

**TRAITEMENT D'IMAGES ERS-1 POUR LA
PRÉVISION HYDROLOGIQUE -
RAPPORT D'ÉTAPE**
Rapport de recherche no R-413 (phase III)

**TRAITEMENT D'IMAGES ERS-1 POUR LA PRÉVISION HYDROLOGIQUE -
RAPPORT D'ÉTAPE**

Rapport rédigé pour

Hydro-Québec

par

**Jean-Pierre Fortin
Monique Bernier
Yves Gauthier
Isabelle Latulippe**

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

Rapport de recherche No R-413 (phase III)

Juin 1995

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iii
LISTE DES FIGURES	iv
1 INTRODUCTION	1
2 ACTIVITÉS RÉALISÉES	3
2.1 Données recueillies	3
2.2 Campagnes de mesures sur le terrain	3
2.3 Traitement des relevés de terrain de l'hiver 1995 et comparaison avec les valeurs de l'hiver 1994	7
2.4 Correction géométrique des images ERS-1	9
2.4.1 Modèle mathématique	9
2.4.2 Performance du modèle	10
2.4.3 La station cartographique radar	11
2.4.4 Correction des images ERS-1 de la Baie-James	12
2.5 Proposition soumise au programme ADRO	13
2.5.1 Objectifs du projet de recherche proposé	13
2.5.2 Description des images RS0 demandées	15
2.5.3 Organisation et coût du projet	18
3 ACTIVITÉS À RÉALISER	25
3.1 Lecture et étalonnage radiométrique des images ERS-1 de l'hiver 1995	25
3.2 Correction géométrique des images de la saison 1994/1995	25
3.3 Traitements des données images	25
3.4 Évaluation du lien entre le rapport de rétrodiffusion et l'équivalent en eau	26
4 CONCLUSION	27
5 RÉFÉRENCES	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Caractéristiques des images radar acquises durant la saison 1994-1995	4
Tableau 2.2	Campagnes de mesures	5
Tableau 2.3	Sommaire des données de la première année	6
Tableau 2.4	Précision du MNA pour l'obtention de la précision planimétrique recherchée et ratio erreur planimétrique/erreur altimétrique	11
Tableau 2.5	Images étalonnées transmises à VIASAT	13
Tableau 2.6a:	Plan d'acquisition des données de RADARSAT (première année)	16
Tableau 2.6b:	Plan d'acquisition des données de RADARSAT (deuxième année)	17

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Localisation des sites expérimentaux	19
Figure 2.2	Évolution de la densité (a) de l'équivalent en eau (b) et de la résistance thermique (c) entre février et mars pour l'hiver 1994 et l'hiver 1995 ..	20
Figure 2.3	Comparaison des profils du couvert nival pour l'hiver 1994 et 1995 ..	21
Figure 2.4	Évolution des caractéristiques du couvert nival durant la semaine du 14 au 17 mars 1995	22
Figure 2.5	Évolution de la teneur en eau liquide à la surface du couvert nival ..	23
Figure 2.6	Relation entre l'équivalent en eau et la résistance thermique de la neige	24

1 INTRODUCTION

L'objectif du projet de recherche actuel est de vérifier le potentiel des images radar du satellite ERS-1 pour estimer l'équivalent en eau du couvert nival sur les bassins de la Baie James. Ce projet d'une durée de 2 ans débutait en décembre 1993.

Dans ce troisième rapport d'étape, nous ferons état des activités réalisées depuis le début de l'année 1995. Nous décrivons les images du satellite ERS-1 obtenues ainsi que les données recueillies lors des campagnes de terrain de février et mars 1995. En particulier lors de la campagne de mars, une mission aéroportée, gracieuseté du Centre canadien de télédétection a eu lieu. Lors de cette mission, des images radar d'une résolution de 4 à 6 m ont été prises en bande C (5GHz), polarisation HH (RADARSAT) et VV (ERS-1) ainsi qu'en bande X (10GHz). De plus, des données en mode polarimétrique (intensité et phase) ont été enregistrées pour la bande C. Ces données aéroportées ne seront pas traitées dans le cadre du projet actuel mais les résultats seront communiqués à Hydro-Québec.

Lors de cette même campagne de mars, la firme VIASAT Inc. a réalisé le positionnement GPS de points au sol dans le cadre du projet PREDIR (Projet conjoint, Université Laval, INRS-Eau, Université de Sherbrooke, VIASAT Inc., MIR télédétection Inc., Consultants TGIS Inc.). Ces points d'appui serviront à corriger géométriquement les images aéroportées ainsi que les scènes ERS-1 de 1994 et 1995 de la région de LG4.

Nous présentons aussi l'état d'avancement du traitement des images et détaillons le processus de correction géométrique des images ERS-1. Notons que la correction géométrique est réalisée par la firme VIASAT Inc. Cette collaboration de VIASAT Inc. est rendue possible parce qu'elle développe une station cartographique radar à l'intérieur du projet PREDIR.

Nous avons aussi défini avec nos partenaires d'Hydro-Québec les objectifs d'une poursuite de nos travaux pour 1996 et 1997 à l'aide des données RADAR (RS0) du satellite RADARSAT. Une proposition de recherche a ainsi été soumise au programme ADRO le 31 mars 1995. Essentiellement, la proposition demande à l'Agence Spatiale Canadienne de fournir, sans frais, 28 images du satellite RADARSAT.

Finalement, les activités à réaliser d'ici la fin du présent contrat de recherche sont présentées.

2 ACTIVITÉS RÉALISÉES

2.1 Données recueillies

Le tableau 2.1 présente la liste des images radar acquises durant la deuxième année du projet, soit à l'automne 1994 et à l'hiver 1995. Les scènes ERS-1 du 25 septembre 1994, du 3 février 1995 et du 12 mars 1995 ont été acquises selon une orbite ascendante (soir) alors que les scènes du 8 novembre 1994 et du 10 février 1995 ont été acquises selon une orbite descendante (jour). Toutes ces images sont centrées sur la même coordonnée géographique mais le territoire couvert varie selon l'axe de l'orbite. Pour des raisons de disponibilité du modèle numérique d'altitude (MNA) et d'accessibilité aux sites, le territoire d'étude a été déplacé cette année de 18 minutes vers l'ouest, soit 20 kilomètres.

L'image du 17 mars 1995 est une image acquise par le ROS aéroporté du Centre Canadien de Télédétection. En effet, nous avons profité du déplacement du Convair-580 dans le nord du Québec pour obtenir, à des fins de recherche, certaines images aéroportées de notre zone d'étude. L'avantage principal de ces images est leur résolution d'environ 6m, comparée à celle de 30m d'ERS-1. Trois survols successifs ont donc permis d'enregistrer un corridor de 15km centré sur la portion de route entre le pont Polaris et l'intersection pour LA1 (Figure 2.1). Les images obtenues sont en bandes C et X et en mode normal (intensité) ou polarimétrique (intensité et phase). Le survol en mode polarimétrique ayant été réalisé en premier, vers 10h00 du matin, il est possible qu'on puisse y discerner la couche de regel à la surface de la neige.

2.2 Campagnes de mesures sur le terrain

Lors de la saison 1994-1995, l'équipe de recherche de l'INRS-Eau s'est rendue à 3 reprises dans le secteur de LG4 (tableau 2.2). La première visite a été effectuée en septembre 1994, afin d'installer des sondes thermiques sur une dizaine de sites, de sélectionner 5 nouveaux sites et de bien documenter le territoire d'étude avant l'hiver (Équipe de recherche: R.Gauthier [HQ] et Y. Gauthier [INRS]). Au cours de cette saison, nous avons donc effectué des mesures à un total de 14 sites.

Les visites hivernales ont eut lieu du 6 au 10 février et du 13 au 17 mars 1995. Ces périodes coïncident approximativement avec les dates des relevés nivométriques d'Hydro-

Tableau 2.1 Caractéristiques des images radar acquises durant la saison 1994-1995

Saison 1995 - Baie James				
Dates et heures d'acquisition	Coordonnées du centre d'image	Orbite relative	Type	Dimension du pixel (m)
25 sept. 94, 21h52	54:00' N 72:30' O	1783 (ASC)	SGF	12.5
8 nov. 94, 10h48	54:00' N 72:30' O	542 (DES)	SGF	12.5
3 fév. 95, 21h50	54:00' N 72:30' O	1783 (ASC)	SGF	12.5
10 fév. 95, 10h47	54:00' N 72:30' O	1891 (DES)	SGF	12.5
12 mars 95, 21h51	54:00' N 72:30' O	2314 (ASC)	SGF	12.5
17 mars 95, 11h00 Image aéroportée ROS Convair/CCT	54:00' N 72:30' O	Bande C Polarimétrique		4 à 6
		Bande C et X Pol. HH et HV		4 à 6
		Bande C et X Pol. HH et HV		4 à 6

ASC= Orbite ascendante

DES= Orbite descendante

Québec qui se sont tenus les 1er février et 18 mars. Les mesures effectuées par notre équipe au cours de la semaine du 6 février 1995 furent les mêmes qu'en 1994, soient 2 lignes de neige par site pour déterminer l'épaisseur, la densité et l'équivalent en eau de la neige, ainsi qu'une fosse creusée dans la neige pour établir le profil du couvert et en calculer la résistance thermique à huit sites considérés comme représentatifs des conditions de neige sur l'ensemble des sites. De plus, la température du sol a été mesurée à deux des 10 carottes prélevées sur chaque ligne de neige et par les sondes thermiques installées sur différents sites à l'automne. Lors de cette campagne, la température de l'air a oscillé entre -9 et -36°C et celle du sol variait entre 0 et -4°C. Le couvert de neige sec et stratifié atteignait en moyenne 80 cm, pour un équivalent en eau moyen de 17 cm. (Équipe de recherche: R.Gauthier et D.Tremblay [HQ], M.Bernier et J.P. Fortin [INRS]).

Tableau 2.2 Campagnes de mesures

Saison 1994/1995 - Baie James				
Images ERS-1 acquises	Terrain	État du sol	État du couvert	Équivalent en eau moyen
25 septembre 94	26-29 sept.	dégelé	Pas de neige	-
08 novembre 94	-	dégelé	Trace	0 cm
03 février 95 10 février 95	6-10 février	gelé	Sec et stratifié	17 cm
12 mars 95	13-17 mars	gelé	Humide	18 cm

Lors de la campagne de terrain tenue au cours de la semaine du 13 au 17 mars 1995, la température de l'air s'est maintenue presque constamment au-dessus du point de congélation et il est même tombé de la pluie le 16 mars en après-midi. En raison des conditions de fonte intensive qui prévalaient alors, plusieurs sites ont été visités à plus d'une reprise pour suivre l'évolution de l'état du couvert. Évidemment, toutes les mesures régulières décrites plus haut ont aussi été effectuées. Le couvert de neige très humide atteignait en moyenne 77 cm, pour un équivalent en eau moyen de 17 cm. La température du sol était de -3°C avant le réchauffement et de 0°C à la fin de la semaine. (Équipe de recherche: R.Gauthier [HQ], M.Bernier, J.P. Fortin et Y.Gauthier [INRS]).

En complément, des relevés de positionnement géodésique pour satellite GPS ont été réalisées avant et pendant le passage du radar aéroporté du Centre Canadien de Télédétection (Équipe de recherche: É.Roy [VIASAT] et L. Lamoureux [U.LAVAL]). Ces relevés ont été effectués à l'aide de récepteurs géodésiques de type ASHTECH ZXII opérés simultanément à bord de l'avion du CCT et sur le terrain (sur des points géodésiques établis) au moment du survol radar.

Ces relevés serviront à deux fins: D'abord, les observations GPS, traitées en mode DGPS (correction différentielle en post-traitement), nous procurent des informations précises (environ 50 cm) sur la position de l'avion au moment du survol radar. Les coordonnées x, y et z de la trajectoire de l'avion ont été calculées à intervalle d'une demi seconde. Ces positions permettront de valider ou de préciser quelques paramètres d'entrée du modèle

de correction géométrique ce qui pourrait améliorer la précision géométrique des ortho-images radar générée à partir des données de ce survol.

Ensuite, ces relevés GPS constituent un jeu de données très intéressant pour tester les algorithmes de positionnement OTF (on the fly) du logiciel POSICIEL développé conjointement par l'Université Laval et VIASAT Inc. dans le cadre du module 3 du projet PREDIR. Les premiers résultats montrent que des précisions supérieures à 50 cm sont attendues. Différents traitements seront réalisés à cette fin durant l'automne 1995.

À titre comparatif, le tableau 2.3 présente un sommaire des données images et terrain recueillies lors de la première année du projet.

Tableau 2.3 Sommaire des données de la première année

Saison 1993/1994 - Baie James				
Dates et heures d'acquisition	Coordonnées du centre d'image	Orbite relative	Terrain	État du couvert
16 août 1993, 10h49	54:00' N 72:12' O	240 (DES)	non	Aucun couvert
25 oct. 93, 10h49	54:00' N 72:12' O	240 (DES)	non	Sec Eq.Eau < 2 cm
12 fév. 94, 21h50	54:00' N 72:12' O	18 (ASC)	oui	Sec et stratifié Eq.Eau = 22cm
26 mars 94, 21h50	54:00' N 72:12' O	18 (ASC)	oui	Sec et stratifié Eq.Eau = 28cm
4 mai 94, 11h15	54:00' N 72:56' O	2135 (DES)	oui	Léger. humide Eq.Eau = 27cm
10 juin 94, 11h15	54:00' N 73:05' O	255 (DES)	non	Humide et partiel Eq.Eau < 25cm

2.3 Traitement des relevés de terrain de l'hiver 1995 et comparaison avec les valeurs de l'hiver 1994

Les relevés des lignes de neige ont été informatisés et filtrés afin d'éliminer certaines valeurs aberrantes résultant, par exemple, d'une erreur de lecture ou d'une balance défectueuse. L'équivalent en eau moyen de chacun des sites a ensuite été calculé. En général, il y avait moins de neige en 1995 qu'en 1994 (figure 2.2). En effet, on mesure en moyenne 17 cm d'équivalent en eau en mars 1995 alors qu'il y en avait 28 cm en mars 1994.

A partir de l'information sur les caractéristiques du couvert nival relevées aux 8 sites représentatifs, les profils typiques du couvert ont été réalisés à chacun des 14 sites. Les profils obtenus au site 11 sont présentés à titre d'exemples à la figure 2.3. On note en particulier qu'en février 1995, la neige est moins dense qu'en 1994. Par contre, lors de la prise des relevés au sol des 14 et 15 mars 1995, la neige était humide au moins dans la couche supérieure du profil. La figure 2.4 nous montre d'ailleurs la propagation de l'eau liquide dans le couvert au site 13 du 14 au 17 mars 1995. Nous devons donc être très prudent dans l'interprétation de l'image ERS-1 du 12 mars 1995, car la neige était alors bien sèche.

La figure 2.5 nous montre l'évaluation de la teneur en eau liquide à la surface du couvert de neige durant la semaine du 14 au 17 mars 1995. Cette teneur en eau est calculée à partir des relevés de la "Sonde diélectrique" qui donne la constante diélectrique moyenne de la neige pour une épaisseur de 3 cm en fonction de la densité moyenne mesurée dans les premiers 5 cm supérieurs du couvert nival. On se rend compte que la neige est saturée en surface à certains sites (4) au début de l'après-midi du 14 mars. Pour la majeure partie des sites, la teneur en eau augmente d'une journée à l'autre. Le 17 mars, il y a un regel des premiers centimètres supérieurs durant la nuit.

La résistance thermique des couverts de neige pour l'hiver 1995 a aussi été estimée. Les informations contenues dans les profils verticaux des couverts permettent tout d'abord de

déterminer l'épaisseur (h_i) et la densité (ρ) de chaque couche homogène de neige. La résistance thermique de chaque couche (R_i [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$]) est ensuite calculée selon:

$$R_i = \frac{h_i}{k_i} \quad (1)$$

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

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

où $A=2.83056 \cdot 10^{-6}$, $B=-9.09947 \cdot 10^{-5}$ et $C=0.0319739$. La densité, ρ_i , est exprimée en kg/m^3 . Ce polynôme a été déterminé à partir des données de conductivité thermique du couvert nival tirées de U.S. Army Corps of Engineer (1956). La résistance thermique de tout le couvert (R) est obtenue en faisant la somme des résistances thermiques de chaque couche homogène.

Par la suite, à partir de la densité et de l'épaisseur moyenne de chaque site tirées des lignes de neige, la résistance thermique de chaque site est estimée. Ces valeurs sont présentées à la figure 2.6 pour les mois de février et mars 1994 et 1995. L'étendue des valeurs des résistances thermiques est similaire pour février 1994 (3 à 5 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$]) et février 1995 (4 à 6 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$]). En mars 1995, la résistance thermique moyenne du couvert (2.5 à 5 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$]) a diminué légèrement suite à une augmentation de la densité du couvert. Au contraire, la résistance thermique a fortement augmenté en mars 1994 (4.5 à 7 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$]) suite à des précipitations importantes entre les deux relevés.

On constate que c'est la densité moyenne du couvert qui détermine la pente de la relation entre la résistance thermique et l'équivalent en eau et que cette pente augmente avec la densité. Ainsi, lorsque la densité moyenne du couvert est faible (200 kg/m^3), une variation unitaire de la résistance thermique engendre une variation de 3 cm de l'équivalent en eau. Si la densité moyenne du couvert est de l'ordre de 300 kg/m^3 , la variation unitaire de la résistance thermique, correspond à une variation de 10 cm.

Rappelons que nous comptons estimer l'équivalent en eau de la neige à partir des résistances thermiques déduites des rapports des coefficients de rétrodiffusion et d'une densité moyenne représentative de la région.

2.4 Correction géométrique des images ERS-1

Les images ERS-1 étalonnées de 1994 ont été transmises à VIASAT Inc. afin d'être corrigées géométriquement. Les prochains paragraphes expliquent le modèle mathématique utilisé, les capacités de la station cartographique radar et les travaux réalisés chez VIASAT.

2.4.1 Modèle mathématique

L'image radar (RSO) est créée à partir du temps de propagation pour la direction en distance et à partir de la fréquence Doppler par rapport au vecteur vitesse de la plate-forme pour la direction en azimut. Les produits traditionnels des systèmes RSO spatiaux sont des images en distance oblique ("slant range") ou terrain ("ground range"). Elles ont été générées numériquement à partir des signaux bruts. Des erreurs d'estimation de la distance oblique ou de la fréquence Doppler, et aussi, d'éphémérides (position, vitesse, temps) peuvent introduire des distorsions géométriques résiduelles.

Les distorsions observées sur les images radar, en distance oblique, sont comparables à celles rencontrées avec des images photographiques inclinées. La perspective radar dans une image est représentée comme étant orthogonale à la direction d'illumination du radar. Le déplacement apparent dû à l'élévation pour le radar se produit dans la "direction opposée" au déplacement apparent pour le visible. Cette relation étant comme la transposition d'un modèle optique développé au départ pour les images SPOT à un modèle radar devient plus évidente.

Le modèle mathématique mis au point pour corriger géométriquement des images radar s'appuie sur celui développé pour les images optiques et testé sur des images SPOT-HRV et LANDSAT-TM. Ce modèle intègre la géométrie de la plate-forme, du capteur, de la Terre, et aussi de la projection cartographique utilisée.

Les principales caractéristiques du modèle de correction géométrique sont:

- développement analytique de la condition de co-linéarité;
- modèle global plus robuste et "prévisible" en terme de précision, donc peu sensible à la distribution spatiale des points d'appui;
- peu d'inconnues (11 pour les plate-formes spatiales) qui nécessitent une dizaine de points d'appui pour la compensation par moindres carrés;
- formulations directes et inverses simples (peu d'opérations mathématiques) qui permettent l'utilisation de micro-ordinateurs (cela est particulièrement utile pour la stéréoscopie).

Le modèle mathématique développé au départ pour les capteurs optiques et les plate-formes spatiales s'applique parfaitement bien aux images radar spatiales et aéroportées, et possède les mêmes caractéristiques que celles observées pour les images optiques. Il permet ainsi de traiter les images radar selon les deux approches suivantes:

- à partir d'une image et d'un modèle numérique d'altitude (MNA), en monoscopie pour créer une ortho-image (approche télédétection), ou
- à partir de deux images, en stéréoscopie pour la formation d'un stéréo modèle sur un stéréo restituteur numérique (approche photogrammétrique).

2.4.2 Performance du modèle

L'approche télédétection utilise une image radar et un modèle numérique d'altitude pour générer les ortho-images. Comme toutes les distorsions relatives au capteur, à la plate-forme et à la Terre (dont le relief) ont été corrigées, à chaque pixel de l'élément extrait correspond les coordonnées XY du système de référence cartographique utilisé. De plus, les ortho-images résultantes de plusieurs capteurs (aéroportés ou spatiaux) peuvent être fusionnées ou mosaïquées.

Différents tests effectués sur des images aéroportées (IRIS) et spatiales (ERS-1, SEASAT) ont montré qu'avec un bon niveau de confiance, la précision de la correction géométrique et de la rectification des images radar aéroportées et spatiales est de l'ordre de un (1) à deux (2) pixels (Toutin, 1994).

2.4.3 La station cartographique radar

La simplicité mathématique du modèle permet de l'adapter à différentes méthodes de correction géométrique pour:

- 1) une image seule;
- 2) un segment d'images à partir d'une longue ligne de vol;
- 3) des segments d'images à partir d'orbites ou de lignes de vol adjacentes;
- 4) des mosaïques d'images en couleur composées à partir de différents capteurs et/ou plates-formes radar; et
- 5) un couple stéréoscopique d'images du même capteur ou de deux capteurs différents.

Les quatre premières méthodes nécessitent un modèle numérique d'altitude (MNA) pour générer des ortho-images et des mosaïques à partir d'un même capteur ou de plusieurs capteurs. Dans la quatrième méthode, des images en couleur composée peuvent être aisément créées, car elles sont superposables dans le système de référence cartographique de l'utilisateur (UTM, MTM, Lambert, etc.). La précision de l'ortho-image est entre autres fonction de celle du MNA (Tableau 2,4). Par exemple, avec une image d'ERS-1, une erreur altimétrique dans le MNA de 10 m. Créera une erreur planimétrique de 23 m. sur l'ortho-image.

Tableau 2.4 Précision du MNA pour l'obtention de la précision planimétrique recherchée et ratio erreur planimétrique/erreur altimétrique

PLATE-FORME	ANGLE DE VISÉE (DEGRÉS)	PRÉCISION RECHERCHÉE (RÉSOLUTIONS)	PRÉCISION DU MNA (MÈTRES)	RATIO PLANIMÉTRIE/ALTIMÉTRIE
SIR-C RAS-X	40	1-2	5-10	1,2
JERS-1 RAS-L	35	1-2	15-20	1,5
ERS-1 RAS-C	23	1(-2)	5-10	2,3
RADARSAT RAS-C	20-49	(1-2)	5-25	0,9 - 2,8

La cinquième méthode permet de visualiser sans MNA un couple stéréoscopique pour extraire de l'information qualitative et quantitative. La vision du relief aide à l'interprétation et à l'analyse des données radar et permet d'extraire des éléments cartographiques en trois dimensions (XYZ), tels des routes, rivières, etc., mais aussi des MNA.

Trois modules principaux regroupent les outils mathématiques utilisés par les quatre premières méthodes. Le module "RP" permet la lecture des données radar (image et paramètres de géométrie du capteur, de la plate-forme et de la Terre) enregistrées sur le disque rigide ou sur un CD-ROM. Il extrait une image brute et calcule les paramètres géométriques de l'orbite du satellite ou de la trajectoire de l'avion, du capteur RAS et de la terre. Si les paramètres de géométrie ne sont pas complets, les informations requises peuvent être fournies de manière interactive par l'utilisateur. Le module "RM" prend ces paramètres produits par "RP" et avec une liste de points d'appui (et de vérification), il calcule le modèle par un ajustement itératif par moindres carrés. Le module "RR" permet de rectifier géométriquement et de mosaïquer le ou les images à partir des paramètres de "RM" et du MNA.

2.4.4 Correction des images ERS-1 de la Baie-James

La première version de la Station cartographique radar et les différentes composantes logiciels s'y rattachant, ont été livrées à VIASAT Inc. pour être testées de façon exhaustive dans un cadre de production. Ce printemps, les six images énumérées au tableau 2.4, déjà étalonnées, ont été envoyées à VIASAT Inc. pour être corrigées par le SRC à l'aide d'un MNA. Le MNA des cartes, au 1:250 000, 33I et 33H a été produit par VIASAT Inc. avec une maille de 12.5 mètres. La précision du MNA est d'environ 20 mètres étant donné qu'il a été généré à partir de courbes de niveau dont l'équivalence est de 50 mètres pour le feuillet 33I et 100 pieds (33 mètres) pour le feuillet 33H.

VIASAT Inc. a procédé à la rectification géométrique d'une sous-image de la scène ERS-1 acquise le 26 mars 1994. La sous-image corrigée couvre la zone d'étude et s'étend sur 40 km d'est en ouest et 50 km du nord au sud (Figure 2.1). Quelques 26 points de contrôle ont été identifiés pour calculer le modèle géométrique dont les erreurs résiduelles sont de 14.7 m en x et 15.3 m en y. Rappelons que la dimension du pixel de la scène ERS-1 est de 12.5 m.

Différents tests ont été effectués au niveau de la méthode de rééchantillonnage utilisée. En effet, la station SCR permet de rectifier géométriquement une image radar en intégrant le filtrage du chatoiement. On évite ainsi de multiplier les traitements et de dégrader inutilement la radiométrie de l'image. Une analyse des résultats est en cours. Elle devrait

nous permettre d'identifier le meilleur filtre en fonction des différentes conditions d'organisation et des différents milieux.

Tableau 2.5 Images étalonnées transmises à VIASAT

Dates et heures d'acquisition		Coordonnées du centre d'image		Orbite relative
25 oct. 1993	10h49	54:00'N	72:12'O	240 (DES)
12 fév. 1994	21h50	54:00'N	72:12'O	18 (ASC)
26 mars 1994	21h50	54:00'N	72:12'O	18 (ASC)
4 mai 1994	11h15	54:00'N	72:56'O	2135 (DES)
10 juin 1994	11h15	54:00'N	13:05'O	255 (DES)
25 sept. 1994	21h52	54:00'N	72:30'O	1783 (ASC)

2.5 Proposition soumise au programme ADRO

2.5.1 Objectifs du projet de recherche proposé

Durant les mois de février et mars 1995 nous avons défini avec nos partenaires d'Hydro-Québec les objectifs d'une poursuite de nos travaux pour 1996 et 1997 à l'aide des données RADAR (RS0) du satellite RADARSAT. Une proposition de recherche a ainsi été

préparée par l'INRS-Eau et soumise au programme ADRO le 31 mars 1995. Une copie de cette proposition a été envoyée à nos partenaires d'Hydro-Québec et de VIASAT inc.

Essentiellement, la proposition demande à l'Agence Spatiale Canadienne de fournir, sans frais, 28 images du satellite RADARSAT pour réaliser les objectifs suivants:

- 1) Estimation de la distribution spatiale, à une date donnée:
 - a) du couvert de neige (présence vs absence);
 - b) de l'équivalent en eau du couvert nival;
 - c) de la neige humide (neige sèche vs neige humide);
 - d) du sol gelé;et cela à des fins de prévision hydrologique 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.

Plus spécifiquement, la méthodologie mise au point dans ce projet servira de base à l'élaboration d'une stratégie d'évaluation de l'équivalent en eau du couvert de neige partout où c'est possible sur un bassin versant, de façon à en déduire la répartition spatiale sur l'ensemble de ce bassin, en utilisant à la fois les informations déduites de la télédétection (images RSO, données micro-ondes passives) et celles provenant des données au sol (lignes de neige ou épaisseurs aux stations), lorsqu'elles sont disponibles.

De plus, l'utilisation des données RSO devrait réduire les coûts d'estimation de l'équivalent en eau tout en augmentant leur précision. Toute augmentation de la précision d'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival se traduira par un meilleur rendement des diverses centrales et des effets financiers importants. D'ailleurs, Daniel Martin, étudiant inscrit au programme de doctorat de l'INRS-Eau va étudier l'impact économique et décisionnel de l'utilisation de cette nouvelle technologie (données RSO) pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige.

A la fin des deux années de ce projet (décembre 1997), les résultats attendus sont l'atteinte des deux objectifs cités plus hauts. De plus, le but ultime de ce projet ADRO est qu'il soit suivi d'une phase pré-opérationnelle où les nouvelles méthodes utilisant les produits RADARSAT seraient intégrées au système de prévision hydrologique d'Hydro-Québec.

2.5.2 Description des images RSO demandées

Les tableaux 2.6a et 2.6b présentent le nombre, le mode et les orbites (ascendante ou descendante) des images RSO qui devront être acquises lors de chaque campagne de terrain. La période totale d'acquisition s'étend de février 1996 à octobre 1997, soit environ 18 mois. Cette période est nécessaire pour obtenir un minimum d'information permettant la mise au point et la vérification de notre méthode sur au moins deux saisons hivernales, sachant que les conditions d'accumulation et de fonte du couvert nival peuvent varier grandement d'un hiver à l'autre.

Nous avons retenu deux modes d'acquisition pour les données RSO, le Mode 1 (faisceaux standard) et le Mode 5 (SCANSAR large). Le principal avantage du Mode Standard réside dans le fait que ce type de données pourra être étalonné dans les premiers mois suivant le lancement de RADARSAT. En effet, afin d'évaluer l'équivalent en eau de la neige, nous avons besoin de déterminer le coefficient de rétrodiffusion du couvert nival et par conséquent d'images étalonnées.

Par contre, nous croyons que la résolution de 100m du mode SCANSAR large sera suffisante pour suivre l'évolution du couvert nival dans ce territoire relativement peu morcelé et que nous pourrions utiliser ce mode pour déterminer la couverture de neige humide. Toutefois, les données SCANSAR large ne pourront vraisemblablement pas être étalonnées par l'agence chargée de leur distribution avant plusieurs mois après le lancement, de sorte qu'il pourra s'avérer impossible d'en extraire des informations quantitatives suffisamment précises à court terme. Comme, le Mode 5 couvre une superficie beaucoup plus grande que celle des images de Mode 1, ce mode devrait permettre de réduire les coûts d'acquisition de la couverture RSO d'un très grand territoire (Bassin La Grande, environ 100 000 km²), rendant possible des économies additionnelles pour l'utilisateur final. L'enjeu économique est par conséquent suffisamment important

Tableau 2.6a: Plan d'acquisition des données de RADARSAT (première année)

Période	Nombre d'images	Mode	Heure locale	Angle d'incidence	Campagnes de terrain	Variables étudiées
Automne 1995	-	-	-	-	Installation de sondes thermiques et diélectriques	-
Hiver 1996						
Début février	1	Standard	6:00	<30°	T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage)	Équivalent en eau du couvert nival
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Fin mars	1	Standard	6:00	<30°	T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage)	Équivalent en eau du couvert nival
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Printemps 1996						
Fin avril (début de la fonte)	2	SCANSAR à 3 jours d'intervalle	18:00		T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage) Teneur en eau de la neige	Neige sèche vs neige humide
Fin mai	2	SCANSAR à 3 jours d'intervalle	18:00		Distribution de l'équivalent en eau; Teneur en eau de la neige; Teneur en eau du sol; T[°C] et Constante diélectrique du sol;	Discrimination neige vs sol nu (couvert partiel)
Automne 1996						
Début octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol; Vérification de l'installation des sondes.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Mi-octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Fin octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			

Tableau 2.6b: Plan d'acquisition des données de RADARSAT (deuxième année)

Période	Nombre d'images	Mode	Heure locale	Angle d'incidence	Campagnes de terrain	Variables étudiées
Hiver 1997						
Début février	1	Standard	6:00	<30°	T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage)	Équivalent en eau du couvert nival
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Fin mars	1	Standard	6:00	<30°	T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage)	Équivalent en eau du couvert nival
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Printemps 1997						
Fin avril (début de la fonte)	2	SCANSAR à 3 jours d'intervalle	18:00		T[°C] et Constante diélectrique du sol; Caractéristiques du couvert de neige (fosses); Mesure de l'équivalent en eau (carottage); Teneur en eau liquide de la neige.	Neige sèche vs neige humide
Fin mai	2	SCANSAR à 3 jours d'intervalle	18:00		Distribution de la neige; Teneur en eau de la neige; Teneur en eau du sol; T[°C] et Constante diélectrique du sol;	Discrimination neige vs sol nu (couvert partiel)
Automne 1997						
Début octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol; Vérification de l'installation des sondes.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Mi-octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
Fin octobre	1	Standard	6:00	<30°	T[°C], humidité et constante diélectrique du sol.	Répartition spatiale du gel
	1	SCANSAR	6:00 ou 18:00			
TOTAL	28					

pour que nous souhaitions vérifier le potentiel des données SCANSAR (Mode 5). C'est pourquoi, nous demandons les deux types de données pour l'hiver et l'automne.

2.5.3 Organisation et coût du projet

L'INRS-Eau serait le maître-d'oeuvre du projet. Le Dr Monique Bernier, professeure à l'INRS-Eau, assurerait la responsabilité administrative et scientifique du projet. Elle serait secondée dans cette tâche par le Dr. Jean-Pierre Fortin. La recherche et le développement seraient essentiellement faits par l'équipe de l'INRS-Eau.

Hydro-Québec serait à la fois l'utilisateur final des méthodologies développées et le pourvoyeur de fonds pour le développement des méthodologies. En tant qu'utilisateurs des méthodologies Messieurs Bisson et Weyman nous aviseraient de leurs besoins et de leurs contraintes techniques et financières tout au long de la recherche, ce qui favoriserait le développement d'outils utiles et pertinents. M. Stéphane Chalifoux, comme coordonnateur de la télédétection à Hydro-Québec, s'assurerait que l'expertise gagnée par ce projet sera conservée au sein de l'organisation. D'autre part, Hydro-Québec financerait les coûts associés à cette recherche pour l'INRS-Eau (soient 86 156\$ pour 1996 et 91 688\$ pour 1997), les coûts de transport à la zone d'étude et les coûts de séjour sur place. De plus, le personnel d'Hydro-Québec participerait à la cueillette des données de terrain, ce qui faciliterait la logistique et permettra des échanges d'idées entre le personnel de l'INRS-Eau et celui d'Hydro-Québec.

La compagnie VIASAT Inc serait essentiellement responsable de la correction géométrique des images RSO, images qui seraient ensuite analysées à l'INRS-Eau. Monsieur Pierre Vincent, associé et professionnel en télédétection, conseillerait aussi l'équipe de l'INRS-Eau sur le développement de méthodes opérationnelles.

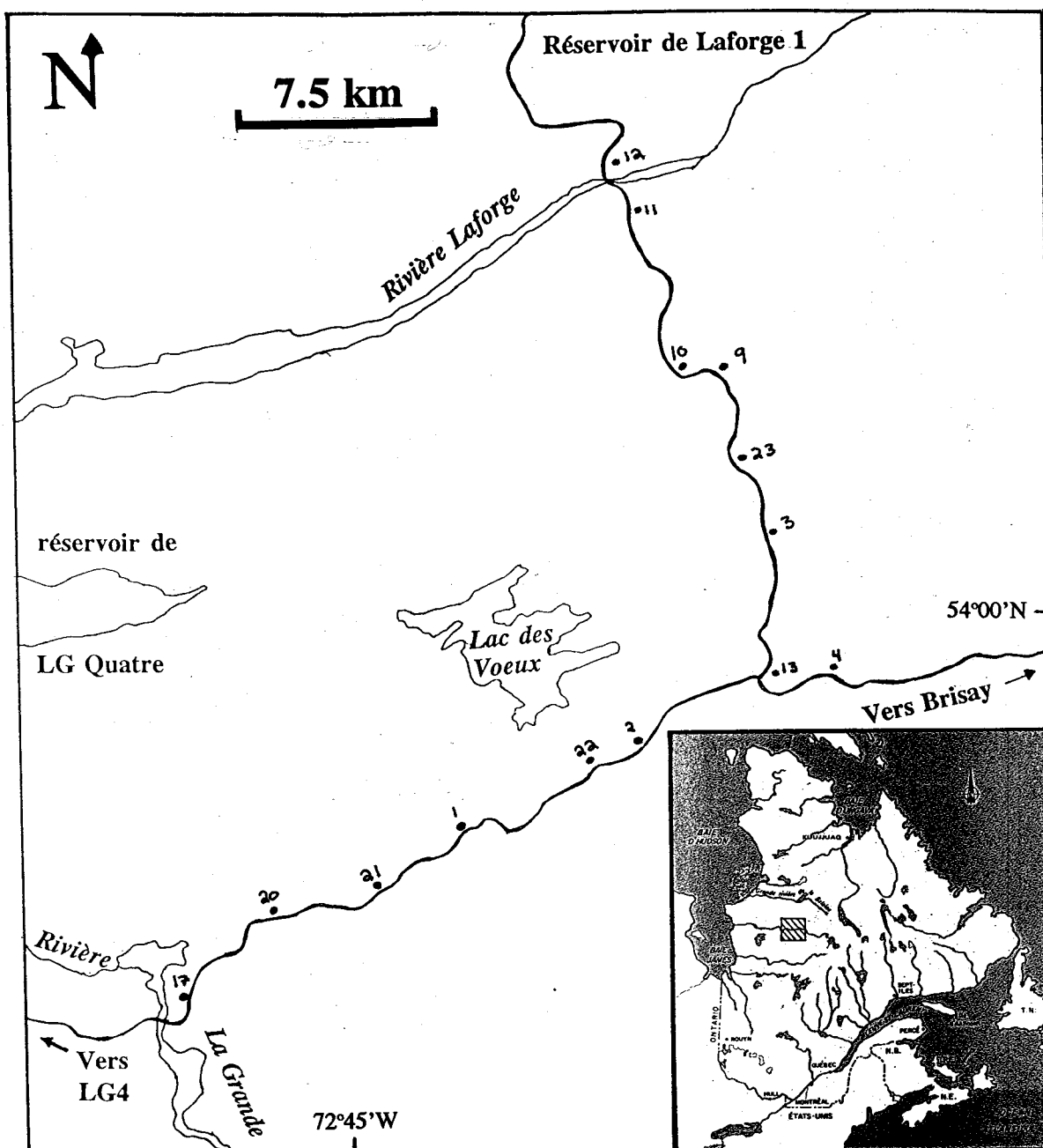


Figure 2.1 Localisation des sites expérimentaux.

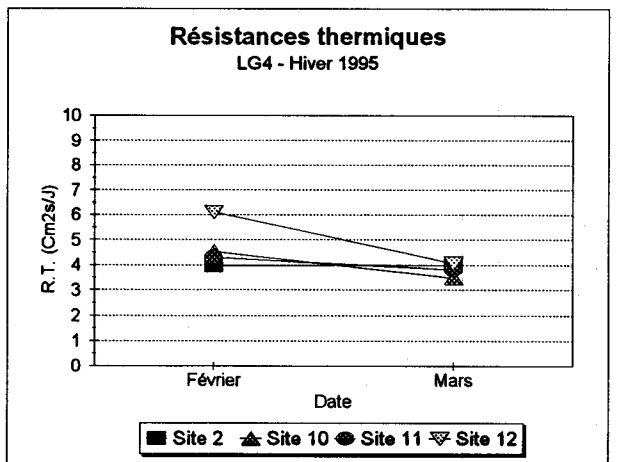
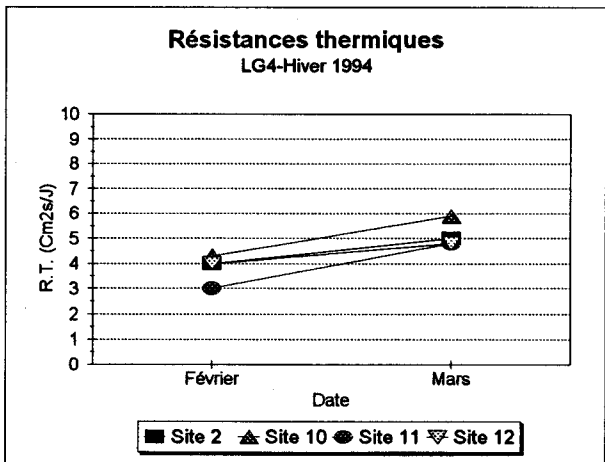
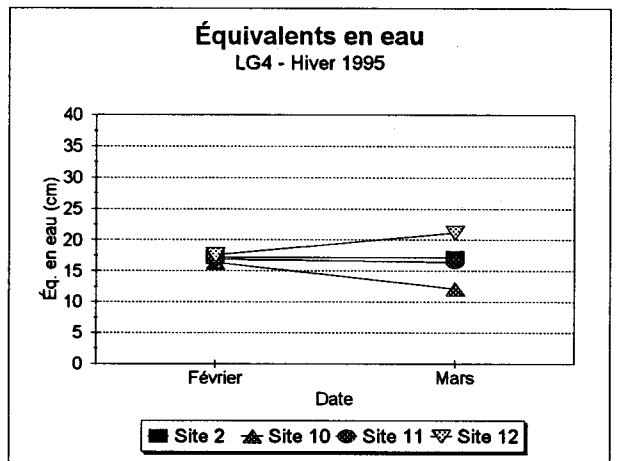
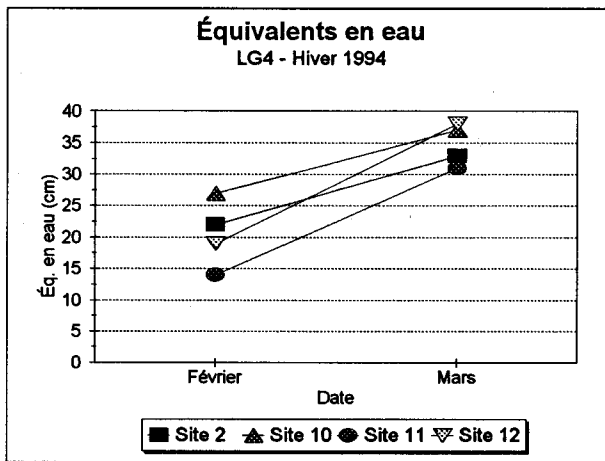
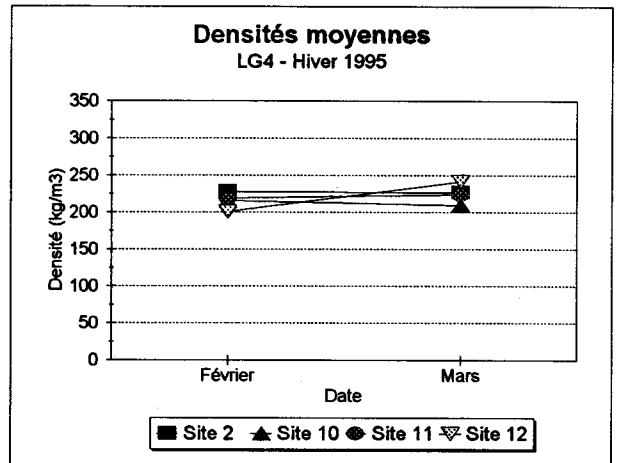
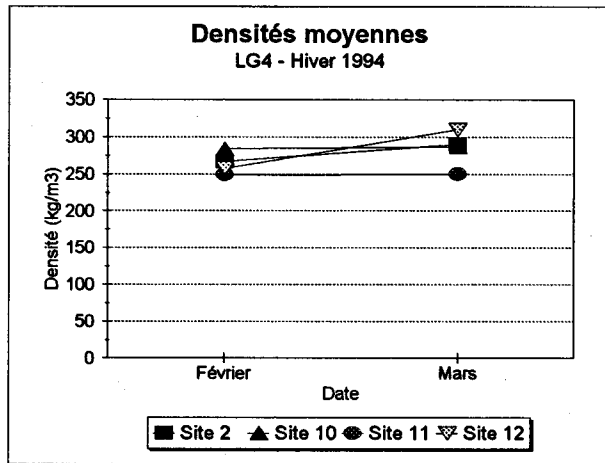


Figure 2.2 Évolution de la densité (a) de l'équivalent en eau (b) et de la résistance thermique (c) entre février et mars pour l'hiver 1994 et l'hiver 1995.

PROFILS DE NEIGE DU SITE 11
LG4 - HIVERS 1994 ET 1995

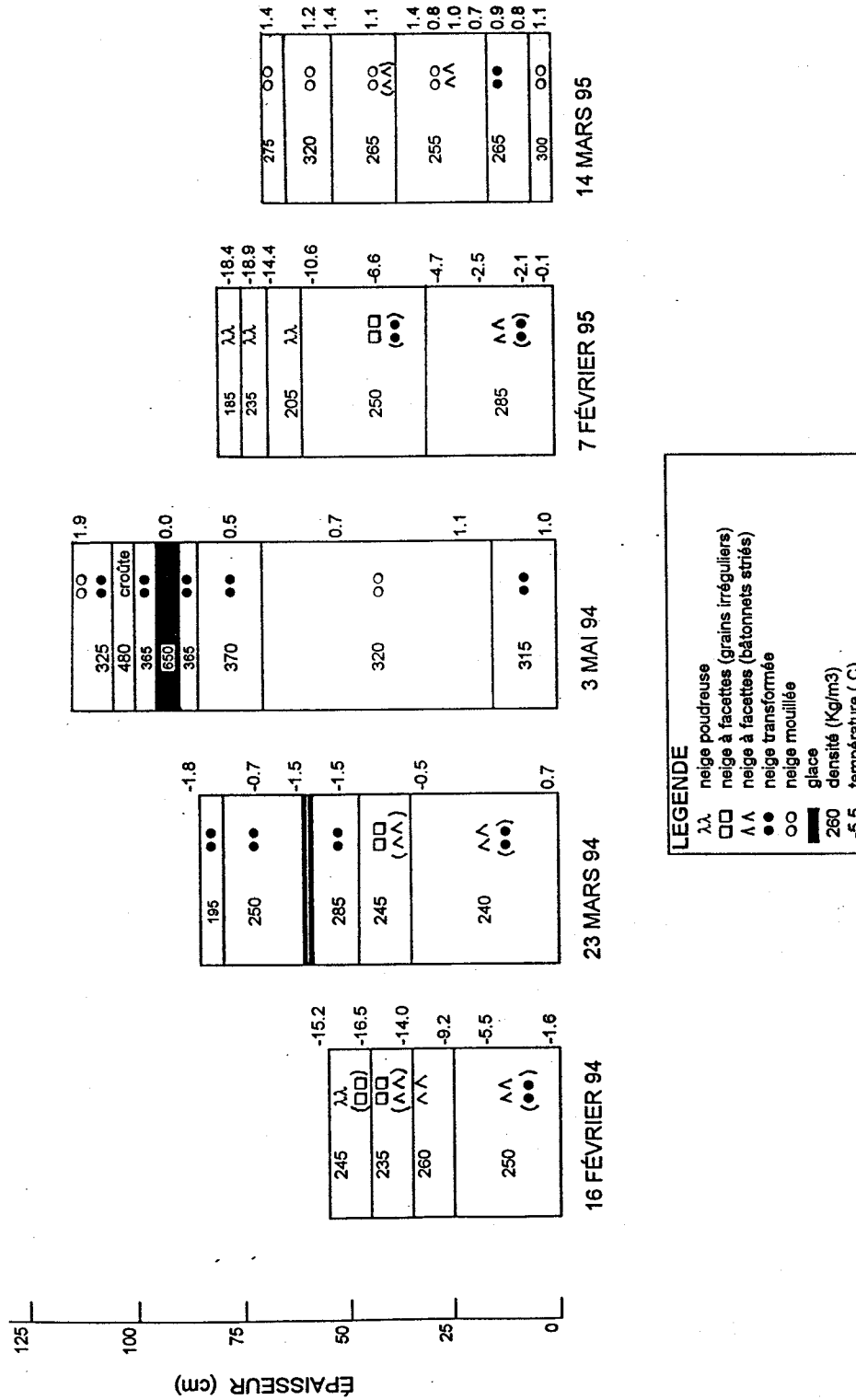


Figure 2.3 Comparaison des profils du couvert nival pour l'hiver 1994 et 1995.

PROFILS DE NEIGE DU SITE 13
LG4 - HIVER 1995

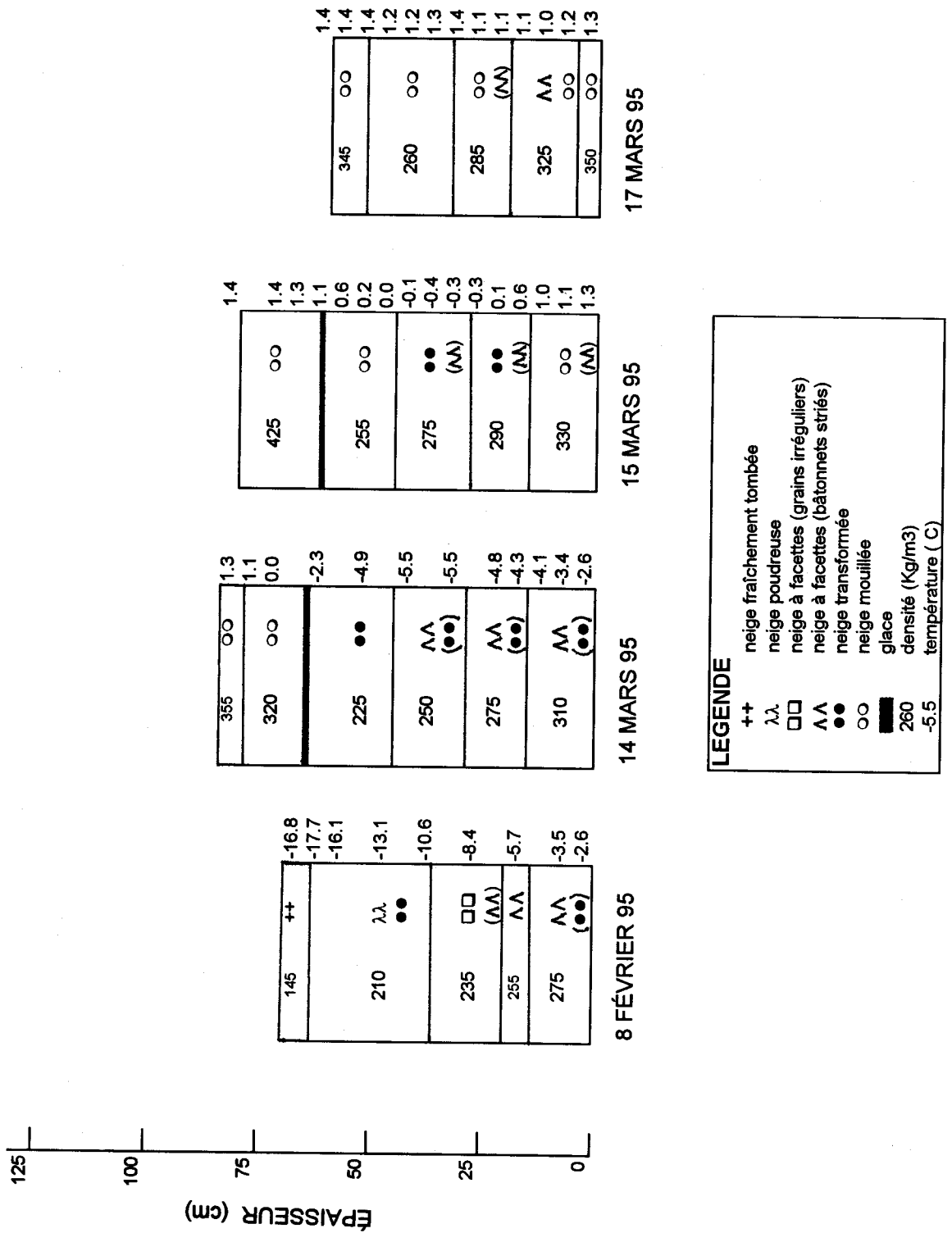


Figure 2.4 Évolution des caractéristiques du couvert nival durant la semaine du 14 au 17 mars 1995.

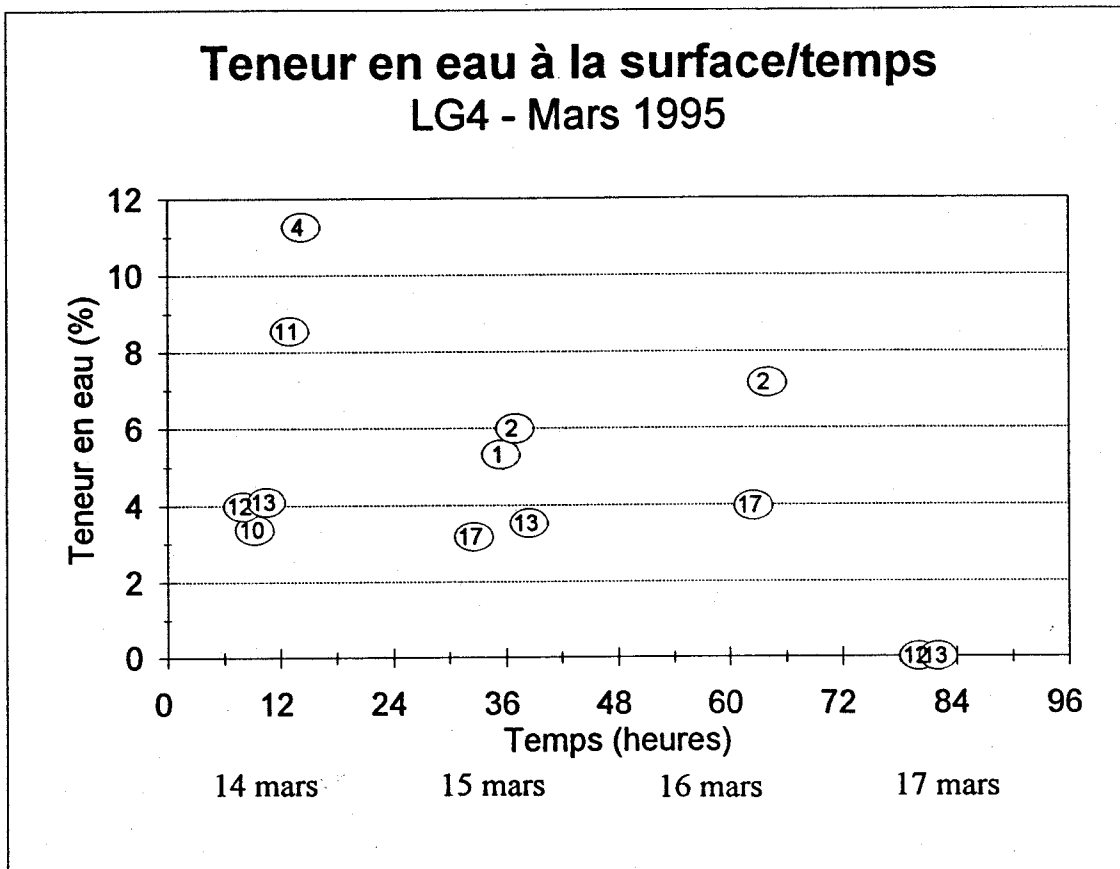


Figure 2.5 Évolution de la teneur en eau liquide à la surface du couvert nival.

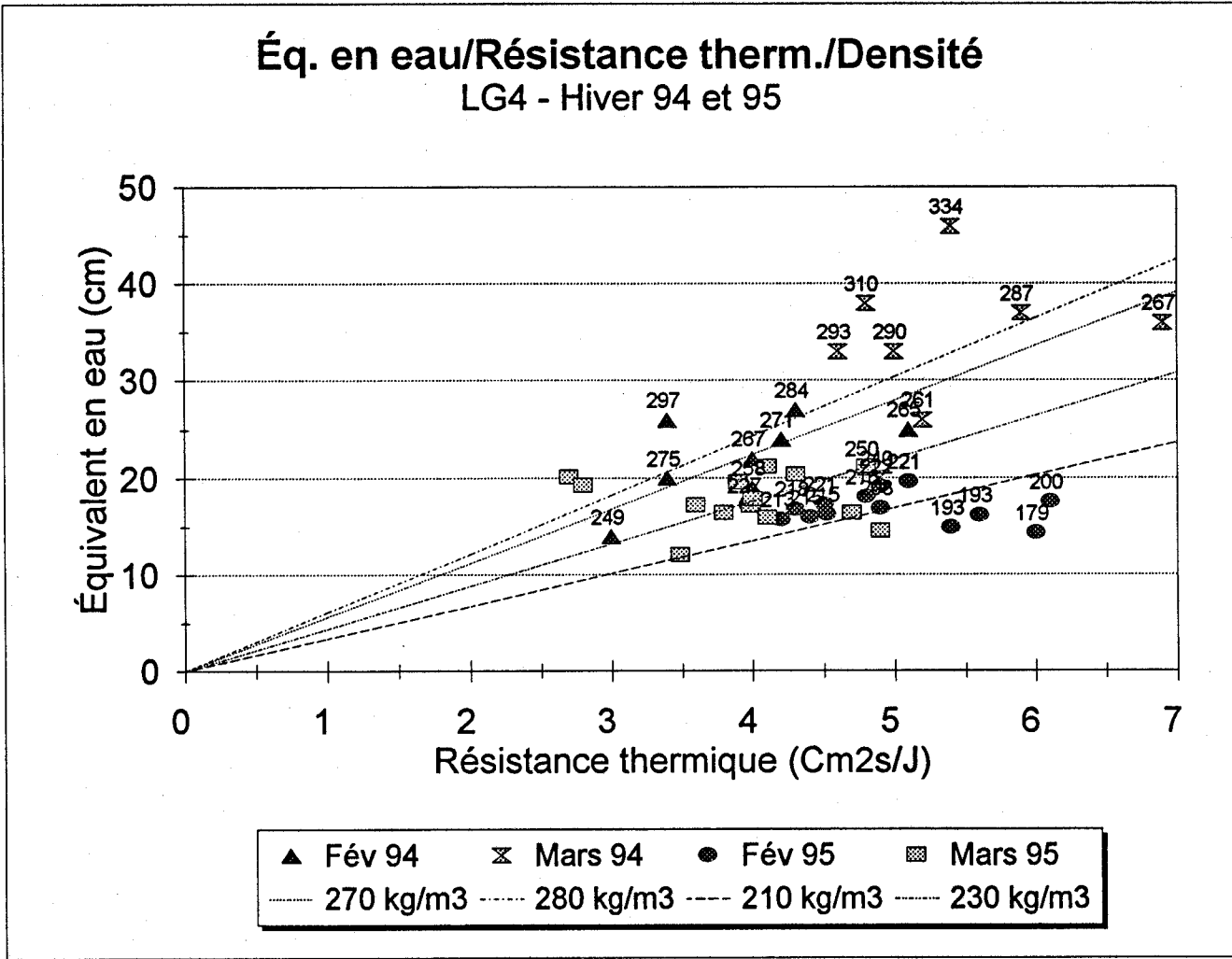


Figure 2.6 Relation entre l'équivalent en eau et la résistance thermique de la neige.

3 ACTIVITÉS À RÉALISER

3.1 Lecture et étalonnage radiométrique des images ERS-1 de l'hiver 1995

Les images du 8 novembre 1994, des 3 et 10 février 1995 ainsi que celle du 12 mars 1995 seront lues sur le système de traitement d'images EASI/PACE de PCI et l'étalonnage radiométrique absolu sera effectué par le programme fourni par le Centre Canadien de Télédétection. Les intensités des images seront aussi transformées en coefficients de rétrodiffusion (dB). Les sous-images du secteur d'étude seront créées.

3.2 Correction géométrique des images de la saison 1994/1995

Les images du 8 novembre 1994, des 3 et 10 février 1995 ainsi que celle du 12 mars 1995 seront corrigées géométriquement par la firme VIASAT, avec la méthodologie appliquée sur les images de l'hiver 1993/1994.

3.3 Traitements des données images

Les sites de mesures de terrain seront localisés sur les images déjà corrigées géométriquement et le coefficient de rétrodiffusion moyen de chaque site sera extrait. Par la suite, nous appliquerons sur les coefficients, un modèle de correction des effets de l'azimuth et de l'angle d'incidence. Ce modèle a été développé à partir de trois hivers de données ERS-1 acquises dans la région de La Pocatière. Finalement, nous calculerons les rapports de rétrodiffusion en soustrayant les valeurs des images sans neige de celles des images d'hiver.

D'autre part, une classification de l'utilisation générale du sol du territoire d'étude devra être faite pour établir l'impact de la végétation sur le rapport de rétrodiffusion et sur l'équivalent en eau du couvert de neige. Cette classification devrait être faite à partir d'une image Landsat-TM.

Enfin, le traitement des images aéroportées acquises le 17 mars 1995 sera effectué à partir de l'automne 1995 par un stagiaire post-doctoral.

3.4 Évaluation du lien entre le rapport de rétrodiffusion et l'équivalent en eau

Lors d'une première analyse des images ERS-1 acquises à l'hiver 1994, nous avons observé une augmentation du coefficient de rétrodiffusion conséquente à une augmentation du couvert de neige, principalement en terrain dégagé. La correction géométrique des images permettra maintenant de détailler notre analyse en comparant le rapport de rétrodiffusion de chaque site de mesures et les caractéristiques du couvert de neige à cet endroit. De plus, l'ajout des données de la deuxième année de mesure nous fournira un meilleur éventail de conditions hivernales puisque les couverts de neige sont significativement différents en 1995. Il sera alors possible de préciser le lien qui existe entre l'équivalent en eau et le signal du satellite. En se basant sur notre expérience antérieure, nous établirons alors les critères permettant d'optimiser cette relation pour en venir alors à une première cartographie de l'équivalent en eau.

4 CONCLUSION

Les progrès réalisés jusqu'ici sont assez importants pour que nous puissions atteindre l'objectif de ce projet de recherche d'ici la fin de l'année 1995, soit vérifier le potentiel du radar pour estimer l'équivalent en eau du couvert nival sur les bassins de la Baie James.

D'autre part, la réalisation du volet micro-ondes passives subventionné par le programme CRSNG-Industrie a débuté en mars. L'objectif principal de ce volet est de vérifier la possibilité d'estimer l'équivalent en eau du couvert nival à la Baie James à partir des données du capteur SSM/1 opérant dans les micro-ondes passives. Les résultats préliminaires de cette recherche seront présentés sous forme d'un rapport au CRSNG en septembre prochain, une copie du rapport sera envoyée à Hydro-Québec.

5 RÉFÉRENCES

Toutin, T. (1994). Cartographie à partir d'images radar. *Journal canadien de télédétection*, 20(2): 171-179.

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