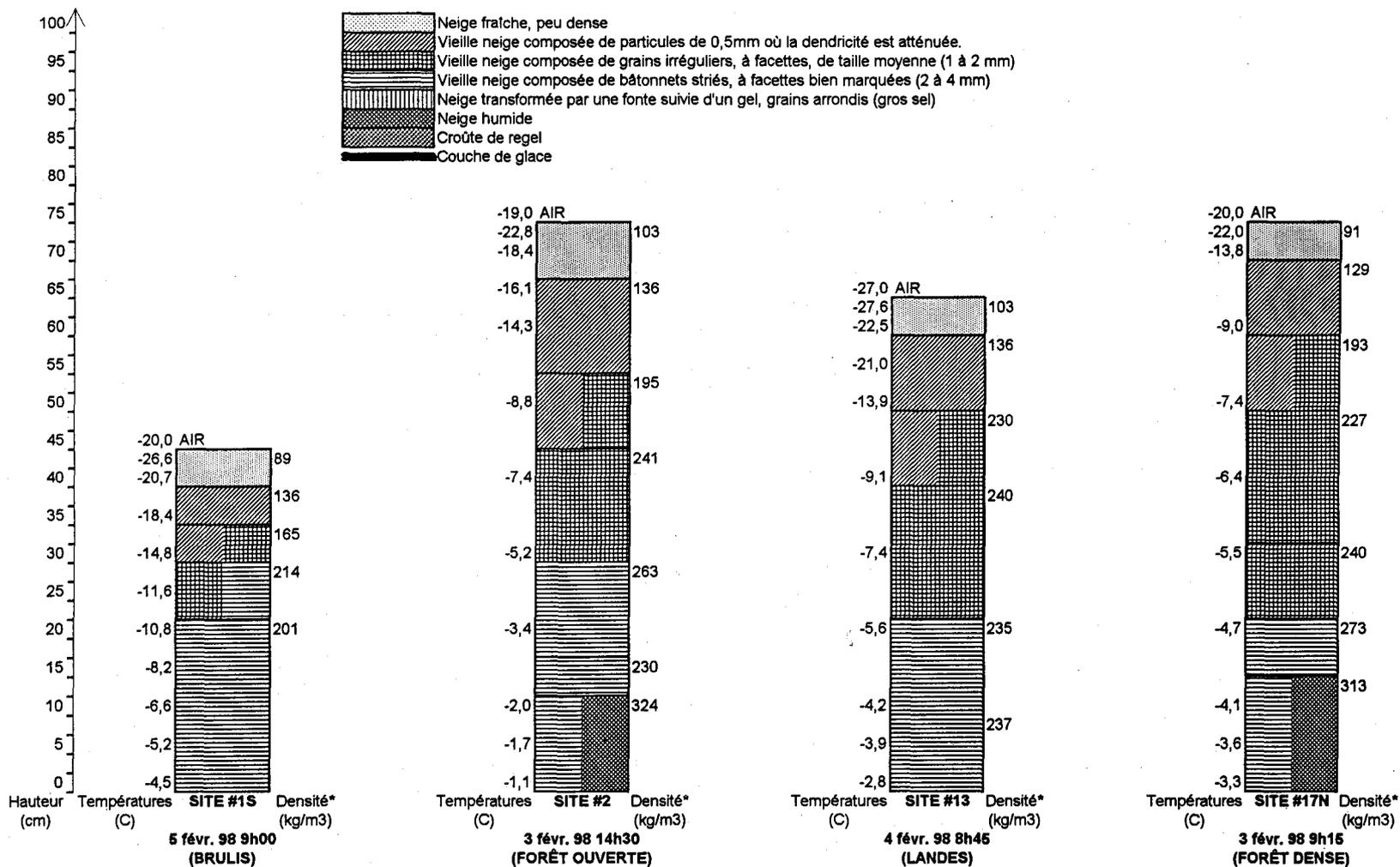
Figure 3 : Conditions environnementales prévalant lors des jours précédant l'acquisition d'images



NOTE: À partir du 2 mai 1998, la neige est complètement fondue au site#2. Le 5cm de neige indiqué par la sonde n'est donc pas significatif.

Figure 4a : Profils typiques du couvert de neige au début février 1998

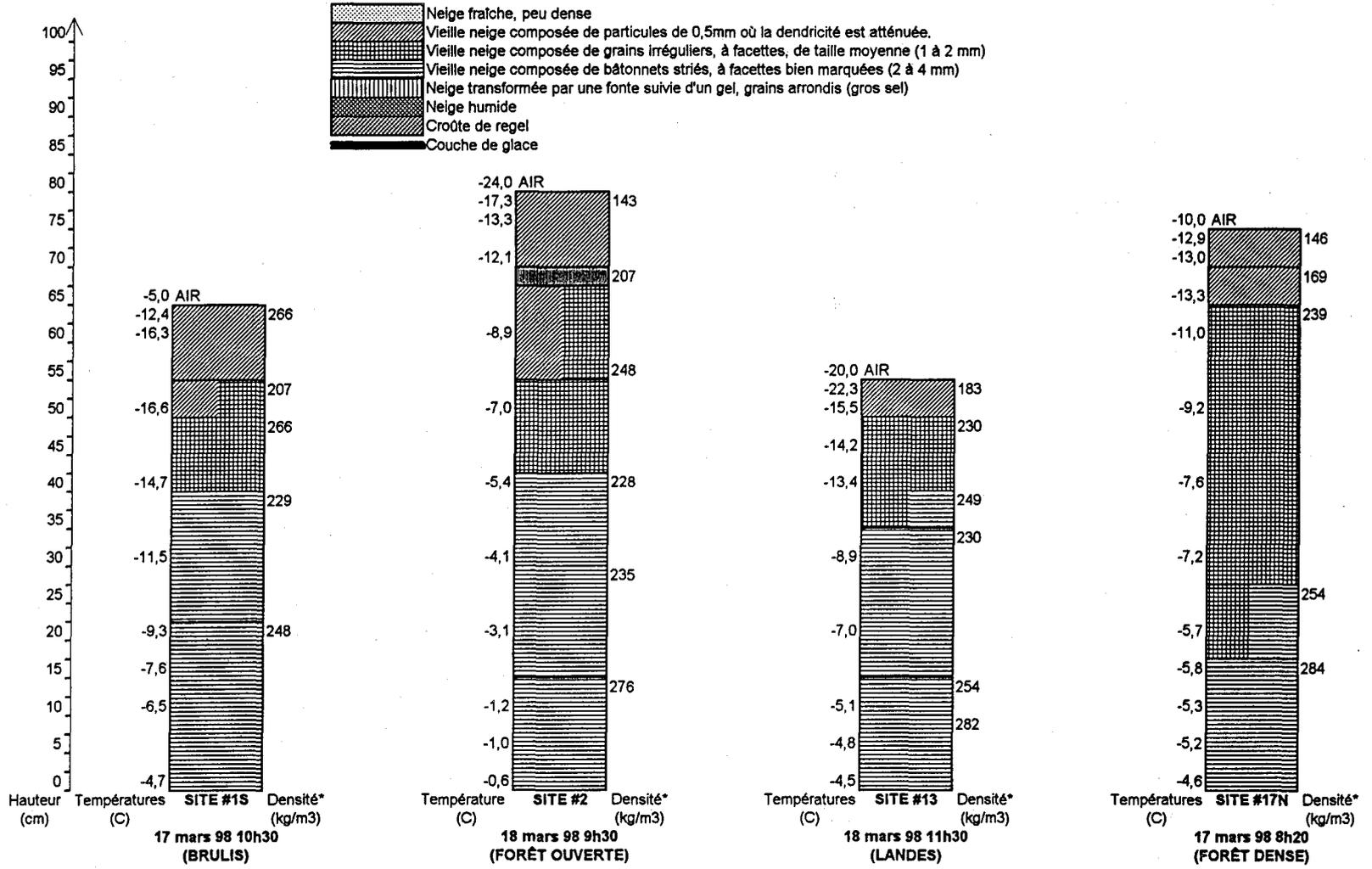
PROFILS FÉVRIER 1998



\* La densité correspond à la densité moyenne de la couche.

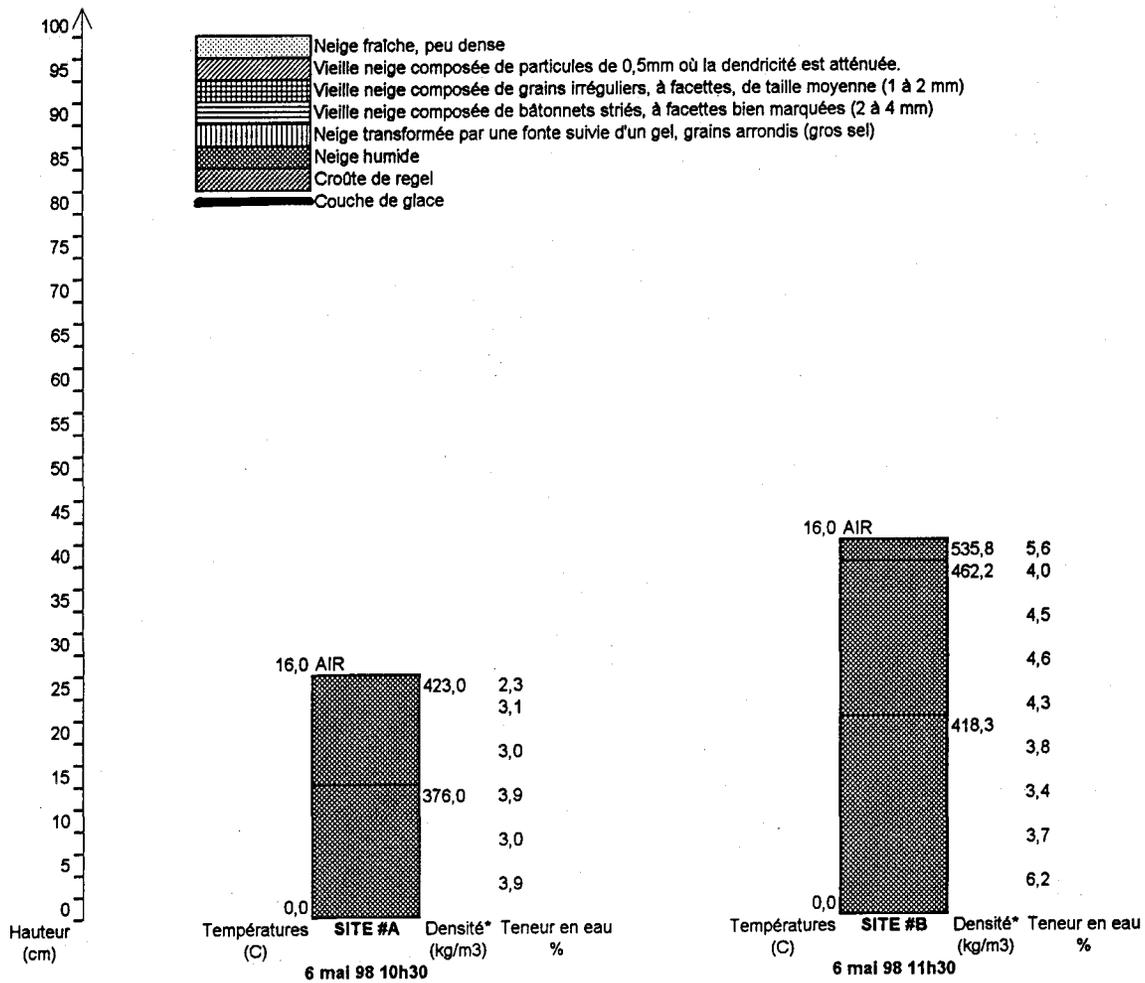
Figure 4b : Profils typiques du couvert de neige à la mi-mars 1998

PROFILS MARS 1998



\* La densité correspond à la densité moyenne de la couche.

PROFILS MAI 1998



\* La densité correspond à la densité moyenne de la couche.

Figure 4c : Profils typiques du couvert de neige au début mai 1998

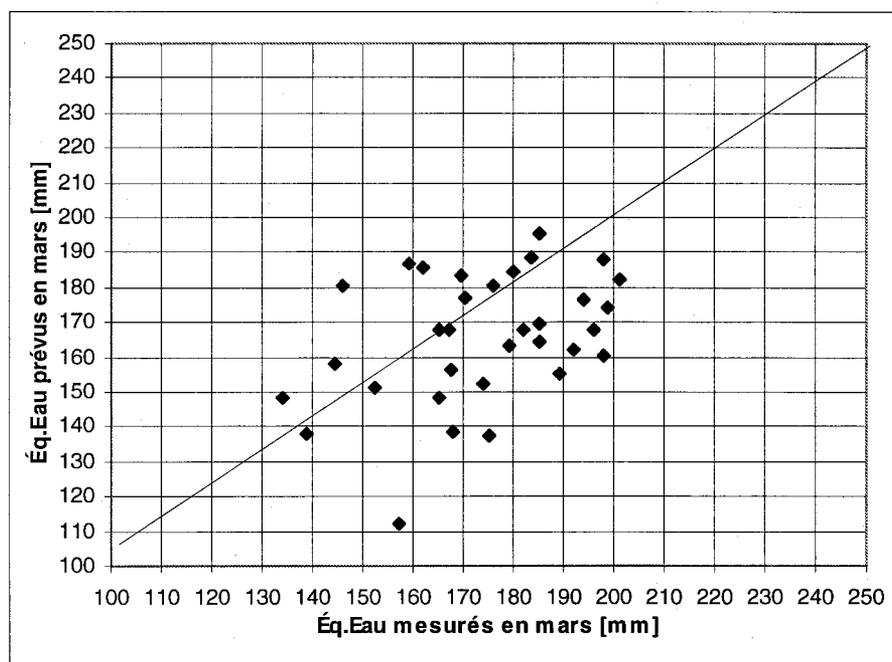


Figure 5 : Détermination de la sous-estimation des équivalents en eau mesurés en février 1998 en comparant les équivalents en eau prévus et mesurés en mars 1998.

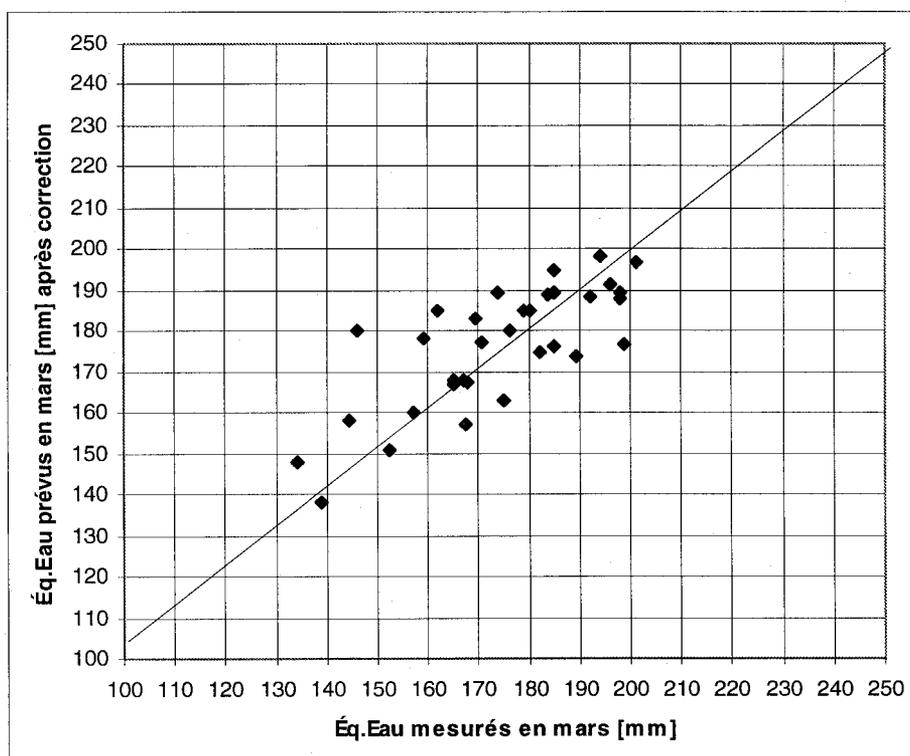


Figure 6 : Comparaison des équivalents en eau prévus et mesurés en mars 1998 après correction des mesures de février 1998

Le principal processus entre les deux acquisitions d'images d'hiver en fût donc un de densification du couvert, principalement dans le haut du profil (figure 4). Comme résultat, le couvert de neige à la mi-mars est à peine plus épais, mais un peu plus dense qu'au début février. Avec des nuits très froides et une plus faible résistance thermique du couvert de neige, la température du sol à la mi-mars sera donc légèrement plus froide (1 à 2 degrés) qu'en février.

## 4.2 Cartographie de l'équivalent en eau de la neige

La première étape de la cartographie de l'équivalent en eau consiste à redéfinir l'algorithme RADARSAT (Bernier *et al.*, 1998) pour les images acquises en mode S1. Chaque image a donc été géocodée et les valeurs numériques ont été transformées en coefficients de rétrodiffusion. Puis, les rapports de rétrodiffusion sont obtenus en soustrayant les coefficients de rétrodiffusion d'une image de référence de ceux des images d'hiver (janvier et mars 1998). Généralement, l'image de référence est une image d'automne où le sol est gelé ou complètement saturé, afin d'éviter les variations dues à la teneur en eau. L'image du 19 novembre 1997 présente ces caractéristiques et les coefficients de rétrodiffusion y sont plus élevés (figure 7), ce qui permet d'obtenir des rapports de rétrodiffusion possédant une meilleure amplitude.

Une fois les rapports calculés à l'aide de l'image de référence du 19 novembre 1997, il faut établir la relation entre ces rapports et la résistance thermique du couvert de neige. Idéalement, cette relation est établie avec une longue série temporelle d'images ou une vaste étendue de conditions du couvert de neige. Dans le cas actuel, nous possédons trois images acquises en mode S1 dans des conditions hivernales à peu près similaires. Les résultats sont donc plutôt groupés (figure 8).

Toutefois, connaissant les algorithmes obtenus avec ERS (pente: 1.14; ordonnée à l'origine: 3.5) et avec le mode S7 de RADARSAT (pente: 1.04; ordonnée à l'origine: 5.1) (Bernier *et al.*, 1997), une régression moyenne peut être estimée avec une pente de 1.25 et une ordonnée à l'origine de 8 pour les images du 4 février 1997 et du 30 janvier 1998 (milieu de l'hiver) et une pente de 1.13 et une ordonnée à l'origine de 6.5 pour l'image de mars 1998 (fin de l'hiver).

---

Par la suite, chaque image RADARSAT a été exportée vers le prototype EQeau (Bernier *et al.*, 1998), conjointement avec la classification de l'occupation du sol pour le même secteur et le fichier des densités moyennes du couvert de neige pour chaque date. Le prototype EQeau estime alors une résistance thermique pour les pixels communs à chaque image. Puis, à partir de cette résistance thermique et d'une densité de neige moyenne pour chaque occupation du sol, il calcule l'équivalent en eau de la neige, à une résolution de 25m par 25m. La fonction d'intégration par bassin a été utilisée pour calculer la moyenne et l'écart-type des équivalents en eau sur chaque image. Finalement, à l'aide du module d'intégration par mailles de EQeau, les équivalents en eau obtenus pour les trois images sont rééchantillonnés à une maille de 500m par 500m afin de généraliser le résultat. Les cartes de l'hiver 1998 sont présentées à la figure 10.

Le tableau 2 présente les équivalents en eau moyens estimés pour les trois images en mode S1 et pour les sites d'échantillonnage. Les équivalents en eau mesurés sur le terrain par l'INRS-Eau (35 lignes de neige), les valeurs mesurées par Hydro-Québec au cours de l'hiver (4 stations nivométriques) et la crue réelle mesurée par Hydro-Québec sont aussi présentés.

**Tableau 2 : Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés**

DATES	ESTIMATIONS AUX SITES		MESURES AUX SITES		ESTIMATIONS IMAGES RADARSAT		MESURES HQ	CRUES 1998 HQ
	Moyennes (mm)	Ecart types (mm)	Moyennes (mm)	Ecart types (mm)	Moyennes (mm)	Ecart types (mm)	Moyennes (mm)	LG4 / LA1 (mm)
4 FÉVRIER 97	131	21	131	16	154	50		
3 MARS 97							135-195	
30 JANVIER 98	157	17	148	15	169	44		
24 FÉVRIER 98							100-150	
19 MARS 98	174	26	171	24	192	56		
4 AVRIL 98							180	100 / 127

Les équivalents en eau moyens estimés sur chaque image RADARSAT sont supérieurs aux valeurs estimées ou mesurées sur les sites d'échantillonnage car les accumulations de neige au sol sont plus importantes au nord et à l'est du secteur d'étude (figure 10). Les relevés d'Hydro-

---

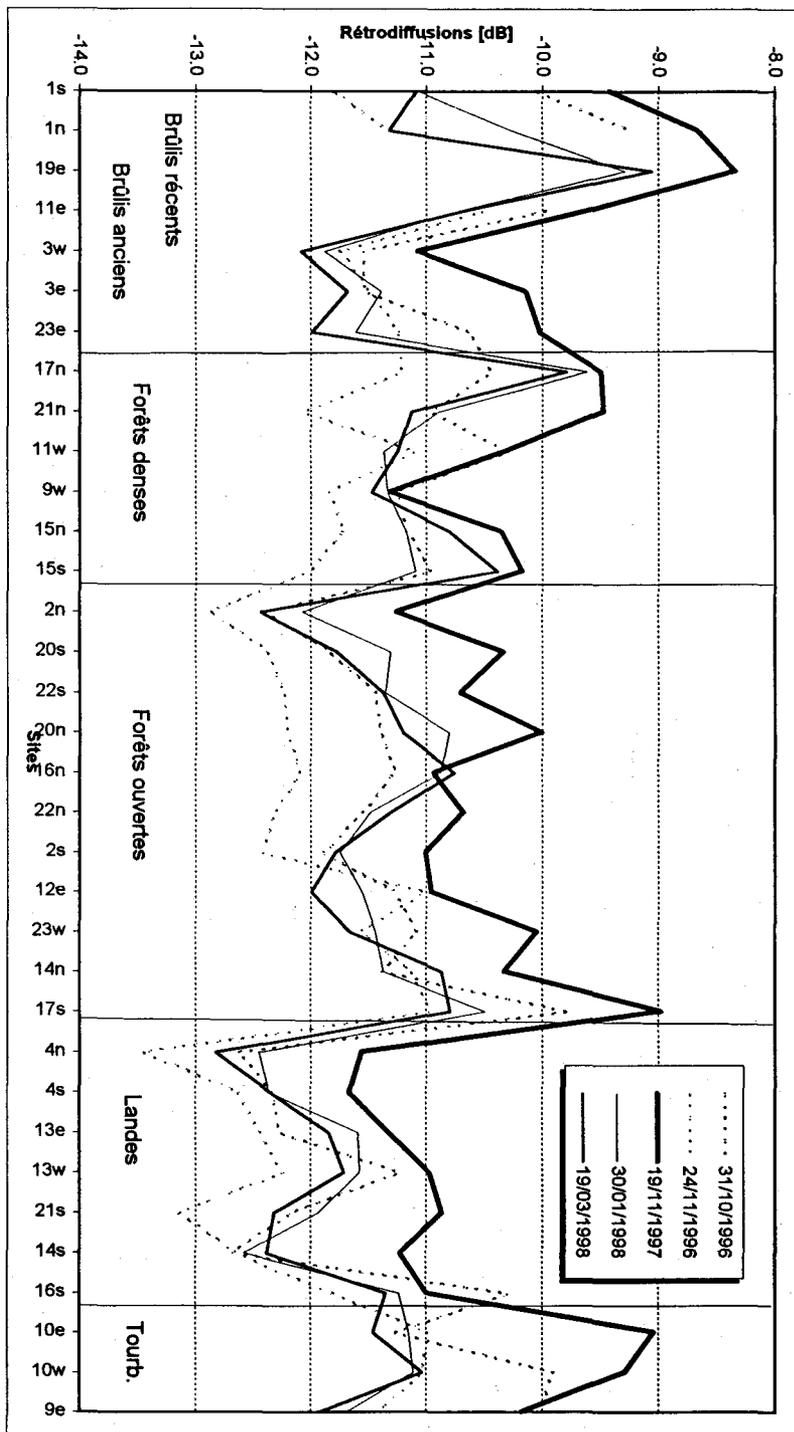
Québec montrent d'ailleurs un équivalent en eau moyen de 135 mm à la station nivométrique de LG4 et de 195 mm au nord (Lac Bertrand) et au nord-est (Lac Kaanapuskow), le 3 mars 1997.

Les estimés moyens sur l'ensemble des sites d'échantillonnage sont à moins de 10 mm de la moyenne des mesures de terrain. Des écart-types observés de +/- 20 à 30 mm sont toutefois dus à l'utilisation d'une densité moyenne dans l'algorithme, à la précision des mesures de terrain, aux variations de l'occupation du sol à l'intérieur même d'une classe et bien sûr, à la sensibilité du radar (figure 9). Les plus grands écarts proviennent des sites de landes et de brûlis. Nous étudions présentement la possibilité de revenir à l'utilisation de deux algorithmes (région boisée, région non-boisée), comme c'était le cas avec les données ERS-1 (Bernier *et al.*, 1996). En effet, les images en mode S1 sont acquises sous les mêmes angles d'incidence que ERS-1 (20°-27°) et sont elles aussi plus sensibles aux variations de l'occupation et de la rugosité du sol.

Enfin, les estimations de l'algorithme sont plus élevées que les valeurs mesurées lors de la crue de 1998 mais il faut tenir compte qu'on ne compare pas exactement les mêmes territoires ou bassins hydrographiques. De plus, le fort ensoleillement et les fortes températures du mois d'avril (figure 11) ont provoqué des pertes importantes par sublimation et une partie de l'eau est aussi retenue par le sol.

---

Figure 7 : Coefficients de rétrodiffusion des images en mode SI



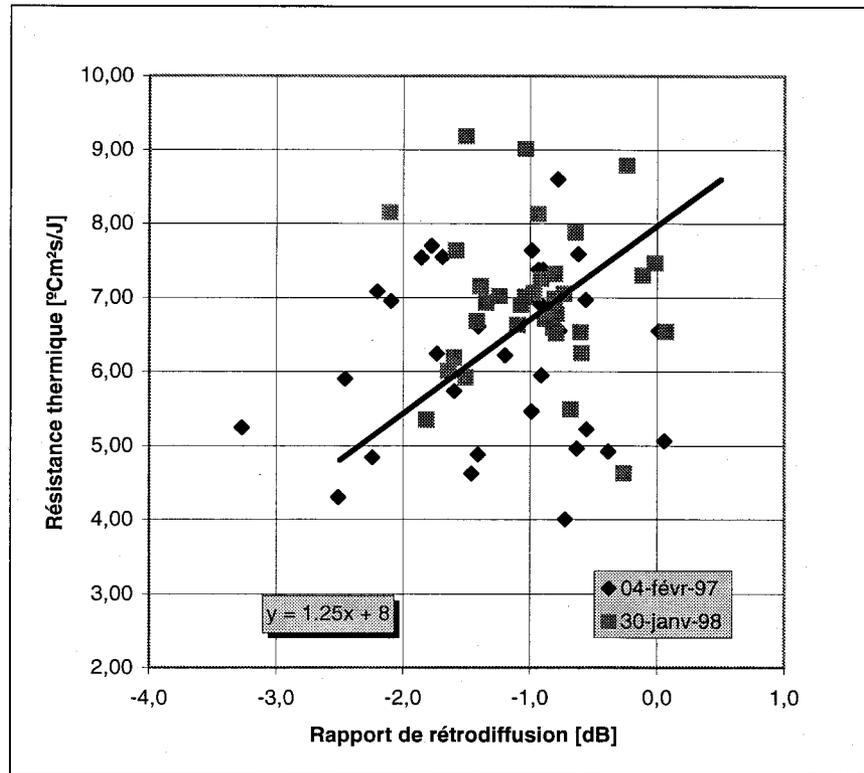


Figure 8 : Relation entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique du couvert de neige au milieu de l'hiver

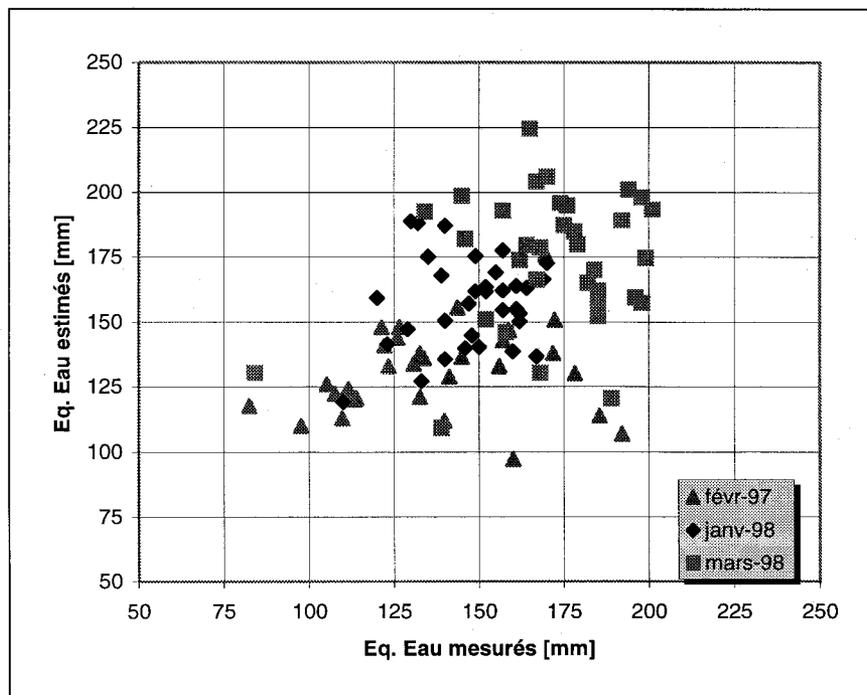


Figure 9 : Précision des estimations de l'équivalent en eau de la neige pour les 35 sites d'échantillonnages

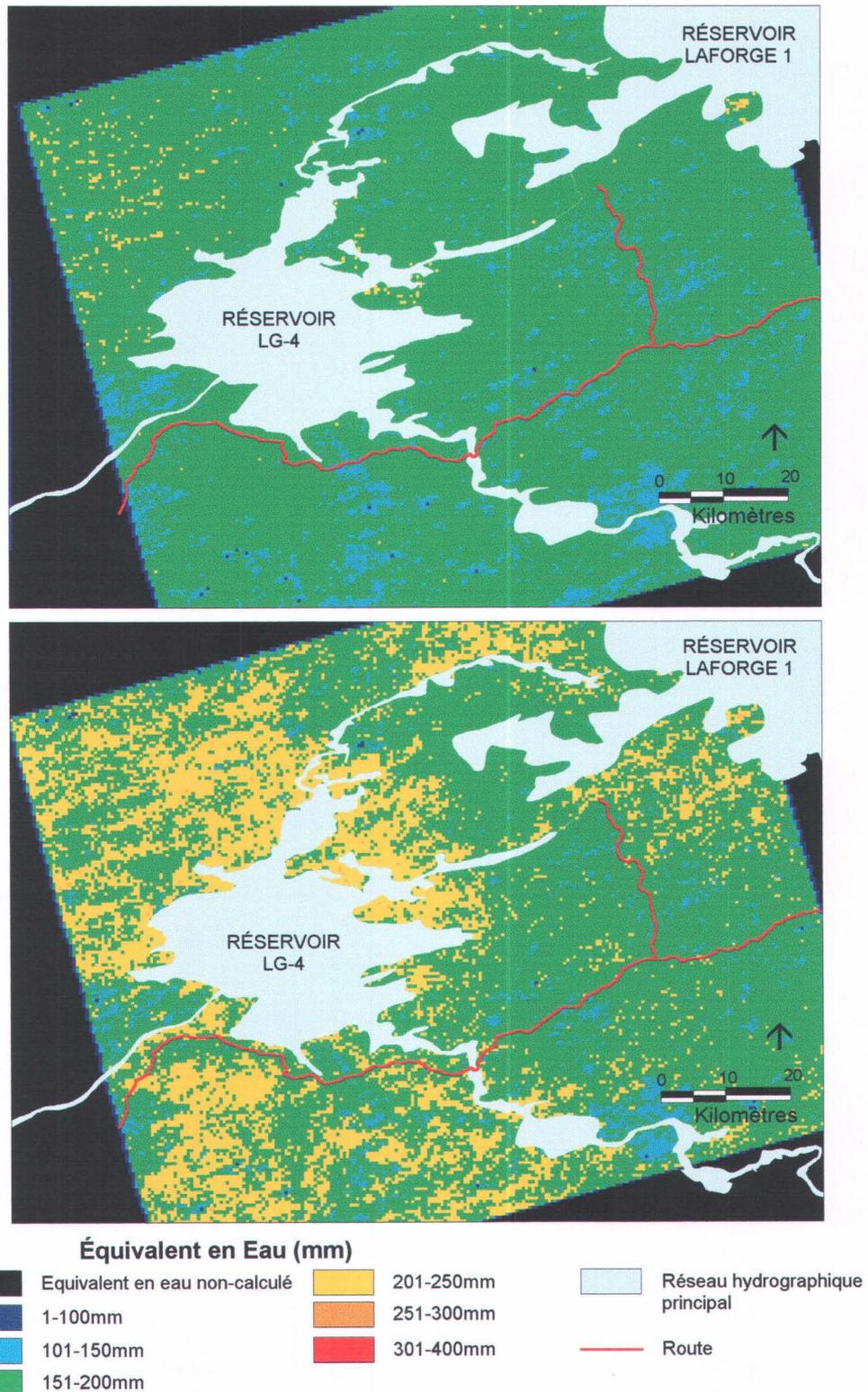


Figure 10: Cartographie de l'équivalent en eau du secteur de LG4 pour le 30 janvier et le 19 mars 1998, à une résolution de 500m par 500m.

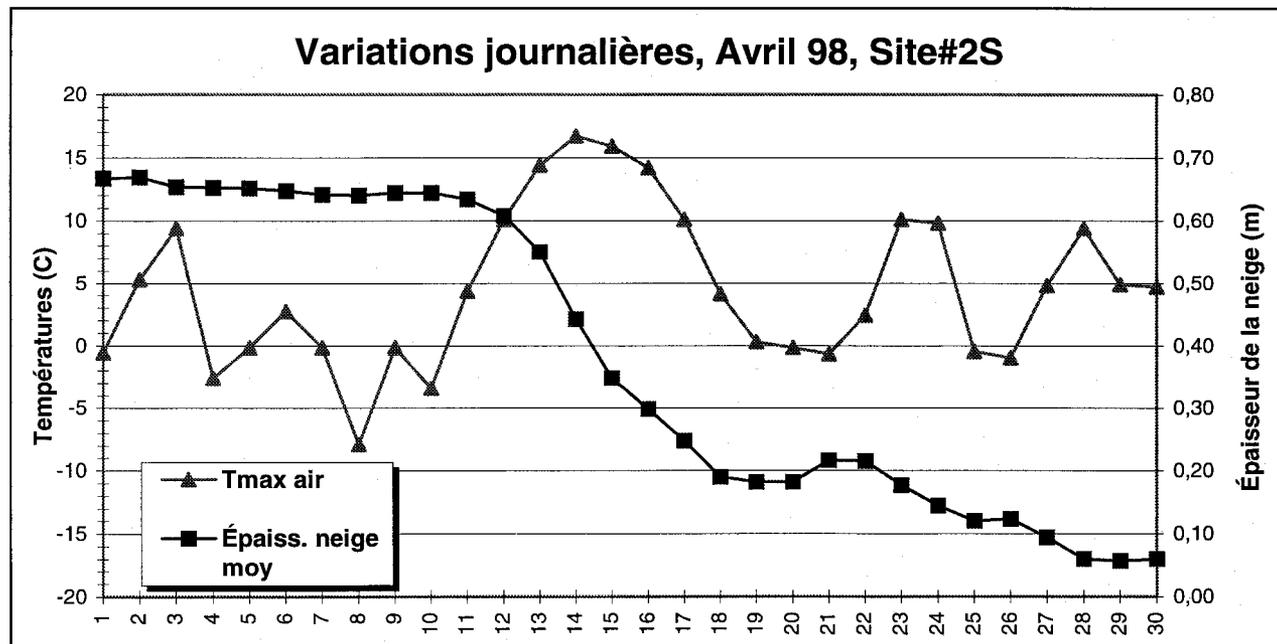


Figure 11 : Conditions climatologiques enregistrées en avril 1998, au site #2Sud

### 4.3 Cartographie de la neige humide

L'un des objectifs du projet consiste à cartographier la neige humide à partir d'une image RADARSAT en période de fonte. L'image en mode S1 du 6 mai 1998 a donc été planifiée et acquise dans ce but. Toutefois, les températures exceptionnellement chaudes du mois d'avril 1998 (figure 11) ont entraîné une fonte rapide de la neige et il ne restait que quelques plaques de neige sur le secteur d'étude, lors de la campagne de terrain du 4 au 7 mai (en comparaison, il y avait 90 cm de neige au sol durant la même période en mai 1994).

Afin de déterminer l'étendue réelle des zones encore enneigées, l'image du 6 mai a été traitée et géocodée selon la procédure habituelle. Dans un premier temps, l'analyse des coefficients de rétrodiffusion (figure 12) nous montre bien que sur nos sites d'échantillonnage, le sol est dégelé et saturé d'eau puisque les valeurs sont beaucoup plus élevées que sur l'image de novembre 1997. Les mesures de terrain ont d'ailleurs révélé que l'humidité de la surface du sol était de 14% en moyenne. Dans un deuxième temps, l'image du 30 janvier 1998 est soustraite de celle du 6 mai afin de déterminer les secteurs où il y a une baisse de rétrodiffusion marquée, typique de la présence de neige humide. Comme le présente la figure 13, c'est 26% de l'image qui connaît une baisse de rétrodiffusion (en noir). En comparant cette carte à l'occupation du sol, on constate que 85% des zones où il y a baisse de rétrodiffusion correspondent aux lacs, rivières, réservoirs et tourbières. En effet, le jour de l'acquisition de cet image, nous pouvions constater que la glace avait disparue à la surface des petits lacs et des tourbières et noter que les grands lacs et les réservoirs étaient couverts de « slush ». Les 15% restant correspondent à part égale à des forêts denses, des forêts ouvertes, des brûlis et des landes ce qui correspond à environ 4% de la superficie de l'image. Lors de la visite sur le terrain, nous avons pu constater que même s'il restait un couvert partiel de neige sur certains de nos sites le 4 mai, ceux-ci étaient libres de neige le 6 mai, en fin d'après-midi. De plus, le 6 mai 1998, on retrouvait un couvert discontinu (entre 20% et 50%) de neige que sur les versants nord des collines.

---

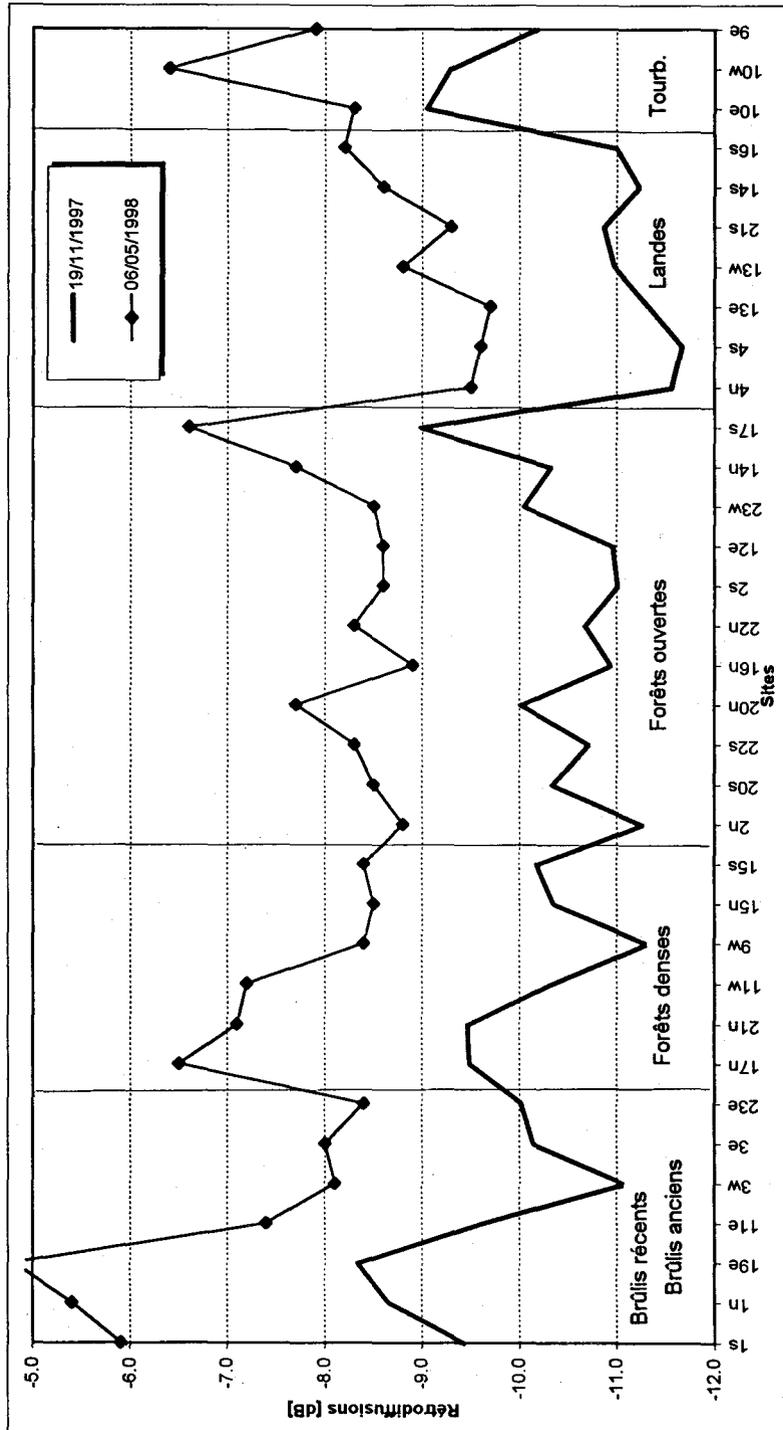
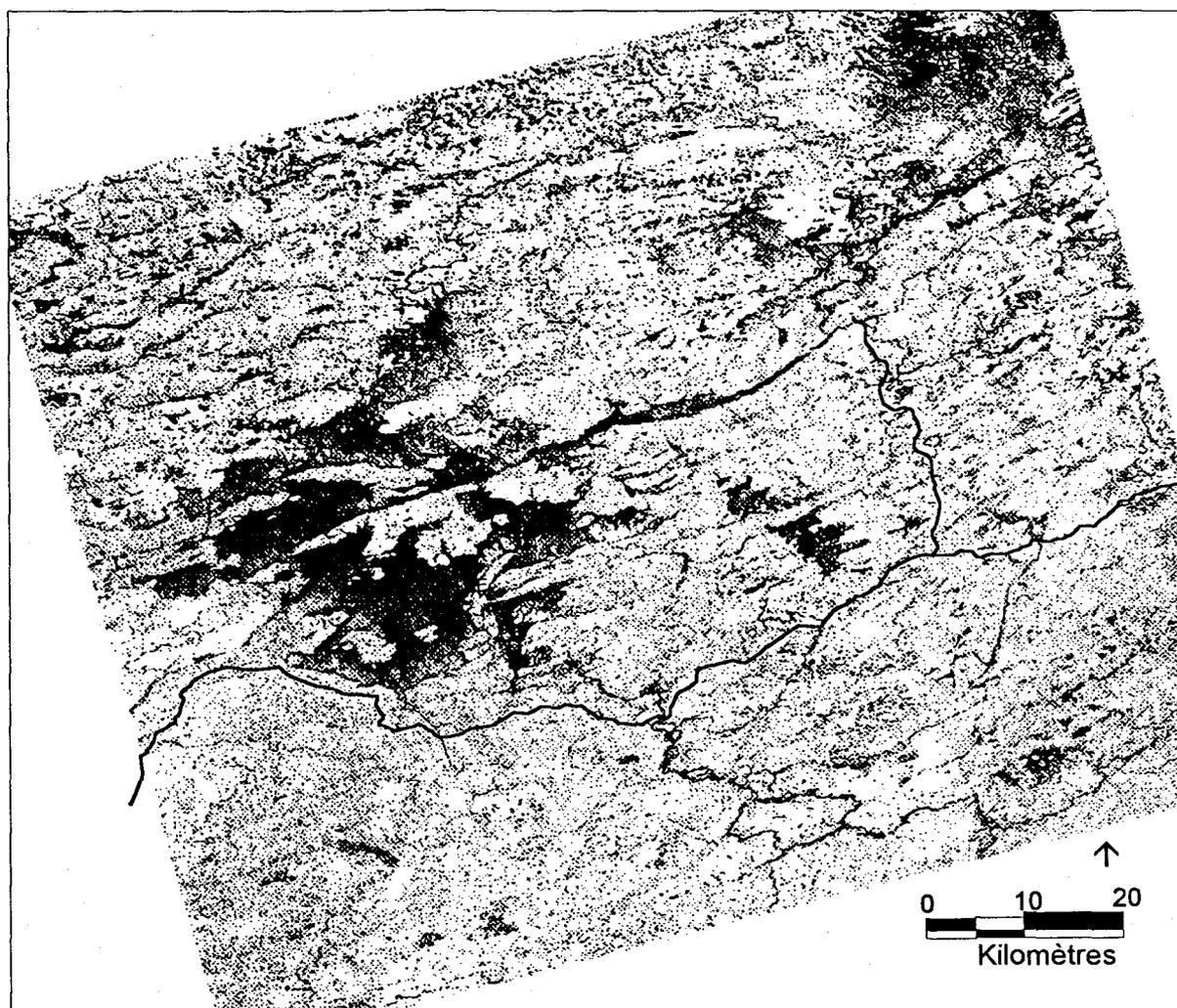


Figure 12 : Augmentation des coefficients de rétrodiffusion lors du dégel du sol et de sa saturation en eau due à la fonte récente du couvert nival.



-  Hausse du coefficient de rétrodiffusion  
(sol saturé en eau le 6 mai 1998)
-  Baisse du coefficient de rétrodiffusion  
(eau libre et glace fondante (80%), neige humide (15%))
-  Route

Figure 13 : Variation de la rétrodiffusion entre janvier et mai 1998

## **5. Travaux à venir et échéancier**

---

### **5.1 Livrables à déposer au 31 décembre 1998**

Le prochain rapport d'étape marquera la fin de la phase dite RADARSAT, donc plusieurs livrables accompagneront ce rapport, mais l'essentiel sera la seconde version du prototype EQeau qui sera réalisée en étroite collaboration avec Viasat Géo-Technologie inc. Les livrables à présenter au 31 décembre 1998 sont :

- 1) Le contour et la structure du sous-bassin de LG4;
- 2) Les algorithmes pour l'estimation de l'équivalent en eau à partir des images RADARSAT (Standard et ScanSAR) et une analyse de la précision de ces estimés.
- 3) La cartographie de l'équivalent en eau du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT (ScanSAR) de février et mars 1998.
- 4) La cartographie de la neige humide du sous-bassin de LG4 à partir des quatre images RADARSAT d'avril et de mai 1998 (2 images Standard et 2 images ScanSAR).
- 5) La seconde version (version fonctionnelle) du prototype EQeau
- 6) Le rapport final de la phase RADARSAT.

### **5.2 Activités complémentaires**

Dans le cadre du projet pilote EQeau, les activités suivantes seront aussi réalisées par l'INRS-Eau d'ici le 31 décembre 1998, en vue de la démonstration de l'hiver 1999:

- 1) La cartographie de l'utilisation du sol de la moitié amont (*LG4, Laforge et Caniapiscou*) du bassin de la Rivière La Grande à partir d'images TM du satellite Landsat.
  - 2) Le contour et la structure des sous-bassins *Laforge et Caniapiscou*;
  - 3) Une campagne de terrain en octobre ou en novembre 1998.
-



## 6. CONCLUSION

---

Une première ébauche du contour du sous-bassin de LG4 a été réalisée à partir de PHYSITEL, mais elle demande à être retravaillée. Au début de l'automne 1998, nous ferons les corrections manuelles nécessaires aux limites des feuillets à l'aide des cartes topographiques au 1: 50 000, et nous utiliserons un réseau hydrographique vectorisé pour orienter l'écoulement des zones problématiques. La validation du résultat final sera faite à l'aide de nos collègues d'Hydro-Québec. Cette limite raffinée du sous-bassin sera introduite dès cet automne dans EQeau pour la détermination de l'équivalent en eau moyen du sous-bassin LG4 à partir des images ScanSAR de l'hiver 1998. Elle sera aussi utilisée à l'hiver 1999 dans le cadre du Projet pilote.

À partir des images acquises les 4 février 1997, 30 janvier 1998 et 19 mars 1998 et des données recueillies au sol durant les campagnes de terrain simultanées, les paramètres de *l'algorithme RADARSAT* provisoire ont été modifiés pour tenir compte du mode S1 (angles d'incidences plus faibles que les images S7 traitées l'an dernier) et obtenir une meilleure évaluation de l'équivalent en eau moyen à la fin de l'hiver (fin mars). En effet, autant sur les images ERS que RADARSAT, l'erreur avait toujours été plus importante en mars qu'en février. Les résultats obtenus montrent qu'avec les images en mode S1, l'estimé de l'équivalent en eau moyen sur nos sites d'échantillonnage est comparable à la moyenne des valeurs mesurées au sol et il est donc meilleur que ceux dérivés des images en mode S7 de RADARSAT et des images ERS. En effet, les estimées extraits des images ERS-1 (hivers 1994, 1995, 1996) sous-estimaient l'équivalent en eau de 10 à 30 mm, tandis que ceux des images S7 (hiver 1997) surestimaient l'équivalent en eau de 15 à 30 mm. Dans les prochains mois, nous continuerons à travailler sur l'algorithme afin de raffiner l'estimation de l'équivalent en eau à chacun des 35 sites d'échantillonnage. Finalement, un point intéressant qui ressort de l'obtention d'une distribution spatiale (carte) de l'équivalent en eau de la neige au sol sur un territoire de 100 X 100 km est qu'elle confirme qu'il tombe moins de neige au sud-est du réservoir de LG4 (135 mm à la station nivométrique de LG4) qu'au nord (193 mm à la station nivométrique du Lac Bertrand).

Une cartographie de la neige humide a été réalisée pour l'image en mode S1 du 6 mai 1998, en utilisant l'image du 30 janvier 1998 comme image de référence. La carte montre que mis à part les plans d'eau (22%), seulement 4% du territoire serait encore couvert de neige humide (fin de la période de fonte). D'ailleurs, selon les observations recueillies sur le terrain, il ne reste de la neige au sol que sur le versant nord de quelques collines. Cette couverture de neige est elle-même partielle (20 – 50%) ne dépasse guère 25 cm de hauteur et a une teneur en eau de 5%.

---

Dans les prochains mois, nous analyserons aussi les images du 12 et 15 avril 1998, une image Standard et une image ScanSAR respectivement qui viennent d'être commandées par Hydro-Québec (EQeau). Ces images ayant été acquises au tout début de la fonte, nous serons capable de comparer les cartes annotées d'avril et de mai dans le prochain rapport.

De plus, seules les quatre images Standard (étalonnées) ont été analysées durant cette étape. Les images ScanSAR seront analysées à l'automne 1998 dès que notre partenaire VIASAT Géo-technologie aura pu les corriger géométriquement dans le cadre du projet pilote EQeau. Toujours concernant le projet EQeau, le contrat entre VIASAT et Travaux publics et Services gouvernementaux ayant été signé le 16 juin dernier, nous avons aussi préparer le plan d'acquisition d'images RADARSAT pour la saison hivernale 1998-1999. Afin de couvrir la moitié amont du bassin de la Rivière LaGrande, trois images Wide et une image SCANSAR seront acquises en novembre, en février et en mars. Ces images serviront à démontrer l'efficacité de l'approche RADARSAT et l'opérationnalité du logiciel EQeau.

## **RÉFÉRENCES**

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.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier (1996). Traitement d'images ERS-1 pour la prévision hydrologique. Rapport rédigé par la Société Hydro-Québec. Rapport final No R413 (phase IV), janvier 1996.

---