

Record Number: 16200
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 d'étape 3
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 septembre 1998
Volume Identification:
Extent of Work: ii, 47
Packaging Method: pages
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 523 e3
Location/URL:
ISBN: 2-89146-349-8
Notes: Rapport annuel 1998-1999
Abstract: Rapport d'étape du 30 septembre 1998 pour Prévisions et ressources hydriques, Hydro-Québec
Porte le numéro R523c en couverture

Call Number: R000523 e3
Keywords: rapport/ ok

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

**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
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 523c

30 septembre 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

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

Alain Royer, technicien en informatique

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	II
1. INTRODUCTION	1
2. OBJECTIFS DU PROJET	5
3. DÉLIMITATION DES SOUS-BASSINS	7
3.1 MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE	7
3.2 DÉDUCTION AUTOMATIQUE DES CONTOURS PAR PHYSITEL	7
3.3 CONTOURS DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES DE LG4, LAFORGE ET CANIAPISCAU	10
4. PRÉCISION DES CARTES D'ÉQUIVALENT EN EAU	21
4.1 PRÉCISION DES ESTIMÉS EXTRAITS DES IMAGES RADARSAT VERSUS LES RELEVÉS DES SITES EXPÉRIMENTAUX.21	
4.2 PRÉCISION DES ESTIMÉS EXTRAITS DES IMAGES VERSUS LES RELEVÉS DES STATIONS NIVOMÉTRIQUES D'HYDRO-QUÉBEC.	24
4.3 ÉVALUATION DES IMAGES SCANSAR	310
5. CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE	321
5.1 IMAGES PRINTANIÈRES DISPONIBLES.....	32
5.2 ALGORITHMES DE CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE	32
5.3 CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE LE 23 AVRIL 1997 (S7).....	365
5.4 CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE LE 12 AVRIL 1998 (S1)	39
5.5 CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE HUMIDE LE 6 MAI 1998 (S1).....	39
6. TRAVAUX À VENIR ET ÉCHÉANCIER	42
6.1 LIVRABLES À DÉPOSER AU 31 DÉCEMBRE 1998.....	421
6.2 ACTIVITÉS ET LIVRABLES COMPLÉMENTAIRES	432
7. CONCLUSION.....	443

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 : Délimitation des sous-bassins de LG4, Laforge et Caniapiscou	11
Figure 3-2 : Délimitation du sous-bassin de LG4.....	13
Figure 3-3: Délimitation du sous-bassin de Laforge	15
Figure 3-4 : Délimitation du sous-bassin de Laforge par itérations.....	16
Figure 3-5 : Exemple de digue sur le réservoir de Laforge (image Landsat-TM)	17
Figure 3-6 : Délimitation du sous-bassin de Caniapiscou	18
Figure 3-7 : Exemple de digues, sous-bassin de Caniapiscou	19
Figure 4-1 : Précision de l'algorithme d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige...23	
Figure 4-2 : Cartographie de l'équivalent en eau – Hiver 1998. Les résultats sont intégrés selon des mailles de 500m de côté.	25

Figure 4-3 : Localisation des stations nivométriques d'Hydro-Québec et des sites expérimentaux où l'INRS-Eau effectue ses lignes de neige	28
Figure 4-4 : Comparaison des équivalents en eau interpolés à partir des mesures aux stations nivométriques et des mesures aux sites expérimentaux	29
Figure 5-1 : Conditions climatologiques enregistrées en avril 1998 à la station du site #2 sud....	33
Figure 5-2 : Simulations montrant la variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la teneur en eau liquide de la neige et de sa rugosité.....	34
Figure 5-3 : Augmentation du contraste sur trois images RADARSAT (S1) de l'hiver et du printemps 1998.	347

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Superficies comparées des différentes limites de sous-bassin	10
Tableau 4-1: Sommaire des campagnes de terrain d'hiver et des acquisitions d'images.....	22
Tableau 4-2: Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés (Mode S1).....	24
Tableau 5-1 : Valeurs moyennes des coefficients de rétrodiffusion des trois principales occupations du sol	35
Tableau 5-2 :: Pourcentage des pixels de l'image du printemps classés comme neige humide...	35

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.

Cette phase RADARSAT (1997 et 1998) vise à 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 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 de largeur) 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 une largeur de 350 km et même 500 km par orbite.

Durant la première année de la phase RADARSAT (1997), l'analyse des données terrain et des images Standard 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 ($45-49^{\circ}$) 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 ($20-27^{\circ}$) du 4 février 1997 estime correctement l'équivalent en eau moyen du couvert nival avec une erreur type de 28 mm. De plus, le livrable clé de la première année (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 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™.

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 (150 000\$) pour la démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT et la faisabilité opérationnelle du prototype EQeau à l'hiver 1999. Ce projet EQeau a été retenu et financé par EOP3 et a officiellement débuté en avril 1998. Ce financement permettra à Viasat Géo-Technologie et à l'INRS-Eau de voir à l'acquisition et aux traitements de nouvelles images RADARSAT pour l'hiver 1999, de réaliser la cartographie de l'utilisation du sol et le contour des trois sous-bassins de la moitié amont (77 114 km²) 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.

Le dernier rapport d'étape présenté par l'INRS-Eau (30 juin 1998) résumait les activités réalisées durant les six premiers mois de l'année 1998. Une première ébauche du contour détaillé du sous-bassin de LG4 a été réalisée par PHYSITEL. Les paramètres de *l'algorithme RADARSAT* ont aussi été modifiés, suite à l'analyse des images Standard en mode S1 et des données recueillies lors des campagnes de terrain de l'hiver 1998, afin d'obtenir une meilleure évaluation de l'équivalent en eau moyen, particulièrement en mars. Les cartes obtenues montrent que 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 en janvier et en mars. Une cartographie de la neige humide a aussi été réalisée pour l'image en mode S1 du 6 mai 1998, la carte montre que, mis à part les plans d'eau, seulement 4% du territoire est encore couvert de neige humide (fin de la période de fonte). Finalement, un plan d'acquisition d'images a été préparé pour l'hiver prochain; trois images Wide et une image ScanSAR seront acquises en novembre 1998, janvier et mars 1999.

Le prochain rapport d'étape pour la phase RADARSAT est dû le 31 décembre 1998, toutefois, dans le cadre du projet EQeau un rapport d'avancement des travaux supplémentaire est attendu le 31 septembre 1998. Ce rapport décrit aussi les trois autres livrables attendus au 30 septembre 1998 de la part de l'INRS-Eau:

- 1) Le contour des trois sous-bassins amonts: *LG4*, *La Forge* et *Canalpiscau* (Chapitre 3);
 - 2) La précision des cartes d'équivalent en eau dérivées des images Standard (Chapitre 4).
 - 3) La cartographie de la neige humide à partir des images Standard (Chapitre 5).
-

2. OBJECTIFS DU PROJET

Rappelons ici les trois objectifs de la phase 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 Grande dans les prochaines années.

3. DÉLIMITATION DES SOUS-BASSINS

3.1 *Modèle numérique d'altitude*

Un modèle numérique d'altitudes (MNA) représentatif de la topographie réelle du terrain (validé) est primordial pour la détermination automatique du contour des sous-bassins 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 par PHYSITEL. Toutefois, VIASAT Géotechnologie a pu obtenir de Forêt Canada, un MNA de meilleure qualité pour les feuillets 33H, 33I, 23C, 23D, 23E, 23F et 23L. Il s'agit de données d'altitudes selon une grille géographique dont le pas est de 3 secondes d'arc. À la latitude de la Rivière La Grande cela représente une résolution de 92 m x 50 m environ. Un second MNA unifié du sous-bassin de LG4 en projection UTM a donc été généré par VIASAT Géotechnologie sous forme matricielle, avec une maille de 50m X 50m. Tel que présenté dans le rapport du 31 juillet 1998, les discontinuités sont encore présentes, mais elles ont été amenuisées. Toutefois, en vue de la démonstration de l'efficacité de l'approche RADARSAT à l'hiver 1999, la déduction du contour des trois sous-bassins amonts (LG4, LaForge et Canapiascau) est requise. Un autre MNA unifié couvrant l'ensemble des trois sous-bassins en projection Lambert a donc été généré par VIASAT Géotechnologie sous forme matricielle, avec une maille de 50m X 50m. De manière à diminuer la taille gigantesque du fichier, nous avons ré-échantillonné le MNA selon une maille de 100m x 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 des contours par PHYSITEL*

La déduction automatique des contours d'un 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 égale 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.

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. 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;
- (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 inclue l'exutoire du bassin (maille-exutoire). Dans le cas des trois sous-bassins de l'étude, les mailles comprenant (1) le barrage de LG4, (2) le barrage de LA1 et (3) le barrage de Brisay, ont été utilisées. 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 des trois sous-bassins amonts de la Rivière LaGrande est un défi de taille pour toute méthode de délimitation automatisée, tant pour les logiciels que pour les algorithmes et les machines. Ce défi est caractérisé par les points suivants :

- Le modèle numérique d'altitudes (MNA) utilisé présente plusieurs discontinuités entre les feuillets cartographiques, créant ainsi de faux écoulements ou empêchant des écoulements réels ;
- Le relief de la région étudiée présente un très faible dénivelé, ce qui rend critique l'imprécision du MNA ;
- Le faible relief, jumelé à la présence de milliers de lacs sur le territoire, entraîne la création d'un nombre astronomique de replats que PHYSITEL doit résoudre en leur attribuant une orientation ;
- Toujours en raison du relief caractéristique, certains lacs se déversent dans plus d'un cours d'eau simultanément ou à différents moments de l'année, ce qui modifie le contour réel ;
- Certains cours d'eau ont été dérivés ou retenus artificiellement par des digues et des barrages, modifiant ainsi les écoulements naturels identifiés par PHYSITEL à partir du MNA ;
- L'ampleur et la complexité des sous-bassins se traduit par un temps de calcul énorme et une utilisation limite des ressources matérielles ;
- La validation des résultats à partir des limites approximatives fournies par Hydro-Québec est insatisfaisante ;

Afin de relever ce défi, les solutions suivantes ont été mises de l'avant :

- Un ordinateur pentium II 400 MHz a été dédié à cet objectif du projet, permettant de réduire significativement les temps de calculs. Ceux-ci se comptent toutefois encore en terme de jours par sous-bassin ;
 - Les algorithmes de PHYSITEL ont été optimisés afin de réduire encore le temps de calcul ;
 - Afin de se doter d'un document de validation acceptable, une délimitation des bassins a été effectuée manuellement, à partir du modèle numérique d'altitudes, d'images satellitaires Landsat-TM et du réseau hydrographique vectoriel au 1 : 250 000, selon la projection Lambert Conique Conforme. De plus, une carte indiquant l'emplacement des digues principales a aussi été utilisée. La superposition de ces quatre couches d'information a
-

permis de déterminer une limite détaillée et réaliste des trois sous-bassins hydrographiques, pour des fins de validation ;

- La localisation des digues et barrages dans PHYSITEL a permis de contourner le problème des écoulements artificiels. La méthodologie utilisée est la suivante :

Dans un premier temps, on localise la maille où se trouve la digue. On identifie alors cette maille comme maille-exutoire. PHYSITEL détermine ensuite toute la zone amont qui se draine de façon naturelle par cette maille. Cette zone est finalement rattachée au sous-bassin puisque toute l'eau qui passait anciennement par cette maille-exutoire est maintenant retenue artificiellement par la digue et incluse dans le sous-bassin.

3.3 Contours des sous-bassins hydrographiques de LG4, Laforge et Caniapiscau

La figure 3.1 montre les limites des trois sous-bassins hydrographiques produites par PHYSITEL et intégrées dans le logiciel MapInfo™ utilisé par Hydro-Québec. À titre comparatif, on y retrouve également les limites approximatives utilisées par Hydro-Québec. Le tableau 1 présente les superficies comparatives de ces sous-bassins.

Tableau 3-1 : Superficies comparées des différentes limites de sous-bassin

Sous-bassin	Superficies (km²) avec les limites approximative de validation	Superficies (km²) avec les limites manuelles de validation	Superficies (km²) avec les limites de PHYSITEL
LG4	30 000	27 110	27 790
Laforge	9 212	9 791	9 958
Caniapiscau	37 930	38 480	36 770

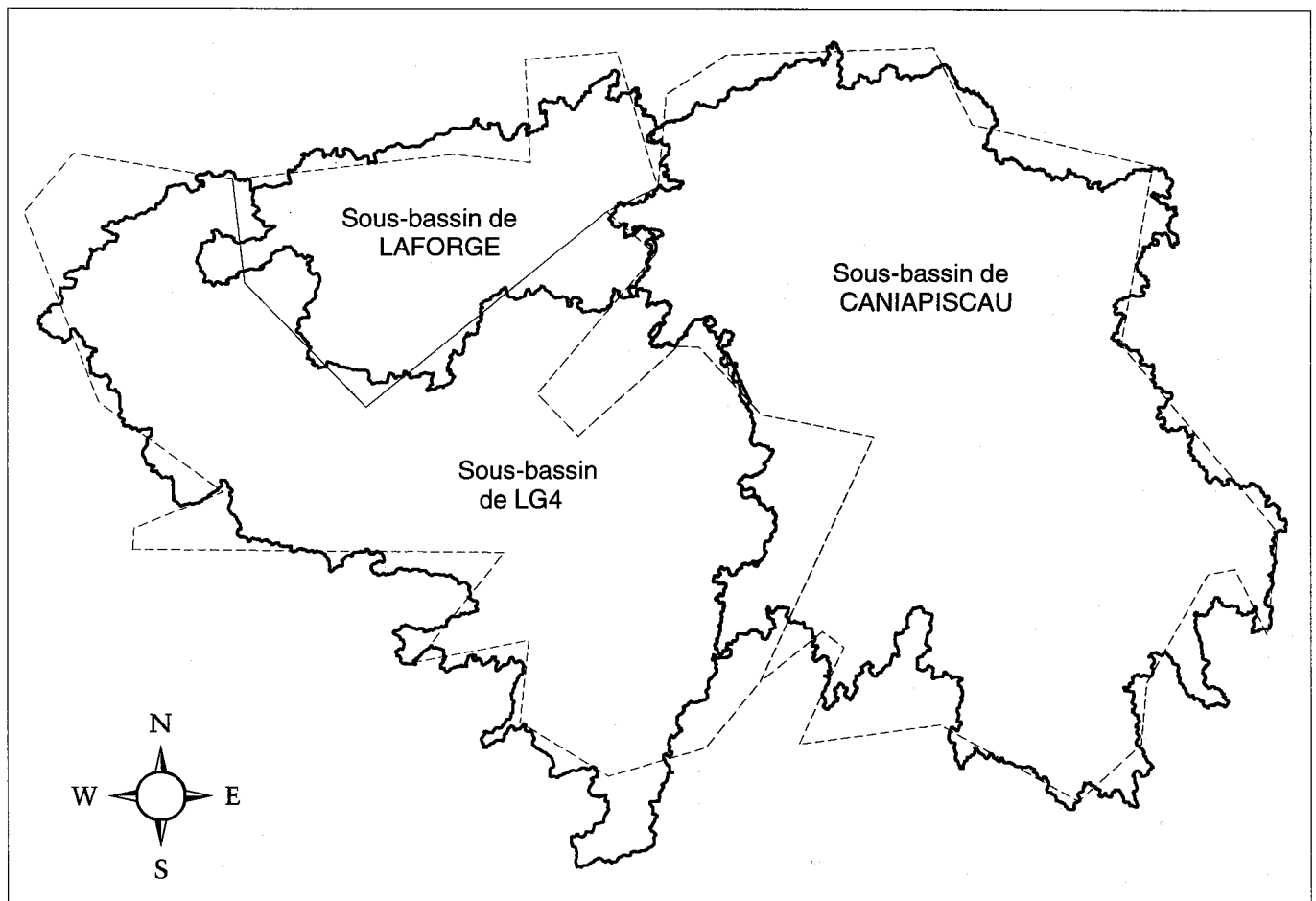


Figure 3-1 : Délimitation des sous-bassins de LG4, Laforge et Caniapiscau

Le cas du sous-bassin de LG4

Dans le rapport du 31 juillet 1998, un premier essai de délimitation du sous-bassin de LG4 avait été réalisé selon la projection UTM. Quatre zones problématiques avaient alors été identifiées :

- Zone 1 : Au sud du sous-bassin, le problème était 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.
- Zone 2 : Au nord du sous-bassin, on remarquait 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.
- Zone 3 : L'indentation nord-est, observable sur la limite grossière, n'est pas reproduite sur la limite automatique.
- Zone 4 : Le quatrième secteur mal délimité est l'extrusion située au centre-ouest du bassin.

Ces quatre zones problématiques ont été traitées et corrigées lors de la création de la nouvelle limite réalisée par PHYSITEL à partir du MNA en projection Lambert (Figure 3.2). Le problème des discontinuités de la zone 1 (au sud-est) a été contourné en effectuant la correction des replats du sud vers le nord. L'algorithme de PHYSITEL a alors inclus correctement ce secteur dans le sous-bassin. Dans le cas de la zone 2, la mauvaise localisation de l'exutoire était due à la présence d'une digue majeure au sud-est du barrage de LG4. En utilisant la méthode de traitement des digues décrite en 3.2, le problème a été corrigé. Quant au tracé trop à l'est de la limite du sous-bassin, la nouvelle limite manuelle de validation a permis de constater que PHYSITEL délimitait correctement le secteur et que c'est la limite de bassin approximative servant alors de validation qui faisait défaut. Cette dernière constatation s'applique aux zones 3 et 4. Donc, la limite déterminée par PHYSITEL correspond très bien à la limite manuelle de validation. Les quelques différences de tracé qui demeurent (Figure 3.2) sont dues à l'imprécision du MNA, particulièrement dans les zones de faible relief.

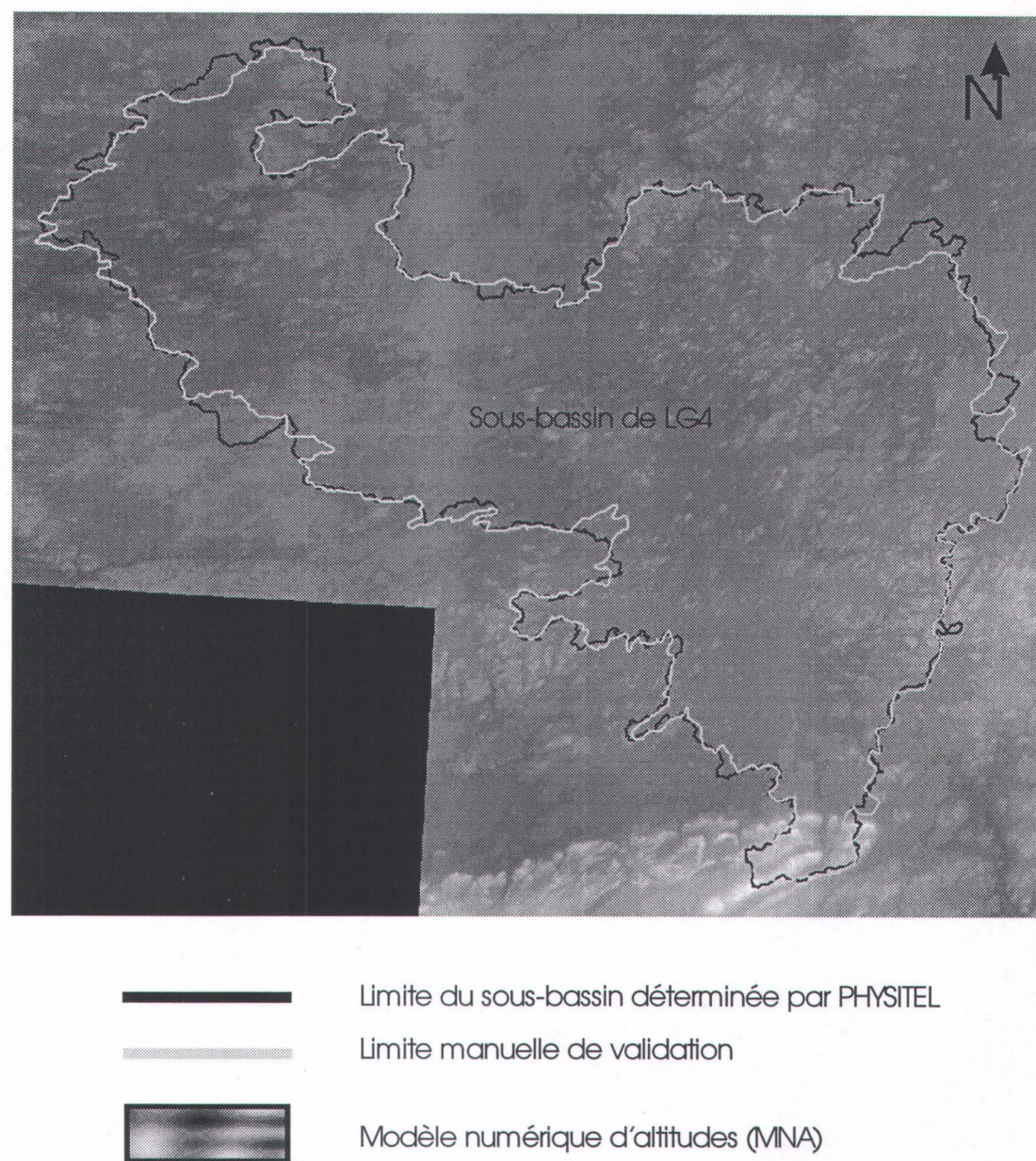


Figure 3-2 : Délimitation du sous-bassin de LG4

Le cas du sous-bassin de Laforge

La nouvelle délimitation du sous-bassin de Laforge est présentée à la figure 3.3. La concordance avec la limite manuelle de validation est excellente. Toutefois, ce résultat a été obtenu après plusieurs itérations. En effet ce sous-bassin est caractérisé par la présence de nombreuses digues et chacune doit être traitée séparément, selon la méthode décrite en 3.2. En spécifiant un exutoire au barrage de LA1, un premier contour très réduit est produit (Figure 3.4a). Puis, une importante digue localisée dans le secteur du lac Fontanges permet de récupérer presque tout le reste du bassin (Figure 3.4b). Enfin, plusieurs petites digues permettent d'inclure d'autres secteurs moins importants du bassin (Figure 3.4c). À titre indicatif, la figure 3.5 présente une des digues du secteur du Lac Fontanges.

Le cas du sous-bassin de Caniapiscou

Le problème majeur de ce sous-bassin est celui de sa dimension. De plus, le réservoir est un amalgame complexe de milliers de lacs reliés les uns aux autres. La résolution des replats par PHYSITEL nécessite donc un temps de traitement énorme. La qualité du résultat (Figure 3.6) est donc des plus intéressante. La limite obtenue pour le sous-bassin de Caniapiscou concorde très bien avec la limite manuelle de validation, sauf pour un secteur situé au sud du bassin. À cet endroit, le MNA n'est pas assez précis pour bien recréer la complexité du relief et du réseau hydrographique. C'est le même phénomène qu'observé sur le sous-bassin de LG4 mais cette fois, il affecte une plus grande superficie ($>1000\text{km}^2$). Une correction manuelle des orientations d'écoulement aurait pu permettre de forcer artificiellement l'inclusion de ce secteur dans le sous-bassin de Caniapiscou mais nous avons préféré présenter le résultat tel quel, afin de démontrer l'importance de la précision du MNA. Toutefois, pour son utilisation future dans EQeau ou dans le processus de prévision d'Hydro-Québec, la correction manuelle devra être faite.

La délimitation du sous-bassin de Caniapiscou a elle aussi nécessitée plusieurs itérations, en raison encore une fois de la présence de digues. La figure 3.7 montre un groupe de digues et l'évacuateur de crue situés au nord du bassin. Leur localisation a permis de récupérer le tiers nord-est du bassin.

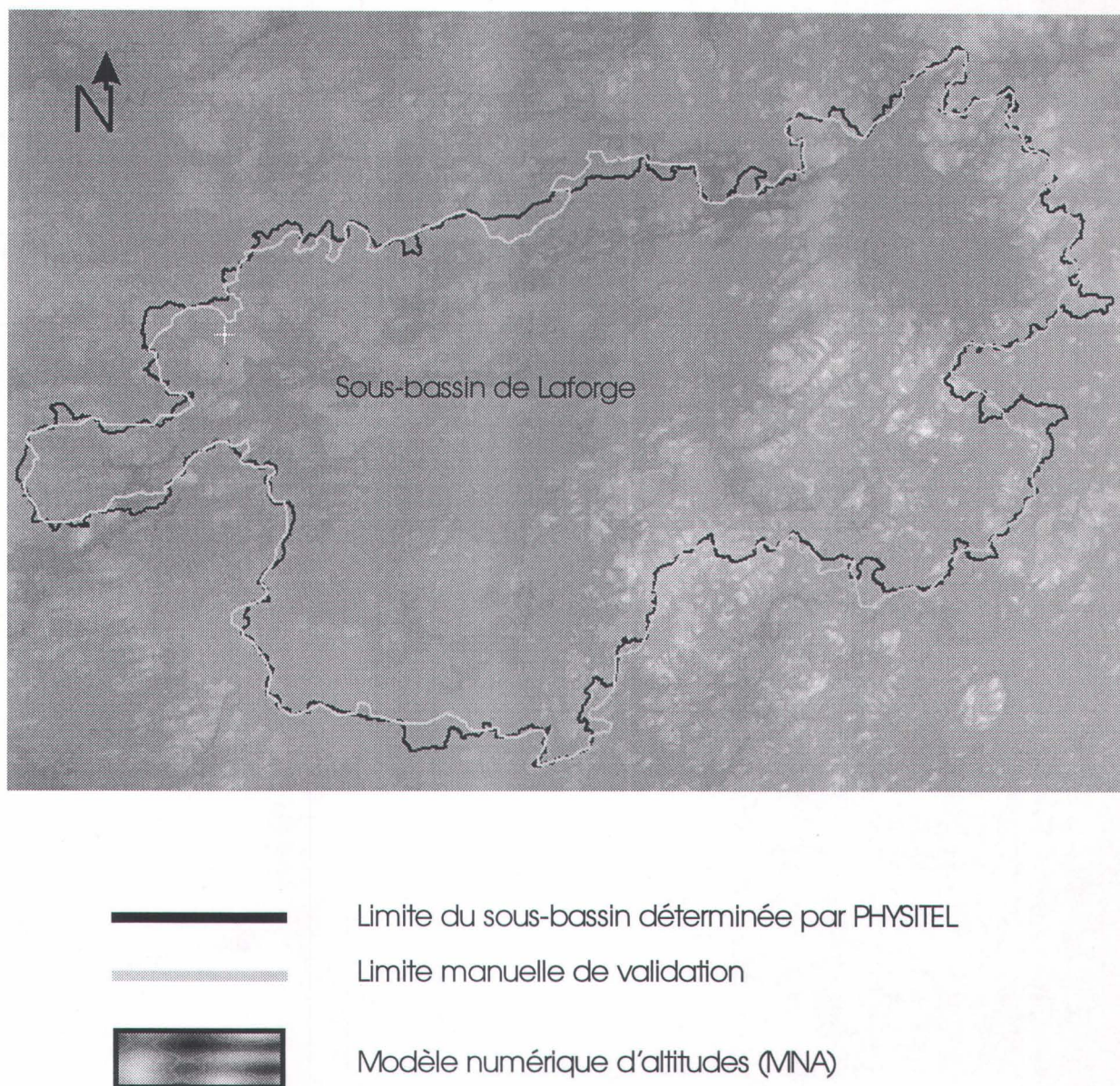


Figure 3-3: Délimitation du sous-bassin de Laforge

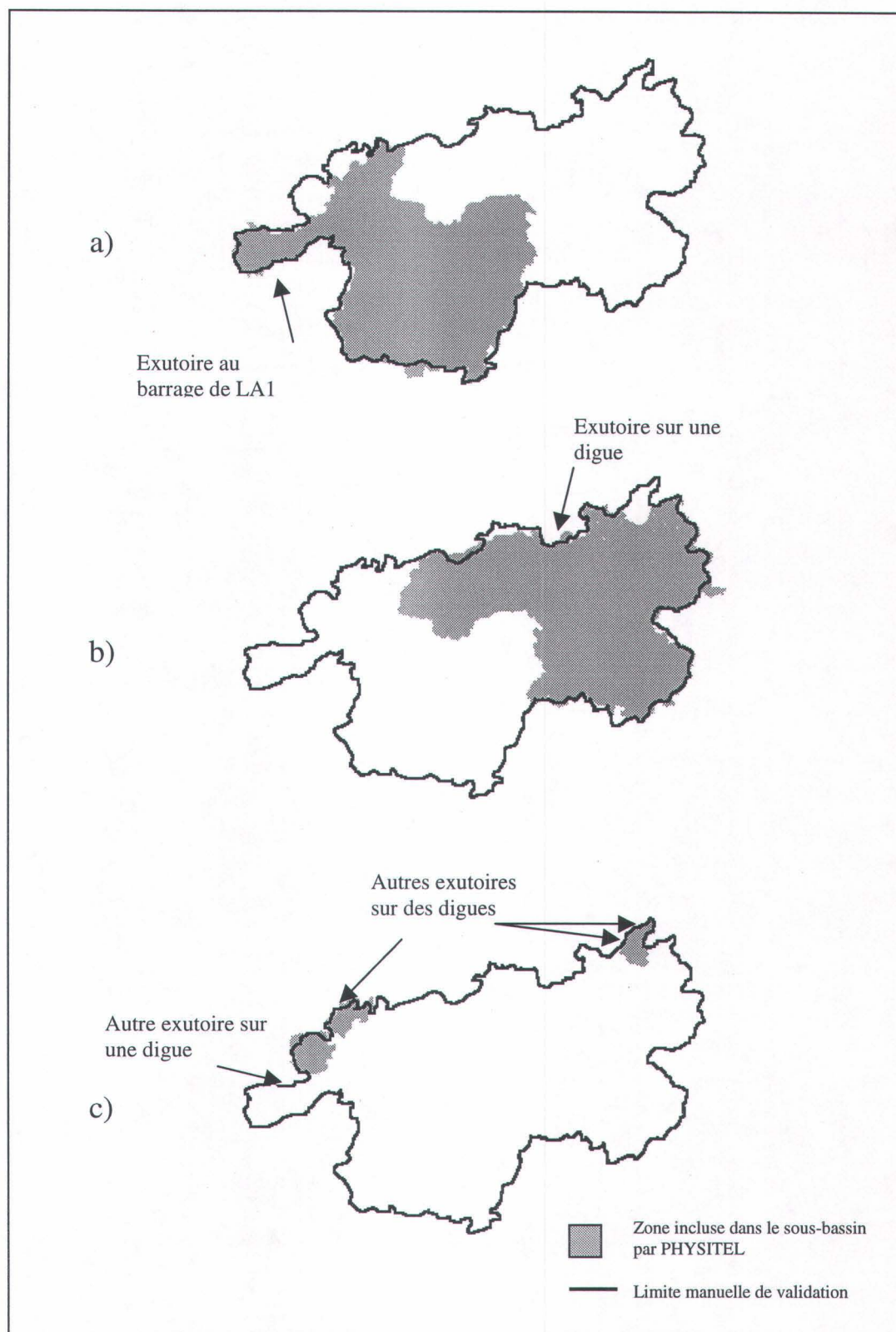


Figure 3-4 : Délimitation du sous-bassin de Laforge par itérations

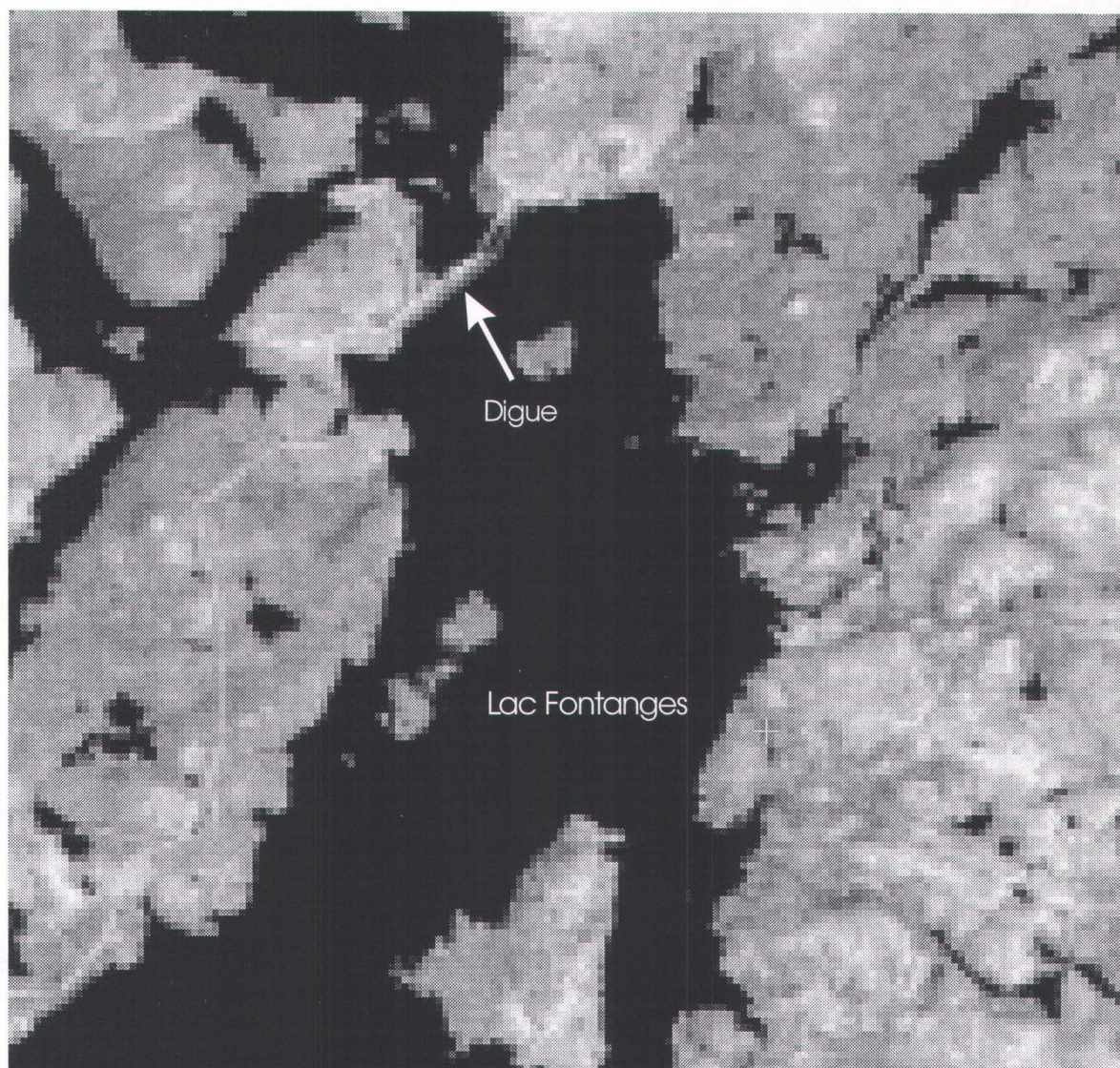


Figure 3-5 : Exemple de digue sur le réservoir de Laforge (image Landsat-TM)

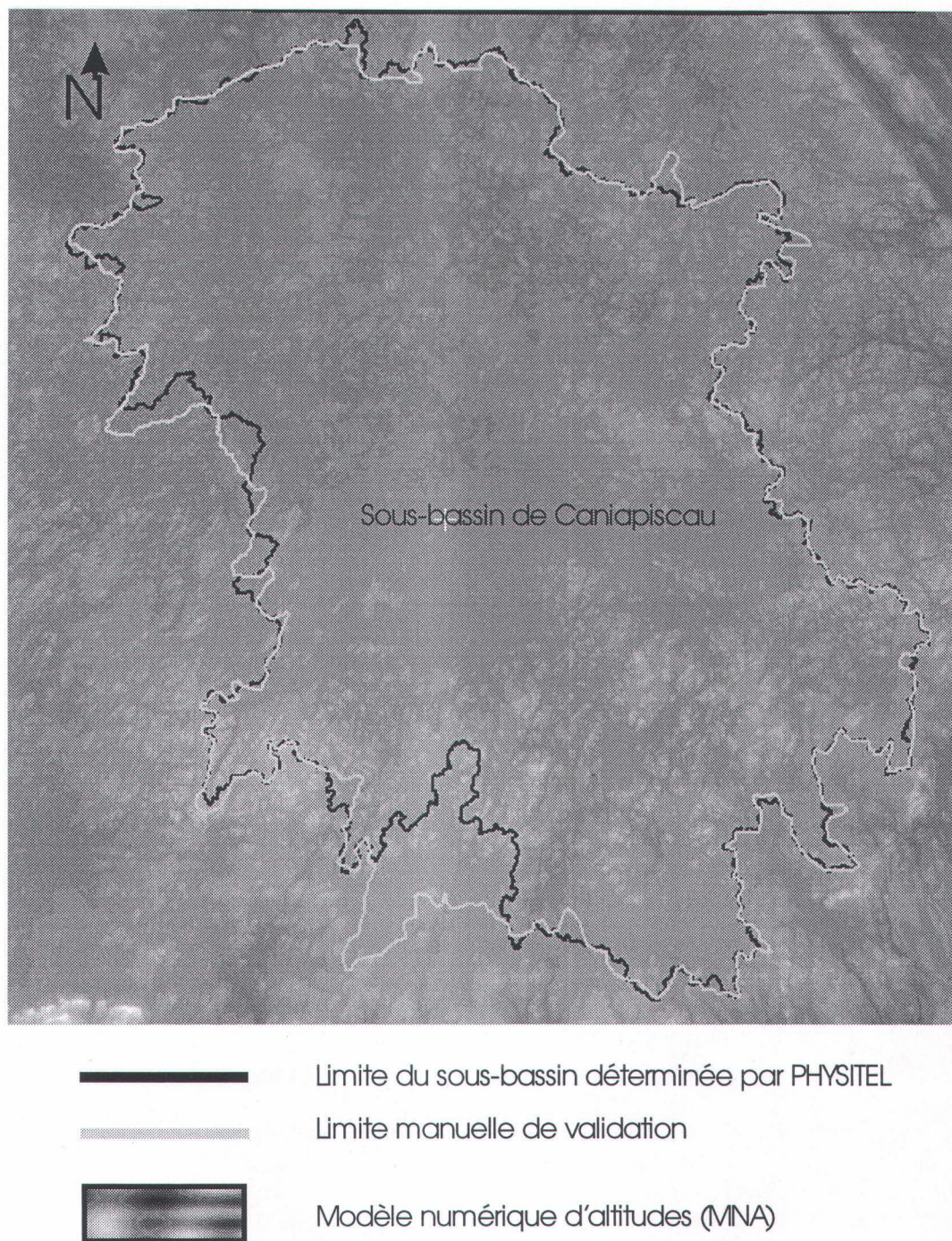


Figure 3-6 : Délimitation du sous-bassin de Caniapiscou

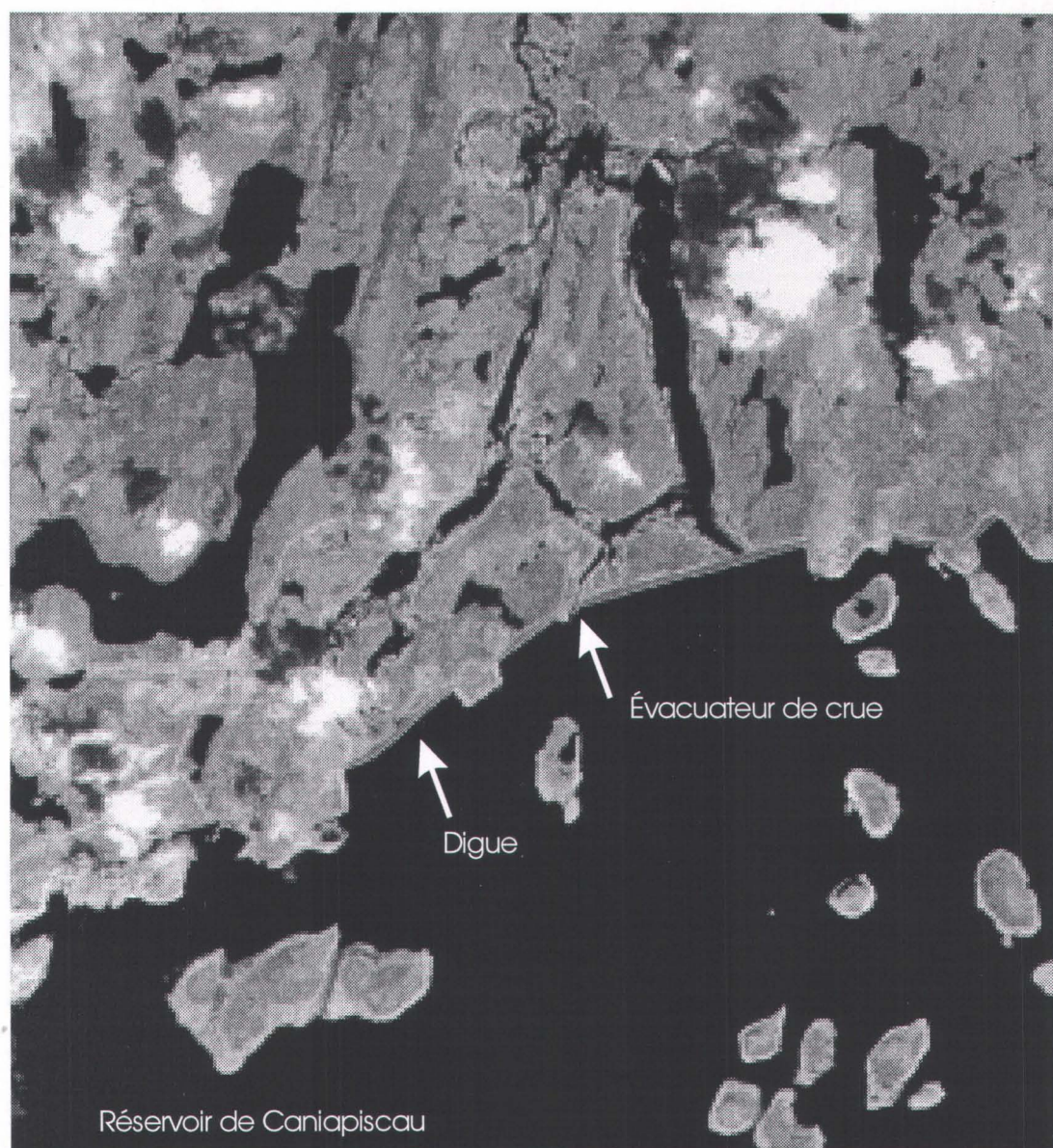


Figure 3-7 : Exemple de digues, sous-bassin de Caniapiscou

En résumé, la performance de PHYSITEL pour cet exercice a été exceptionnelle, compte-tenu de l'imprécision des données sources et de la complexité du milieu. Un MNA plus précis et correspondant mieux à l'état actuel de ces grands bassins aurait permis d'éviter plusieurs cas problématiques.

Finalement, en prévision des prochains objectifs du projet, la limite raffinée des trois sous-bassins amonts a été introduite dans *EQeau* pour calculer l'équivalent en eau moyen des trois sous-bassins à partir des images RADARSAT de l'hiver 1999.

4. PRÉCISION DES CARTES D'ÉQUIVALENT EN EAU

4.1 Précision des estimés extraits des images RADARSAT versus les relevés des sites expérimentaux

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 (σ_h°) sont soustraits d'une image de référence (σ_a°). 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 α 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, 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	Eq.Eau	Densité	R.Th.
		[cm] Moy.	[mm] Moy.	[kg/m ³] Moy.	[°Cm ² s/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

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'incertude 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.

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).

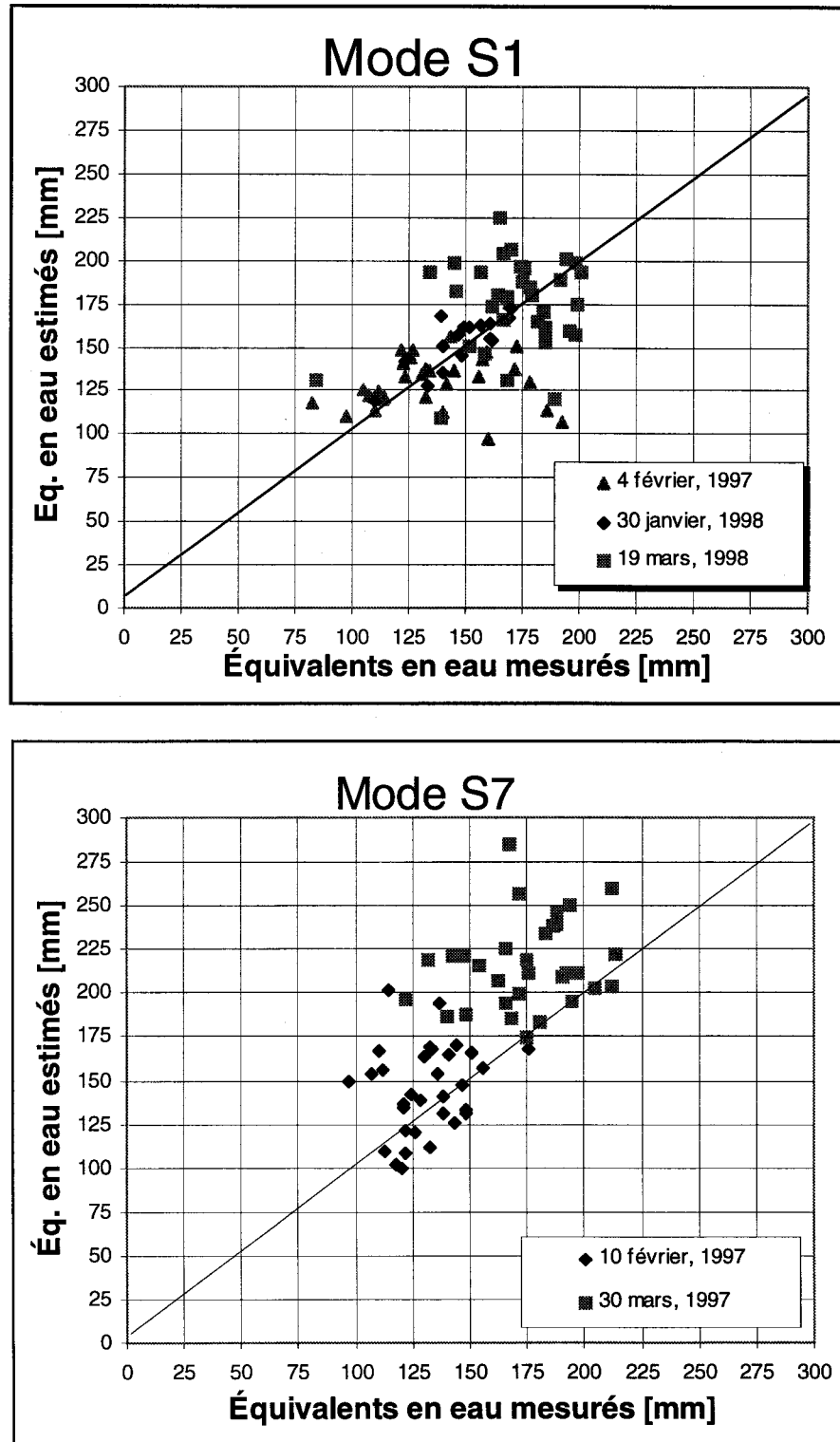


Figure 4-1 : Précision de l'algorithme d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige.

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

4.2 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 1998 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 Kaanapskow (au nord-est).

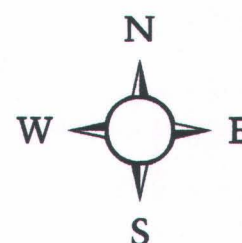
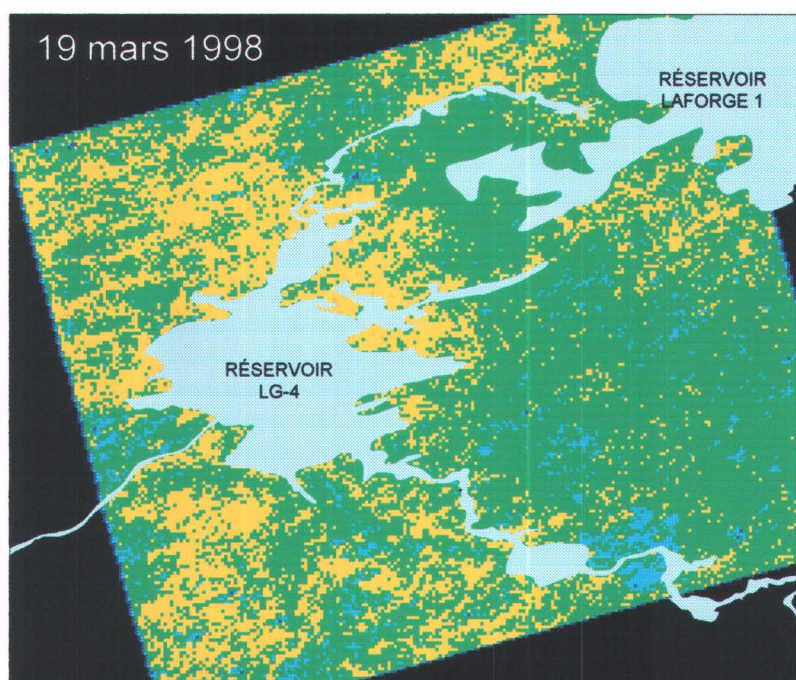
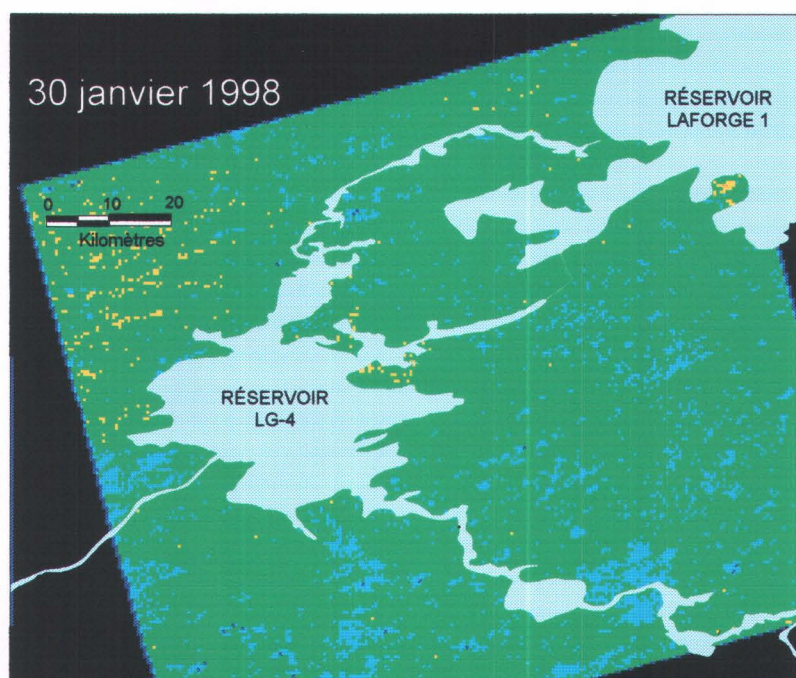
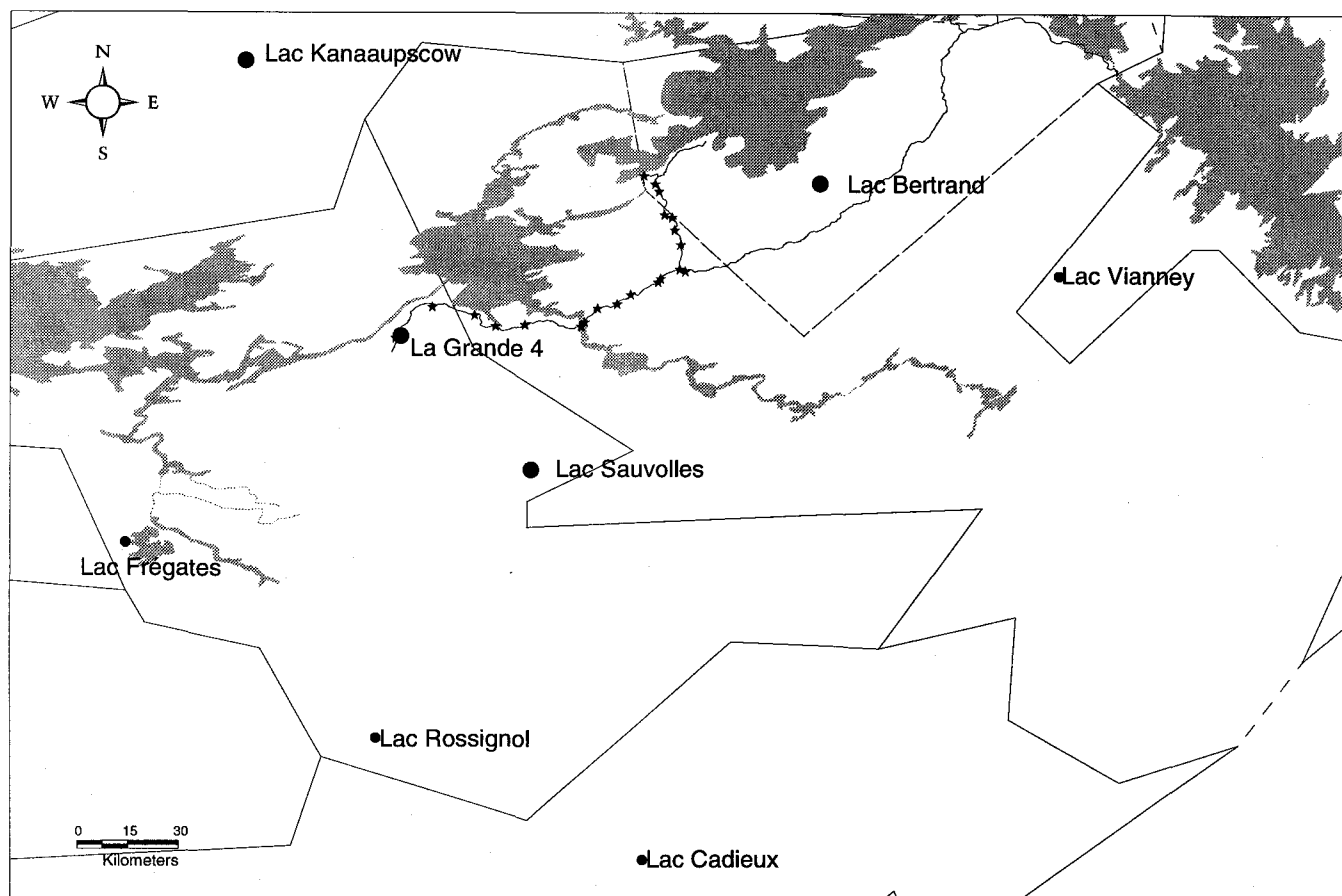


Figure 4.2: Cartographie de l'équivalent en eau de la neige pour l'hiver 1998.
Les résultats sont rééchantillonnés à 500m.

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^{er} 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^{er} avril 1998. Cela signifie que l'équivalent en eau 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 (figure 4.1) les équivalents en eau extraits de l'image RADARSAT du 18 mars 1998 sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées.

En somme, l'imagerie RADARSAT, en mode Standard (1), en plus de fournir un bon estimé de l'équivalent en eau moyen sur un territoire donné, produit une information très utile sur la distribution spatiale de la neige au sol sur ce territoire (figure 4.2).



- Stations nivométriques d'Hydro-Québec
(Les stations ayant servi à l'interpolation ont un symbole plus gros)
- ★ Sites expérimentaux de l'INRS-Eau

Figure 4-3 : Localisation des stations nivométriques d'Hydro-Québec et des sites expérimentaux où l'INRS-Eau effectue ses lignes de neige.

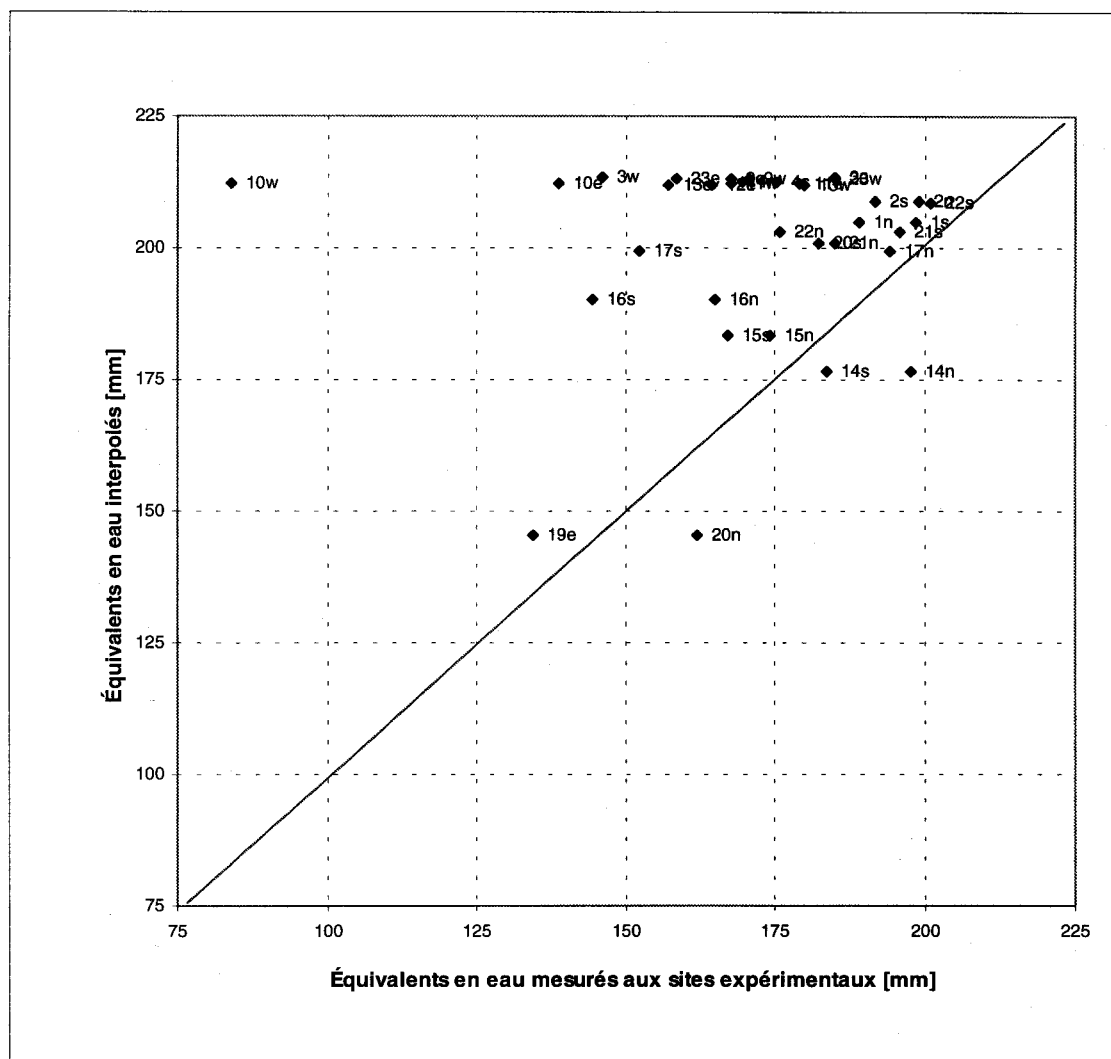


Figure 4.4 : Comparaison des équivalents en eau interpolés à partir des mesures aux stations nivométriques et des mesures aux sites expérimentaux.

4.3 Évaluation 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 (500 km) au lieu des images Standard (100 km). Des images ScanSAR ont alors été acquises durant la saison 1997-1998. Toutefois, ces images multi-faisceaux n'ayant pas encore été étalonnées et montrant des valeurs différentes d'un faisceau à l'autre, nous avons des réserves sur leur potentiel. Elles ont néanmoins été géocodées avec une précision satisfaisante par Viasat Géo-Technologie et elles seront analysées d'ici le 31 décembre 1998.

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 (Martin *et al*, accepté). C'est pourquoi, des images en mode Wide ont été commandées pour la prochaine saison hivernale en plus des images ScanSAR.

Il y a lieu de mentionner ici que les images ScanSar pourraient être étalonnées au cours des prochains mois, selon les informations recueillies auprès des chercheurs de l'Agence spatiale canadienne.

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: 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 acquise les 15 avril et 9 mai 1998, mais elles ne seront traitées que dans les prochaines semaines avec les images ScanSAR hivernales.

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 et une image ERS-1 printanière 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:

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

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

où:

σ_r° représente les coefficients de rétrodiffusion de l'image de référence (image d'hiver).

σ_p° représente les coefficients de rétrodiffusion de l'image de printemps (neige humide).

Bien que ces algorithmes conventionnels de cartographie de la neige humide supposent une baisse significative des coefficients de rétrodiffusion lorsque le couvert nival devient humide (3 dB), les valeurs extraites de l'image du 23 avril 1997 ne donnent pas les basses valeurs attendues,

tel que discuté dans un rapport antérieur (Bernier *et al.*, 1997). En effet, l'image présente des valeurs inférieures d'à peine 1 dB à l'image de neige sèche du 30 mars 1997, sauf sur les lacs.

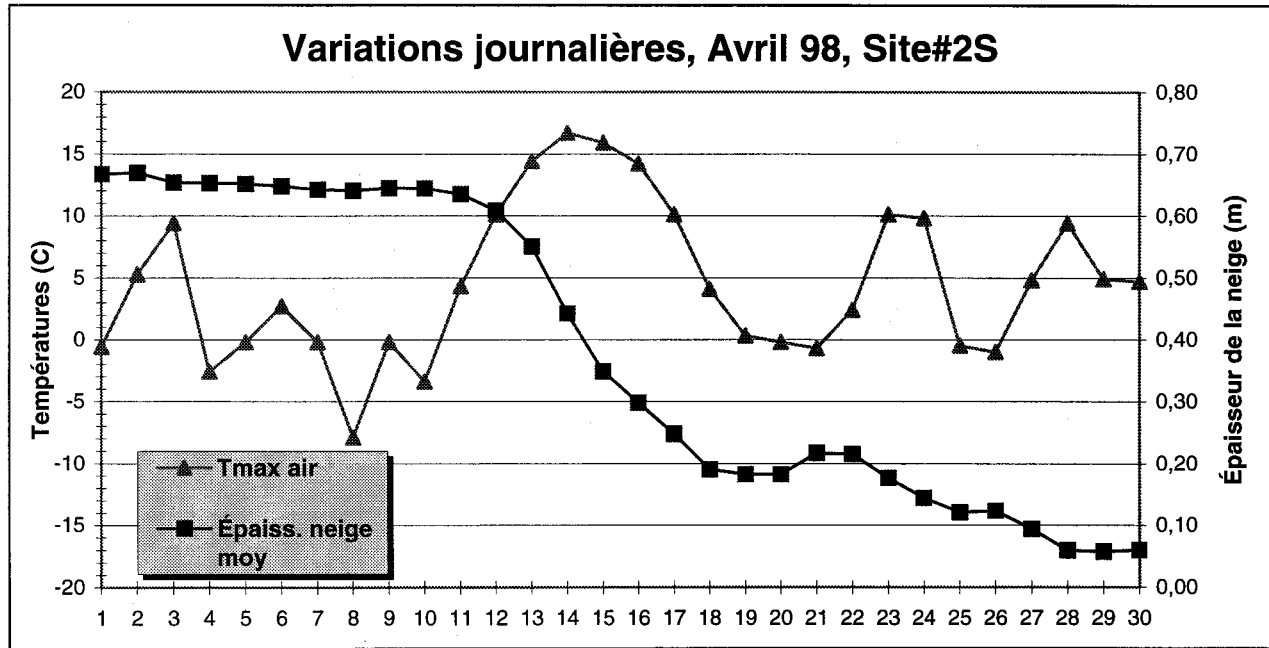


Figure 5-1 : Conditions climatologiques enregistrées en avril 1998 à la station du site #2 sud.

Des simulations (Figure 5.2) basées sur un modèle de rétrodiffusion radar (Baghdadi *et al.*, accepté) ont permis d'attribuer ce phénomène à une forte contribution de la rétrodiffusion de surface à l'interface air/neige pour un couvert rugueux ($rms=2mm$), des teneurs en eau élevées ($W_v=7\%$) et de larges angles d'incidences ($S7 = 45^\circ$ à 49°). D'ailleurs, Shi et Dozier (1992) avaient déjà mentionné que la rétrodiffusion d'un couvert de neige dont la surface est rugueuse peut être aussi forte que celle de la neige sèche, ce qui rend la cartographie de la neige humide impossible.

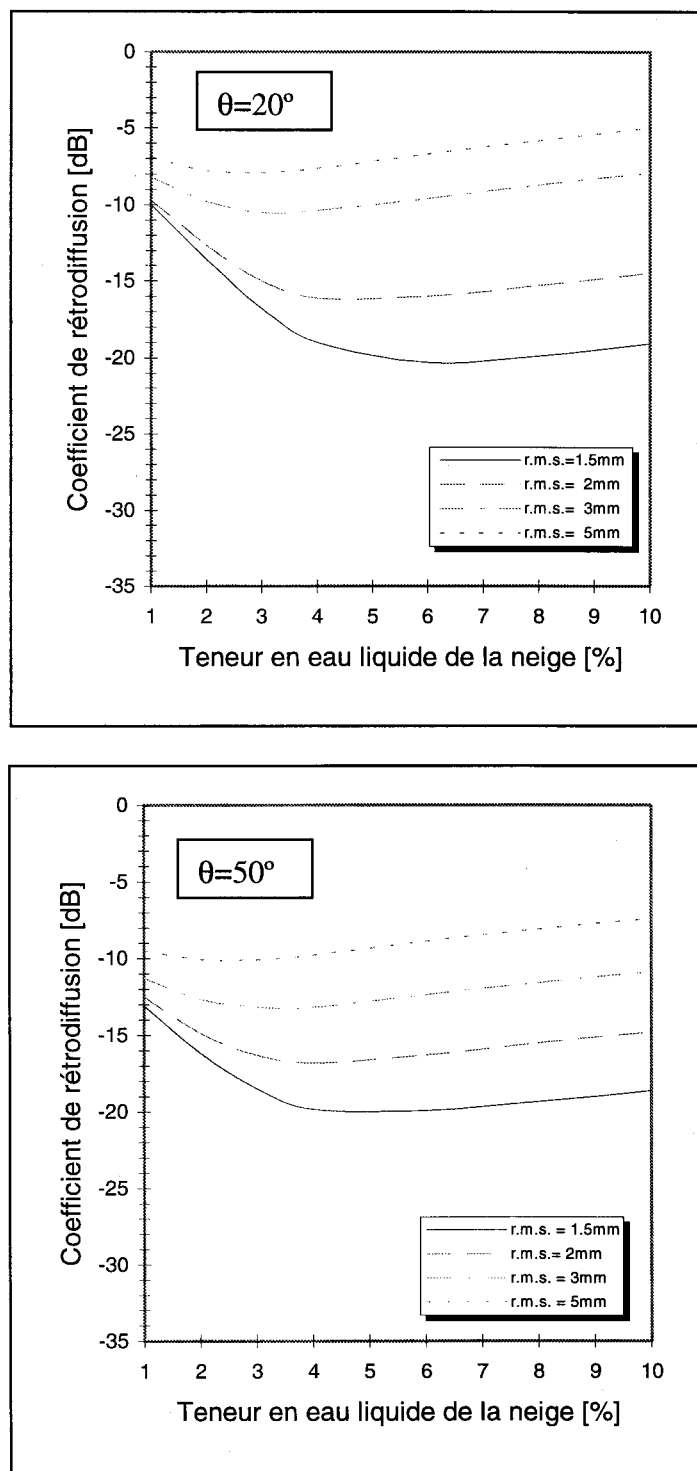


Figure 5-2 Simulations montrant la variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la teneur en eau liquide de la neige et de sa rugosité.

À partir de simulations d'images RADARSAT en mode Standard, Baghdadi *et al* (sous presse) ont aussi suggéré un second algorithme pour cartographier la neige humide:

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 : α_{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. 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 5.3). Ce comportement est aussi bien observé sur une image en mode S1 qu'une image en mode S7. Nous proposons de dériver un algorithme de classification de la neige humide qui applique une valeur α_{moyen} spécifique à chacun des trois groupes d'occupation du sol: 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)
Lacs	-15.0 dB	-20.7 dB	-11.7 dB	-12.9 dB	-13.1 dB
Milieux ouverts	-13.8 dB	- 15.0 dB	-11.3 dB	-11.3 dB	-8.2 dB
Milieux fermés	-13.2 dB	- 12.5 dB	-11.0 dB	-10.1 dB	-7.8 dB

5.3 Cartographie de la neige humide le 23 avril 1997 (S7)

Afin de d'illustrer les observations précédentes, 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, 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% (tableau 5.2).

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 puisque 66% de l'image est classifiée comme de la neige humide. Par la suite, on a appliqué une valeur α_{moyen} spécifique à chacun des trois groupes d'occupation du sol. On note alors une augmentation significative de la proportion des pixels de neige humide mais nous nous attendions à ce que l'ensemble des pixels soient classés.

Tableau 5-2 : Pourcentage des pixels de l'image du printemps classés comme neige humide

Algorithmes	AVRIL 97	AVRIL 98	MAI 98
Équations 3 et 4	14%	9%	6%
Équation 3 uniquement	31%	10%	6%
Équation 5 ou 6	66%	61%	73%
Équation 5 ou 6 avec un α_{moyen} spécifique par classe :			
Lacs	76%	64 %	58%
Milieux ouverts	77%	66%	70%
Milieux semi-fermés	82%	69%	71%

30 jan. 98



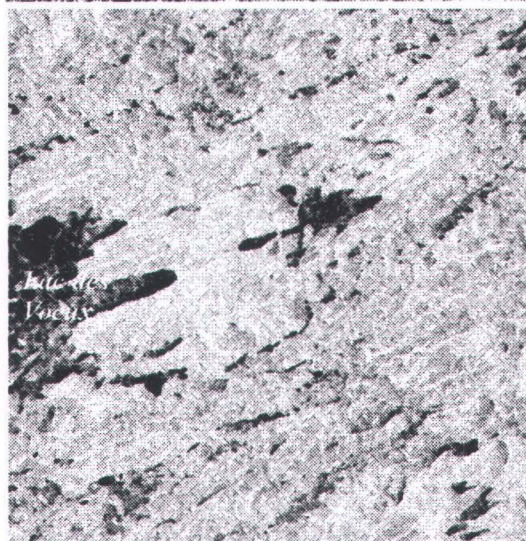
Neige sèche

12 avril 98



Neige humide

6 mai 98



Sans neige,
Sols saturés

Figure 5.3: Augmentation du contraste sur trois images RADARSAT (S1) de l'hiver et du printemps 1998

5.4 Cartographie de la neige humide le 12 avril 1998 (S1)

Cette image ayant été prise en mode S1, les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont plus élevées que celles du 23 avril 1997 en mode S7 (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 sur l'ensemble de l'image (figure 5.3). Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion moyens des trois principales classes diffèrent effectivement peu de celles de janvier 1998. Toutefois, l'image du 12 avril 1998 n'ayant pas été acquise en conjonction avec une campagne de terrain, la teneur en eau liquide de la neige n'a pas été mesurée. Ici aussi, les trois algorithmes ont été appliqués. Comme pour l'image d'avril 1997, c'est l'application de l'équation 6 avec un α_{moyen} spécifique pour les trois principales classes d'occupation du sol qui donne les meilleurs résultats.

5.5 Cartographie de la neige humide le 6 mai 1998 (S1)

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.

En juin dernier, 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 6 mai et celle du 30 janvier 1998. 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 correspondent à part égale à des forêts ouvertes, des brûlis et des landes ce qui correspond à environ 4% de la superficie de l'image. Dans ce cas d'un couvert de neige bien humide mais très partiel (sauf sur les lacs), cette approche simple semblait avoir bien fonctionné pour cartographier la neige humide.

D'autre part, nous avons aussi utilisé les trois algorithmes décrits à la section 5.2. Le premier (équations 3 et 4) sous-estime nettement la présence de neige humide sur l'image (6 %) alors que les deux autres la surestiment beaucoup (58% à 73%).

6. TRAVAUX À VENIR ET ÉCHÉANCIER

6.1 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*, une réalisation conjointe de Viasat Géotechnologies et de l'INRS-Eau. Les livrables à déposer au 31 décembre 1998 sont :

- 1) Le contour détaillée du sous-bassin de *LG4* pour utilisation par *EQeau* (*contour déjà réalisé et décrit dans ce rapport d'avancement des travaux*);
 - 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.
 - 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 images RADARSAT (Standard et ScanSAR) d'avril et de mai 1998.
 - 5) Le suivi du gel du sol du sous-bassin de LG4 à partir des images RADARSAT de l'automne 1996 (Standard).
 - 6) 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.
 - 7) Le rapport final de la phase RADARSAT
-

6.2 Activités et livrables 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 préparation des acquisitions de l'hiver 1999:

- 1) La cartographie de l'utilisation du sol (projection Lambert) de la moitié amont (*LG4, Laforge et Caniapiscau*) du bassin de la Rivière La Grande à partir de cinq images TM du satellite Landsat pour utilisation par *EQeau*.
 - 2) Le contour détaillé des sous-bassins *Laforge* et *Caniapiscau* pour utilisation par *EQeau* (*lesquels ont été réalisés et décrits dans ce rapport*);
 - 3) 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 pour connaître les conditions environnementales lors de l'acquisition des images RADARSAT de référence (Wide et ScanSAR).
-

7. CONCLUSION

Durant ces trois derniers mois, les activités de l'INRS-Eau ont surtout été consacrées à la détermination automatique des contours des trois sous-bassins amonts du bassin de la Rivière La Grande. Ces contours détaillés seront utilisés par *EQeau* afin d'estimer l'équivalent en eau moyen du couvert nival pour chacun des trois sous-bassins (*LG4*, *Laforge* et *Caniapiscau*) dans le cadre du projet pilote à l'hiver 1999. La détermination automatique des contours de ces trois bassins qui couvrent plus de 75 000 km² représentait un défi de taille. De plus, le MNA utilisé présente des discontinuités aux limites des feuillets (sept feuillets au 1: 250 000). Le relief est peu accentué, la région est parsemée de nombreux lacs, et les directions d'écoulement de plusieurs cours d'eau ont été modifiés par des digues. Afin de relever le défi, plusieurs solutions originales ont été mises de l'avant, telles que l'optimisation des algorithmes de PHYSITEL pour la résolution des zones plates, la localisation des digues et barrages dans PHYSITEL, en les identifiant comme mailles-exutoires, et la création manuelle des limites des sous-bassins à des fins de validation.

Nous avons complété l'évaluation de la précision des cartes d'équivalents en eau obtenus à partir des images RADARSAT en mode Standard. 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. De plus, nous avons aussi comparé les équivalents en eau estimés aux valeurs mesurées par Hydro-Québec aux stations nivométriques permanentes. Les accumulations de neige au sol sont effectivement plus importantes au nord et à l'est du secteur expérimental, tel que déterminé par *l'algorithme RADARSAT* et cela autant à l'hiver 1997 qu'à l'hiver 1998. Cela montre que les images en mode S1 de RADARSAT peuvent permettre de mieux connaître la distribution spatiale du couvert nival sur un territoire en plus de fournir un bon estimé de l'équivalent en eau moyen de la neige au sol.

Trois essais de cartographie de l'étendue de la neige humide à partir des images Standard des printemps 1997 et 1998 ont aussi 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. 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). Pour les images d'avril, d'autres approches devront être envisagées.

En conclusion, les activités prévues pour ces trois derniers mois ont été réalisées. Tel que précisé au Chapitre 6, les trois prochains mois serviront à compléter les objectifs de la Phase RADARSAT et à s'assurer que la deuxième version d'*EQeau* est fonctionnelle pour mener à bien la démonstration (projet pilote) de l'hiver 1999.

RÉFÉRENCES

Baghdadi, N., Gauthier Y., Bernier, M. et J.P. Fortin, (accepté). Potential and Limitations of RADARSAT SAR Data for Wet Snow Monitoring. Accepté comme communication, *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*.

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*.

Baghdadi, N., Gauthier et M. Bernier, (1997) Capability of Multi-Temporal ERS-1 SAR Data for Wet Snow Mapping, *Remote Sensing of Environnement*, vol. 60, no.2, pp 174-186, 1997.

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. GE-36, no 1, janvier, pp 226-243.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, J-L. Bisson et P. Vincent (accepté). 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, 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). 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

Shi J. Et J. Dozier (1992) Radar Backscattering Response to Wet Snow. Comptes-rendus de IGARS'92, Houston, Texas, mai, pp 927-929.
