

REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE
DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE

Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) :



Les photocopies effectuées par l'étudiant(e) seront sous sa responsabilité.

ou par le

Service de documentation :



Danielle De Sève
Nom

Danielle De Sève
Signature

Nom du directeur de recherche: Monique Bernier

Nom du co-directeur de recherche: Jean-Pierre Fontin

Boursier ou non-boursier: (FCAR 96-98)

Université du Québec
INRS-Eau

**DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME POUR CARTOGRAPHIER
L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE AU SOL (EEN) DANS UN
ENVIRONNEMENT DE TAÏGA À PARTIR DES DONNÉES DE MICRO-ONDES
PASSIVES DU CAPTEUR SSM/I**

par
Danielle De Sève
Maîtrise en Géographie (M.Sc)

Thèse présentée
pour l'obtention
d'un grade de Philosophiae doctorat (Ph.D.)
en Sciences de l'eau

Jury

Président du jury et examinateur externe

Dr. Kalifa Goïta
Université de Moncton
Campus d'Edmundston
École des sciences forestières

Examineur externe

Dr. Claude Duguay
Université Laval
Département de Géographie
Centre d'étude Nordique

Examineur interne

Dr. Gérald. H. Jones
Université du Québec
INRS-Eau

Co-directeur

Dr. Jean-Pierre Fortin
Université du Québec
INRS-Eau

Directeur de recherche

Dr. Monique Bernier
Université du Québec
INRS-Eau

Thèse soutenue le 24 septembre 1999

© droits réservés de Danielle De Sève

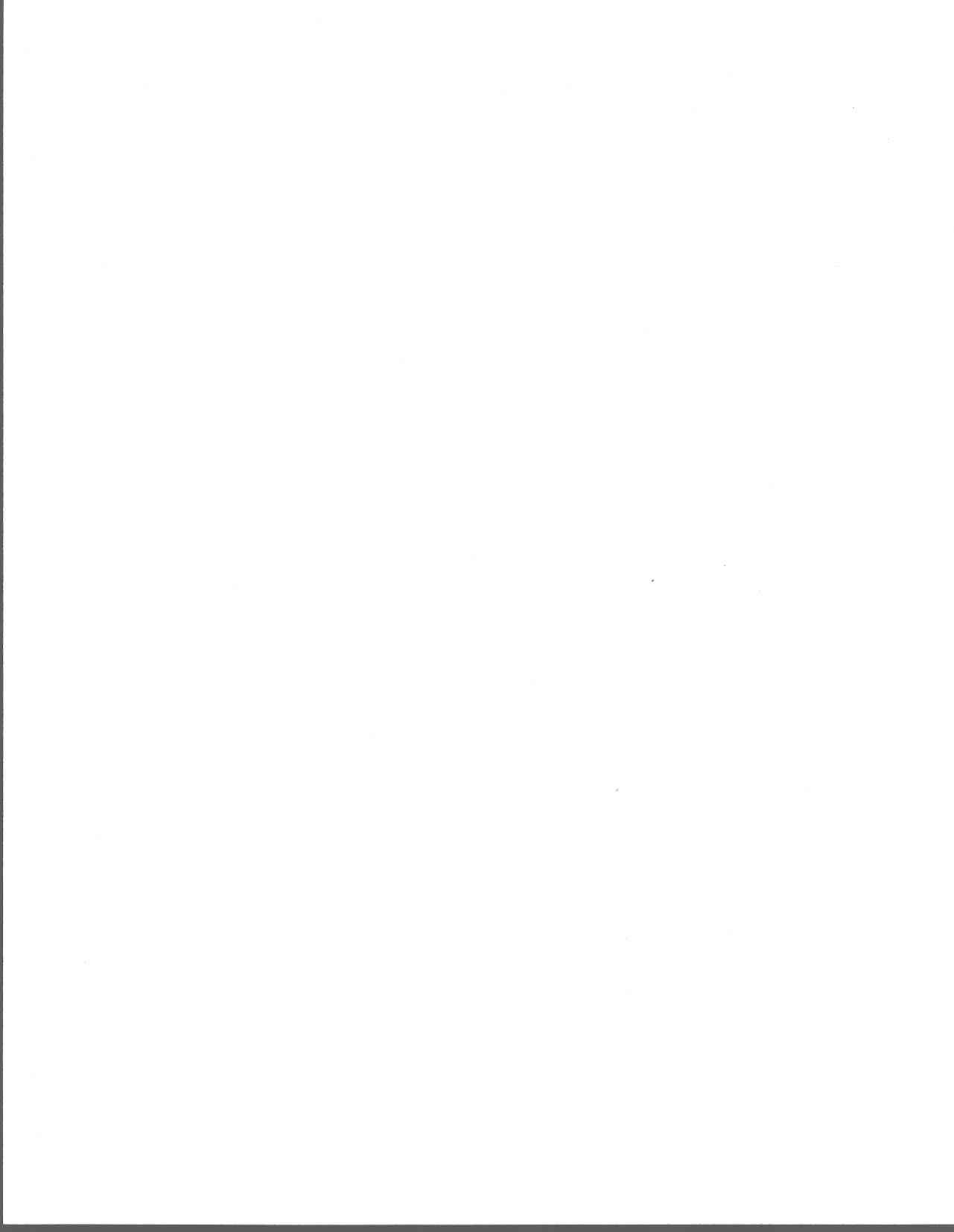


TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
DÉDICACE	vii
REMERCIEMENTS	viii
RÉSUMÉ	ix
PARTIE I	1
1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs de la recherche	12
1.3 Présentation de la thèse	14
2 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES	17
2.1 L'émission des micro-ondes	17
2.2 La conservation de l'énergie	19
2.3 Les températures de brillance	20
2.4 Les paramètres influençant la radiométrie du couvert nival	23
2.4.1 La constante diélectrique complexe du couvert nival	23
2.4.2 La diffusion de surface	27
2.4.3 Le coefficient d'extinction	31
2.4.4 La fréquence et l'angle d'incidence	34
3 DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE ET DES DONNÉES	37
3.1 Le site expérimental	37
3.2 Description des données de télédétection	41
3.3 Description des données de terrain	41
3.3.1 Caractérisation du couvert nival	43
4 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES	49
4.1 Extraction et pré-traitement de l'information	49
4.1.1 Projection des données SSM/I	49
4.1.2 Interpolation des données SSM/I	49
4.1.3 Estimation de l'EEN aux stations météorologiques	50
4.1.4 Intégration des données dans un SIG	53

5	ANALYSE TEMPORELLE	55
5.1	Présentation du protocole d'analyse	55
5.1.1	Variation des Tb à 19 GHz V	56
5.1.2	Variations des Tb à 37 GHz	56
5.1.3	comparaison des Tb à 37 GHz du site d'étude aux valeurs de Tb simulées issues de la littérature	65
6	ÉVALUATION DE L'IMPACT DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL SUR LA VARIABILITÉ DES TB DE LA NEIGE	69
6.1	Variations mensuelles des Tb de la neige en fonction des classes d'occupation du sol	69
6.2	Évaluation sous-pixel de la radiométrie des Tb de la neige en fonction des différentes classes d'occupation du sol	72
7	ÉLABORATION D'UN ALGORITHME POUR ESTIMER L'EEN	83
7.1	Élaboration du protocole	83
7.1.1	Création des facteurs de pondération a_i et b_i	84
7.1.2	Création des facteurs de pondération c	85
7.2	Évaluation des Tb corrigées à 37 et 19 GHzV	89
7.3	Comparaison du GTV et du GTVP pour des pixels homogènes et des pixels mixtes	91
8	DISCUSSION	95
8.1	Estimation de l'EEN et l'erreur type des estimés	95
8.2	Limite de la méthode des micro-ondes passives	99
8.3	Application d'un prototype pour estimer l'EEN à partir de la méthode du GTVP	103
8.4	Comparaison entre les algorithmes du GTV et du GTVP pour estimer l'EEN dans différents types d'environnements au Canada	107
9	CONCLUSION	111
	RÉFÉRENCES	115
	PARTIE II	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Évaluation des coefficients de réflexion de Fresnel (Γ) en puissance pour un capteur à 37 GHz en polarisation verticale (V) et horizontale (H)	30
Tableau 2. Caractéristiques de la neige aux lignes de neige	45
Tableau 3. Statistiques concernant l'atténuation du signal à 37 GHz (V) pour deux secteurs de la zone d'étude	62
Tableau 4. Classification de l'image NOAA/AVHRR du Québec	74
Tableau 5a. Inférences statistiques sur la régression linéaire entre la classe LR et les Tb	81
Tableau 5b. Inférences statistiques sur la régression linéaire entre la classe FF et les Tb	81
Tableau 6. Inférences statistiques sur la régression linéaire entre le GTV pour des pixels homogènes et les coordonnées Y et X des sites de mesure de la neige	88
Tableau 7. Estimation de l'EEN et l'erreur type des estimés (ETE) pour les hivers 1996-1997 et 1997-1998	96
Tableau 8. Estimation de l'EEN et l'erreur type des estimés (ETE) pour les hivers 1993-1994, 1994-1995 et 1995-1996	98
Tableau 9. Évaluation des erreurs de pondération liées au décalage de positionnement de l'image NOAA/AVHRR par rapport aux images SSM/I	101
Tableau 10. Inférences statistiques sur la régression linéaire entre les EEN et le GTVP ₄	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les températures de brillance apparentes	21
Figure 2. Relation entre la partie réelle de la constante diélectrique de la neige ϵ'_n et la densité de la neige ρ_n	25
Figure 3. Diffusion de surface	28
Figure 4. Le coefficient d'extinction K_e , d'absorption K_a et de diffusion K_s	33
Figure 5. Variations des T_b selon l'angle d'incidence et la fréquence	35
Figure 6. Localisation du site d'étude	39
Figure 7. Caractéristiques de la neige pour les hivers 1993-1993 à 1997-1998	47
Figure 8. Relation entre les accumulations d'EEN mesurées au sol et celles estimées aux stations météorologiques corrigées en fonction du vent et non-corrigées en fonction du vent (octobre 1993 à mars 1998)	52
Figure 9. Variations des T_b à 37 et 19 GHz en fonction de l'EEN (1996-1997 à 1997-1998)	57
Figure 10. Variations de l'émissivité à 35 GHz en fonction de l'EEN selon les travaux de Mätzler (a) et l'indice développé par Hallikainen et Jolma (b)	59
Figure 11. Variations de l'émissivité en fonction des fréquences et de la taille des grains	60
Figure 12. Variations de la température du sol et de la neige	64
Figure 13. Comparaison des T_b simulées à 37 GHz issues de la littérature et des données expérimentales du site d'étude	67
Figure 14. Variations des T_b moyennes mensuelles à 37 GHz pour différentes classes d'occupation du sol	70
Figure 15. Estimation des pourcentages de chacune des trois classes d'occupation du sol retenues pour chaque pixel SSM/I.	75
Figure 16. Variations des T_b à 37 et 19 GHz en relation avec le pourcentage de superficie des classes LR et FF dans le pixel par rapport à la classe FO	77
Figure 17. Variations du GTV pour des pixels homogènes selon des axes nord-sud et est-ouest pour différentes classes d'EEN (mm)	87
Figure 18. Variations des T_b à 37 et 19 GHz en fonction de l'EEN pour des pixels mixtes et pour des pixels mixtes pondérés	90
Figure 19. Variations du GTV et du GTVP en fonction de l'EEN pour des pixels homogènes et mixtes	92
Figure 20. Décalage du pixel SSM/I	100
Figure 21. Organigramme de la méthodologie proposée	104
Figure 22. Comparaison des algorithmes d'estimation de l'EEN pour différents types d'environnements au Canada	108

DÉDICACES

À mon ami Eric qui depuis plusieurs années déjà, partage ma vie, mes passions et mes rêves .

À ma mère que j'aime profondément et qui m'a toujours encouragée à poursuivre mes rêves.
Merci pour la confiance que tu as en moi et en tous tes autres enfants.

À mes soeurs Diane, Nathalie qui sont les meilleures amies que l'on pourrait espérer avoir.

À mon bon ami Sylvain.

REMERCIEMENTS

Ce projet a pu être réalisé grâce à la collaboration de nombreuses personnes. J'aimerais d'abord exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Madame Monique Bernier pour son enthousiasme et la confiance qu'elle a mis en moi, mais également pour sa patience, sa disponibilité et ses précieux conseils.

J'aimerais également remercier mon co-directeur Jean-Pierre Fortin pour son dévouement et ses précieux conseils qui ont éveillé en moi un esprit scientifique plus critique.

Je ne pourrais passer sous silence la contribution de monsieur Yves Gauthier qui a toujours accepter de réviser avec compétence mes articles en anglais et m'a également apporté de l'aide en traitement d'images. Je tiens aussi à souligner les conversations stimulantes qui ont également contribuer à analyser mon travail sous un angle différent.

Je veux aussi souligner l'aide non formelle de nombreux collègues qui ont répondu avec intérêts à mes nombreuses questions tant aux niveau informatiques que scientifiques soit: Richard Turcotte professionnel de recherche en Hydrologie, Alain Royer technicien en informatique, Mario Haché assistant de recherche en Hydrologie statistique et finalement Marie Emmanuelle Quentin étudiante au doctorat.

Je remercie aussi l'INRS, la Fondation FCAR, le Programme CRYSYS, le Ministère des Affaires Indiennes et du Nord pour l'apport financier qui a permis la réalisation de cette thèse. Un merci tout spécial à madame Anne Walker et Barry Goodison d'Environnement Canada qui ont toujours manifesté un intérêt pour mes recherches et m'ont apporté à certaines occasions leur expertise scientifique. Merci aussi à Raymond Gauthier d'Hydro-Québec pour son aide sur le terrain, sa bonne humeur et ses encouragements toujours appréciés.

Ma profonde gratitude va également à Éric mon ami pour son écoute, sa patience et sa compréhension. Je le remercie également pour ses conseils importants lors de la révision de mes travaux et son assistance lors de mes travaux de terrain à Shefferville en mars 1998.

En terminant, j'aimerais sincèrement remercier ma famille qui m'a toujours apporté un soutien moral et parfois financier afin que je puisse réaliser cette thèse. Leurs encouragements constants, m'ont permis de ne jamais me décourager lors des moments plus difficiles et de toujours garder confiance en moi.

RESUMÉ

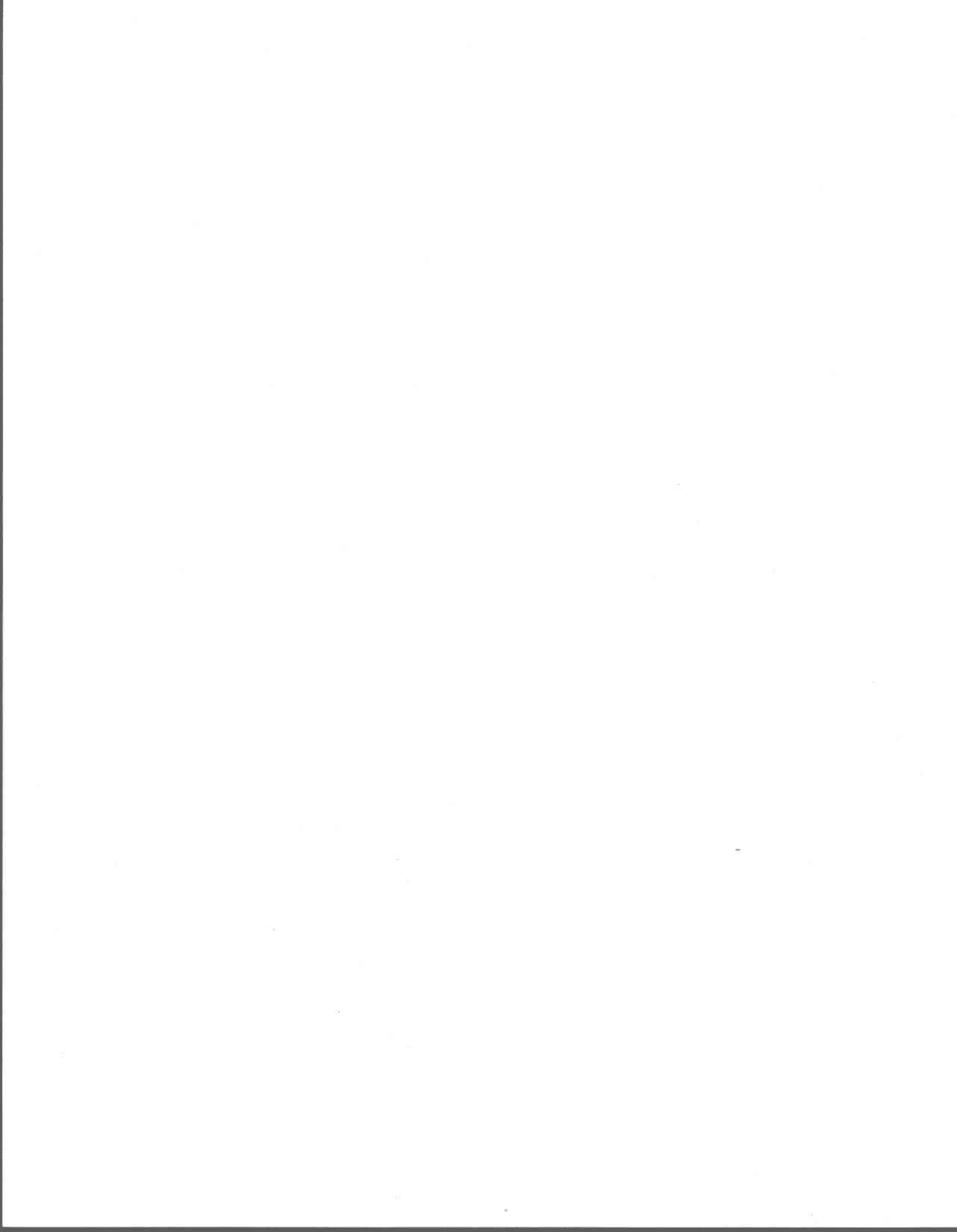
Depuis septembre 1995, l'Institut national de la recherche scientifique à Québec (l'INRS-Eau) s'est associé avec le Service de l'Environnement Atmosphérique (SEA) d'Environnement Canada dans le cadre du programme CRYSYS afin d'évaluer la variation spatio-temporelle des T_b de la neige pour un environnement de taïga (Nord du Québec). Le but de cette recherche consiste premièrement, à effectuer une analyse spatio-temporelle des données SSM/I, afin de mieux comprendre les variations saisonnières des températures de brillance de la neige au sol, deuxièmement, évaluer l'impact de l'occupation du sol sur la variabilité du signal micro-onde de la neige et finalement, développer un algorithme en micro-ondes passives qui soit adapté à l'environnement de taïga pour estimer l'EEN.

Les résultats de l'analyse temporelle pour les données SSM/I des hivers 1996-1997 et 1997-1998 montrent une diminution des T_b à 37 GHz avec l'augmentation des valeurs d'EEN et une inversion de la relation lorsque les EEN sont supérieurs à 150 mm. La diminution des valeurs de T_b est directement liée à l'augmentation de la diffusion de volume dans le stock de neige et par le fait même à l'augmentation de l'EEN, alors que l'inversion de la relation est causée par le fait que la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques est inférieure à l'épaisseur du couvert nival. À 19 GHz, on remarque que les T_b sont peu corrélées avec les valeurs d'EEN. En fait, la fluctuation des T_b est plutôt associée à la variation des températures de l'air.

L'évaluation de l'impact de l'occupation du sol sur la variabilité des données SSM/I a permis de mettre en évidence l'influence des zones forestières et des lacs gelés sur la variation du signal de la neige. En fait, à l'aide d'une analyse sous-pixel, nous avons démontré que l'augmentation du pourcentage de forêts ou de lacs dans un pixel SSM/I, contribuait à augmenter la valeur radiométrique du pixel. Ce qui a comme conséquence de créer une certaine confusion lorsque l'on tente d'estimer l'équivalent en eau de neige (EEN) au sol.

Afin de minimiser l'impact de l'occupation du sol sur la contamination des pixels SSM/I, nous proposons une méthode de gradient de température en polarisation verticale pondérée (GTVP). Les facteurs de pondération (a_i et b_i) sont construits en tenant compte de la relation entre l'augmentation de la valeur des T_b de la neige à 37 GHz et celle du pourcentage de forêts fermées (FF) et de lacs et réservoirs (LR) dans le pixel. Un troisième facteur de pondération (facteur c) permet de minimiser l'impact lié aux conditions physiques de la neige. La méthode proposée permet d'améliorer la précision des estimés de 19 % comparativement à une méthode classique de gradient spectral (GTV) pour estimer l'EEN.

PARTIE I



1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

La présence du couvert nival dans l'hémisphère nord influence considérablement le système climatique à l'échelle de l'Amérique du Nord. En effet, la présence de neige au sol modifie le bilan énergétique de la terre puisqu'elle réfléchit environ 80% des rayons solaires. Une diminution des accumulations nivales en hiver peut donc avoir comme conséquence de modifier le bilan énergétique terrestre et par le fait même augmenter le transfert de chaleur vers l'atmosphère. Il en résulterait éventuellement une hausse des températures (Peixoto et Oort, 1992). Ainsi, tout changement lié à la distribution du couvert nival a un impact important sur le climat et par ricochet sur le cycle hydrologique des régions continentales et nordiques. Pour être en mesure d'analyser tous ces changements, il est préalablement nécessaire d'estimer la distribution et la quantité de la neige au sol, d'année en année. Les mesures de la neige au sol sont en général réalisées par carottage. Toutefois, à cause de l'inaccessibilité de plusieurs zones des hautes latitudes et de la superficie de ces secteurs, le travail de terrain devient difficile et onéreux. Dans cette optique, la télédétection micro-onde offre une alternative intéressante, permettant une fréquence suffisante de prise de données et une vision synoptique du territoire. Mentionnons par ailleurs, que les micro-ondes sont relativement indépendantes des contraintes atmosphériques et de l'éclairement solaire.

Pour la caractérisation du couvert nival, l'utilisation des micro-ondes passives est particulièrement intéressante. En effet, elle offre la possibilité d'effectuer le suivi du couvert nival sec et humide et permet aussi de déterminer l'épaisseur et l'équivalent en eau de la neige au sol (EEN). Le potentiel réel des micro-ondes passives réside dans le fait que les radiations micro-ondes de la neige sèche sont très sensibles aux variations du stock de neige, particulièrement pour les fréquences supérieures à 15 GHz. L'intensité des radiations micro-ondes de la neige tend donc à diminuer au fur et à mesure que le couvert de neige épaissit ou encore que l'EEN augmente (Hallikainen, 1984). La diminution de l'intensité des radiations est directement reliée à la redistribution de l'énergie causée par la diffusion de volume de