

**Record Number:** 12710  
**Author, Monographic:** Bernier, M.//Fortin, J. P.//Gauthier, Y.//Lelièvre, M.//Fitzback, J.//Baghdadi, N.  
**Author Role:**  
**Title, Monographic:** Suivi du couvert nival à l'aide des données de Radarsat  
**Translated Title:**  
**Reprint Status:**  
**Edition:**  
**Author, Subsidiary:**  
**Author Role:**  
**Place of Publication:** Québec  
**Publisher Name:** INRS-Eau  
**Date of Publication:** 1997  
**Original Publication Date:** 31 juillet 1997  
**Volume Identification:**  
**Extent of Work:** iv, 70  
**Packaging Method:** pages incluant un annexe  
**Series Editor:**  
**Series Editor Role:**  
**Series Title:** INRS-Eau, rapport de recherche  
**Series Volume ID:** 508  
**Location/URL:**  
**ISBN:** 2-89146-387-0  
**Notes:** Rapport annuel 1997-1998  
**Abstract:** Rapport rédigé pour l' Unité Prévisions et des ressources hydriques, Hydro-Québec  
**Call Number:** R000508  
**Keywords:** rapport/ ok/ dl

***Suivi du couvert nival à l'aide des données de  
RADARSAT***

***Rapport de recherche No R-508***

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

**Rapport rédigé pour**

**Unité Prévisions et Ressources Hydriques  
Hydro-Québec**

**par**

**Monique Bernier, Jean-Pierre Fortin, Yves Gauthier,  
Manon Lelièvre, Josée Fitzback et Néhmé Baghdadi**

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

**Rapport de recherche No R-508**

**31 juillet 1997**

# TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	I
LISTE DES TABLEAUX .....	II
LISTE DES FIGURES.....	II
SOMMAIRE.....	III
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DU PROJET .....	5
3. MÉTHODOLOGIE .....	7
3.1 ACQUISITION DES DONNÉES .....	7
3.1.1 Zone d'étude.....	7
3.1.2 Sites-tests .....	7
3.1.3 Acquisition des images .....	10
3.1.4 Acquisition des données de contrôle.....	12
3.2 TRAITEMENT DES IMAGES .....	14
3.3 TRAITEMENTS DES DONNÉES AUXILIAIRES .....	16
3.4 CARTOGRAPHIE DES PARAMÈTRES DU COUVERT NIVAL - SOUS BASSIN DE LG4.....	17
3.4.1 Cartographie de l'équivalent en eau .....	17
3.4.2 Cartographie de la neige humide .....	18
3.5 DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE.....	19
4. RÉSULTATS.....	21
4.1 CONSTRUCTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE .....	21
4.2 APERÇU DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES .....	21
4.3 ANALYSE DES DONNÉES DE L'HIVER 1995/1996 .....	30
4.3.1 Validation de l'algorithme de la phase ERS-1 à partir des données de 1996.....	30
4.3.2 Comparaison des données ERS-1 et RADARSAT-1 .....	35
4.4 ANALYSE DES DONNÉES DE L'HIVER 1996/1997 .....	36
4.4.1 Cartographie de la neige humide .....	36
4.4.2 Cartographie de l'équivalent en eau de la neige.....	40
5. CONCEPTION DU PROTOTYPE .....	47
5.1 INTRODUCTION .....	47
5.2 MODULE PRINCIPAL EQ-EAU.....	47
5.2.1 Sous-module Équivalent en eau.....	49
5.2.2 Sous-module Intégration par mailles.....	50
5.2.3 Sous-module Statistiques .....	51
5.2.5 Sous-module Intégration par sous- bassin .....	52
6. TRAVAUX À VENIR ET ÉCHÉANCIER .....	55
6.1 LIVRABLES À DÉPOSER AU 31 DÉCEMBRE 1997 .....	55
6.2 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES.....	55
6.3 ACTIVITÉS DE TERRAIN .....	56

<b>7. CONCLUSION</b> .....	<b>57</b>
<b>8. RÉFÉRENCES</b> .....	<b>59</b>
<b>ANNEXE 1</b> .....	<b>61</b>
DESCRIPTION DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES D'HYDRO-QUÉBEC .....	61

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Sites-tests par type d'occupation du sol .....	10
Tableau 2 : Images acquises entre les 2 phases du projet.....	10
Tableau 3: Sommaire des images acquises pour la phase RADARSAT du projet (hiver 1996/97).....	11
Tableau 4: Sommaire des campagnes de mesures sur le terrain .....	13
Tableau 5: Mesures effectuées lors des campagnes de terrain d'hiver .....	13
Tableau 6: Distribution des sondes sur le territoire d'étude.....	14
Tableau 7: Traitements numériques effectués sur les images .....	15
Tableau 8: Conditions au site #11 au moment du passage du satellite.....	26
Tableau 9: Résultats moyens des mesures des campagnes de terrain d'hiver 1996 et 1997.....	27
Tableau 10: Couples d'images utilisés lors de la phase ERS-1 et en 1996.....	31
Tableau 11: Précision de l'algorithme sur les images de 1994/1995.....	33
Tableau 12: Choix des images de référence pour 1997 .....	40

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du territoire d'étude .....	8
Figure 2: Carte de localisation des sites-tests.....	9
Figure 3: Bilan climatologique de décembre 1995 à avril 1997, LG4. ....	22
Figure 4: Tendances des conditions précédant l'acquisition des images (hiver 96 et automne 96).....	23
Figure 5: Tendances des conditions précédant l'acquisition des images (automne 96 et hiver 97).....	24
Figure 6: Variation temporelle des profils verticaux.....	28
Figure 7: Variation des profils verticaux selon le type d'occupation du sol .....	29
Figure 8: Précision de l'algorithme - 1994/1995 .....	33
Figure 9: Précision de l'algorithme pour les images de 1996.....	35
Figure 10: Image Radarsat du 23 avril 1997.....	38
Figure 11: Comparaison des rétrodiffusions entre avril et mars 1997 .....	39
Figure 12: Relation entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique des zones de forêt ouverte.....	42
Figure 13: Précision obtenue lors de l'estimation des équivalents en eau à partir des images RADARSAT (S7) du 10 février 1997 et du 30 mars 1997. ....	42
Figure 14: Carte des équivalents en eau estimés à partir de l'image RADARSAT du 10 février 1997 .....	43
Figure 15: Carte des équivalents en eau estimés à partir de l'image RADARSAT du 30 mars 1997 .....	44
Figure 16: Précision de l'algorithme RADARSAT sur une image en mode S1 (4 février 1997).....	45
Figure 17: Schéma du prototype EQ-Eau .....	48
Figure 18: Intégration par maille des cartes d'équivalent en eau : A) grille d'intégration B) grille initiale (à intégrer) C) superposition des deux grilles D) résultats de l'intégration .....	50
Figure 19: Intégration sur un sous bassin des cartes d'équivalent en eau : A) Carte d'équivalent en eau à intégrer B) Contour du sous bassin sur lequel se fait l'intégration superposé sur la carte d'équivalent en eau à intégrer C) Équivalent en eau intégré sur le sous bassin .....	53
Figure 20: Hauteur des thermistances. ....	62
Figure 21: Vue d'ensemble des stations climatologiques.....	63

## SOMMAIRE

Ce projet appuyé par l'Agence spatiale canadienne dans le cadre du programme ADRO (*Application Development and Research Opportunity*) vise à montrer la faisabilité d'utiliser les images RADARSAT pour le suivi des paramètres du couvert nival nécessaires à la prévision hydrologique. Essentiellement, il s'agit d'adapter les algorithmes développés pour les données ERS-1 aux données de RADARSAT et de mettre en place un prototype fonctionnel pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige via des images satellitaires (ERS-1 ou RADARSAT) au Service des Prévisions et des Ressources hydriques à Hydro-Québec d'ici janvier 1999.

L'ensemble des activités prévues pour cette première étape de la phase RADARSAT a été réalisé. D'une part, les modèles numériques d'altitude (MNA) et la correction géométrique des images radar ont été réalisés par VIASAT Géo-Technologies Inc. D'autre part, l'INRS-Eau a réalisé les campagnes de terrain et l'analyse des images ERS-1 et RADARSAT afin de valider l'algorithme provisoire.

Des données de terrain et des images ERS-1 avaient été acquises sur le site d'étude de LG4 lors de la saison hivernale 1995-1996 afin d'assurer la continuité de la recherche. L'analyse de ces nouvelles données a validé l'algorithme provisoire tout en faisant évoluer l'approche. En effet, l'approche tient maintenant compte de la variation de la densité de la neige en fonction de l'occupation du sol. Ainsi, pour l'ensemble des images ERS-1 acquises en 1994, 1995 et 1996, «l'algorithme ERS» qui entrera dans le prototype **EQ-EAU** sous-estime l'équivalent en eau mesuré au sol de 10 à 30 mm (5 à 15%), avec un erreur type de 20 à 40 mm. ( $\pm 10$  à 20%).

L'analyse des données de terrain et des images RADARSAT de l'hiver 1997 a aussi permis d'établir un *algorithme RADARSAT* provisoire pour le prototype **EQ-EAU**. L'approche utilisée est la même, l'algorithme ne diffère que par la valeur des paramètres. Ainsi, l'algorithme

RADARSAT appliqué aux deux images en Mode S7 surestime l'équivalent en eau mesuré au sol de 15 à 30 mm (12 à 18 %) avec un erreur type de 26 à 32 mm. Toutefois, ce même algorithme appliqué à l'image en Mode S1 du 4 février 1997 donne une très bonne estimation de l'équivalent en eau moyen du couvert nival (une sous estimation de moins de 1% )avec une erreur type de 28 mm. Une carte représentant la distribution spatiale de l'équivalent en eau de la neige au sol a été réalisée pour les images en Mode S7 du 10 février et 30 mars 1997.

L'image RADARSAT du 23 avril 1997, représentant des conditions de fonte, a aussi été analysée. Toutefois, une carte de la distribution de la neige humide n'a pas été réalisée puisque l'algorithme de Baghdadi et al (1997) ne s'applique pas dans les conditions particulières de cette image, soit un couvert nival très humide et rugueux en surface. Néanmoins, vu la rétrodiffusion presque nulle des lacs et des réservoirs de cette image RADARSAT, il est clair que la surface du couvert nival était bien humide (6-7%) au moment du passage du satellite.

Finalement, durant cette première étape du projet (février à juillet 1997), l'analyse fonctionnelle du prototype a été réalisée conjointement par VIASAT et l'INRS-Eau

# 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.

En préparation à RADARSAT-1, de décembre 1993 à décembre 1995, l'INRS-Eau mena une étude pour évaluer 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. 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). Deux exemples de cartes d'équivalent en eau ont aussi été produits pour le secteur du Lac des Voeux (Fortin *et al*, 1996). Ce premier algorithme a tendance à sous-estimer de 20 mm (8%) l'équivalent en eau moyen de la neige en se basant sur nos sites de mesures. Compte tenu de la distance entre les stations nivométriques d'Hydro-Québec, cette précision devrait être supérieure à celle pouvant être obtenue avec le réseau en place. Ces résultats ont encouragé l'Unité Prévisions et Ressources hydriques d'Hydro-Québec à poursuivre l'étude du suivi du couvert nival avec les données de RADARSAT dans le cadre du programme ADRO (*Application Development and Research Opportunity*) de l'Agence spatiale canadienne.

Cette phase RADARSAT vise donc à adapter aux données de RADARSAT (bande C-HH) les algorithmes empiriques développés à partir d'ERS-1 (bande C-VV) afin d'estimer l'équivalent en eau de la neige au sol, ainsi que d'autres variables reliées au suivi du couvert nival. En effet, le

---

satellite RADARSAT (bande C-HH) offre la possibilité d'acquérir les images en mode Standard (résolution au sol de 30 m) dans sept gammes d'angles d'incidence entre 20° et 59°, par opposition à ERS qui opère à un angle d'incidence médian de 23° (RSI, 1995). Ce capteur possède aussi un nouveau mode, le mode SCANSAR (résolution au sol de 100 m). Les algorithmes développés avec ERS-1 pour cartographier les paramètres du couvert nival (équivalent en eau, neige humide) doivent donc être adaptés à ces nouvelles données afin qu'ils puissent être utilisés dans un système de prévision hydrologique. Aussi, la pertinence des divers produits de RADARSAT au contexte de la rivière La Grande doit être vérifiée.

De plus, afin d'intégrer ces algorithmes utilisant les produits RADARSAT aux procédures opérationnelles de l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec, un prototype fonctionnel doit être développé sur *MapInfo*™ d'ici janvier 1999.

Ce rapport résume les activités réalisées durant les premiers six mois de la phase RADARSAT (février à juillet 1997) ainsi que les activités réalisées entre les deux phases (l'année 1996) pour assurer la continuité de la recherche (Chapitre 4). Il présente aussi les premiers résultats et les premières cartes tirées des images RADARSAT (Chapitre 5). Ce rapport constitue, par lui-même, l'un des livrables du projet (no.5) et décrit aussi les quatre autres livrables attendus au 31 juillet 1997:

- 1- Les modèles numériques d'altitude (MNA) au 1:250 000
  - 2- La cartographie de l'équivalent en eau de la neige au sol du secteur expérimental à partir des images ERS-1 pour l'hiver 1996 ainsi qu'une comparaison avec les résultats de 1994 et 1995.
  - 3- Une première cartographie de la neige humide au printemps 1997 du secteur expérimental à partir des images RADARSAT.
-

- 
- 4- Une première cartographie de l'équivalent en eau de la neige au sol à l'hiver 1997 du secteur expérimental. (2 dates).
  - 5- Le premier rapport d'étape.

Enfin, le chapitre 5 du rapport résume *l'Analyse fonctionnelle* du prototype développé conjointement par VIASAT Géo-Technologies Inc et l'INRS-Eau. Toutefois, l'analyse fonctionnelle se retrouvera détaillée dans le rapport que déposera VIASAT Inc. à la fin d'août.

---



## 2. OBJECTIFS DU PROJET

---

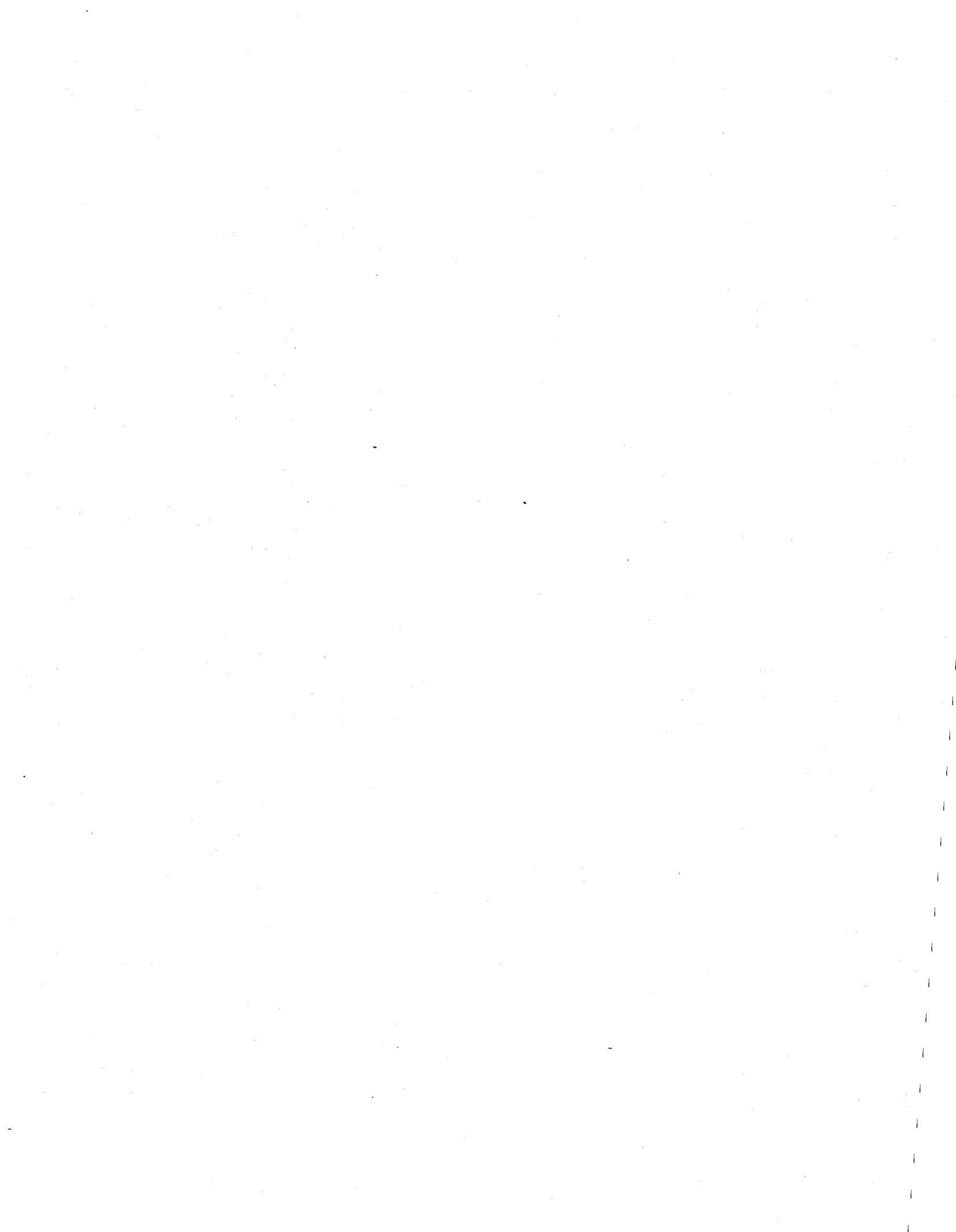
- 1) Estimation de la distribution spatiale, à une date donnée, des paramètres suivants:
  - a) l'équivalent en eau du couvert nival;
  - b) la neige humide (neige sèche vs neige humide ou neige humide et absence de neige);
  - c) le sol gelé;

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 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. MÉTHODOLOGIE**

---

Les activités méthodologiques de ce projet se répartissent en quatre groupes principaux:

1) l'acquisition des données, 2) les traitements préliminaires, 3) l'établissement des algorithmes et la cartographie des paramètres du couvert nival, ainsi que 4) l'élaboration du prototype.

### **3.1 Acquisition des données**

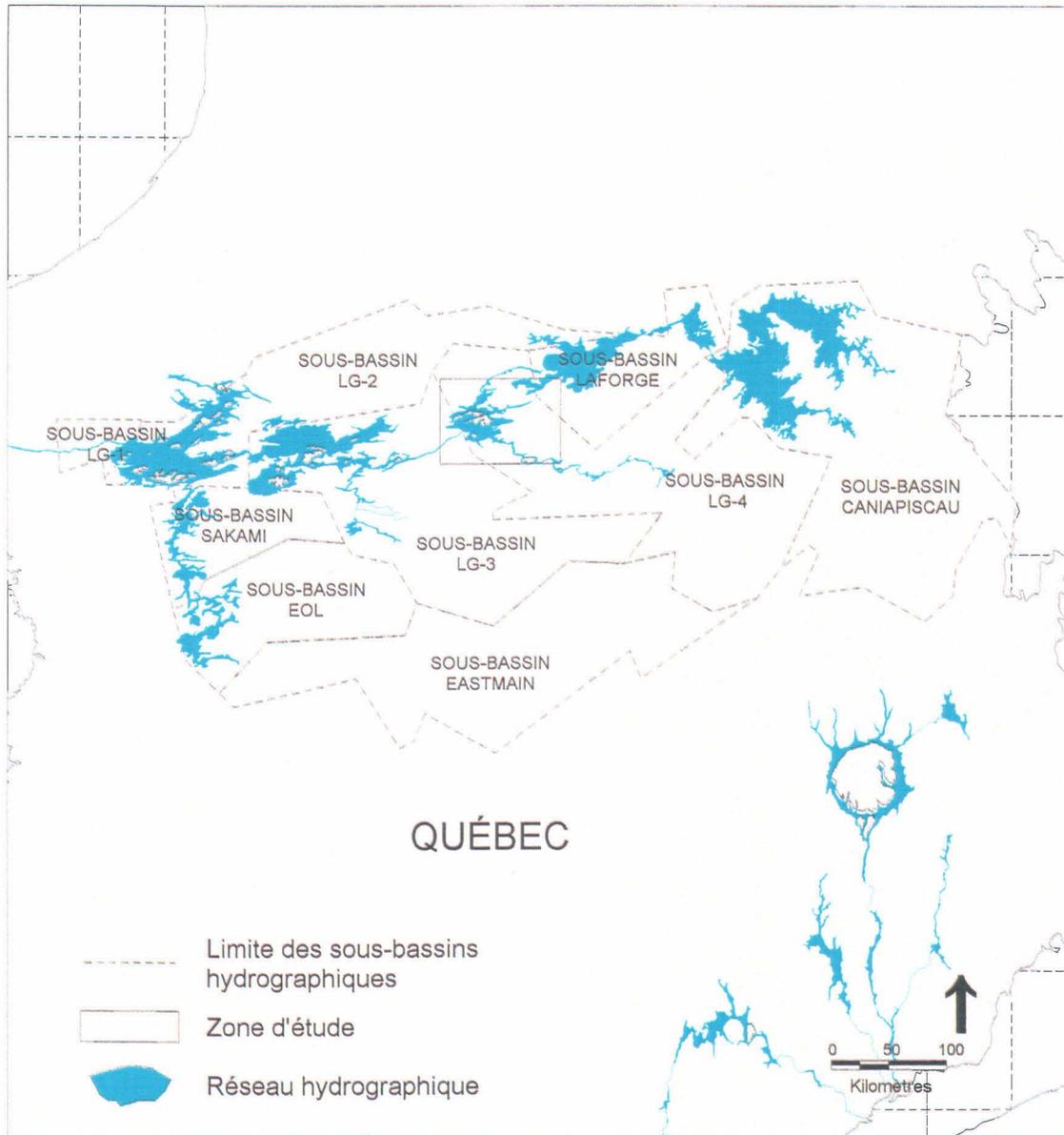
#### **3.3.1 Zone d'étude**

Le sous-bassin LG4 du complexe hydroélectrique La Grande a été choisi comme zone d'étude (Figure 1). Si l'on exclut les plans d'eau et les infrastructures humaines, nous pouvons regrouper l'occupation du sol de cette zone en quatre classes générales: les tourbières, les brûlis, les landes arbustives et la forêt ouverte. Ces classes sont représentatives de l'occupation du territoire sur tout le bassin de La Grande.

#### **3.1.2 Sites-tests**

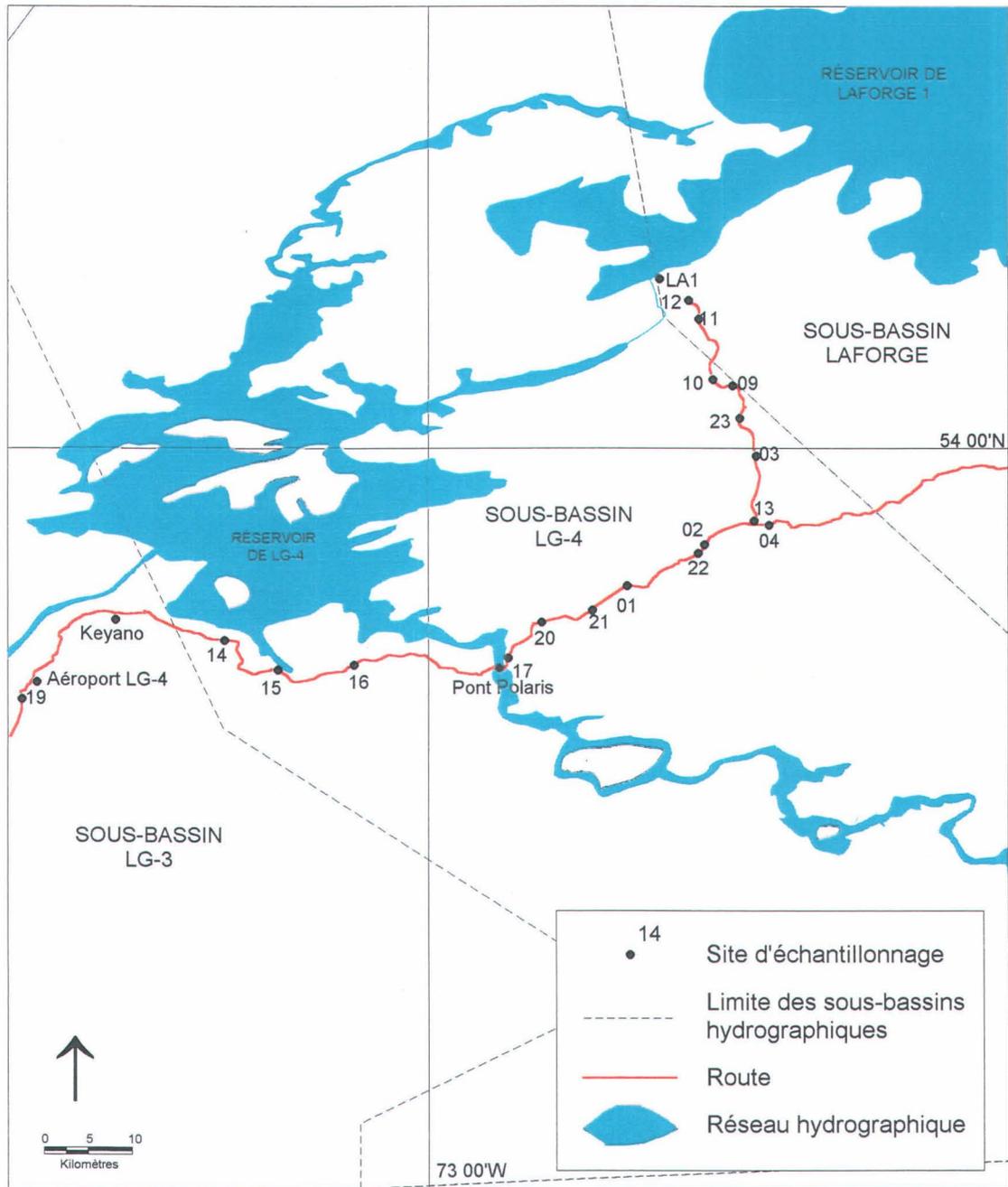
Les sites-tests sont les lieux de collecte de données terrain. Pour la phase RADARSAT du projet, 18 sites-tests sont utilisés (figure 2). Pour des raisons d'accessibilité, quatre sites situés à l'extrême est du territoire d'étude (#5, #6, #7, #8) ont été remplacés en 1996, par quatre sites situés entre l'aéroport de LG4 et le pont Polaris (#14, #15, #16, #19). Pour chaque site, des données sont prises de chaque côté de la route, d'où la spécification ultérieure de nord, sud, est et ouest. Le tableau 1 regroupe ces sites par type d'occupation du sol.

---



Source: Hydro-Québec

Figure 1: Carte de localisation du territoire d'étude



Source : Hydro-Québec

Figure 2: Carte de localisation des sites-tests

Occupation du sol dominante	Nombre de sites	Liste des sites
Forêt (épinette noire) Densité 25% à 40%	5	9W, 15N, 15S, 17N, 17S
Forêt ouverte Densité 10% à 25%	14	2N, 2S, 3W, 12N, 12E, 14N, 14S, 16N, 20N, 20S, 21N, 22N, 22S, 23W
Lande, Régénération	7	4N, 4S, 13E, 13W, 16S, 21S, 23E
Brûlis	7	1N, 1S, 3E, 11E, 11W, 19N, 19S
Tourbières	3	9E, 10E, 10W

Tableau 1: Sites-tests par type d'occupation du sol

### 3.1.3 Acquisition des images

Suite à l'entente de collaboration entre le Centre Canadien de Télédétection et l'INRS-Eau initiée en 1992, trois images du satellite européen ERS-1 ont été acquises pour le projet d'Hydro-Québec lors de la saison hivernale 1995-1996. De plus, 2 images du satellite canadien RADARSAT-1 de la même saison ont été gracieusement offertes par l'Agence Spatiale Canadienne, dans le cadre du programme ADRO. En fonction des dates prévues des campagnes de terrain et du début des opérations de RADARSAT (fin mars 1996), les images acquises sont les suivantes :

Date	Satellite	Mode	Angle d'incidence	Résolution	Surface couverte
11 déc 1995	ERS-1	Descendant	19 à 26°	30 m	100 X 100 km
19 fév 1996	ERS-1	Descendant	19 à 26°	30 m	100 X 100 km
25 mars 1996	ERS-1	Descendant	19 à 26°	30 m	100 X 100 km
29 mars 1996	RADARSAT	Ascendant	20 à 27° (S1)	30 m	100 X 100 km
22 avr 1996	RADARSAT	Ascendant	20 à 27° (S1)	30 m	100 X 100 km

Tableau 2 : Images acquises entre les 2 phases du projet

Pour la saison hivernale 1996-1997, le programme ADRO a fourni 12 images RADARSAT (tableau 3):

Dates et heures d'acquisition	Coordonnées centrales	Mode	Angle d'incidence [degrés]	Résolution (m)	Dimension du pixel (m)	Surface couverte (km)	Nombre de pixels et de lignes
7 oct. 1996	53 59 13 N 72 58 08 W	S1 Asc.	20 à 27	30	12,5	100 x 100	P 9157 L 8178
13 oct. 1996	54 02 59 N 72 47 17 W	S7 Asc.	45 à 49	30	12,5	100 x 100	P 8968 L 7982
31 oct. 1996	53 59 01 N 72 56 20 W	S1 Asc.	20 à 27	30	12,5	100 x 100	P 9163 L 8177
6 nov. 1996	54 01 02 N 72 45 40 W	S7 Asc.	49 à 49	30	12,5	100 x 100	P 8970 L 7981
24 nov. 1996	53 58 35 N 72 58 48 W	S1 Asc.	20 à 27	30	12,5	100 x 100	P 9153 L 8153
30 nov. 1996	53 59 26 N 72 48 24 W	S7 Asc.	45 à 49	30	12,5	100 x 100	P 8966 L 7982
4 fév. 1997	53 58 57 N 72 56 39 W	S1 Asc.	20 à 27	30	12,5	100 x 100	P 9169 L 8178
10 fév. 1997	54 00 25 N 72 46 16 W	S7 Asc.	45 à 49	30	12,5	100 x 100	P 8969 L 7982
27 mars 1997	54 02 16 N 72 50 26 W	S4 Asc.	34 à 40	30	12,5	100 x 100	P 9003 L 7876
30 mars 1997	54 03 06 N 72 46 22 W	S7 Asc.	45 à 49	30	12,5	100 x 100	P 12473 L 14013
23 avr. 1997	54 02 42 N 72 45 34 W	S7 Asc.	45 à 49	30	12,5	100 x 100	P 8970 L 7918
27 avr. 1997	54 04 49 N 72 09 45 W	W2 Asc.	31 à 39	30	12,5	150 x 150	P 12826 L 11149

Tableau 3: Sommaire des images acquises pour la phase RADARSAT du projet (hiver 1996/97)

Pour la seconde saison (1997-1998), des acquisitions d'images sont aussi prévues à l'automne, au début de février, fin mars et au printemps. Les dates et les modes seront choisis avec nos partenaires (VIASAT Inc. et l'Unité des Prévision et Ressources Hydriques) en septembre prochain. Au total, une vingtaine d'images RADARSAT seront analysées. Nous avons retenu deux modes d'acquisition pour les données RSO, le Mode standard et le Mode SCANSAR. Les principaux avantages du Mode Standard (100 km X 100 km) sont que ce type de données a déjà été étalonné (janvier 1997) par l'Agence Spatiale canadienne et que leur résolution (30 m) est similaire à celle d'ERS-1. Dans un contexte opérationnel, les données SCANSAR seraient toutefois les plus avantageuses puisqu'une seule image couvre une superficie de 500

km X 500 km, soit 80% du bassin de la rivière La Grande. De plus, nous croyons que la résolution spatiale de 100 m du mode SCANSAR "*large*" sera suffisante pour suivre l'évolution du couvert nival dans ce territoire relativement peu morcelé. Toutefois, étant donné la difficulté inhérente à la détermination des patrons d'antenne de ces données multi-faisceaux, au moment d'écrire ces lignes nous ne savons pas quand les données SCANSAR pourront être étalonnées. C'est pourquoi nous avons choisi de vérifier la pertinence du "*Mode Wide*" (déjà étalonné) dont la résolution spatiale est du même ordre que le mode standard (30 m) mais qui couvre 150 km.

### **3.1.4 Acquisition des données de contrôle**

Quatre campagnes de terrain sont prévues à chaque année (deux en hiver, une troisième à l'automne et l'autre au printemps). Ces campagnes permettent de recueillir les données de contrôle nécessaires à l'établissement et à la validation des algorithmes.

Bien que la phase RADARSAT du projet n'ait démarré qu'en février 1997, quelques mesures au sol ont pu être effectuées à l'hiver 1996 afin d'assurer la continuité de la recherche. Ces campagnes ont été tenues conjointement à d'autres mesures d'Hydro-Québec dans la région de LG4 et avec la collaboration du personnel d'Hydro-Québec. Les relevés des stations météorologiques installées en décembre 1995 et quelques profils effectués en février 1996 ont permis d'obtenir une vue d'ensemble des conditions prévalant au moment de l'acquisition des images du 11 décembre 1995 et du 19 février 1996. Aucune campagne de terrain n'a eu lieu en mars 1996 mais les données recueillies lors de la campagne d'avril 1996, jumelées aux relevés des stations météorologiques ont permis de simuler une vue d'ensemble des conditions prévalant au moment de l'acquisition de l'image du 25 mars 1996. La campagne de l'automne 1996 avait pour objectif principal de vérifier l'état des sondes. Des mesures de la rugosité des sols, de leur constante diélectrique et de leur couvert végétal ont aussi été réalisées. Dès le début effectif du projet RADARSAT (février 1997), les campagnes hivernales de mesures complètes ont repris. Le tableau 4 résume ces campagnes. Les profils et les lignes de neige comprennent les mesures décrites au tableau 5.

---

Dates des campagnes de terrain	Neige	Mesures effectuées
11 au 15 décembre 1995	Peu ou pas	Installation des stations climatologiques
20 au 23 février 1996	Sèche	3 Profils de neige, 5 lignes de neige
Aucune campagne en mars 1996		
16 au 19 avril 1996	Humide	6 profils, 15 lignes de neige
29 octobre au 1 <sup>er</sup> novembre 1996	Peu ou pas	Relevés des sondes, rugosité, Cte diélectrique
10 au 13 février 1997	Sèche	6 profils, 36 lignes de neige
24 au 27 mars 1997	Sèche	6 profils, 36 lignes de neige
21 au 24 avril 1997	Humide	12 profils, 23 lignes de neige

**Tableau 4: Sommaire des campagnes de mesures sur le terrain**

	Lignes de neige	Profils
<b>Nombre</b>	36 (2 lignes par sites) 10 carottes par lignes	6 Sites #1S,2S,11E,13E,17N et #19N
<b>Type de mesures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épaisseur de la neige</li> <li>• Densité de la neige</li> <li>• Équivalent en eau de la neige</li> <li>• Résistance thermique de la neige</li> <li>• Température du sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épaisseur des couches de neige</li> <li>• Densité des couches</li> <li>• Type et dimension des grains</li> <li>• Résistance thermique de la neige</li> <li>• Teneur en eau liquide de la neige</li> <li>• Profil vertical de la température</li> </ul>

**Tableau 5: Mesures effectuées lors des campagnes de terrain d'hiver.**

Plusieurs sondes sont installées en permanence sur nos sites (tableau 6) et relevées à chaque campagne de terrain. Les sondes thermiques sont de simples thermistances enfouies à environ 3 cm dans le sol. La température est relevée lors des visites sur le terrain. Les sondes TDR sont constituées de deux tiges parallèles, en cuivre, de 44 cm et servent à estimer la constante diélectrique du sol. Elles sont enfouies à 3 cm dans le sol et reliées à un câble coaxial. L'estimation est obtenue par un appareil du type « *Time Domain Reflectometer* » qui permet de mesurer la perméabilité électrique du sol entre les deux tiges, à un moment donné. Les stations climatologiques installées par Hydro-Québec et qui enregistrent la température du sol et de la neige et l'épaisseur du couvert nival en continu, sont décrites à l'annexe 1. Finalement, nous

utilisons toutes les lignes de neige régulières effectuées par Hydro-Québec sur le sous-bassin de LG4.

Sites	Sondes Thermiques	Sondes TDR	Station climatologique
	Température du sol	Constante diélectrique du sol	Température et hauteur de la neige
1S	X		
2S	X	X	X
3W	X		
4N	X		
11E		X	X
10E	X		
13E	X		
17N	X		
19E	X	X	X

Tableau 6: Distribution des sondes sur le territoire d'étude.

### 3.2 Traitement des images

Ces traitements préliminaires visent à préparer les données de télédétection en vue de leur utilisation par les algorithmes d'estimation des paramètres du couvert nival. Les tâches à réaliser pour traiter les images RADARSAT et ERS-1, sont résumées au tableau 7.

L'étalonnage radiométrique est essentiel lorsque l'on veut tirer des images une information quantitative comme l'équivalent en eau de la neige et comparer des données prises à différentes dates (Raney *et al*, 1994). Les images RADARSAT acquises en mode *Standard* et *Wide* sont étalonnées lors de leur production par RSI inc. La procédure d'étalonnage a été développée par le personnel de l'Agence spatiale canadienne et du Centre canadien de télédétection. Toutefois, les images reçues ont été rehaussées pour des besoins esthétiques à l'aide d'une table de rehaussement ("*look-up table*"). Comme nous voulons retrouver les valeurs des coefficients de rétrodiffusion (valeurs étalonnées), nous devons inverser la procédure de rehaussement pour transformer les puissances en "brillance" et finalement en "Coefficient de rétrodiffusion".

Type	Objectif	Action
Étalonnage radiométrique	Comparaison des valeurs à l'intérieur d'une image et entre les différentes images	Correction du patron d'antenne et transformation des puissances en coefficients de rétrodiffusion
Correction géométrique	Superposition des images et intégration ultérieure dans les modèles hydrologiques	Géoréférenciation des images dans le plan cartographique UTM, correction des effets du relief
Localisation des sites-tests	Comparaison des mesures de terrain et des valeurs des images	Délimitation sur les images des sites où les mesures de terrain ont été effectuées
Extraction des coefficients de rétrodiffusion	Comparaison des mesures de terrain et des valeurs estimées au moyen des images	Calcul de la moyenne des rétrodiffusions sur chaque site
Calcul des rapports de rétrodiffusion	Éliminer les effets dues à l'occupation du sol, à la rugosité et à la pente	Soustraction des moyennes de rétrodiffusion calculées à l'hiver et à l'automne
Application de l'algorithme	Cartographie de l'équivalent en eau	Estimation des équivalents en eau

Tableau 7: Traitements numériques effectués sur les images

Ces étapes sont représentées par les deux équations suivantes:

$$\beta_{ij} = 10 * \log_{10} ((DN * DN + A_0) / A_j) \quad (1)$$

où  $\beta_{ij}$  = Brillance (*Beta nought*) du pixel  $i,j$

DN = Puissance reçue pour le pixel  $i,j$

$A_0$  and  $A_j$  = Table de rehaussement (gain offset and scaling table) du pixel  $i,j$

$$\sigma_{ij} = \beta_{ij} + 10 * \log_{10}(\sin(I_j)) \quad (2)$$

où  $\sigma_{ij}$  = Coefficient de rétrodiffusion (*Sigma nought*) du pixel  $i,j$

$\beta_{ij}$  = Brillance (*Beta nought*) du pixel  $i,j$

$I_j$  = Angle d'incidence du pixel  $j$

La correction géométrique des images de RADARSAT permet d'obtenir des images superposables et ayant la même projection (UTM, Lambert ou autres) qu'une carte. Cette

correction est effectuée par la firme VIASAT Géo-Technologies Inc. qui a développé un logiciel de correction géométrique des images radar dans le cadre du projet PREDIR (Collectif, 1996). Chaque image RADARSAT est géocodée à l'aide de points d'appui relevés sur les cartes, d'un MNA et des paramètres de positionnement du satellite. Cette approche permet la superposition précise des images RSO prises à différentes dates et la correction des effets du relief sur la géométrie de l'image (Collectif, 1996). Les images LANDSAT-TM sont aussi géoréférencées par le même logiciel que les images RADARSAT. Une fois géoréférencées, les images LANDSAT sont ensuite classifiées afin de produire une carte d'occupation du sol pour le sous-bassin LG4. Celle-ci facilite la localisation des sites-tests et permet de développer des algorithmes spécifiques à certaines classes d'occupation du sol.

Pour les besoins du projet, VIASAT Géo-Technologies Inc réalise le modèle numérique d'altitude (MNA) pour l'ensemble du sous-bassin de LG4 à partir de 7 fichiers des éléments topographiques de la BNDT (Base nationale de données topographiques) à l'échelle du 1 :250 000 de Géomatique Canada. Ces fichiers sont : 23C, 23D, 23E, 23F, 23L, 33h, et 33I. Ces modèles serviront à la correction géométrique des images et à la détermination des contours des sous-bassins.

### **3.3 Traitements des données auxiliaires**

Toutes les données recueillies au sol (tableaux 5 et 6), lors de chaque campagne de terrain, sont réduites, informatisées et analysées. La résistance thermique du couvert de neige est calculée pour chaque profil en faisant la somme des résistances thermiques de chaque couche homogène ( $R_i$ ) du couvert nival. La résistance thermique de chaque couche ( $^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$ ) est calculée selon :

$$R_i = h_i / k_i \quad (3)$$

où  $h_i$  est l'épaisseur de chaque couche de neige en mètres et  $k_i$  est la conductivité thermique ( $\text{J}/^{\circ}\text{Cms}$ ) correspondante et calculée selon l'équation suivante :

---

$$k_i = A\rho_i^2 + B\rho_i + C \quad (4)$$

où  $A=2.83056*10^{-6}$ ,  $B=-9.09947*10^{-5}$  et  $C=0.0319739$ . La densité,  $\rho_i$ , est exprimée en  $\text{kg/m}^3$ . Ce polynôme a été déterminé à partir des données de conductivité thermique du couvert nival publiées par U.S. Army Corps of Engineer (1956).

Par la suite, la résistance thermique du couvert de neige est extrapolée aux 36 sites en tenant compte de la hauteur et de la densité moyenne de la neige à chacun des sites.

### **3.4 Cartographie des paramètres du couvert nival - sous bassin de LG4**

#### **3.4.1 Cartographie de l'équivalent en eau**

Afin de déterminer l'équivalent en eau, nous adaptons l'approche développée avec les données ERS-1 (Bernier *et al*, soumis; Fortin *et al*, 1996). Cette approche compte trois étapes:

- 1) Localisation des sites expérimentaux sur les images radar géoréférencées et extraction des coefficients de rétrodiffusion pour chaque site afin de comparer les mesures de terrain et les valeurs estimées au moyen des images.
- 2) Calcul des rapports de rétrodiffusion ( $\sigma^\circ$ hiver -  $\sigma^\circ$ référence), sélection de la ou des meilleures dates pour l'image de référence (d'automne), et établissement des paramètres de la meilleure relation entre les rapports de rétrodiffusion et la résistance thermique des couverts de neige pour les images RADARSAT:

$$R_{\text{est}} = m * \text{Rap}(\sigma^\circ) + b \quad (5)$$

où  $R_{\text{est}}$  est la résistance thermique estimée à partir de l'image radar ;

- m est la pente de la régression;
- Rap( $\sigma^0$ ) est le rapport de rétrodiffusion ;
- b est l'ordonnée à l'origine de la régression

Par ailleurs, l'équivalent en eau de la neige ( $E_{est}$ ) peut être estimé à partir de la résistance thermique du couvert nival ( $R_{est}$ ) par la relation suivante :

$$E_{est} = a(\rho) * R_{est} \quad (6)$$

où  $a$  est la pente de la relation linéaire entre l'équivalent en eau et la résistance thermique. Cette relation est fonction de la densité  $\rho$  du couvert nival.

- 3) Application de l'algorithme (équations 5 et 6) et comparaison des équivalents en eau estimés avec les équivalents en eau mesurés. Cette étape inclue aussi l'évaluation des effets de la variation de l'angle d'incidence ( $23^0$  pour le mode S1 par rapport à  $47^0$  pour le mode S7) sur la précision des estimés.

### **3.4.2 Cartographie de la neige humide**

En 1993, Rott et Nagler ont publié une approche pour cartographier la neige humide en haute montagne, basée aussi sur une différence de signal entre deux images : l'image à analyser et une image K de neige sèche. Si la différence est supérieure à un seuil donné, alors il y a présence de neige humide. Cet algorithme a ensuite été modifié avec succès par l'équipe de l'INRS-Eau pour tenir compte de l'environnement agricole du sud du Québec (Bagdhadi *et al*, 1997).

Pour les images printanières (avril et mai), nous reprenons aussi les traitements des images (étalonnage, correction géométrique), le calcul des différences des coefficients de rétrodiffusion et l'application d'un algorithme. Toutefois, dans ce cas, l'image de référence va être une image de neige sèche (Rott et Nagler, 1993) et l'algorithme est présenté aux équations 7 et 8. Le résultat final sera la proportion de pixels de neige humide pour une unité hydrologique donnée (maille ou

---

bassin-versant). En utilisant les critères de Baghadi *et al* (1997), un pixel est considéré comme contenant de la neige humide si :

$$|\sigma_h^\circ - \sigma_r^\circ| \geq 3 \text{ dB avec } \sigma_h^\circ < \sigma_r^\circ \quad (7)$$

$$-18\text{dB} \leq \sigma_h^\circ \leq -11\text{dB} \quad (8)$$

où  $\sigma_h$  est le coefficient de rétrodiffusion d'un pixel de l'image à traiter,  
 $\sigma_r$  est le coefficient de rétrodiffusion de l'image de référence.

### 3.5 Développement d'un prototype

Finalement, un prototype informatique pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol via des images satellitaires radar est développé par VIASAT Géo-Technologies Inc et l'INRS-Eau sous la supervision de l'Unité Prévisions et Ressources Hydriques d'Hydro-Québec. Ce prototype vise à intégrer les algorithmes développés par l'INRS-Eau pour le suivi du couvert nival aux procédures opérationnelles du Service des Prévisions et Ressources hydriques d'Hydro-Québec. Ainsi, une interface *MapInfo<sup>TM</sup>* est développée par VIASAT Géo-Technologies Inc en étroite collaboration avec l'INRS-Eau pour s'assurer de la compatibilité des routines et procédures. Réciproquement, les modules contenant les algorithmes sont développés par l'INRS-Eau en étroite collaboration avec VIASAT Géo-Technologies Inc.

Une première version du prototype permettant d'évaluer l'équivalent en eau de la neige (version alpha) sera livrée en décembre 1997 et une seconde version, plus élaborée et dite fonctionnelle, en décembre 1998. Cette façon de procéder permettra, d'une part, de faire la mise à jour des modules *Algorithme* et *Intégration* qui constituent le coeur de la recherche au fur et à mesure que les travaux avanceront, et d'autre part, de fournir au Service des Prévisions un outil opérationnel évolutif d'estimation de la quantité de neige au sol.

Dans ce contexte, l'analyse fonctionnelle du prototype a été réalisée conjointement dans la première étape du projet par l'INRS-Eau et VIASAT Géo-Technologies Inc. La contribution de l'INRS-Eau est résumée au chapitre 5.

---

## **4. RÉSULTATS**

---

### **4.1 Construction du modèle numérique d'altitude**

Le modèle numérique d'altitude du sous bassin de LG4 a été complété. La production du MNA sur les cartes 23C, 23D, 23E, 23F et 23L vient compléter celui des cartes 33H et 33I. La cohérence des élévations de la matrice résultante a été vérifiée et le MNA est livré en format « RAW » 16 bits.

### **4.2 Aperçu des conditions environnementales**

Ce chapitre présente un sommaire des conditions environnementales prévalant lors de l'acquisition de chaque image satellite. Les données des sondes météorologiques permettent d'obtenir une vue d'ensemble des hivers 1996 et 1997, une vue plus détaillée de la semaine précédant le passage du satellite et une vue ponctuelle des conditions à l'heure de l'acquisition de l'image. Les données du 15 décembre 1995 au 15 avril 1996 et du 15 septembre 1996 au 24 avril 1997 ont été analysées. Elles sont d'une importance majeure pour l'interprétation des images.

La figure 3 montre que globalement, les hivers 1996 et 1997 se ressemblent, si ce n'est le minimum de la température de l'air qui est atteint plus tôt en 1996 et la couche de neige qui est un peu plus faible en 1997.

Les figures 4 et 5 montrent quant à elles, les variations de la température à la surface du sol, de la température de l'air et de la hauteur de neige dans la semaine précédant le passage du satellite. Ces données sont des moyennes journalières et permettent de mieux voir la tendance affectant les conditions environnementales.

---

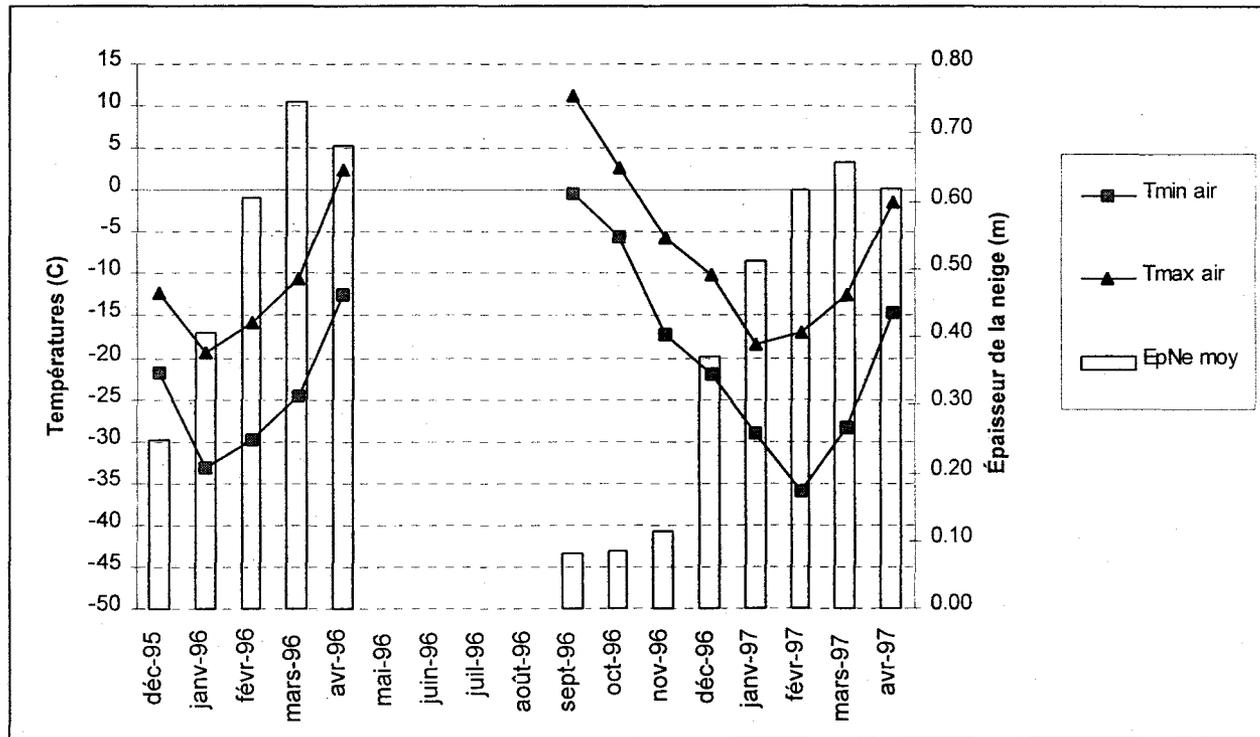


Figure 3: Bilan climatologique de décembre 1995 à avril 1997, LG4. Les données moyennes mensuelles proviennent de la station du site #2, sauf pour les mois de novembre et décembre 1996 où les données de la station #11 ont dû être utilisées.

Figure 4: Tendances des conditions précédant l'acquisition des images (hiver 96 et automne 96)

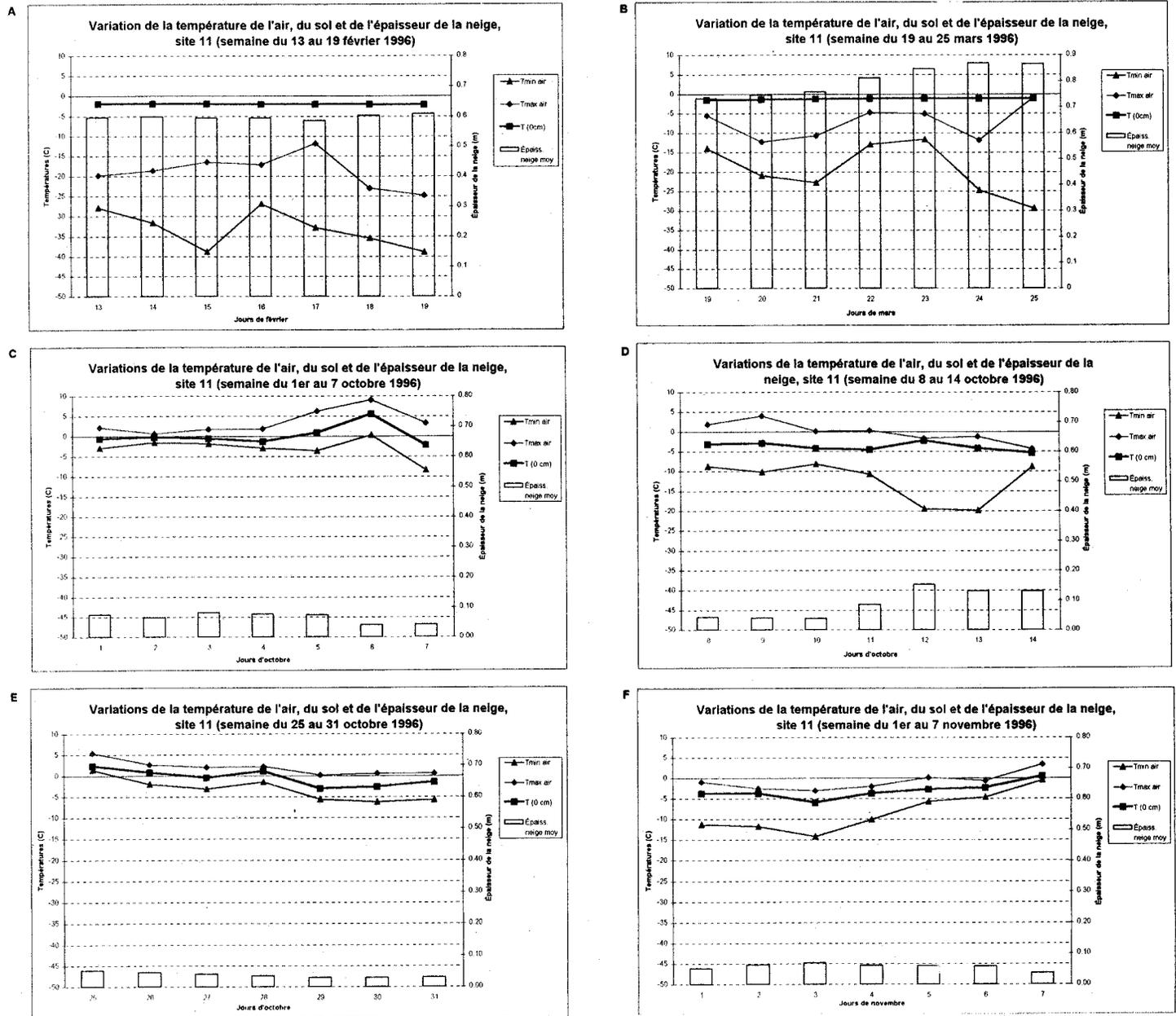
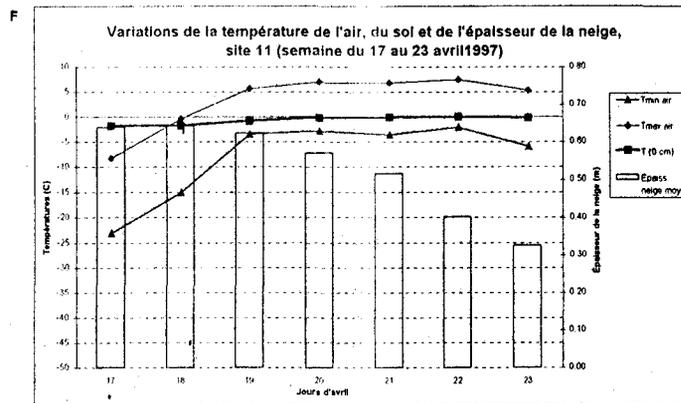
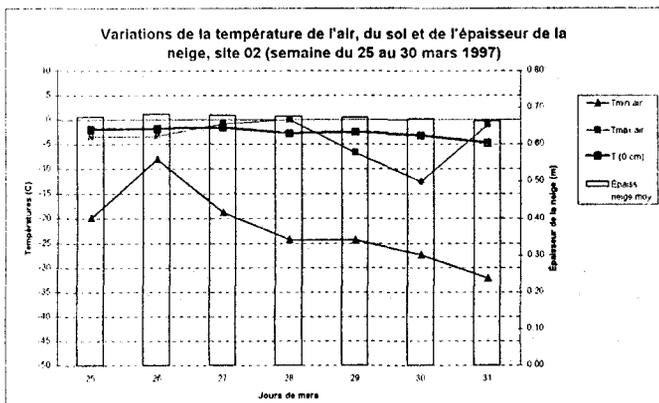
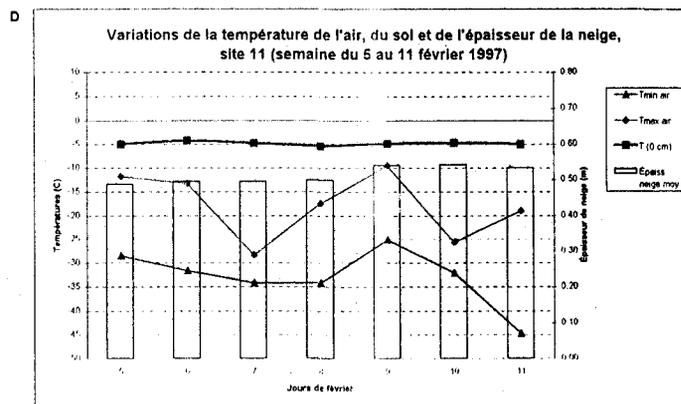
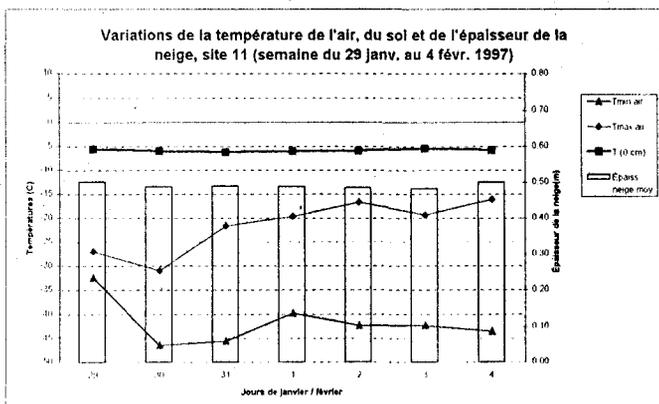
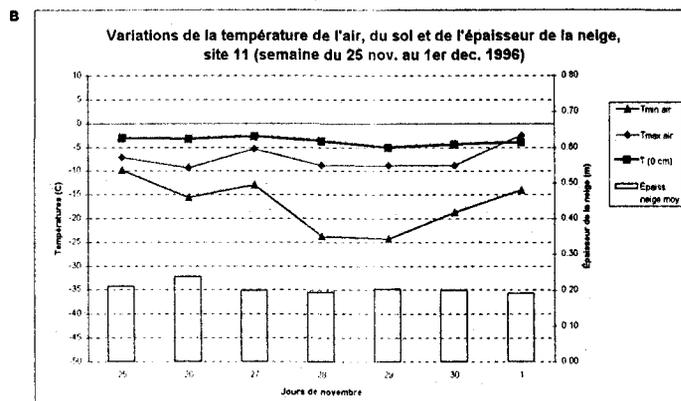
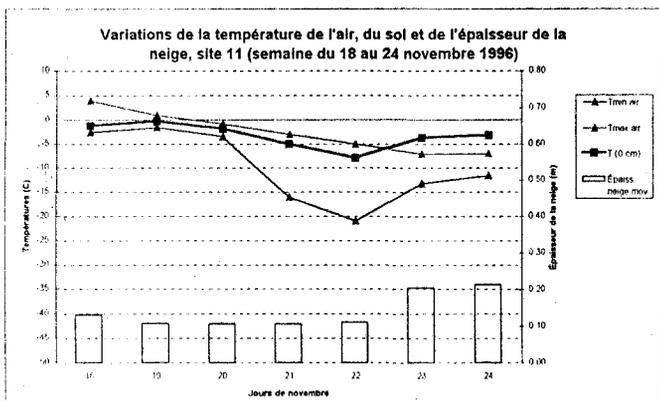


Figure 5: Tendances des conditions précédant l'acquisition des images (automne 96 et hiver 97)



Les conditions prévalant en février 1996 (figure 4A) sont assez sévères, avec des températures moyennes de l'air constamment sous les  $-20^{\circ}\text{C}$ . Le sol est gelé mais le couvert de neige de 60 cm maintient sa température entre  $-2$  et  $-3^{\circ}\text{C}$ . En mars (figure 4B), le couvert de neige atteint 85 cm et la température du sol approche zéro.

Pour les périodes couvrant les trois images d'octobre 1996 et la première de novembre (figures 4C à 4F), les températures du sol et de l'air fluctuent beaucoup autour du point de congélation, avec les maximums de l'air plus chauds que le sol. Une mince couche de neige est parfois présente. Pour les périodes couvrant les deux images de la fin novembre (figures 5A et 5B), on remarque une plus grande différence entre les températures minimales et maximales de l'air, une température du sol qui reste sous le point de congélation et un sol moins froid que l'air puisque l'épaisseur du couvert de neige est plus élevée (10 à 20 cm).

En février 1997 (figures 5C et 5D), la température du sol est très stable près de  $-5^{\circ}\text{C}$ , malgré des fluctuations importantes de la température de l'air sous le point de congélation et allant jusqu'à  $-45^{\circ}\text{C}$ . Cela s'explique par un couvert de neige isolant (densité moyenne de  $190\text{ kg/m}^3$ ) de 50 cm d'épaisseur. En mars (figure 5E), on note un couvert de neige de 65 cm d'épaisseur, une température de l'air moins sévère et la température du sol qui se rapproche de  $0^{\circ}\text{C}$ . Notons qu'un problème de prise de données pour le 27 mars par la station climatologique du site #11 fait en sorte que l'analyse climatique de ces images a été faite à partir du site #02. Finalement, en avril (figure 5F), une poussée d'air chaud entraîne le début de la fonte et une stabilisation de la température du sol à  $0^{\circ}\text{C}$ .

Pour avoir une idée des conditions exactes au moment de l'acquisition de chaque image RSO, nous disposons des mesures des sondes aux sites #19, #11 et #2 à chaque heure. À titre d'exemple, le tableau 8 donne la lecture d'une sonde à l'heure la plus près du passage du satellite. Cette lecture est essentielle dans le cas des images prises en période de fonte, où il faut déterminer si la neige est humide ou non lors de l'acquisition de l'image.

DATE	HEURE	T°C à -5cm	T°C à 0cm	T°C à 5cm	T°C à 12cm	T°C à 27cm	T°C à 57cm	T°C à 87cm	T°C de l'air	Ép. neige (cm)
11 déc. 1996	Journée	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
19 février 1996	*11h00	-1,5	-2,1	-3,3	-3,8	-6,0	-20,6	-30,5	-30,3	60,7
25 mars 1996	11h00	-0,9	-1,1	-1,4	-1,7	-2,7	-6,3	-10,6	-10,9	85,6
25 mars 1996	18h00	-0,9	-1,0	-1,3	-1,7	-2,7	-6,0	-8,4	-8,0	88,9
29 mars 1996	18h00	-0,9	-1,0	-1,4	-1,8	-3,2	-8,2	-20,3	-12,5	86,1
22 avril 1996	Journée	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1,5	67,0
7 octobre 1996	18h00	-0,3	-5,4	-5,8	-6,0	-5,7	-5,6	-5,5	-4,8	3,5
13 oct. 1996	18h00	-1,2	-3,2	-3,8	-3,3	-1,7	-3,1	-3,2	-3,3	12,4
31 oct. 1996	18h00	-0,3	-2,9	-4,4	-4,7	-4,5	-3,4	-4,6	-4,5	5,1
6 nov. 1996	18h00	-0,8	-1,8	-2,5	-2,7	-1,8	-0,3	-2,5	-2,3	5,4
24 nov. 1996	18h00	-1,3	-2,7	-3,9	-6,9	-7,6	-5,2	-7,6	-7,4	17,6
30 nov. 1996	18h00	-1,8	-3,8	-6,0	-11,6	-15,6	-14,0	-15,3	-14,7	20,9
4 février 1997	18h00	-3,7	-5,5	-7,9	-11,2	-16,9	-21,7	-21,6	-20,5	49,1
10 février 1997	18h00	-3,5	-4,7	-6,6	-9,3	-15,9	-31,7	-31,6	-31,1	54,0
27 mars 1997	*18h00	-3,3	-1,6	-2,7	-3,0	-4,1	-4,8	-7,9	-4,8	68,5
30 mars 1997	18h00	-2,3	-3,2	-3,7	-4,6	-7,4	-21,7	-18,9	-16,5	60,9
23 avril 1997	**18H00	0,2	0,5	0,1	0,1	1,7	3,6	N.D.	5,6	32,8
27 avril 1997	18h00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

\* Les données proviennent du site #02 dû à un problème relié à l'enregistrement des données de la sonde climatologique du site 11

\*\* Les données proviennent du site #19 car les dernières données du site 11 correspondent au 23 avril 15h00

**Tableau 8: Conditions au site #11 au moment du passage du satellite**

La caractérisation du couvert de neige effectuée lors des campagnes de terrain permet aussi d'obtenir un portrait plus complet des conditions environnementales lors du passage du satellite. Le tableau 9 donne d'abord un sommaire des mesures moyennes, telles qu'obtenues à partir des lignes de neige et des profils verticaux. Les températures du sol sont calculées à partir des huit sondes thermiques installées à trois centimètres dans le sol.

	20 au 23 février 1996		16 au 19 avril 1996		10 au 13 février 1997		24 au 27 mars 1997		21 au 24 avril 1997	
	Moy.	Ecart type	Moy.	Ecart type	Moy.	Ecart type	Moy.	Ecart type	Moy.	Ecart type
Épaisseur (cm)	70,8	9,6	72,1	10,5	68,7	5,8	80,0	9,2	59,5	12,1
Équiv. en eau (cm)	15,8	2,4	20,2	2,6	13,1	1,6	17,9	2,7	15,9	4,1
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	224		280		190		224		267	
Résistance thermique (Cm <sup>2</sup> s/J)	3,8	1,2	non calculé		4,9	1,0	4,2	0,8	non calculé	
Température du sol (C)	-2,7	2,2	0,0	0,0	-3,0	1,9	-2,9	2,0	0,0	0,0

Tableau 9: Résultats moyens des mesures des campagnes de terrain d'hiver 1996 et 1997.

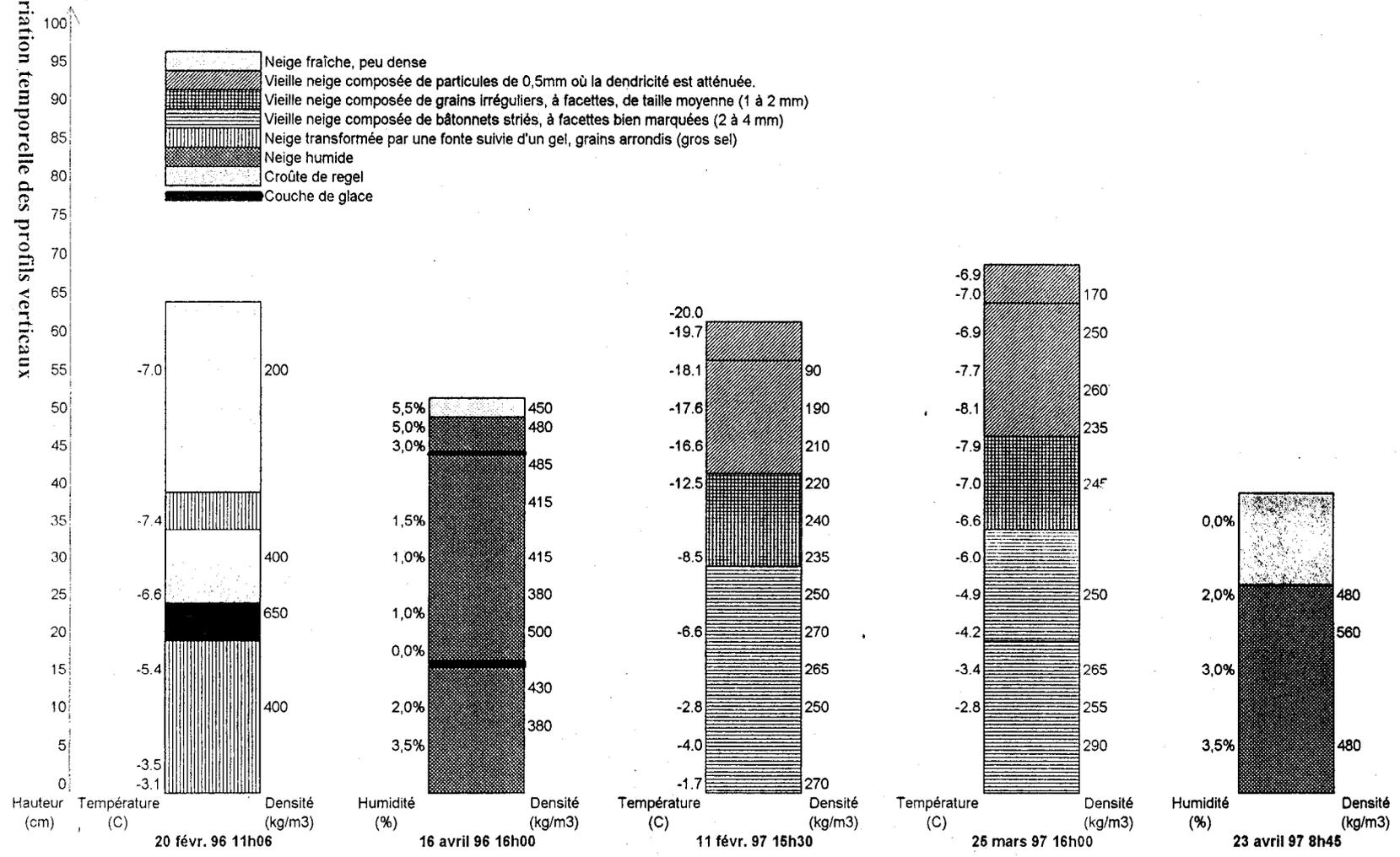
On remarque que c'est en avril 1996 que l'équivalent en eau et la densité sont les plus élevés.

Pour aller au-delà de ces considérations générales, l'étude des profils verticaux s'avère indispensable. Dans un premier temps, la variation temporelle d'un même profil peut être visualisée. La figure 6 montre le profil du site #2S lors de cinq campagnes de terrain. On peut y observer les couches de neige de densité et de composition différente et la présence de couches de glace, particulièrement en février 1996. Ces données permettent une meilleure comparaison des conditions et bien sûr, le calcul de la résistance thermique.

Dans un deuxième temps, il est utile de comparer les profils relevés lors d'une même campagne mais sur des sites d'occupation du sol différente. À titre d'exemple, la figure 7 montre la situation prévalant lors de la campagne de février 1997, sur des sites de brûlis, de forêt ouverte, de landes et de forêt dense. De façon générale dans les sites forestiers, l'épaisseur totale du couvert nival est plus importante et la neige moins dense au sommet du profil (premiers 20 cm). La résistance thermique y sera donc plus élevée. Les données des profils vont d'ailleurs permettre d'établir des relations plus précises entre les sites dégagés et les sites forestiers. Cette information peut s'avérer intéressante pour une meilleure cartographie de l'équivalent en eau dans les zones boisées.

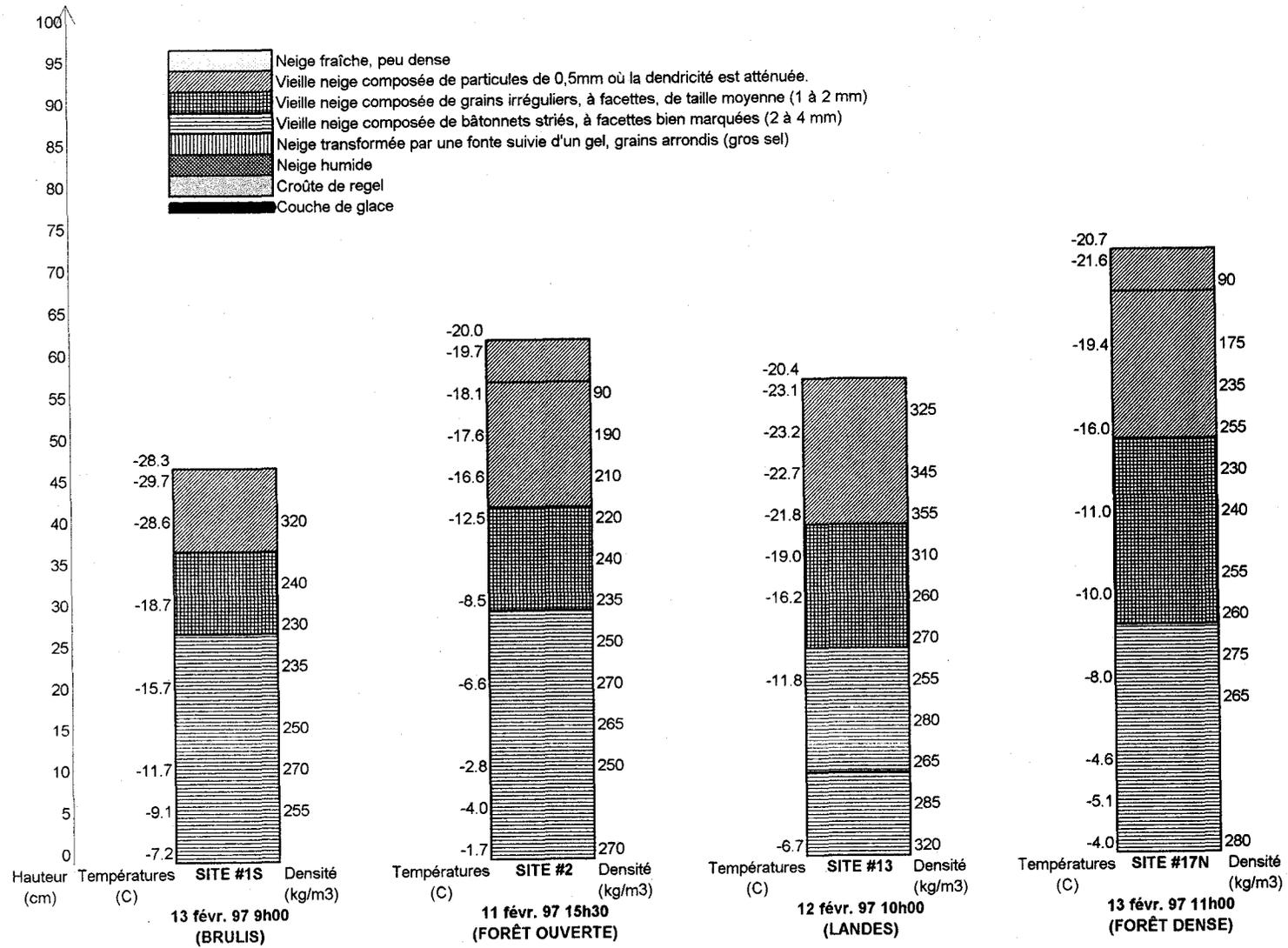
Figure 6: Variation temporelle des profils verticaux

**PROFILS SITE #2S (1996-1997)**  
ZONE DE FORÊT OUVERTE



PROFILS FÉVRIER 1997

Figure 7: Variation des profils verticaux selon le type d'occupation du sol



### **4.3 Analyse des données de l'hiver 1995/1996**

Suite à la phase « ERS-1 » du projet (1994-1995) et en préparation à la phase RADARSAT (1997-1998), des données de terrain et des images radar ont été acquises sur le site d'étude de LG4 lors de la saison hivernale 1995-1996. L'acquisition de ces données visait deux objectifs, la validation de l'algorithme et la comparaison des données des satellites ERS et RADARSAT.

#### **4.3.1 Validation de l'algorithme de la phase ERS-1 à partir des données de 1996**

Les images et données terrain acquises pour ce volet ont été décrites au chapitre 3. Fait à noter, les données ERS-1 acquises dans le cadre de ce projet de recherche peuvent être regroupées en 2 catégories :

- 1) Images acquises en mode ascendant
- 2) Images acquises en mode descendant

La grande différence entre ces deux groupes est la direction de visée. Dans le mode ascendant, le satellite se dirige vers le nord et vise vers l'est. Dans l'autre mode, il se dirige vers le sud et vise donc vers l'ouest. Une même cible illuminée de deux directions différentes n'aura pas exactement la même apparence, surtout si la rugosité de sa surface possède un patron privilégié (labours, par exemple) (Gauthier et al, soumis). L'orientation de la pente du terrain peut également modifier le signal.

Lors de la phase ERS-1 (Fortin et al, 1996), toutes les images traitées et analysées avaient été acquises en mode ascendant. En effet, les deux seules images acquises en mode descendant (25 octobre 1993 et 10 février 1995) durant cette phase, n'avaient pas été utilisées dans le développement de l'algorithme. Par contre, les images ERS-1 disponibles pour l'hiver 1996 ont toutes été acquises en mode descendant. Il serait alors possible que l'algorithme développé lors de la phase ERS-1 ne puisse s'appliquer directement sur ces données. Toutefois, puisque l'algorithme utilise les rapports de rétrodiffusion, l'effet de la direction de visée devrait être éliminé ou réduit considérablement, si l'image de référence est acquise dans le même mode que l'image d'hiver. Les couples d'images utilisées pour calculer les rapports de rétrodiffusion sont

---

présentés au tableau 10. L'inconvénient avec cette approche est l'utilisation de trois images de référence (d'automne). Le signal des images d'automne étant susceptible de varier beaucoup dans le temps comme dans l'espace (variation de la teneur en eau des sols), l'utilisation de trois images de référence pourrait entraîner des variations des résultats qui ne proviendraient pas des changements du couverts de neige mais plutôt des changements des conditions du sol à l'automne.

Image d'hiver	Image d'automne	Mode
19 février 1996	11 décembre 1995	DES
25 mars 1996	11 décembre 1995	DES
10 février 1995	25 octobre 1993	DES
3 février 1995*	26 septembre 1994	ASC
12 mars 1995*	26 septembre 1994	ASC
12 février 1994*	26 septembre 1994	ASC
26 mars 1994*	26 septembre 1994	ASC

\* images d'hiver de la phase ERS-1

**Tableau 10: Couples d'images utilisés lors de la phase ERS-1 et en 1996**

Les traitements numériques effectués sur les images de 1995/1996 sont les mêmes que lors de la phase ERS-1 du projet et sont énumérés au tableau 7. Le premier couple de données utilisé pour valider les résultats de la phase ERS-1, est celui de l'image du 10 février 1995, jumelé à l'image de référence du 25 octobre 1993. Dans le rapport final de la phase ERS-1 (Fortin et al, 1996), nous suggérons d'utiliser les deux relations provisoires qui suivent (équations 9 et 10) pour estimer la résistance thermique du couvert nival à partir du rapport de rétrodiffusion :

Pour les landes et les forêts ouvertes :

$$R_{\text{est}} = 1.14 * \text{Rap}(\sigma^{\circ}) + 3 \quad (9)$$

Pour les forêts, les tourbières et les brûlis :

$$R_{\text{est}} = 1.14 * \text{Rap}(\sigma^{\circ}) + 4 \quad (10)$$

L'emploi de deux relations en fonction de l'occupation du sol, découlait des différences observées entre les deux variables selon l'occupation du sol. Elle se justifiait par le fait que nous trouvions des valeurs de résistance thermique plus élevées dans la forêt (d'où une ordonnée à l'origine de 4 au lieu de 3) et que les brûlis et les forêts avaient des valeurs de rétrodiffusion très élevées à l'automne par rapport aux autres occupations du sol. Toutefois, la distribution des valeurs de chaque côté des deux droites de régression (erreur type) étant de l'ordre de  $1\text{ }^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$  et dans l'état actuel des connaissances théoriques sur le radar, l'emploi de 2 relations ne se justifiant pas, nous préférons n'adopter qu'une seule relation pour l'ensemble des occupations du sol, soit :

$$R_{\text{est}} = 1.14 * \text{Rap}(\sigma^{\circ}) + 3.5 \quad (11)$$

L'équation 11, servant à estimer la résistance thermique de la neige, a donc été appliquée pour les données du 10 février 1995 et pour l'ensemble des quatre images hivernales traitées durant la phase ERS-1.

La seconde équation de l'algorithme, servant à déterminer l'équivalent en eau, est fonction de la densité moyenne du couvert nival à une date donnée (équation 6). Afin de tenir compte de la variation effective de la densité du couvert en fonction de l'occupation du sol (figure 7), le paramètre « *a* » a été calculé avec une densité moyenne spécifique à chaque type d'occupation du sol.

La figure 8 illustre les résultats en comparant les équivalents en eau estimés aux équivalents en eau mesurés pour chaque date et le tableau 11 donne l'erreur moyenne des estimés en incluant ou non, les valeurs estimés pour les brûlis. Notez que les points de la figure 8 ne comprennent pas les sites de brûlis. En effet, les brûlis présentent une variation temporelle de leur signal très différente des autres occupations du sol du territoire et l'algorithme sous-estime nettement leur équivalent en eau. Toutefois, les brûlis ne représentent que 4 % de la superficie de la sous-image analysée.

---

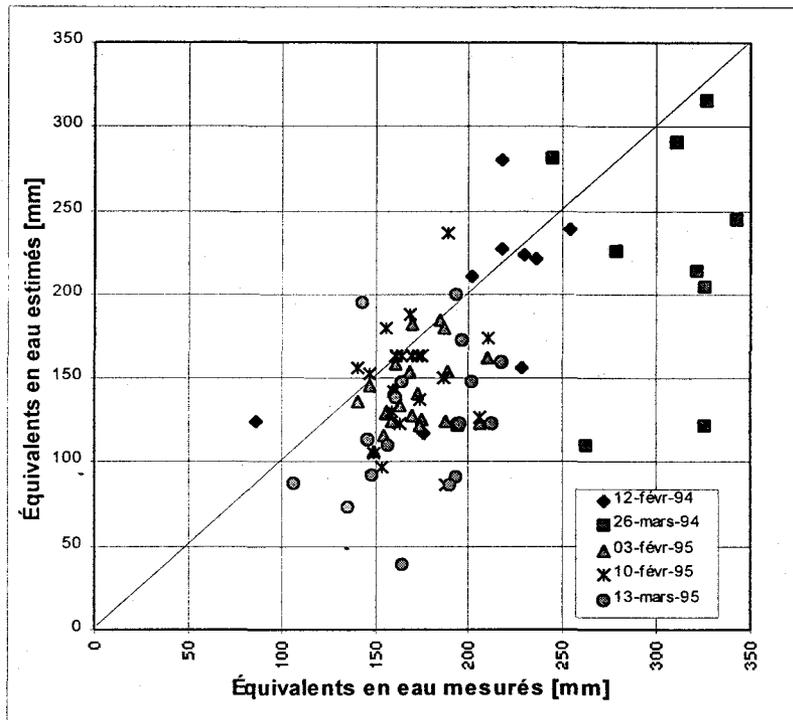


Figure 8: Précision de l'algorithme - 1994/1995

		12 février 1994	26 mars 1994	3 février 1995	10 février 1995	12 mars 1995
Avec brûlis	Erreur moyenne	-39 mm	-112 mm	-38 mm	-22 mm	-56 mm
	Erreur type	±59 mm	±77 mm	±30 mm	±33 mm	±52 mm
Sans brûlis	Erreur moyenne	-10 mm	-80 mm	-29 mm	-20 mm	-49 mm
	Erreur type	±39 mm	±68 mm	±23 mm	±35 mm	±42 mm

Tableau 11: Précision de l'algorithme sur les images de 1994/1995

Il est important de souligner que, malgré l'utilisation de deux images de référence différentes (orbites inverses) pour les images du 3 et le 10 février 1995, l'algorithme ERS obtient des résultats comparables quoique les valeurs estimées diffèrent. La moins bonne performance de l'algorithme ERS pour les données du 26 mars 1994 s'explique par le fait qu'à cette période, la température du sol se maintient près du point de congélation sur l'ensemble des sites. Cette situation provient d'un réchauffement notable des températures de l'air durant le mois de mars 1994 et des valeurs élevées de la résistance thermique du couvert nival. Dans le cas de mars

1995, l'image a été acquise dans des conditions très froides alors que la campagne de terrain a été effectuée deux à quatre jours plus tard, sous un mercure supérieur à 0°C et même de la pluie le quatrième jour. Les densités mesurées étaient alors nettement supérieures aux conditions prévalant lors de l'acquisition de l'image, d'où la moins bonne précision de l'algorithme.

En résumé, de façon générale, l'algorithme ERS (équations 5 et 6 ou bien 11 et 6) sous-estime l'équivalent en eau de 10 à 30 mm (5-15%) , avec un erreur type de 20 à 40 mm. ( $\pm 10-20\%$ ). Par comparaison, la version provisoire (Fortin et al, 1996) de l'algorithme sous-estimait l'équivalent en eau de 20 mm, avec une erreur type de  $\pm 40$  mm. Toutefois, cet algorithme n'avait été appliqué que sur la sous-région du lac des Voeux et seulement sept sites-tests avaient pu être utilisés et deux images d'hiver (12 février et 26 mars 1994) pour évaluer sa précision. Aucun brûlis ne faisait parti des sites-tests de cette sous-région.

L'efficacité de cet algorithme sur les images ERS-1 de 1996 est plus difficilement évaluable puisque très peu de données terrain sont disponibles pour cet hiver-là, seulement quelques sites ont été visités en février et aucun en mars. Toutefois, les équivalents en eau mesurés entre les 16 et 19 avril 1996 peuvent être utilisés pour valider les estimés tirés de l'image du 25 mars 1996 puisque selon les sondes météorologiques, l'accumulation ou la fonte de neige entre les deux visites n'a pas été significative. De plus, l'équation 6 est appliquée sur l'image du 25 mars en utilisant la densité moyenne observée à cette période depuis 1994 ( $230 \text{ kg/m}^3$ ).

La figure 9 compare les équivalents en eau estimés avec les équivalents en eau mesurés. Pour mars 1996, les précisions obtenues sont du même ordre de grandeur que pour les données de février 1994 et 1995 présentées précédemment au tableau 11. L'algorithme ERS sous-estime de 14 mm (7%) l'équivalent en eau avec une erreur type de  $\pm 34$  mm ( $\pm 17\%$ ). Pour février, les résultats sont du même ordre (6.5%) mais l'erreur type est plus faible ( $\pm 7\%$ ) étant donné que nous n'avons que trois valeurs mesurées.

---

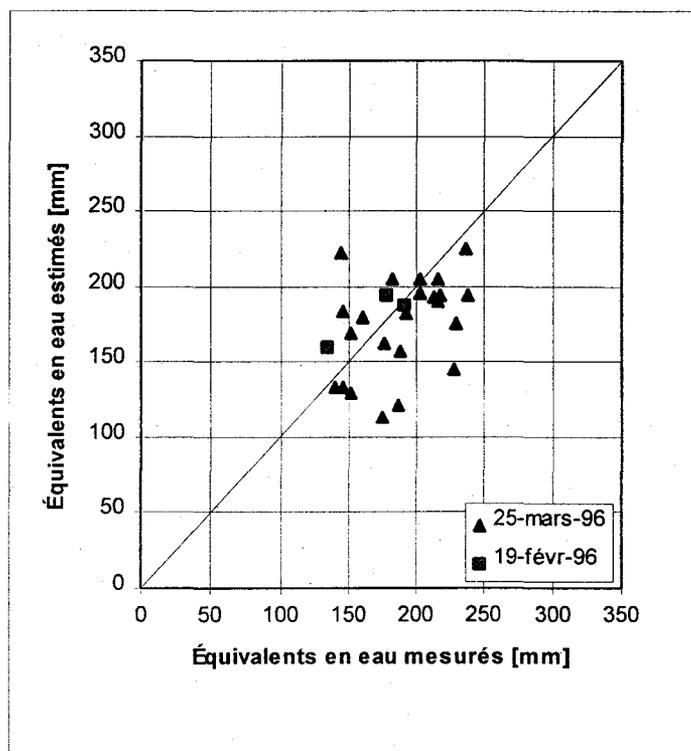


Figure 9: Précision de l'algorithme pour les images de 1996

### 4.3.2 Comparaison des données ERS-1 et RADARSAT-1

Lors de l'acquisition des images RADARSAT-1 du 29 mars 1996 (neige sèche) et du 22 avril 1996 (neige humide), l'Agence spatiale canadienne ne pouvait fournir de données étalonnées, c'est-à-dire qu'aucune analyse quantitative ne pouvait être faite sur ces images. Puisqu'il est possible d'étalonner les images *Standard* depuis le début de février 1997, les images du 29 mars et du 22 avril 1996 devraient être retraitées par le distributeur des images RADARSAT, selon une entente établie dans le cadre du programme ADRO. Ces images ne nous ayant pas encore été livrées, les comparaisons seront faites ultérieurement.

## 4.4 Analyse des données de l'hiver 1996/1997

### 4.4.1 Cartographie de la neige humide

D'abord, rappelons quelques concepts théoriques sur la physique des phénomènes liés à la rétrodiffusion d'un couvert de neige. Un couvert de neige sèche possède une constante diélectrique variant entre 1.3 et 2.5 en fonction de sa densité. Le contraste diélectrique avec l'air ( $\cong 1$ ) étant très faible, il y a pénétration de l'énergie incidente dans le couvert. Comme la neige est un milieu hétérogène composé de glace et d'air, il y a diffusion de volume. Les particules de glace étant responsables de cette diffusion, les propriétés diélectriques d'un couvert de neige sèche dépendent de la densité de la neige et de la grosseur des grains. Cependant, lorsque la température voisine 0°C, de l'eau sous forme liquide apparaît et la partie imaginaire de la constante diélectrique de la neige ( $\epsilon''_n$ ), dénommée aussi "pertes diélectriques", augmente fortement. Pour la neige sèche,  $\epsilon''_n$  est de l'ordre de  $10^{-3}$  et augmente jusqu'à des valeurs situées entre 0.2 et 0.7 pour des teneurs en eau de 2 à 10% (Rott, 1984). Le phénomène d'absorption devient alors beaucoup plus important que la diffusion de volume et la profondeur de pénétration diminue fortement, passant de l'ordre de 10 m à quelques centimètres, en bande C. Par exemple, pour un couvert de neige printanier d'une densité moyenne de 500 kg/m<sup>3</sup>, la profondeur de pénétration est d'environ 15 cm, si la teneur en eau est de 1%, et de 3 cm seulement, si la teneur en eau augmente à 5% (Rott et Nagler, 1993).

Donc, étant donné la faible pénétration de l'énergie dans un couvert de neige humide, l'état du sol n'influence pas le signal de rétrodiffusion. De plus, étant donné ce peu de diffusion dans la neige humide, le signal de rétrodiffusion reste habituellement inférieur à celui de la plupart des surfaces terrestres et en particulier de la neige sèche. D'où le développement antérieur (Baghdadi et al, 1997) d'un algorithme de cartographie de la neige humide présenté à la section 3.4 (équations 7 et 8).

Exceptionnellement, lorsque la surface de neige est très humide (7 à 10%) l'absorption est si importante que la diffusion de surface est le phénomène dominant et cette diffusion est proportionnelle au contraste diélectrique entre les deux milieux. Comme le patron angulaire de la

---

---

rétrodiffusion est proportionnel à la rugosité de cette surface, la rétrodiffusion d'une surface lisse est très faible, voire nulle. Par contre, la rétrodiffusion augmente au fur et à mesure que la surface devient plus rugueuse. Ainsi, lorsque la fonte façonne une interface air/neige très rugueuse, la rétrodiffusion est alors aussi élevée que pour des conditions de neige sèche. Les conditions de l'image du 23 avril 1997 sont un exemple parfait de cette théorie. Selon les mesures de terrain, la teneur en eau de la neige est de 7% et plus lors du passage du satellite. La couverture de neige sur les lacs et les réservoirs est généralement lisse et produit donc une rétrodiffusion à peine plus élevée que le bruit du système radar (figure 10). Ailleurs, la forte rugosité de la neige, causée par la végétation et le relief, entraîne une rétrodiffusion similaire à celle de la neige sèche (figure 11). Dans ce cas particulier, l'algorithme développé aux équations 7 et 8 ne fonctionne pas et n'a donc pas été appliqué.

En pratique, dans un cadre opérationnel, les informations provenant des observations météorologiques combinées aux images radar pourront permettre de détecter la fonte et son évolution.

---

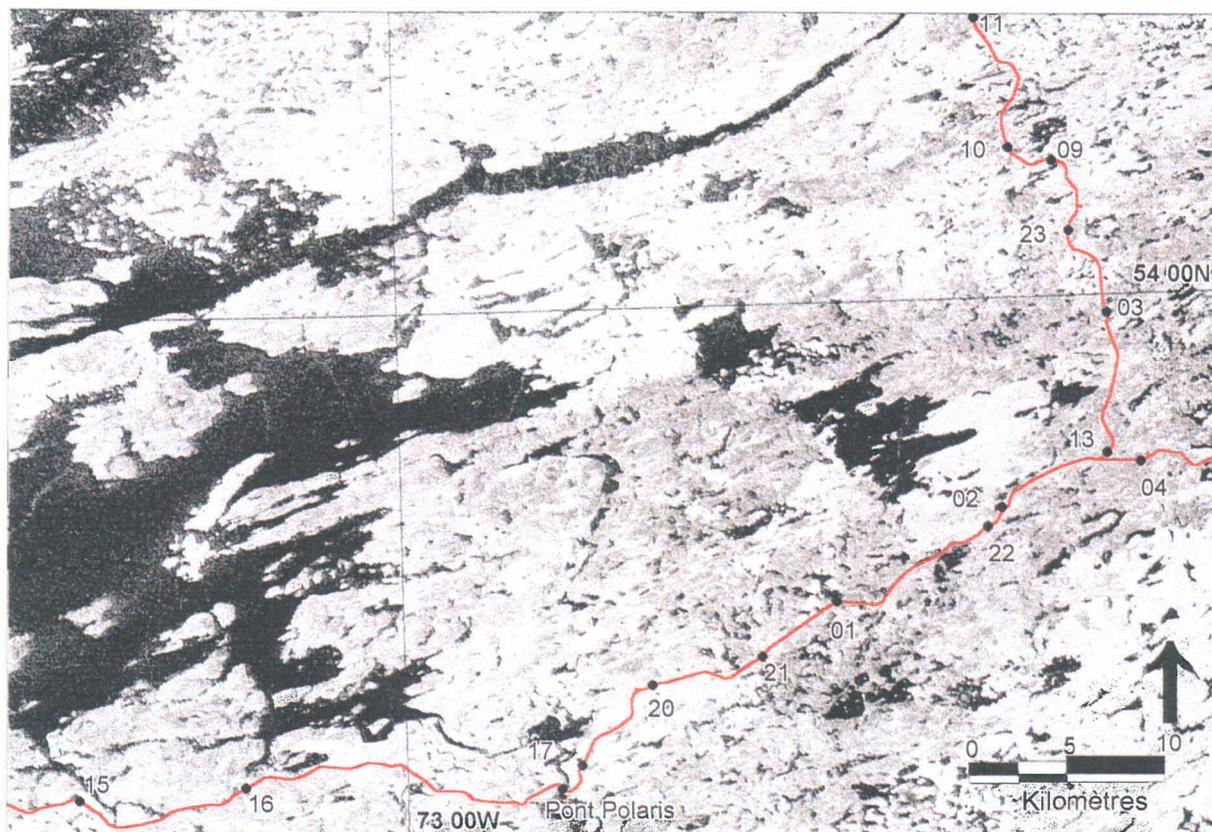


Figure 10: Image Radarsat du 23 avril 1997

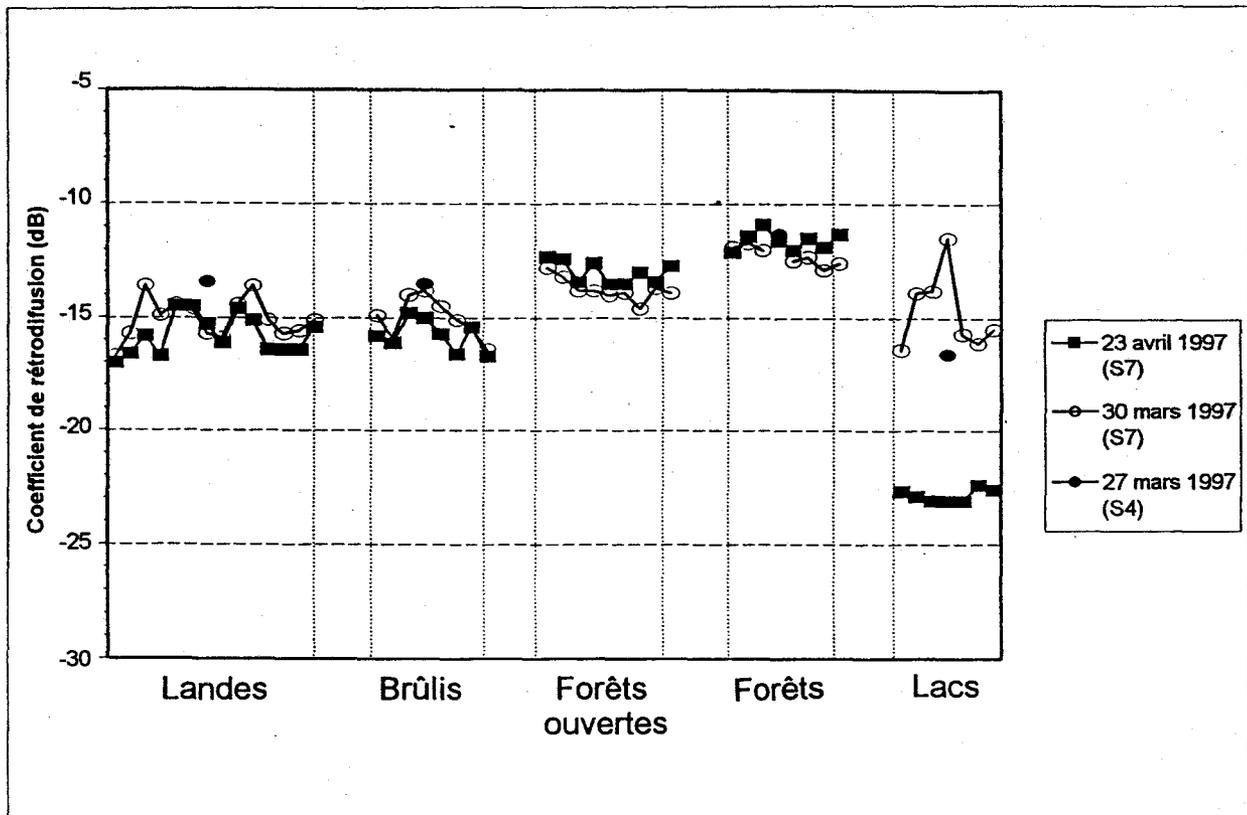


Figure 11: Comparaison des rétrodiffusions entre avril et mars 1997

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

Tous les traitements préalables à la cartographie de l'équivalent en eau de la neige, tels que définis dans le tableau 7, ont été effectués sur les six images RADARSAT suivantes : 31 octobre et 6 novembre 1996 , 4 et 10 février 1997, 27 et 30 mars 1997. Les rapports de rétrodiffusion (image d'hiver - image de référence) ont été calculés selon les combinaisons du tableau 12. Parmi les six images d'automne reçues (tableau 3), celles du 31 octobre et du 6 novembre ont été traitées en premier, parce que nous étions sur le terrain au moment du passage du satellite le 31 octobre 1996. Les autres images d'automne seront traitées et analysées pour le prochain rapport d'étape de décembre 1997. Dans le cas de l'image du 27 mars, une image de référence correspondant aux angles d'incidence du mode S4 (34°-40°) sera ultérieurement créée à partir des images en mode S1 (20°-27°) et S7 (45°-49°) de l'automne 1996.

Image d'hiver	Image de référence	Mode
4 février 97	31 octobre 96	S1
10 février 97	6 novembre 96	S7
27 mars 97	aucune disponible	S4
30 mars 97	6 novembre 96	S7

Tableau 12: Choix des images de référence pour 1997

Pour obtenir une première cartographie de l'équivalent en eau de la neige à partir des images RADARSAT, nous avons appliqué la même procédure que sur les images ERS-1 (section 4.3.1). Les valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine de l'équation 6 ont toutefois été modifiées pour s'adapter aux rapports de rétrodiffusion extraits des images RADARSAT. La figure 12 montre la relation entre les rapports de rétrodiffusion des images RADARSAT de l'hiver 1997 et la résistance thermique pour les zones de forêt ouverte. D'autre part, le paramètre  $a$  (équation 5) a été calculé de la même façon que pour les images ERS-1, c'est-à-dire en utilisant une densité moyenne propre à chaque type d'occupation du sol. En combinant les équations 5 et 6, l'algorithme RADARSAT provisoire, se présente comme suit :

$$EQ_{est} = ((1.04 * Rap(\sigma^{\circ})) + 5.1) * a \quad (12)$$

où  $EQ_{est}$  est l'équivalent en eau estimé à partir de l'image radar ;  
 $Rap(\sigma^{\circ})$  est le rapport de rétrodiffusion ;  
 $a$  est fonction de la densité du couvert nival

La pente de 1.04 est comparable à celle de 1.14 utilisée avec les données ERS-1 (équation 11). L'ordonnée à l'origine passe toutefois de 3.5 à 5.1 pour les données RADARSAT. Ce changement est probablement relié au changement de capteur RSO, de polarisation (HH pour RADARSAT comparé à VV pour ERS-1) et de processeur. Il peut être aussi relié aux valeurs des images d'automne sélectionnées. Les analyses des quatre autres images d'automne disponibles et celles des images de l'hiver prochain permettront de mieux saisir les différences réelles ou apparentes entre les deux capteurs.

Appliqué sur les images RADARSAT de l'hiver 1997, l'algorithme provisoire (équation 12) surestime l'équivalent en eau du couvert nival de 15 mm (environ 12 %) avec une erreur type de  $\pm 26$  mm pour le 10 février 1997. Pour le 30 mars 1997, la surestimation est de 30 mm (environ 18 %) avec une erreur type de  $\pm 32$  mm. La comparaison des valeurs mesurées et estimées pour chacun des sites-tests est illustrée à la figure 13. La cartographie résultante, pour les images en mode S7 du 10 février et du 30 mars 1997 est présentée aux figures 14 et 15.

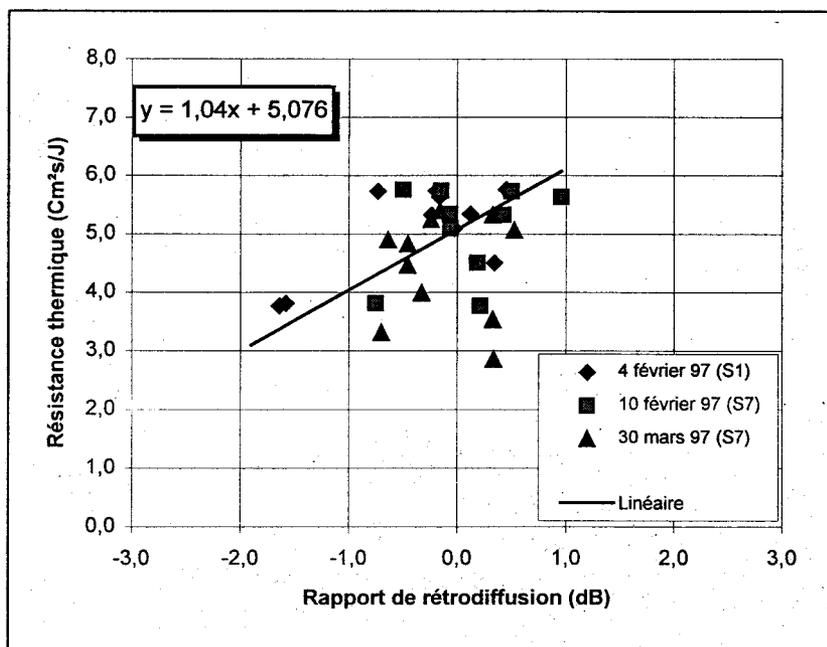


Figure 12: Relation entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique des zones de forêt ouverte.

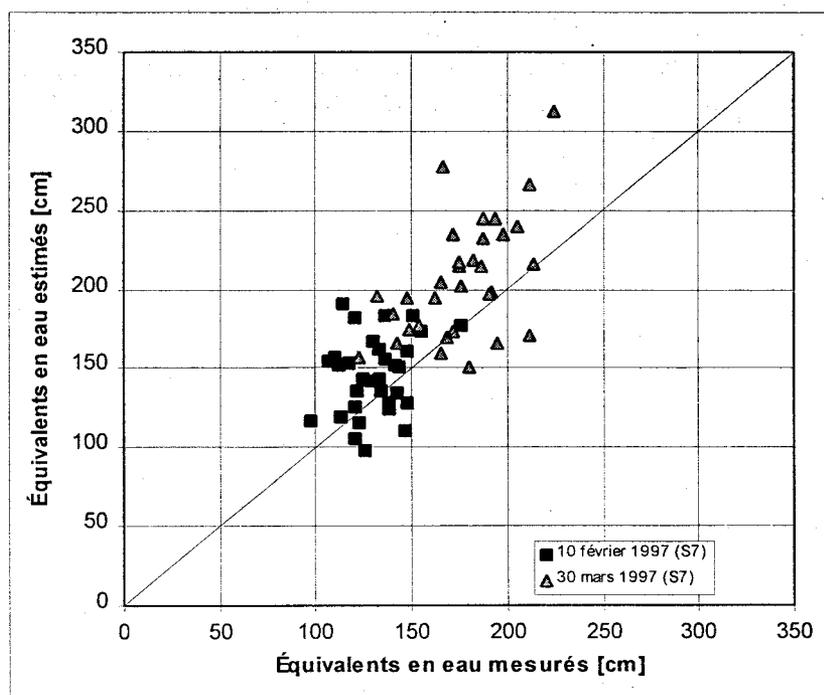
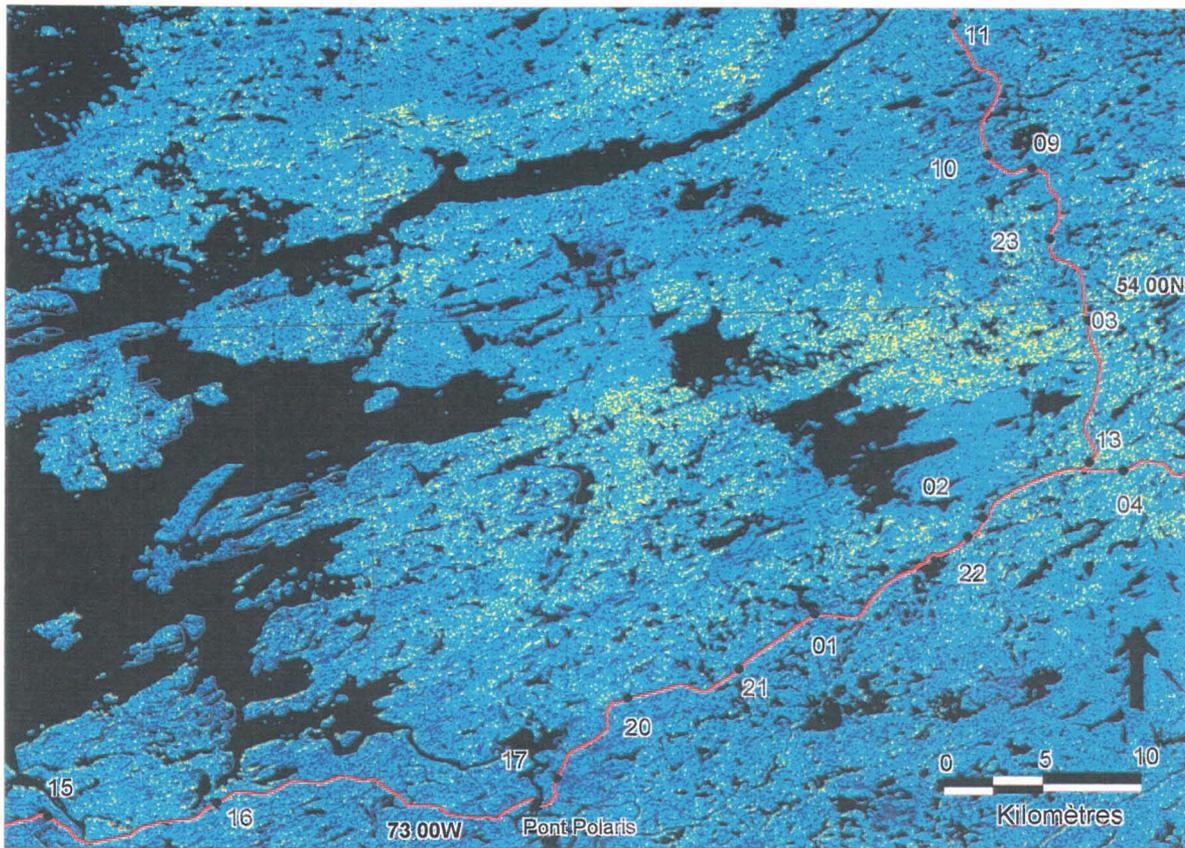


Figure 13: Précision obtenue lors de l'estimation des équivalents en eau à partir des images RADARSAT (S7) du 10 février 1997 et du 30 mars 1997.



**Équivalent en eau  
(mm)**

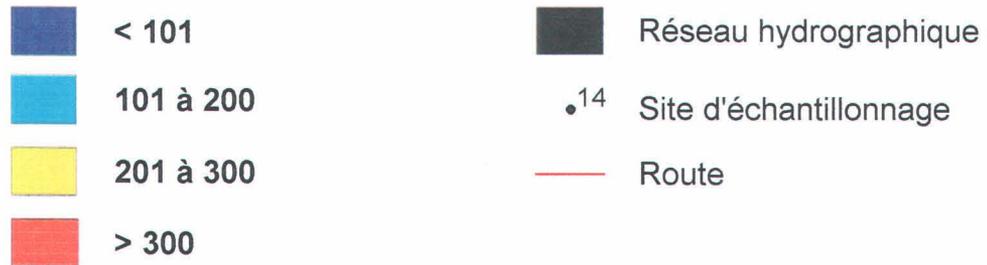
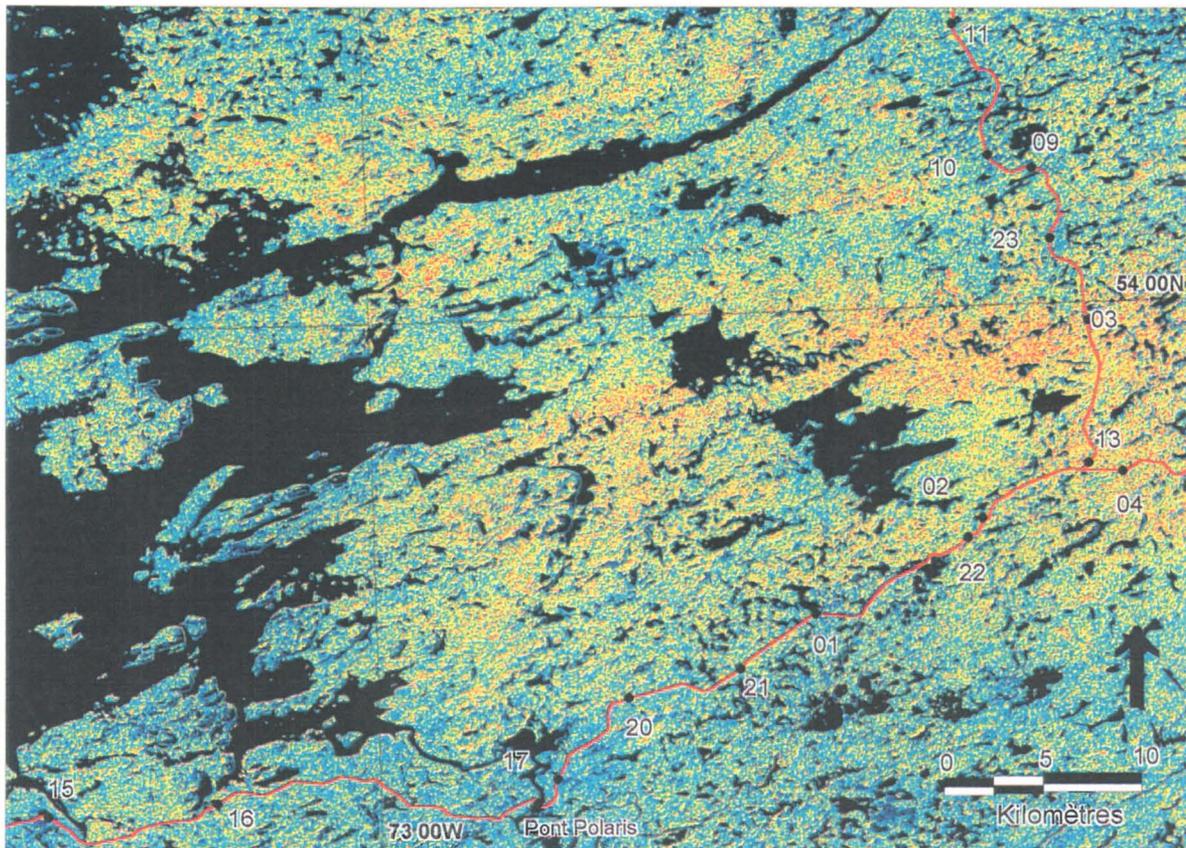


Figure 14: Carte des équivalents en eau estimés à partir de l'image RADARSAT du 10 février 1997



**Équivalent en eau  
(mm)**

 < 101

 101 à 200

 201 à 300

 > 300

 Réseau hydrographique

 14 Site d'échantillonnage

 Route

Figure 15: Carte des équivalents en eau estimés à partir de l'image RADARSAT du 30 mars 1997

Le même algorithme a été appliqué sur les rapports de rétrodiffusion extraits de l'image en mode S1 du 4 février 1997. Les angles d'incidence étant plus faibles, la rétrodiffusion des images en mode S1 ( $20^{\circ}$ - $27^{\circ}$ ) est plus élevée qu'en mode S7 ( $45^{\circ}$ - $49^{\circ}$ ), mais l'utilisation d'une image de référence acquise elle aussi en mode S1 permet d'obtenir des rapports comparables. La figure 16 illustre la précision de l'algorithme RADARSAT pour l'image du 4 février 1997. Cet algorithme provisoire (équation 12) estime très bien l'équivalent en eau du couvert nival pour le 10 février 1997. Par rapport aux valeurs mesurées au sol, la sous-estimation moyenne est de 1 mm soit moins de 1 %, avec une erreur type de 28 mm.

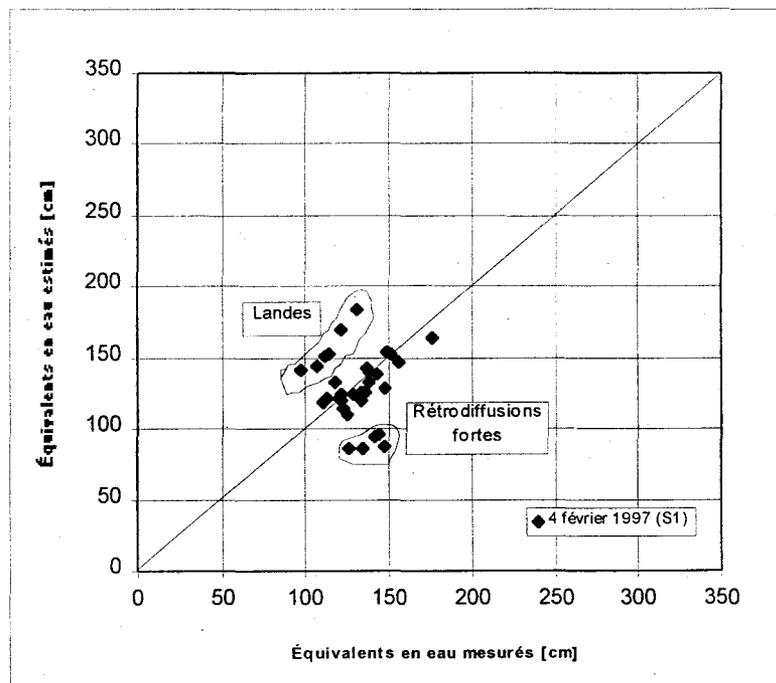


Figure 16: Précision de l'algorithme RADARSAT sur une image en mode S1 (4 février 1997)

Toutefois, on peut remarquer sur cette figure, trois groupes de points distincts. Les sites où l'équivalent en eau est surestimé sont tous des sites de landes et l'erreur observée de près de 50mm est probablement liée à une surestimation de la densité moyenne sur ces sites. Le groupe de points sous-estimés de près de 50 mm comprend des sites de différentes occupations du sol et l'erreur est induite par une rétrodiffusion plus forte sur l'image d'automne. Encore une fois, l'analyse approfondie des images d'automne lors de la prochaine étape permettra de mieux

comprendre cette variation des coefficients de rétrodiffusion. De plus, il nous sera nécessaire d'obtenir d'autres images d'hiver en mode S1 pour en évaluer réellement les avantages ou désavantages vis-à-vis le mode S7, pour la cartographie de l'équivalent en eau de la neige.

---

## **5. CONCEPTION DU PROTOTYPE**

---

### **5.1 Introduction**

Le prototype **EQ-Eau** sera implanté afin d'intégrer les algorithmes développés par l'INRS-Eau pour le suivi du couvert nival aux procédures opérationnelles d'Hydro-Québec. L'implantation d'EQ-Eau sera effectuée par les deux intervenants suivants : VIASAT et l'INRS-Eau. La firme VIASAT se charge de l'implantation d'une interface MapInfo™ pour le prototype. D'autre part, l'INRS-Eau implante le module principal pour le calcul de l'équivalent en eau et l'intégration des données d'équivalent en eau sur une grille réduite variable. La communication entre le module de l'INRS-Eau et l'interface de VIASAT s'effectuera via une librairie de lien dynamique (DLL).

Durant cette première étape du projet (février à juillet 1997), l'analyse fonctionnelle du prototype a été réalisée conjointement par VIASAT et l'INRS-Eau et elle sera présentée par VIASAT Inc. dans un document distinct. Celui-ci contiendra la description de l'ensemble des activités à réaliser pour implanter le prototype, la définition de l'interaction entre le module de l'INRS-Eau et l'interface de VIASAT et finalement l'échéancier de toutes les activités réalisées par les deux parties. Toutefois, afin de souligner la contribution de l'INRS-Eau à l'activité «développement du prototype » durant cette étape, voici une brève description des fonctions du module principal.

### **5.2 Module principal EQ-Eau**

Afin de réaliser le module principal du prototype, l'INRS-Eau planifierait cinq sous-modules. Chacun de ces sous-modules est schématisé à la figure 17 par une boîte. Les informations dont les flèches se dirigent vers une boîte représentent les données nécessaires pour l'exécution du sous-module associé à la boîte. D'autre part, les informations dont les flèches sortent d'une boîte représentent les résultats produits par le sous-module associé à la boîte.

---

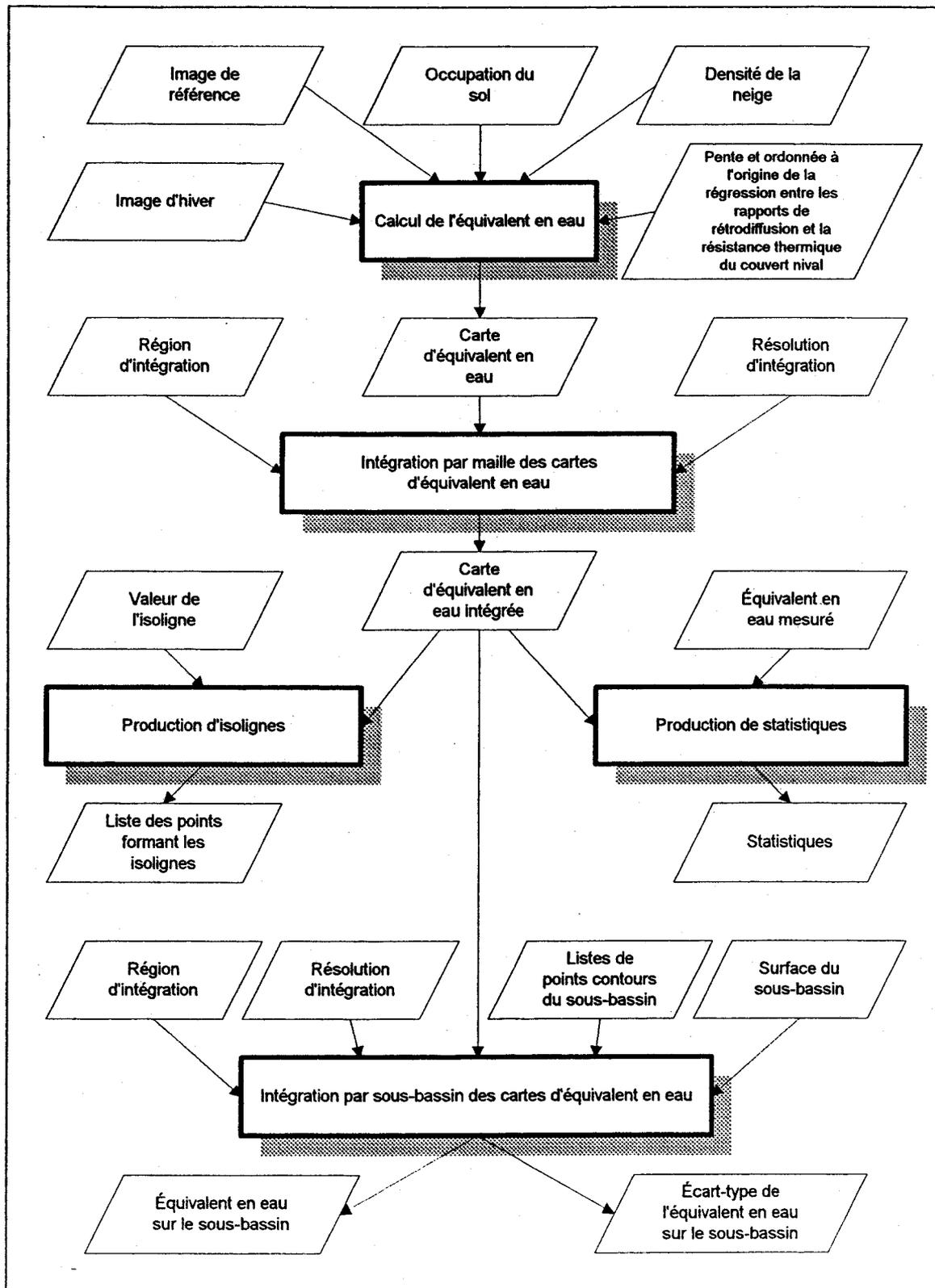


Figure 17: Schéma du prototype EQ-Eau

Dans la version alpha du prototype **EQ-Eau**, livrable le 31 décembre 1997, on ne retrouvera que quatre de ces cinq sous-modules : *calcul de l'équivalent en eau, intégration par maille, production de statistiques et intégration par sous-bassin des cartes d'équivalent en eau*. En effet, le sous-module effectuant la production d'isolignes ne se retrouvera, dépendant de sa pertinence, que dans la deuxième version du prototype **EQ-Eau** prévue pour décembre 1998. Dans les sections ci-dessous, chacun des quatre sous-modules de la version alpha est présenté.

### 5.2.1 Sous-module **Équivalent en eau**

Ce sous-module détermine l'équivalent en eau pour une image d'hiver fournie en paramètre à l'aide du modèle établi par l'INRS-Eau. Ce dernier permet d'évaluer l'équivalent en eau du couvert nival à partir des rapports entre les coefficients de rétrodiffusion d'une scène d'hiver et d'une scène de référence et de la densité moyenne du couvert nival. Selon ce modèle, l'équivalent en eau peut être estimé à l'aide des équations 5 et 6 décrites à la section 3.4.1 : cartographie de l'équivalent en eau.

Voici les fonctions du sous-module :

1. Lecture de l'image d'hiver.
  2. Lecture de l'image de référence.
  3. Lecture de l'occupation du sol.
  4. Calcul des rapports de rétrodiffusion (imageHiver - imageReference)
  5. Pour chaque point (pixel) de l'image :
    - 5.1 Détermination de la densité de la neige en fonction du type de l'occupation du sol.
    - 5.2 Calcul du paramètre  $\alpha$
  6. Calcul de la résistance thermique estimée
  7. Pour chaque point de l'image :
    - 7.1 Détermination de l'équivalent en eau estimé.
-

### 5.2.2 Sous-module Intégration par mailles

Ce sous-module permet l'intégration des cartes d'équivalent en eau sur la région d'étude et pour la résolution désirée. L'intégration se fait selon l'algorithme d'intégration présent dans PHYSITEL. À partir des données d'entrée spécifiées ci-dessous, il est possible d'évaluer l'équivalent en eau sur une grille incluse dans la grille initiale dont la résolution des mailles est supérieure ou égale à la résolution des mailles de la grille initiale. Cette évaluation est basée sur la répartition des équivalents en eau de la grille initiale sur la surface délimitée par les mailles de la grille d'intégration. Ceci signifie que l'on estime l'équivalent en eau d'une maille de la grille d'intégration en faisant la moyenne pondérée des équivalents en eau à chaque petite maille de la grille initiale incluse (totalement ou partiellement) dans la maille d'intégration. La pondération est faite en fonction du pourcentage d'aire occupée par une maille de la grille initiale dans une maille de la grille d'intégration. Ce principe est illustré à la figure 18.

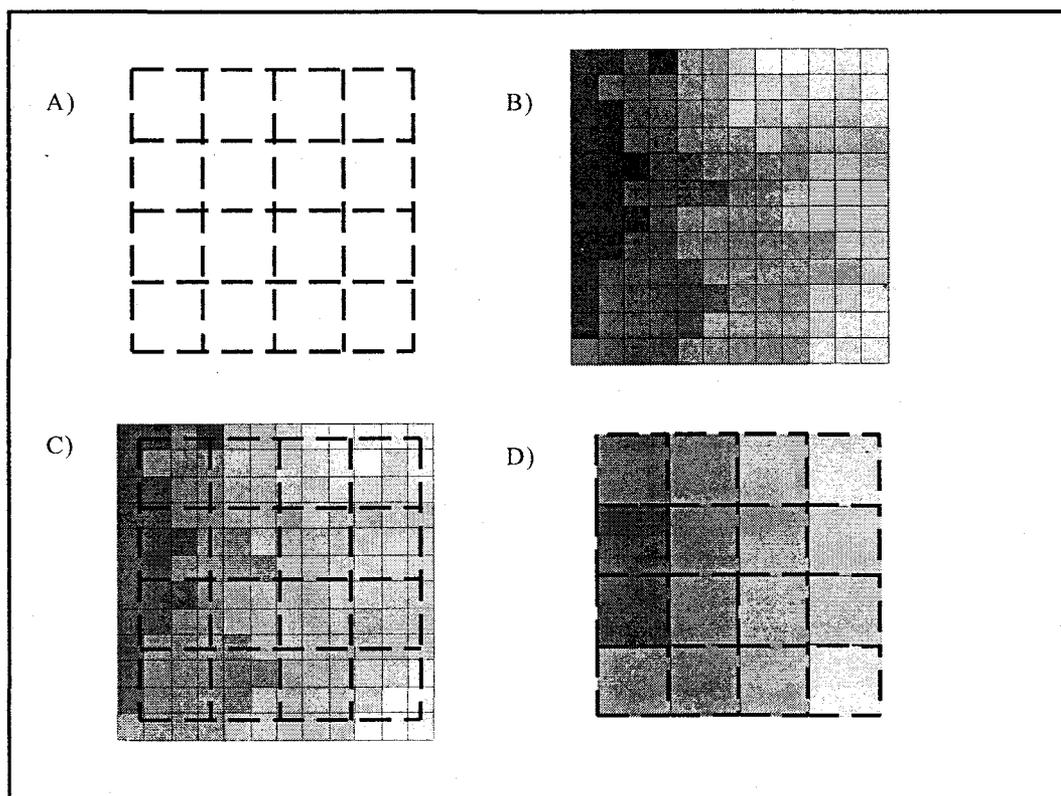


Figure 18: Intégration par maille des cartes d'équivalent en eau : A) grille d'intégration B) grille initiale (à intégrer) C) superposition des deux grilles D) résultats de l'intégration

### 5.2.3 Sous-module Statistiques

Ce sous-module permet de comparer les estimations produites selon l'algorithme de l'INRS-Eau et les équivalents en eau mesurés au sol. Les outils mathématiques et statistiques permettent de quantifier objectivement la qualité des données estimées. Trois modèles sont présentés :

$$\text{Différences aux carrés} = \sum_{i=1}^N (v_{ci} - v_{mi})^2 \quad (13)$$

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (v_{ci} - v_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N (\langle v \rangle - v_{mi})^2} \quad (14)$$

où

$v_{mi}$  : la  $i$ ème donnée mesurée

$v_{ci}$  : la  $i$ ème donnée calculée correspondant à la  $i$ ème donnée mesurée

$N$  : Nombre de pas de simulation

$\langle v \rangle$  : La moyenne des données mesurées

$$GJ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (v_{ci} - v_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N (\langle \varepsilon \rangle - v_{mi})^2} \quad (15)$$

où

$v_{mi}$  : la  $i$ ème donnée mesurée

$v_{ci}$  : la  $i$ ème donnée calculée correspondant à la  $i$ ème donnée mesurée

$N$  : Nombre de jour de calcul

$\langle \varepsilon \rangle$  : La moyenne des équivalents en eau journalière mesurés pour la  $i$ ème journée

En collaboration avec Hydro-Québec, l'INRS-Eau retiendra un ou plusieurs de ces outils mathématiques et statistiques les plus pertinents. Le résultat de cette sélection sera présenté dans un document ultérieur.

### **5.2.5 Sous-module Intégration par sous- bassin**

L'intégration sur un sous-bassin des cartes d'équivalent en eau s'effectue selon l'algorithme présent dans la procédure INTEGR.SUB d'Hydro-Québec. À partir des données d'entrées spécifiées ci-dessous, il est possible d'évaluer l'équivalent eau et son écart-type sur un sous-bassin donné. Cette évaluation est basée sur la répartition des équivalents en eau sur la surface délimitée par les points contours formant le -sous-bassin. Ceci signifie que l'on estime l'équivalent en eau sur un sous-bassin en faisant la somme pondérée de chaque maille incluse (totalement ou partiellement) dans le sous-bassin. La pondération est faite en fonction du pourcentage d'aire occupée par une maille dans le sous-bassin étudié. La figure 19 illustre le processus d'intégration.

À noter que ce processus d'intégration s'applique autant à des cartes d'équivalent en eau intégrées (par maille) qu'à des cartes d'équivalent en eau non-intégrées. La différence réside dans le temps de calcul. Plus les mailles sont fines plus le temps de calcul devient long. À l'inverse, plus les mailles sont grossières plus le temps de calcul devient court.

---

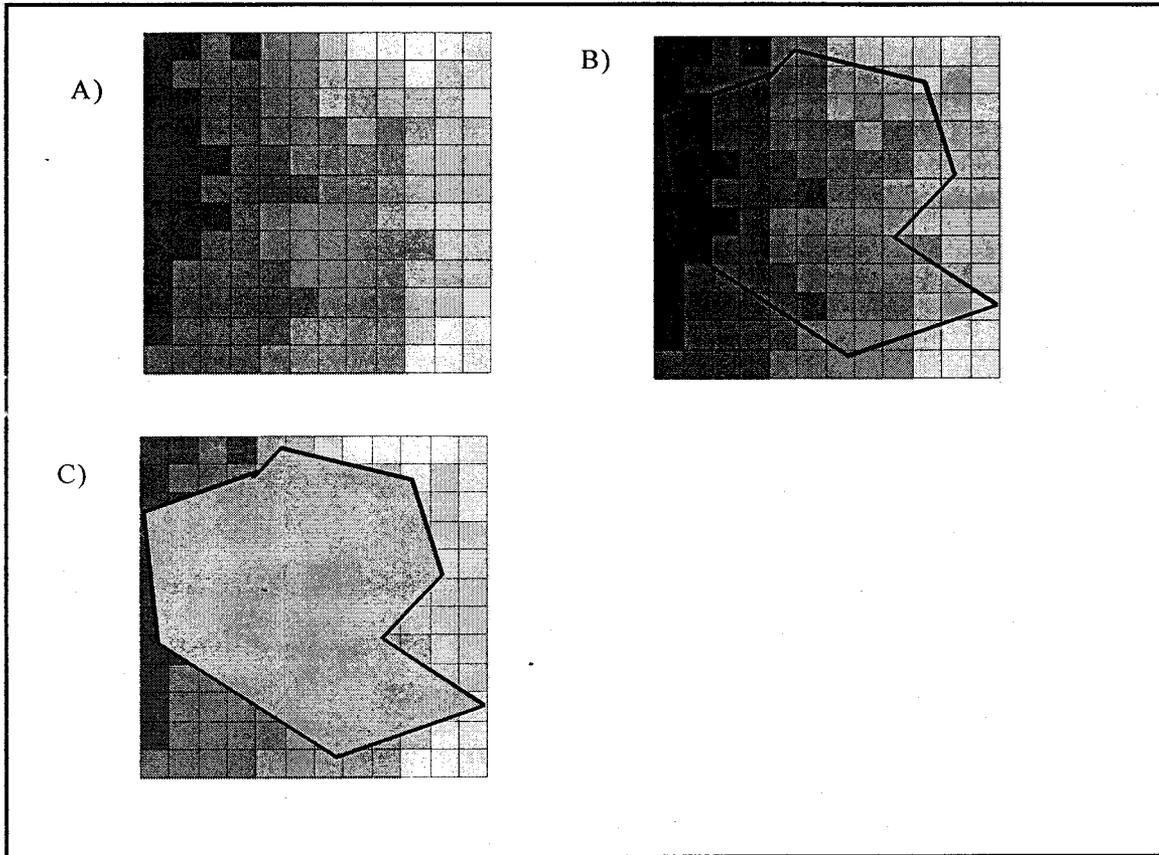
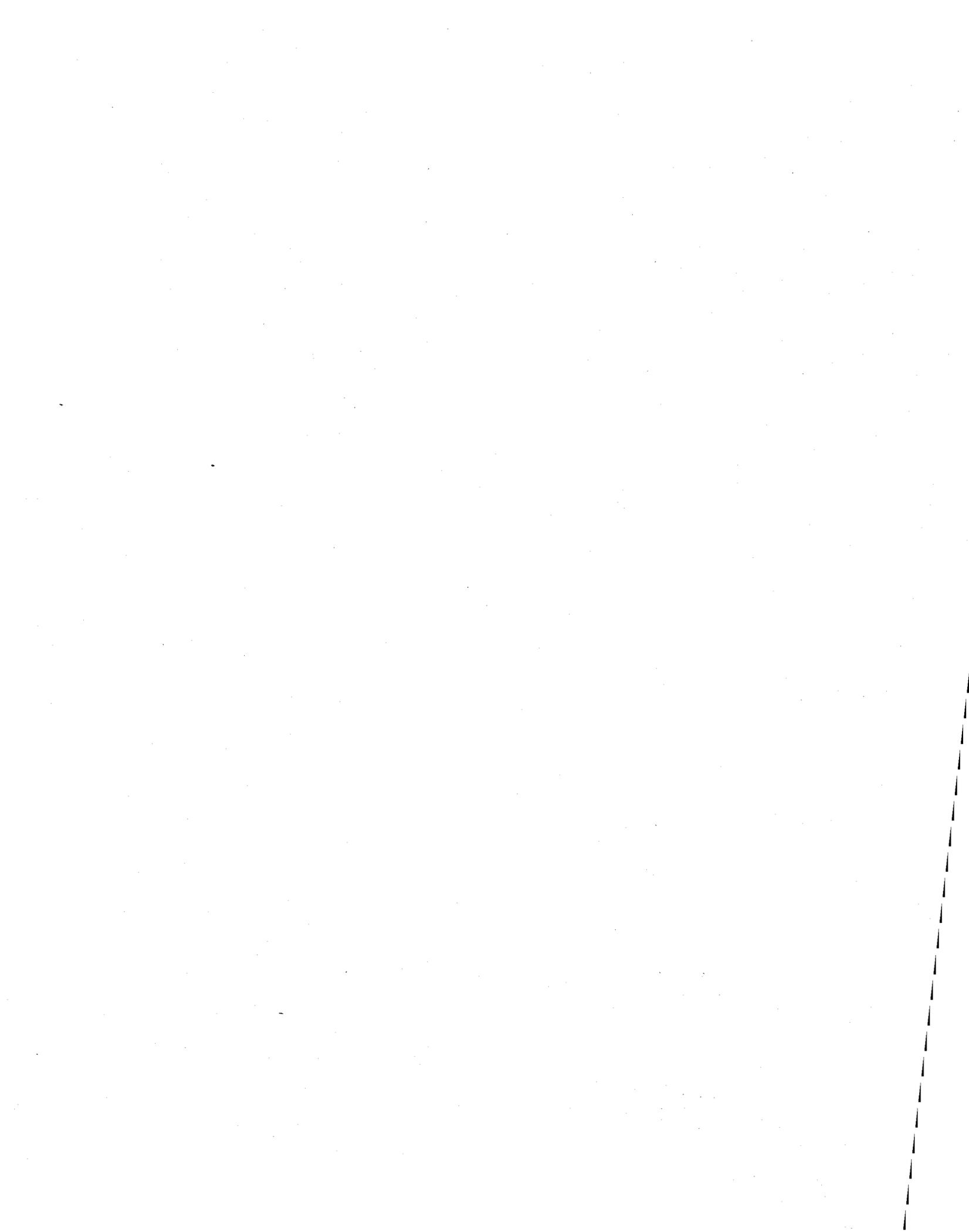


Figure 19: Intégration sur un sous bassin des cartes d'équivalent en eau : A) Carte d'équivalent en eau à intégrer B) Contour du sous bassin sur lequel se fait l'intégration superposé sur la carte d'équivalent en eau à intégrer C) Équivalent en eau intégré sur le sous bassin



## **6. TRAVAUX À VENIR ET ÉCHÉANCIER**

---

### **6.1 Livrables à déposer au 31 décembre 1997**

Les livrables devant être déposés au 31 décembre 1997 sont :

- 1) La cartographie de l'occupation du sol du sous-bassin de LG4 en entier. Cette étape nécessitera l'acquisition de nouvelles images LANDSAT-TM afin de couvrir la partie sud-est du sous-bassin.
- 2) Le contour du sous-bassin de LG4 sous forme numérique: le logiciel Physitel et les modèles numériques d'altitudes seront utilisés pour ce travail.
- 3) Une première version du module principal (Calcul de l'équivalent en eau et Intégration) du prototype EQ-Eau (quatre sous-modules).
- 4) Le second rapport d'étape.

### **6.2 Analyses complémentaires**

L'analyse des données RADARSAT de la saison 1996-1997 se poursuivra afin de raffiner les algorithmes, d'améliorer la précision des estimations et de mieux déterminer l'effet des changements d'angles d'incidence. Une attention particulière sera portée aux images d'automne et au développement d'une image de référence optimale.

L'image en format W2 (faisceau large) acquise le 30 avril 1997 et l'image Scansar acquise le 29 mars 1996 seront aussi traitées. Leur dimension et leur format requiert toutefois une procédure de traitement adaptée.

Des tests seront amorcés afin de vérifier l'effet d'un rééchantillonnage de 12.5 m (dimension des pixels) à 25 m (résolution spatiale des images Standard) ou à 100 m (résolution spatiale des

---

images (SCANSAR) avant l'application de l'algorithme. Ceci afin de réduire la dimension des matrices et le temps de calcul. L'aspect visuel et la légende des cartes d'équivalent en eau produite seront également optimisés.

Une étude sur la représentativité des mesures de terrain et de leur effet sur la sensibilité de l'algorithme sera aussi effectuée. Les résultats devraient être présentés lors des 7 ièmes Journées scientifiques du Réseau de télédétection de l'AUPELF-UREF portant sur les mesures de terrain en télédétection qui se déroulera à Sainte-Foy, du 14 au 17 octobre 1997.

### **6.3 Activités de terrain**

Une campagne de terrain est prévue en août prochain afin de vérifier les appareils de mesure (stations climatologiques et sondes TDR) pour la prochaine saison et de récolter les données climatologiques prises depuis le mois d'avril. De plus, une seconde campagne de terrain est prévue en novembre afin de récolter des informations sur l'état du sol pour les travaux sur l'image de référence et le suivi du gel du sol (objectif 1c).

---

## 7. CONCLUSION

---

L'ensemble des activités prévues pour cette première étape de la phase RADARSAT a été réalisé. D'une part, les modèles numériques d'altitude (MNA) et la correction géométrique des images radar ont été réalisés par VIASAT Géo-Technologies Inc. D'autre part, l'INRS-Eau a réalisé les campagnes de terrain et l'analyse des images ERS-1 et RADARSAT afin de valider l'algorithme provisoire et de cartographier l'équivalent en eau.

Suite à la phase «ERS-1» du projet et en préparation à la phase RADARSAT des données de terrain et des images radar (ERS et RADARSAT) avaient été acquises sur le site d'étude de LG4 lors de la saison hivernale 1995-1996. L'analyse des nouvelles données ERS-1 a validé l'algorithme provisoire (équations 5 et 6) tout en permettant une évolution de celui-ci, puisqu'une seule valeur de l'ordonnée à l'origine (le paramètre  $b$  dans l'équation 5) a été adoptée pour l'ensemble des occupations du sol. De plus, afin de tenir compte de la variation effective de la densité du couvert nival en fonction de l'occupation du sol, nous avons utilisé une valeur de densité moyenne pour chaque type d'occupation afin de déterminer l'équivalent en eau (équation 6). Ainsi, pour l'ensemble des images ERS-1 acquises en 1994, 1995 et 1996, «l'algorithme ERS» entrant dans le prototype **EQ-EAU** sous-estime l'équivalent en eau mesuré au sol de 10 à 30 mm (5 à 15%), avec une erreur type de 20 à 40 mm. ( $\pm 10$  à 20%).

Concernant les images RADARSAT de la saison 1996/1997, l'image RADARSAT étalonnée du 23 avril 1997 a été traitée et analysée. Une première cartographie de la neige humide au printemps 1997 du secteur expérimental n'a toutefois pas été réalisée puisque l'algorithme de Baghdadi et al (1997) ne s'applique pas dans les conditions particulières de cette image soit un couvert nival très humide et très rugueux en surface. En effet, la fonte ayant façonné une interface air/neige très rugueuse entre les 19 et 23 avril sur nos sites-tests, leur rétrodiffusion est alors aussi élevée que sur l'image de neige sèche du 30 mars 1997 et l'algorithme ne fonctionne pas. Toutefois, vu la rétrodiffusion presque nulle des lacs et des réservoirs de cette image RADARSAT, il est clair que la surface du couvert nival était bien humide (6-7%) au moment du passage du satellite. Dans un contexte opérationnel, la combinaison des données météorologiques

---

et des images radar permettra de détecter le début de la fonte et de suivre son évolution par la suite.

L'analyse des données terrain et des images RADARSAT de l'hiver 1997 a aussi permis d'établir un *algorithme RADARSAT* provisoire pour le prototype EQ-EAU. L'approche utilisée est la même, l'algorithme ne diffère que par la valeur des paramètres. Ainsi, l'*algorithme RADARSAT* appliqué aux deux images en mode S7 surestime l'équivalent en eau mesuré au sol de 15 à 30 mm (12 à 18 %) avec un erreur type de 26 à 32 mm. De plus, ce même algorithme appliqué à l'image en mode S1 du 4 février 1997 donne une très bonne estimation de l'équivalent en eau moyen du couvert nival (une sous-estimation de moins de 1%) avec une erreur type de 28 mm. Toutefois, il nous sera nécessaire d'obtenir d'autres images d'hiver en mode S1 pour en évaluer réellement les avantages ou désavantages vis-à-vis le mode S7. De plus, des cartes représentant la distribution spatiale de l'équivalent en eau de la neige au sol ont été réalisées pour les images en mode S7 du 10 février et 30 mars 1997.

Finalement, durant cette première étape du projet, l'analyse fonctionnelle du prototype a été réalisée conjointement par VIASAT et l'INRS-Eau et elle sera présentée en détail par VIASAT Inc. dans un document distinct. En effet, la firme VIASAT se chargera de l'implantation d'une interface MapInfo™ pour le prototype. Pour sa part, l'INRS-Eau implantera le module principal pour le calcul de l'équivalent en eau et l'intégration des cartes d'équivalent en eau sur une grille réduite variable. Pour réaliser ce module principal, l'INRS-Eau développera quatre ou cinq des sous-modules suivants: Calcul de l'équivalent en eau, intégration par maille, intégration par sous-bassin, production de statistiques, et production d'isolignes.

---

## 8. RÉFÉRENCES

---

Bagdhadi, N., Y. Gauthier et M. Bernier (1997). Capability of Multi-Temporal ERS-1-SAR Data for Wet Snow Mapping. Remote Sensing of Environment.

Bernier, M., J.P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, J.L. Bisson, et P. Vincent (soumis). Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires. Revue des sciences de l'eau, soumis en juin 1997, 26 pages.

Collectif (1996). Projet de recherche sur l'exploitation des données images Radar (PREDIR). Rapport final. Université Laval, INRS-Eau, Université de Sherbrooke, Viasat Géo-technologie inc., MIR Télédétection inc., Consultants TGIS inc., mai 1996, 104 pages.

Fortin J.P., M. Bernier, Y. Gauthier et D. De Sève (1996). Traitement d'images ERS-1 pour la prévision hydrologique - Rapport final rédigé pour Hydro-Québec. INRS-Eau, rapport de recherche No. 431, janvier, 71 pages.

Gauthier, Y., M. Bernier et J.P. Fortin (1997). Aspect and Incidence Angle Sensitivity in ERS-1 data. International Journal of Remote Sensing. (Soumis)

Rott, H. et T. Nagler (1993). Capabilities of ERS-1 SAR for Snow and Glacier Monitoring in Alpine Areas, Second ERS-1 Symposium, Hamburg, Germany, 11-14 octobre, pp. 965-970.

Rott, H. (1984). The analysis of Backscattering Properties from SAR Data of Mountain Regions, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. OE,9, no. 5, 347-355.

Raney, R.K., Freeman, T., Hawkins, R.W., Bamler, R. (1994). A Plea for Radar Brightness, Proceedings IGARSS 1994, Pasadena, U.S.A.

RSI (1995) RADARSAT illuminated; Your Guide to Products and Services. Radarsat International Inc., Richmond, Colombie Britannique, juillet 1995, 110 pages

U.S. Army Corps of Engineers (1956). Snow Hydrology. Portland, Oregon.

---

## Annexe 1

### ***Description des stations climatologiques d'Hydro-Québec***

Les stations climatologiques sont trois stations temporaires de mesures de températures de la neige et de hauteur de la neige installées par le personnel d'Hydro-Québec en décembre 1995. Les mesures sont prises à toutes les heures et archivées localement. Elles peuvent aussi être transmises au centre de réception via le satellite GOES. Toutefois, la transmission par satellite n'a pas fonctionné à l'hiver 1996 et 1997 mais devrait être opérationnelle à l'automne 1997.

Sept thermistances, montés sur une tuyauterie de PVC blanc, mesurent la température sous le sol (-5cm), au sol et à 5 niveaux au dessus du sol (ou dans la neige). Le support en PVC blanc permet de minimiser le transfert de chaleur. Les sondes elles-mêmes sont à 10cm du montage principal, entourées d'un écran de silicone et d'une jupe en plastique pour assurer l'étanchéité. Le dessin ci-contre indique le montage des sondes.

Le *Sonar Ranging Sensor* modèle SR50 de la compagnie Campbell Scientific est utilisé pour mesurer la hauteur de la neige au sol. Il est situé à environ 2,5m du sol. Sa précision est de  $\pm 1$  cm ou 0,4% de la distance et il possède une résolution de 0,1mm. Les lectures de l'appareil sont compensées en fonction de la température de l'air par la formule suivante:

$$H = Z - \left( L_{SR50} \cdot \sqrt{\frac{T_{ext}}{273.15}} \right) \quad (16)$$

où

- H : hauteur de la neige au sol  
 Z : le zéro de l'appareil (hauteur de la base du SR50)  
 $L_{SR50}$  : lecture du SR50 (« distance to target »)  
 $T_{ext}$  : température de l'air, en degrés Kelvin

L'appareil prend trois lectures consécutives et la moyenne de ces lectures est conservée.

Une sonde de température de l'air à également été installée. Celle-ci, munie de son propre écran solaire est localisée du côté nord, montée derrière le panneau solaire. Elle est à environ 2,0m du sol. La lecture de cette température nous permet de compenser la mesure de la hauteur de la neige au sol.

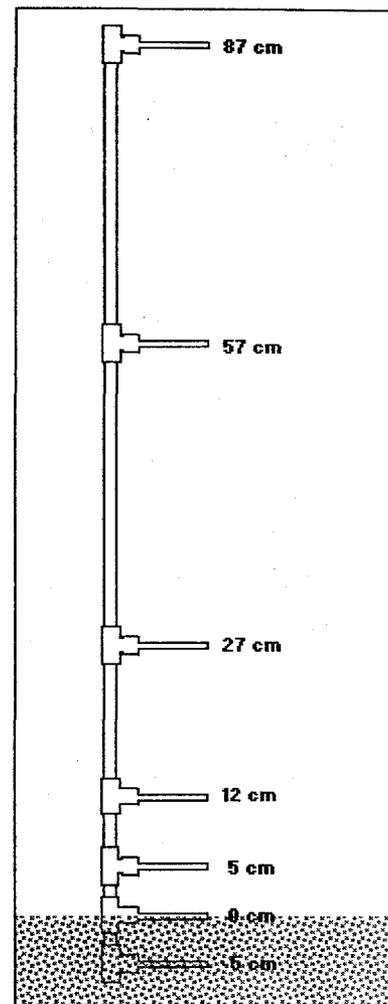
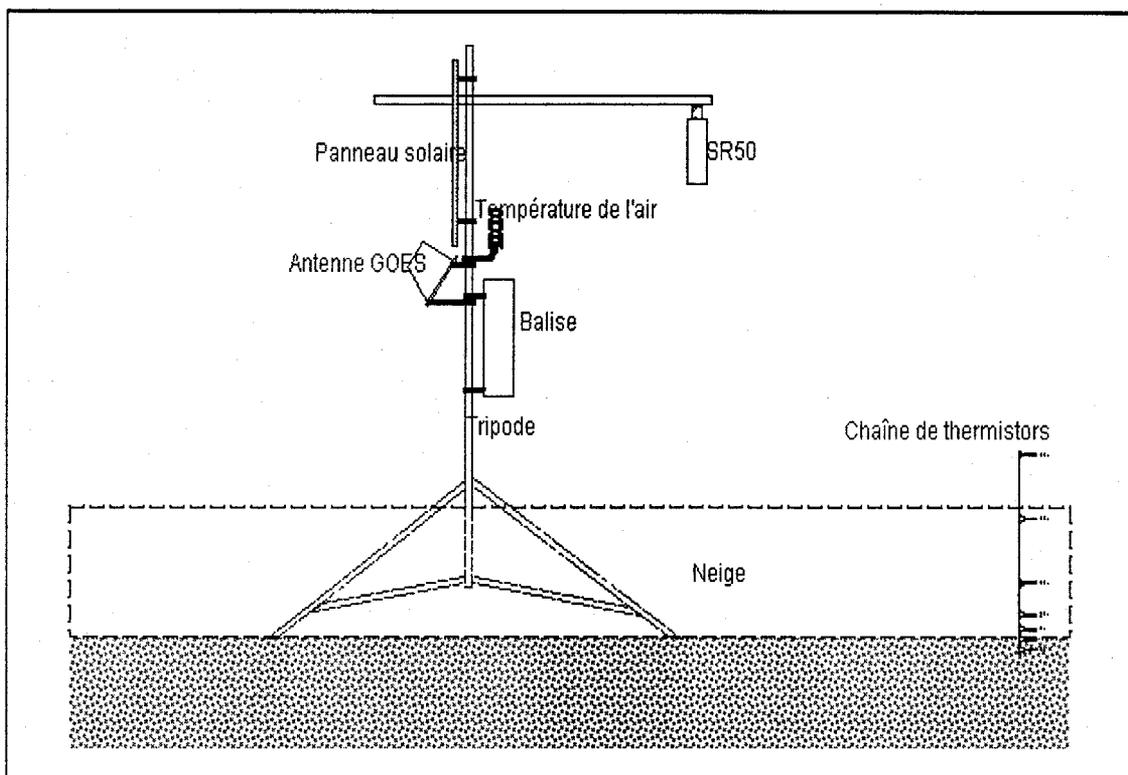


Figure 20: Hauteur des thermistances.

Le système d'acquisition et de transmission de données se compose de 3 éléments principaux:

- une balise d'acquisition programmable qui a pour fonction de commander la lecture des paramètres à toutes les heures et de les archiver pour une période d'environ 9 mois. Ces données peuvent ensuite être téléchargées dans un micro-ordinateur portatif via un lien RS232 ou RS485.
- Un émetteur et une antenne permettent la transmission des données à toutes les trois heures via le satellite GOES. Les données sont alors acquises en temps réel par un système de réception situé à Montréal.

- Un batterie couplée à un chargeur et un panneau solaire fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'ensemble.



**Figure 21: Vue d'ensemble des stations climatologiques**

Les appareils sont fixés à un tripode en tuyaues galvanisés, sauf la chaîne de thermistors qui est ancrée dans le sol à l'aide d'une courte tige de cuivre. Le dessin ci-dessous illustre la disposition générale des instruments.

Référence : Raymond Gauthier, Hydro-Québec



## **L'ÉQUIPE DE RECHERCHE :**

Marique Bernier, professeure en télédétection

Jean-Pierre Fortin, professeur en hydrologie

Yves Gauthier, agent de recherche en télédétection et géomatique

Manon Lelièvre, étudiante-stagiaire en géographie

Josée Fitzback, assistante de recherche en informatique

Néhmé Baghdadi, stagiaire postdoctoral en télédétection