



Cartel Centre d'applications et de
recherches en télédétection

GB
2601.72
R42 L37
2003

**Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

**Étude de la variation spatio-temporelle du couvert nival par
télédétection micro-ondes passives et validation du Modèle
Régional Canadien du Climat (MRCC)**

Alexandre Langlois, 1979 -

I-1992

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en géographie physique, cheminement Télédétection**

Mars 2003

© Alexandre Langlois, 2003

Directeur de recherche: **Alain Royer**

Membres du jury :

Michel Fily (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de
l'Environnement LGGE, Grenoble, France)

René Laprise (Groupe canadien de modélisation régionale du climat,
Université du Québec à Montréal)

Hardy Granberg (Département de géographie et télédétection, Université de
Sherbrooke)

Résumé

Département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

Étude de la variation spatio-temporelle du couvert nival par télédétection micro-ondes passives et validation du Modèle Régional Canadien du Climat

Alexandre Langlois

Maîtrise géographie physique, cheminement en télédétection

Mars 2003

© Alexandre Langlois, 2003

87 pages

Cette recherche présente l'analyse de la variation spatio-temporelle du couvert nival considéré comme un indicateur potentiel de changement climatique dans la région du Québec. Le couvert nival de cette région a été simulé à l'aide du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) entre août 1992 et juin 1995 et un des buts principaux de ce travail est d'en valider les résultats avec les données satellites. Deux bases de données satellitaires du National Snow and Ice Data Centre, sur la référence EASE-Grid (SSM/I Earth-Cnnd) sont comparées à la fois aux sorties du MRCC, à celles du modèle de mesure d'équivalent en eau de la neige (EEN) du Service Météorologique du Canada (SMC) et finalement, aux données météorologiques d'épaisseur de neige. La première base de données hebdomadaires est dérivée des données visible/proche infrarouge VIS/PIR de AVHRR-NOAA et donne sous forme binaire la présence ou l'absence de neige pixel par pixel sur la période 1967-2001. La seconde base de données SSM/I donne la température de brillance polarisée à 19 GHz et 37 GHz 2 fois par jour sur la période 1992-1995. La différence normalisée des températures de brillance $(Tb_{37v} - Tb_{19v}) / Tb_{19h}$ constitue le meilleur paramètre pour l'analyse du couvert nival au-dessus d'un seuil spécifique pour chaque type de densité de végétation.

La validation des résultats du capteur SSM/I s'est faite avec les données météorologiques de 16 stations distribuées du Nord au Sud au Québec ainsi que sur 6 transitions de saison (automne et printemps 1993-1994-1995). En terme de jour de neige, l'erreur moyenne pour chaque transition varie entre 4.88% et 8.24%, ce qui permet de considérer les résultats SSM/I comme référence pour la validation des modèles de simulation climatique.

La différence moyenne SSM/I-SMC pour tout le Québec varie entre 7.7% et 16.2% en fonction des saisons, tandis que celle SSM/I-MRCC se situe entre 7.8% et 12.0%. Les résultats montrent que les données MRCC tendent à sous-estimer la présence du couvert nival tandis que les données du SMC indiquent le contraire.

En analysant la base de données complète de AVHRR sur le couvert nival depuis 1966, on peut observer sur 4 zones différentes une baisse pour 3 régions sur 4 du nombre de pixels enneigés (variant entre -0.25 pixel/hiver pour le sud et +0.082 pixel/hiver pour l'est) et de toutes les régions pour la durée d'enneigement (variant entre -0.118 sem/hiver pour le nord et -0.0147 sem/hiver pour l'ouest).

Ce travail montre que les données satellites constituent un outil essentiel pour étudier la variabilité du climat ainsi que pour valider la modélisation du climat futur.

Mots clefs :

Données micro-ondes SSM/I, Données VIS/PIR AVHRR, Données MRCC, Données EEN, Données météorologiques, Validation, Base de données NSIDC EASE-Grid, Couvert nival, Changement climatique

Abstract

The spatial/temporal variation of the snow cover is simulated by many models such as the Canadian Regional Climate Model (CRCM) developed by Université du Québec à Montréal that simulates the snow water equivalent (SWE), a key parameter for hydrological cycle investigation. Better understanding of snow cover dynamics and the validation of these models suffer from the space observational record available and passive microwave satellite data and appears as a very useful tool for such an objective. The data are derived from the daily Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I) data from the DMSP satellite serie and also in the Northern Hemisphere Weekly Snow Cover and Ice Extent from the NSIDC in the EASE-Grid format. A threshold adapted for four vegetation density classes (Canadian Landcover 1km-resolution image) is applied to the normalized difference brightness temperature signal between 37GHz and 19GHz to extract snow cover. This satellite database is available since 1987, however, the analysis has been carried out between August 1992 and June 1995 over Eastern Canada corresponding the CRCM run simulation driven by NCEP atmospheric objective analysis. The results shows that the model is underestimating snow cover, the winter season tends to arrive later when compared to SSM/I and spring is arriving too early. For the study area, the CRCM is modelling snow cover with an error of 9.3%. Locally, this error can be as large as 30-40%. This thesis shows the potential of satellite microwave data for comprehensive spatial and temporal evaluation of model behavior.

Keywords:

Passive microwave SSM/I, Snow cover, Snow water equivalent SWE, Canadian Regional Climate Model CRCM, Validation

Table des matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux	VI
Liste des annexes	VII
Glossaire	VIII
Remerciements	X
1. Introduction	1
2. Hypothèses de recherche	3
3. Objectifs de la recherche	3
4. Site d'étude	3
5. Théorie	4
5.1. Analyse du signal mesuré	4
5.2. Détermination de la présence de neige	7
6. Bases de données	12
6.1. Description des capteurs et bases de données satellites	12
6.1.1. Le capteur SSM/I et les données micro-ondes passives.....	12
6.1.2. Le capteur AVHRR et les données visible/proche infrarouge	15
6.2. Description des modèles	17
6.2.1. Le Modèle Régional Canadien du Climat	17
6.2.2. Les réanalyses d'équivalent en eau (EEN) du SMC	20
6.3. Autres bases de données utilisées	21
6.3.1. Occupation du sol	21
6.3.2. Les données météorologiques	22
6.3.3. Les données d'occupation d'eau du NTDB.....	23

7.	Méthodologie	24
7.1.	Assimilation et extraction des bases de données satellites	25
7.2.	Validation de SSM/I avec les données météorologiques	32
7.3.	Extraction et traitement des données MRCC	38
7.4.	Extraction et traitement des données du SMC.....	41
7.5.	Mise en concordance temporelle des bases de données.....	43
7.6.	Extraction complète de la série AVHRR	45
8.	Résultats et analyse.....	46
8.1.	SSM/I	46
8.1.1.	SSM/I vs AVHRR	46
8.1.2.	SSM/I vs SMC.....	48
8.2.	SSM/I vs MRCC	56
8.3.	Analyse de la tendance climatique issue de AVHRR	65
9.	Discussion et conclusion	68
10.	Références	72

Liste des figures

- Figure 1** : Zone d'étude couverte par la base de données EASE-Grid (à gauche) et par le modèle de simulation climatique MRCC (à droite).....4
- Figure 2a, 2b et 2c** : Variation de l'émissivité (ϵ) du couvert nival (a) neige humide à gauche; (b) neige avec épaisse croûte de glace à droite en fonction de la fréquence et de la polarisation (Mätzler, 1987). (c) évolution du ΔT_b ($(37\text{GHz V} - 19\text{GHz V}) / 19\text{GHz H}$) dans un couvert nival simple avec une valeur de densité et de taille de grain.....8
- Figure 3**: Variation temporelle des différences normalisées des températures de brillance comparée aux données météorologiques pour Shefferville10
- Figure 4**: Projection de la base de données EASE-Grid weekly snow cover and sea ice extent du NSIDC13
- Figure 5**: Géométrie de visée du capteur SSM/I (tiré du site web http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/SENSOR_DOCS/ssmi.html).....13
- Figure 6**: Les micro-ondes (hyperfréquences) dans le spectre électromagnétique (tiré du site web http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter1/chapter1_3_f.html).....14
- Figure 7**: Image brute SSM/I sur la EASE-Grid (721 x 721) à 19GHz H.....15
- Figure 8**: Géométrie de visée du capteur AVHRR (tiré du site web http://www.educnet.education.fr/meteo/sat_met/satellit/html).....16

Figure 9: Situation du visible proche infrarouge dans le spectre électromagnétique (tiré du site web http://www.educnet.education.fr/meteo/sat_met/satellit/html/satmt42.htm).....	17
Figure 10: Illustration du fonctionnement des données NCEP conditionnant les données du MRCC.....	19
Figure 11: Occupation du sol au Canada en 31 classes (Cihlar, J., and J. Beaubien, 1998).	22
Figure 12: Fraction décimale de l'occupation de l'eau au Canada (Fernandes et al., 2001).....	23
Figure 13: Organigramme de la méthodologie.....	24
Figure 14: Images brutes et moyennes sur 2 jours pour chaque fréquence utilisée.....	27
Figure 15: Image de la différence normalisée des températures de brillance issue de l'opération $(37V - 19V) / 19H$ moyennée sur 2 jours.....	28
Figure 16: Superposition du masque sur les océans aux images SSM/I.....	29
Figure 17: Comparaison des filtres médians sur 15, 25 et 35 jours du signal brut ΔT_b sur toute la base de donnée (1992-1994) pour la région de Kuujjuak (Nunavik).....	30
Figure 18: Image de neige de SSM/I en projection EASE-Grid.....	31
Figure 19: Masque sur les pixels ayant une fraction d'eau supérieure à 40%	32

Figure 20: Répartition des différents types d'occupations du sol par densité au Québec	33
Figure 21: Comparaison du nombre de jours de neige entre SSM/I et la base de données météorologiques des 16 stations (voir tableau 2)	35
Figure 22: Écart entre le nombre de jours de neige des données météorologiques et des données SSM/I (données météorologiques – SSM/I).....	36
Figure 23: Image brute de EEN du MRCC en projection stéréographique polaire	39
Figure 24: Image brute de EEN MRCC en projection EASE-Grid avec le masque.....	40
Figure 25: Image de neige du MRCC en projection EASE-Grid	41
Figure 26: Image brute du SMC de EEN en projection EASE-Grid	42
Figure 27: Image de neige du SMC en projection EASE-Grid.....	42
Figure 28: Mise en concordance spatiale des bases de données (1 ^{er} janvier 1993).....	44
Figure 29: Image de neige de AVHRR en projection EASE-Grid pour la semaine du 27 mars 1967	46

Figure 30: Différence entre le cumul du nombre de semaines de neige SSM/I et le cumul du nombre de semaines de neige AVHRR entre août 1992 et juin 1994	47
Figure 31: 4 zones d'études pour la comparaison de SSM/I avec les analyses du SMC	48
Figure 32: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour 4 zones pour SSM/I vs SMC.....	50
Figure 33: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour le Québec pour la comparaison de SSM/I avec SMC	51
Figure 34: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1992 pour la comparaison SSM/I vs le SMC	52
Figure 35: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1993 pour la comparaison SSM/I vs SMC	53
Figure 36: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1993 pour la comparaison SSM/I vs SMC	54
Figure 37: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1994 pour la comparaison SSM/I vs SMC	55
Figure 38: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour 4 zones, pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC	57
Figure 39: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour le Québec pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC	58

Figure 40: Omission totale (gauche) et commission totale (droite) cumulées sur toute la série temporelle de août 1992 à juin 1995 (1064 jours). Les données du MRCC sont prises comme référence.....	59
Figure 41: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1992 pour la comparaison SSM/I vs MRCC	60
Figure 42: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1993 pour la comparaison SSM/I vs MRCC	61
Figure 43: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1993 pour la comparaison SSM/I vs MRCC	62
Figure 44: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1994 pour la comparaison SSM/I vs MRCC	63
Figure 45 : Évolution de l'erreur du modèle en fonction de la latitude et du temps (les lignes correspondent à des zones où il n'y a pas de données).....	64
Figure 46: Moyenne du nombre de pixels de neige par zone et par hiver depuis 1966	65
Figure 47: Durée d'enneigement en semaines pour chaque hiver entre 1975 et 2001	66

Liste des tableaux

Tableau 1: Classes d'occupation du sol regroupées sur les images SSM/I (tiré de De Sèves, 1999)	6
Tableau 2: Seuils utilisés sur les ΔT_b et l'épaisseur du couvert nival pour les 16 stations étudiées	34
Tableau 3: Différence absolue entre le nombre de jours de neige météo et le nombre de jours de neige SSM/I	37
Tableau 4: Comparaison de l'erreur absolue en fonction des saisons et des stations	38
Tableau 5: Erreur moyenne et erreur quadratique moyenne (en % de surface ΔN) pour la comparaison de SSM/I avec les analyses du SMC sur 4 transitions, 4 zones et pour tout le Québec	49
Tableau 6 : Erreur moyenne et erreur quadratique moyenne (en % de surface ΔN) pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC sur 4 transitions, 4 zones et pour tout le Québec	56

Liste des annexes

Annexe 1 : Principaux programmes (code MatLab)	73
---	----

Glossaire

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

CCT : Centre Canadien de Télédétection

CMC: Canadian Meteorological Centre

CCRM : Centre Coopératif de Recherche à Mésoséchelle

DMSP: Defense Meteorological Satellite Program

ϵ_p : Émissivité de la surface avec une polarisation p

EASE-Grid : Equal Area Scalable Earth - Grid

ECMWF: European Centre for Medium-range Weather Forecasting

EEN : Équivalent en Eau de la Neige

$f_{1,2,3}$: Occupation du sol f

F : Fraction d'occupation du sol f

FF : Forêt Fermée

FO : Forêt Ouverte

GOES : Geosynchronous Operational Environmental Satellites

LCC: Lambert Conique Conforme (type de projection)

LR : Lacs et Réservoirs

ΔN : Valeur de la différence de pixels de neige SSM/I et SMC ou MRCC en fonction du nombre total de pixel considéré dans la zone d'étude

MC² : Noyau dynamique du modèle de mésoséchelle compressible communautaire

MRCC: Modèle Régional Canadien du Climat

MRN: Ministère des Ressources Naturelles

NASA : National Aeronautic and Space Administration

NCEP : National Centre for Environmental Protection

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

NSIDC: National Snow and Ice Data Centre

NTDB: National Topographic Data Base

SISL : Semi Implicite-Semi Lagrangien

SMC: Service Météorologique Canadien

SMMR: Scanning Multichannel Microwave Radiometer

SN : Sols Nus

Spin-Up : Période de d'initialisation du modèle

SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager

τ : Transmittance de l'atmosphère

Ta: Température de l'atmosphère

Tb_p: Température de brillance dans une polarisation p

ΔT_b : Différence normalisée des températures brillance

Ts: Température de surface

UQAM : Université du Québec À Montréal

VIS/PIR: Visible/Proche InfraRouge

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le CRSNG, le FCAR ainsi que René Laprise du Groupe canadien de modélisation régionale du climat à l'Université du Québec À Montréal (UQAM) pour le support financier apporté tout au long de la réalisation de cette recherche. Merci aussi à Anne Frigon également du Groupe canadien de modélisation régionale du climat pour sa collaboration tout au long du projet. Merci à Alain Royer, directeur du Centre d'application et de recherche en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke qui a été d'une aide essentielle dans l'avancement et la continuité de ce travail en tant que directeur de recherche. Merci à Hardy Granberg, professeur et chercheur au CARTEL ainsi qu'à Matti Leppärenta, professeur à l'Université de Helsinki pour m'avoir permis de participer au Snow Course 2002 qui a eu lieu en Finlande en mars 2002. Finalement, merci à Vincent Roy pour ses connaissances et ses conseils apportés en matière de programmation et d'extraction de données.

1. Introduction

La recherche en climatologie est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêts dans le monde de la science. L'Homme est de plus en plus sensible à son environnement et à l'impact de ses habitudes de vie sur celui-ci. Il tente de plus en plus à comprendre les grandes dynamiques climatologiques dans le but de mieux mesurer l'importance de ses actions sur son milieu de vie. On parle beaucoup du réchauffement global « Global Warming » qui soulève énormément d'inquiétudes (IPCC, 2001). Le climat de la planète est toujours état de changement, on peut y observer différents cycles qui sont sous l'influence de différents facteurs. Cependant, peut-on vraiment parler de tendance générale au réchauffement, y a-t-il vraiment raison de s'alarmer? Il faut rester prudent car le climat est un phénomène très compliqué et est composé d'une multitude de paramètres physiques que l'on doit bien comprendre et cette recherche traitera plus particulièrement de celui du couvert nival au niveau de sa variation spatio-temporelle, qui peut être considéré comme un indicateur du changement climatique.

La compréhension de la variation spatio-temporelle du couvert nival est plutôt difficile notamment à cause de la grandeur du territoire à étudier. C'est ici qu'intervient la télédétection qui permet d'étudier différents paramètres physiques sur de tels territoires. La variation spatio-temporelle de la neige est un bon indicateur de changement climatique (Goodison, 1993). Plusieurs modèles de simulation climatique ont été élaborés pour modéliser cette variation dont le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) développé par l'Université du Québec à Montréal UQAM (Laprise et al., 1995) et les analyses de l'équivalent en eau de la neige (EEN) développé par Ross Brown du SMC (Brown et Goodison, 1996). La validation de tels modèles avec les données micro-ondes passives du capteur SSM/I et des données en visible proche infrarouge du capteur AVHRR du NSIDC au niveau du couvert nival est donc un atout essentiel à l'étude du climat.

La première base de données satellitaires est celle du visible/proche infrarouge avec les données binaires hebdomadaires du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) compilées par le NSIDC (National Snow and Ice Data Center, Northern Hemisphere Weekly Snow Cover and Ice Extent), en format EASE-Grid (Equal Area Scalable Earth). Cette base de données, qui commence en 1966 et s'étend jusqu'en 2001, est la plus longue du genre. Le traitement complet de la série permettra d'évaluer la tendance de changement climatique.

La deuxième base de données satellitaires est issue des micro-ondes passives du capteur SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) de la série de satellites DMSP du NSIDC en format EASE-Grid. Cette dernière base de données s'étend de 1987 à 2001. Cependant, nous traiterons la partie couvrant la période de août 1992 à juin 1995, soit la période de simulation du couvert nival du MRCC. L'originalité de la recherche réside dans l'extraction du couvert nival à partir de la télédétection micro-onde passive sur une base journalière, plus précise que les données hebdomadaires AVHRR. Nous comparerons le produit de couvert nival SSM/I aux données météorologiques d'épaisseur de neige au sol à titre de validation.

Après avoir discuté des objectifs principaux de ce travail et de la théorie, nous présenterons les bases de données dans la section 6 et la méthodologie dans la section 7. Les résultats et discussions seront présentés à la suite dans les sections 8 et 9 respectivement.

2. Hypothèses de recherche

Les hypothèses que nous cherchons à valider dans ce travail sont au nombre de trois :

- 1- La télédétection VIS/PIR et micro-onde passive permettent le suivi de l'évolution spatio-temporelle du couvert nival (Mätzler, 1987)
- 2- La variation spatio-temporelle du couvert nival constitue un bon indicateur de changement climatique (Goodison, 1993)
- 3- La télédétection permet de valider des modèles de simulation climatique

3. Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette recherche est de suivre l'évolution spatio-temporelle du couvert nival par satellite au Québec depuis les 30 dernières années et d'autre part, de valider le MRCC entre août 1992 et juin 1995 sur le Québec. Les objectifs spécifiques sont en premier lieu de mettre au point une méthode de détermination de la présence ou de l'absence de neige en micro-ondes passives, de mettre au point une méthode de validation du MRCC et finalement, de comparer la base de données SSM/I avec AVHRR, le MRCC et les analyses de EEN du SMC.

4. Site d'étude

Le site d'étude se situe principalement au Québec, zone couverte par la dernière simulation du MRCC. La zone couvre 100 pixels en latitude et longitude pour une couverture totale de $9 \times 10^6 \text{ km}^2$. Le coin supérieur gauche de la zone d'étude est situé aux coordonnées 63.4537 N 260.0272 W (point central du pixel) et le coin inférieur droit à 39.9396 N 307.5158 W (Figure 1).

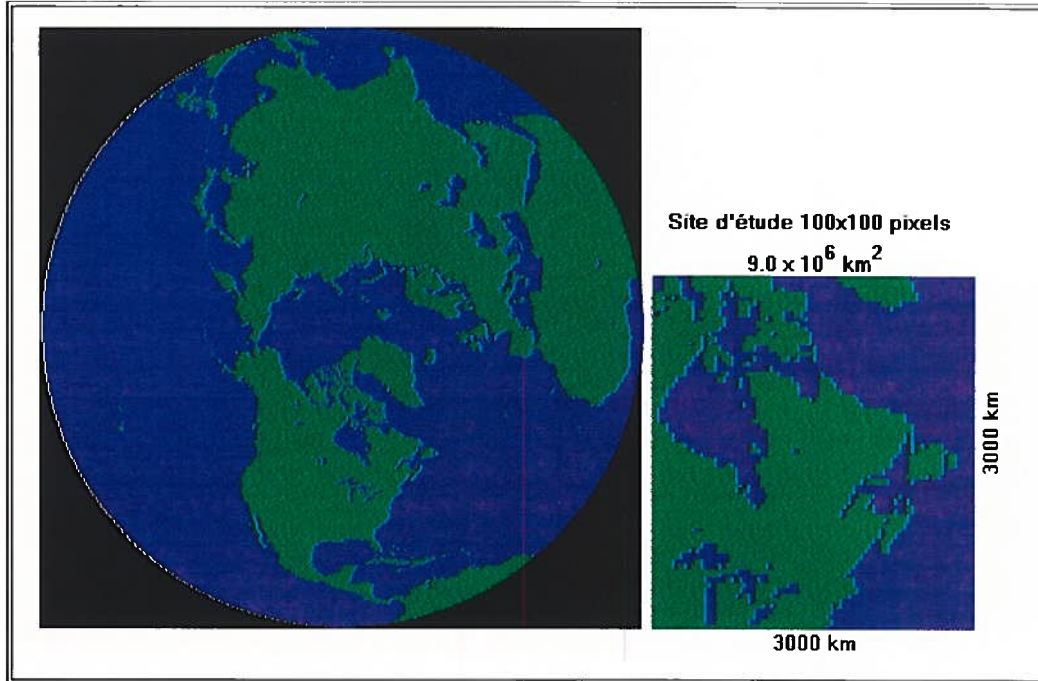


Figure 1 : Zone d'étude couverte par la base de données EASE-Grid (à gauche) et par le modèle de simulation climatique MRCC (à droite).

5. Théorie

5.1. Analyse du signal mesuré

La température de brillance (T_b) pour une polarisation p dans le domaine des hyperfréquences (1 – 40 GHz) est donnée par l'équation 1 :

$$T_{b_p} = (\epsilon_p T_s + (1 - \epsilon_p) T_{a\downarrow}) * \tau + T_{a\uparrow} \quad [\text{éq. 1}]$$

où $T_{a\downarrow}$ et $T_{a\uparrow}$ correspondent aux températures de l'atmosphère émises respectivement vers le bas et vers le haut et ϵ_p représente l'émissivité de la surface considérée dans la polarisation p et τ la transmittance de l'atmosphère.

Pour 2 fréquences (1 et 2), on a :

$$\begin{aligned} T_{b1} - T_{b2} &= [(\varepsilon_1 T_s + (1 - \varepsilon_1) T_{a\downarrow 1}) \tau_1 + T_{a\uparrow 1}] - [(\varepsilon_2 T_s + (1 - \varepsilon_2) T_{a\downarrow 2}) \tau_2 + T_{a\uparrow 2}] \\ &= (\varepsilon_1 \tau_1 - \varepsilon_2 \tau_2) T_s + \Delta T_{a\downarrow} + (\varepsilon_2 \tau_2 T_{a\downarrow 2} - \varepsilon_1 \tau_1 T_{a\downarrow 1}) + \Delta T_{a\uparrow} \quad [\text{éq. 2}] \end{aligned}$$

On déduit la différence normalisée définie par :

$$\frac{\Delta T_b}{\varepsilon_H T_s} \approx \frac{\Delta \varepsilon_v T_s}{\varepsilon_H T_s} + \frac{\text{fonction atmosphérique}}{\varepsilon_H T_s} \quad [\text{éq. 3}]$$

On s'aperçoit dans les équations 1, 2 et 3 que plusieurs facteurs influent sur les températures de brillance ($\Delta \varepsilon, T_s$ et la fonction de transmittance atmosphérique) et nous devons en tenir compte. Dans notre cas, les facteurs les plus influents seront la présence d'eau, de neige et de la couverture végétale du sol. L'eau n'agit pas comme un corps noir en micro-ondes contrairement à l'infrarouge, et les températures de brillance sous l'influence de l'eau seront plus froides. La forêt a une émissivité très forte en micro-ondes se rapprochant de celle d'un corps noir et par conséquent, la température de brillance captée sera plus chaude. Ces principaux facteurs doivent être considérés dans le traitement des images (voir section 5.2). Avant de traiter les images, nous enlèverons les océans puisque la glace de mer et l'eau ne nous intéressent pas. De plus, nous éliminerons les surfaces trop chaudes, qui excluent à priori un couvert de neige. Des températures de brillance supérieures à 280 degrés Kelvin ne peuvent contenir de neige car nous sommes au-dessus du point de congélation. Nous utilisons 280 degrés Kelvin plutôt que 273 puisque l'on veut éviter de perdre la neige mouillée. En micro-ondes passives, la neige mouillée a une émissivité très forte à la manière d'un corps noir qui peut parfois se rapprocher de 0 celcius (273 Kelvin). Nous appliquerons donc ces deux conditions comme un masque que nous superposerons aux images SSM/I pour ne tenir compte que de ce qui nous intéresse. Par la suite, nous serons en mesure de considérer la végétation et le réseau hydrographique à l'intérieur des terres. La manière de considérer ces deux facteurs est d'évaluer quantitativement l'impact du pourcentage d'occupation de chacune de ces classes sur les températures de brillance à 37

GHz et 19 GHz. Tel que l'a démontré De Sève et al. (1999), les 4 classes qui influent sur les températures de brillance au Québec sont la forêt fermée (FF), la forêt ouverte (FO), le sol nu (SN) et les lacs et réservoirs (LR). Ces classes sont tirées des données NOAA/AVHRR (Land Cover Data Base, CCT, Ottawa) qui, superposées aux images SSM/I, permettent de connaître le pourcentage d'occupation de chaque classe à l'intérieur d'un pixel SSM/I.

Classes de l'occupation du sol originales	Classes de l'occupation du sol regroupées
Eau : lacs et réservoirs Baie James et Baie d'Hudson	Lacs et réservoirs (LR)
Brûlis Landes boisées à lichen Forêts ouvertes	Forêts ouvertes (FO)
Forêts de résineux Forêts mixtes Forêts de feuillus	Forêts fermées (FF)
Sols nus Toundra	Sols nus (SN)

Tableau 1: Classes d'occupations du sol regroupées sur les images SSM/I (tiré de De Sève et al., 1999)

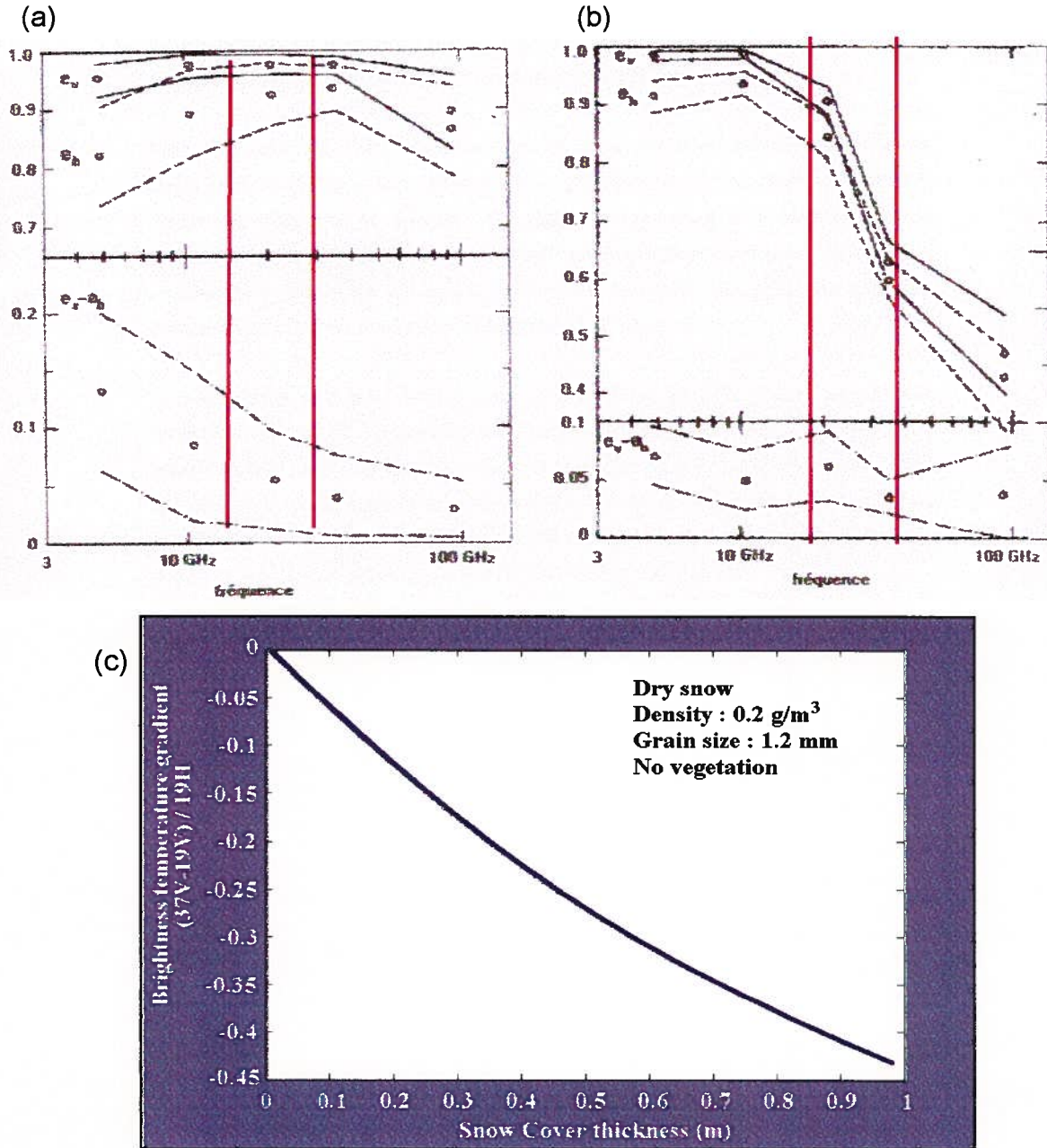
L'image de l'occupation du sol est disponible en résolution de 1 km et en projection stéréographique polaire. Nous devons donc ramener cette image en projection « equal azimuthal area » tout en la laissant en résolution de 1 km. Nous aurons donc 25 pixels x 25 pixels (625 pixels) de l'image d'occupation du sol pour 1 pixel SSM/I. Nous choisirons donc 4 différentes classes d'occupation du sol en fonction de la densité de végétation au sol : dense, non dense, agricole et toundra. Les zones contenant un pourcentage d'eau supérieur à une certaine limite ne seront pas considérées puisqu'elles influencent différemment les températures de brillance en fonction de leur état (eau libre ou eau glacée), d'autant plus qu'il n'y a pas de moyen de savoir si cette eau est glacée ou non. En micro-onde, il est difficile d'évaluer l'impact d'une fraction d'eau dans un pixel de 25 x 25 km². Par conséquent, nous avons procédé par essais pour tenter d'éliminer le plus possible les erreurs liées à l'eau sans toutefois trop éliminer de

pixels. Le Québec contient énormément d'eau et nous avons fait des masques de 10% à 60%. En masquant le pixel à 10% d'eau, il ne reste pratiquement plus de territoire à étudier tandis qu'à 60% on ne masque qu'une mince partie du territoire. Le choix à 40% semble le plus raisonnable dans un contexte d'étude spatiale

5.2. Détermination de la présence de neige

La figure 2c représente un cas de couvert de neige sèche avec une seule densité et une seule valeur de taille de grain. Ce type de neige est idéal à modéliser mais, n'est pas représentatif de la réalité. Il n'est pas rare de retrouver une croûte de glace ou de la neige mouillée en particulier au Québec. La plupart du temps, ces couches de glaces sont liées à une précipitation de verglas, de fonte-regel au printemps ou encore à cause d'un fort gradient de température entre 2 couches de densités passablement différentes. L'exemple démontré dans la recherche est celui de Mätzler qui, à l'aide de cette figure, démontre la méthode de la différence des températures de brillance entre 37 GHz et 19 GHz. Cette figure fait donc mention en (a) de la neige mouillée que l'on retrouve surtout au printemps et en (b) de la neige avec une croûte de glace. Un couvert de neige sans croûte de glace peut se retrouver durant l'hiver à la période froide où le couvert est stable, et les températures sous le seuil de congélation, en plus d'avoir de faibles gradient de températures provenant de flux de conductivité thermique du sol (G). Cette période stable nous intéresse moins puisque le modèle s'est déjà stabilisé à cette période et, que les erreurs qu'il simule se retrouvent presque uniquement durant les transitions de saisons (section 8.2.). La validation s'est donc concentrée sur cette période; période durant laquelle on retrouve de la neige mouillée (Figure 2a) et de la neige avec des croûtes de glace (Figure 2b).

Cette étape constitue le cœur même de la recherche. Les figures 2a, 2b et 2c expliquent bien les fondements de la méthode de détermination de la présence de neige.



Figures 2a, 2b et 2c : Variation de l'émissivité (e) du couvert nival; (a) neige humide à gauche; (b) neige avec épaisse croûte de glace à droite en fonction de la fréquence et de la polarisation (Mätzler, 1987). (c) Évolution du ΔT_b ((37GHz V - 19GHz V) / 19GHz H) dans un couvert nival simple avec une valeur de densité et de taille de grain.

Figure (2a) : $e_{19} \approx e_{37}$ et $e_v > e_h$ [éq. 4]

Figure (2b) : $e_{19} \gg e_{37}$ et $e_v \approx e_h$ [éq. 5]

L'émissivité (e) de la neige est bien présentée dans les figures 2a et 2b tirées de Mätzler, (1987). Ces figures représentent la variation de l'émissivité d'un couvert nival en fonction de la fréquence pour 2 types de couverts : neige humide et couvert nival avec une épaisse croûte de glace. La polarisation verticale donne toujours une émissivité plus grande que la polarisation horizontale et est moins sensible aux effets de surface (équation 4). Par conséquent, les températures de brillance observées y sont plus grandes. La valeur de l'émissivité à 19 GHz est plus grande que celle à 37GHz et par conséquent, la différence entre les deux sera négative en présence de neige (équation 5). Cette méthode est donc très efficace pour mettre en évidence le couvert nival.

Pour déterminer s'il y a présence ou non de neige, on calcule la différence normalisée des températures de brillance des deux polarisations verticale-horizontale dont la valeur augmente avec la constante diélectrique. Il peut arriver cependant que l'on observe de légères différences sur des surfaces avec un couvert nival qui sont souvent dues à la présence de végétation, ce qui sera discuté un peu plus loin. Les propriétés spectrales dépendent donc des propriétés volumétriques du couvert nival telles la taille de grain, la densité et la température (Prigent et Aires, 2003).

La polarisation verticale donne toujours le plus grand gradient spectral associé à la dispersion radiative. De plus, elle est sensible aux couverts de faible profondeur, spécialement à 85GHz (petites longueurs d'ondes puisque la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Dans cette recherche, les différences de températures de brillance utilisées seront 37GHz – 19GHz. Cette différence permet de bien distinguer des zones couvertes de neige de celles qui ne le sont pas (Walker et Goodison, 1993).

Chaque pourcentage d'occupation du sol influence différemment les valeurs du gradient de température et nécessite un seuil spécifique pour définir la présence ou l'absence de neige. C'est donc une méthode de seuillage pixel par pixel qui sera appliquée dans ce cas-ci, puisque chaque pixel contient différents pourcentages des quatre classes énumérées dans le tableau 1. Cette notion de seuillage est applicable sur les images résultant de l'équation 6 :

$$(T_b \text{ 37 GHz vertical} - T_b \text{ 19 GHz vertical}) / T_b \text{ 19 GHz horizontal} \quad [\text{éq. 6}]$$

La neige atténue plus fortement le signal à 37GHz (courtes longueurs d'ondes) qu'à 19GHz (grandes longueurs d'ondes) donnant une différence négative en présence de couvert nival tel que le démontre la figure 3.

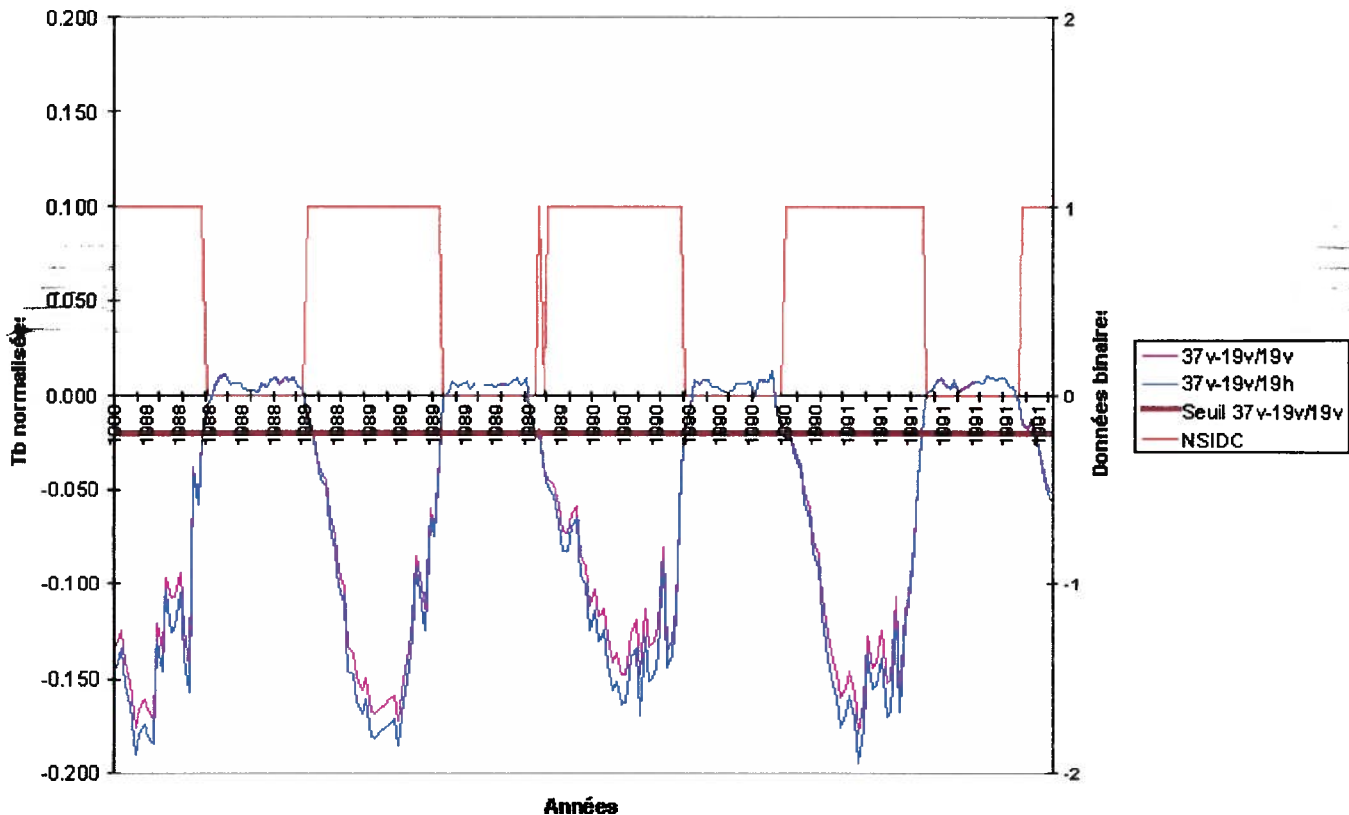


Figure 3: Variation temporelle des différences normalisées des températures de brillance comparée aux données météorologiques pour Shefferville

En imposant un certain seuil à cette différence, nous sommes donc en mesure de classifier de façon binaire le couvert nival sur un territoire donné. Cependant, tel que mentionné plus tôt, nous devons tenir compte de l'occupation du sol dans chacun des pixels SSM/I. Comme nous aurons éliminé la classe eau, il nous restera les trois classes suivantes : forêts denses, forêts non denses et toundra, auxquelles nous ajouterons le milieu agricole. Il nous faudra donc trouver un seuil particulier à chacune de ces classes d'occupation du sol.

En comparant les données météorologiques disponibles avec les données des températures de brillance SSM/I entre août 1992 et juin 1995, nous serons en mesure de bien distinguer un seuil pour une région particulière (fonction de la densité de végétation) en reportant les zones de décrochement des données météorologiques sur les données micro-ondes passives de SSM/I. Cette comparaison nous permettra de classifier chaque pixel en créant une image de seuil associée au pourcentage d'occupation de chaque type de densité de végétation.

Pour une occupation f_1 , f_2 et f_3 , si nous négligeons les effets atmosphériques on a :

$$Tb_{37v} \approx f_1 (\epsilon_1^{37v} Ts_1) + f_2 (\epsilon_2^{37v} Ts_2) + f_3 (\epsilon_3^{37v} Ts_3) ; \quad [\text{éq. 7}]$$

$$Tb_{19v} \approx f_1 (\epsilon_1^{19v} Ts_1) + f_2 (\epsilon_2^{19v} Ts_2) + f_3 (\epsilon_3^{19v} Ts_3) ; \quad [\text{éq. 8}]$$

$$\Delta Tb \approx f_1 \Delta \epsilon Ts_1 + f_2 \Delta \epsilon Ts_2 + f_3 \Delta \epsilon Ts_3 \quad \rightarrow \quad \text{relation linéaire} \quad [\text{éq. 9}]$$

À partir de ces notions, nous pourrions appliquer la fraction d'occupation du sol au seuil.

Le seuil s_{pixel} du pixel avec 3 couvertures de fraction F_1 , F_2 et F_3 correspond à :

$$s_{\text{pixel}} = F_1 * s_1 + F_2 * s_2 + F_3 * s_3 \quad [\text{éq. 10}]$$

Ceci nous permettra à priori d'être un peu plus précis, mais avec l'imprécision due aux différences de résolution entre 37GHz et 19GHz, il faudra analyser l'impact de cette décomposition. Nous obtiendrons ainsi une image de couvert nival pour le site d'étude pour une journée particulière.

6. Bases de données

6.1. Description des capteurs et bases de données satellites

6.1.1. Le capteur SSM/I et les données micro-ondes passives

Le capteur SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) est transporté sur le Defense Meteorological Satellite Program (DMSP F-8, DMSP F-10, DMSP F-11 et DMSP F-13). Ce capteur est en quelques sortes la version plus moderne qui a suivi SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer). Il contient 7 canaux, soit 4 fréquences polarisées (la fréquence à 22GHz est seulement polarisée horizontalement). Ce système en micro-ondes passives mesure la brillance de l'atmosphère, de l'océan et du sol à 19.35, 22.235, 37.0 et 85.5 GHz (Grody et Basist, 1996). SSM/I consiste en un réflecteur parabolique d'une dimension de 24 x 26 pouces monté sur un boîtier contenant le radiomètre, le système de données numériques, le balayeur et la batterie. Il est en rotation continue à un taux de 31.6 tours par minute et permet d'acquérir des images telles qu'étudiées dans cette recherche. Il vole à une altitude de 860 km avec une inclinaison de 98.8° sur une période orbitale de 102 minutes. Cette orbite procure une couverture complète de la Terre après 3 jours excepté deux petites zones circulaires centrées sur les pôles. Parmi toutes les fréquences disponibles, nous utiliserons seulement 19 GHz en polarisation verticale et horizontale et 37GHz en polarisation verticale tel que mentionné dans la section précédente. Le produit final est disponible sur la EASE-Grid à 25 km de résolution mais, il est important de mentionner qu'au départ la résolution est différente pour chaque fréquence. En effet, 37 GHz a une résolution de 37 km x 28 km tandis que 19 GHz a une résolution de 69 km x 43 km. Ces différentes résolutions sont ensuite rééchantillonnées sur la EASE-Grid à 25 km. La figure 4 illustre la projection des images SSM/I (EASE-Grid).

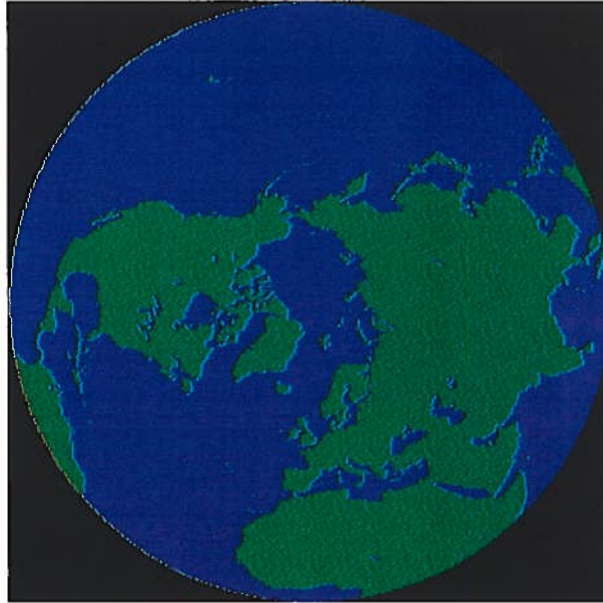


Figure 4: Projection de la base de données EASE-Grid weekly snow cover and sea ice extent du NSIDC

Le scan constant de SSM/I est de 102.4° correspondant à un champ de 1394 km comme le démontre la figure 5.

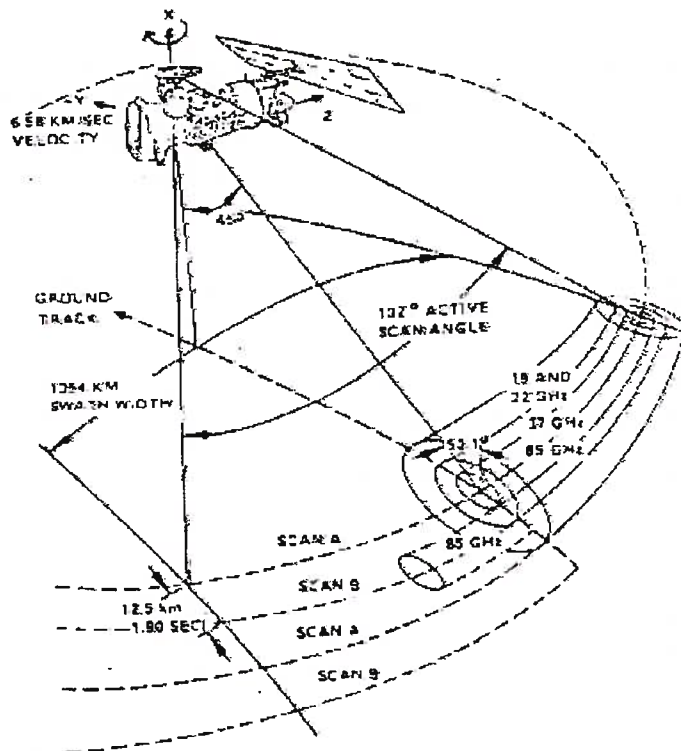


Figure 5: Géométrie de visée du capteur SSM/I (tiré du site web http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/SENSOR_DOCS/ssmi.html)

Les données micro-ondes passives sont obtenues du programme Pathfinder de NOAA/NASA, à partir du capteur SSM/I et sont superposées à la grille EASE-Grid (section 6.1.1.) tout comme les données du capteur AVHRR (section 6.1.2.). Cette grille représente les données interpolées qui permettent de maximiser l'intégrité radiométrique des températures de brillance originales, tout en maintenant une bonne résolution spatiale. La couverture a commencé en août 1987 et le processus est toujours en marche.

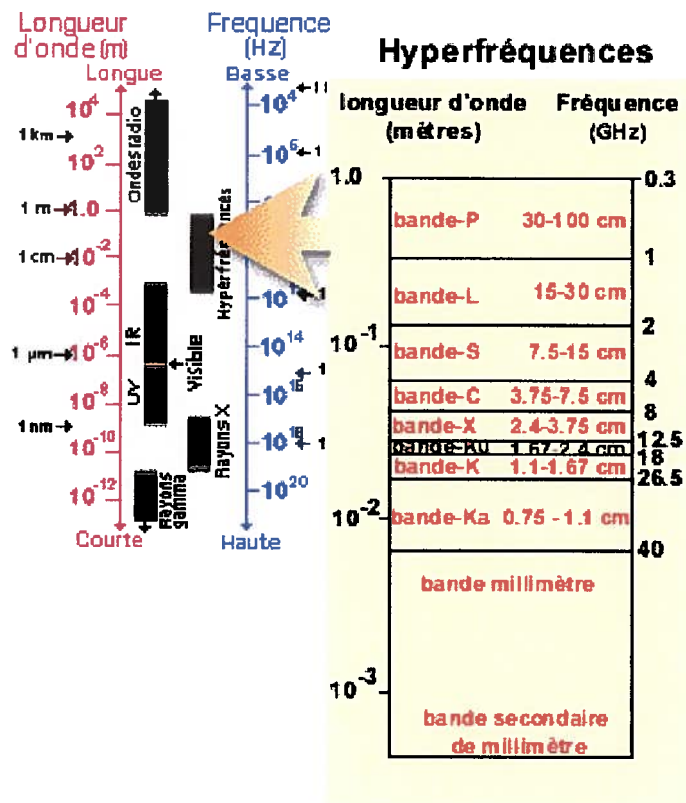


Figure 6: Les micro-ondes (hyperfréquences) dans le spectre électromagnétique (tiré du site web http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter1/chapter1_3_f.html)

Pour chacune des fréquences utilisées, nous avons deux images par jour correspondant à chacune des phases du satellite (ascendante et descendante). Cependant, une seule journée ne couvre pas la planète entière (figure 7) et c'est pourquoi nous devons faire une moyenne sur les images et les phases. Les données brutes indiquent la température de brillance en degrés Kelvin. Ces données de températures sont multipliées par 10 pour éviter d'avoir des décimaux (32 bits) qui requiert plus d'espace mémoire que les nombres entiers (8 ou 16 bits).

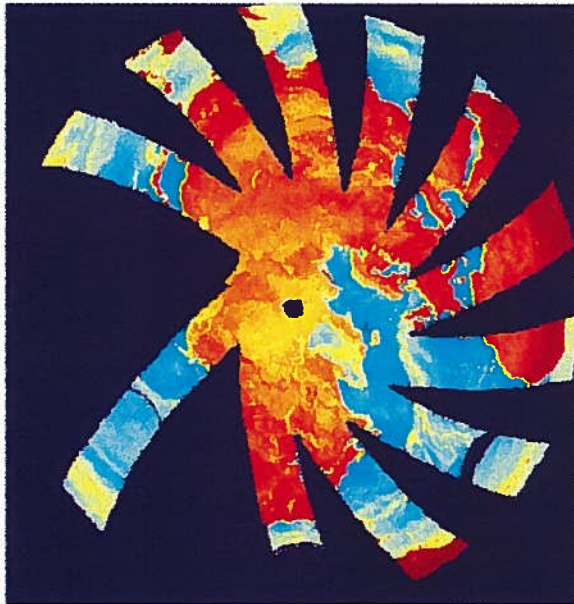


Figure 7: Image brute SSM/I sur la EASE-Grid (721 x 721) à 19GHz H

6.1.2. Le capteur AVHRR et les données visible/proche infrarouge

Ce capteur est un balayeur multibandes à cinq canaux :

- canal 1 : de 0,58 à 0,68 micromètre (visible) ;
- canal 2 : de 0,72 à 1,10 micromètre (proche infrarouge) ;
- canal 3 : de 3,55 à 3,93 micromètres (infrarouge moyen) ;
- canal 4 : de 10,3 à 11,3 micromètres (infrarouge thermique) ;
- canal 5 : de 11,5 à 12,5 micromètres (infrarouge thermique).

Il est à noter que seuls les canaux visible et proche infrarouge sont utilisés dans cette recherche. Ce capteur fait parti de la télédétection passive, c'est-à-dire qu'il mesure l'énergie réfléchiée par la surface et transmise par l'atmosphère issue de l'énergie solaire incidente. La largeur de la trace est de 2700 km (champ de 112°) et la résolution au nadir est de 1.1 km. Cependant, cette résolution se dégrade beaucoup pour les grands angles d'incidence (Bonn, 1991). Les données AVHRR traitées par le NSIDC se retrouvent aussi sur la EASE-Grid avec une résolution de 25 km.

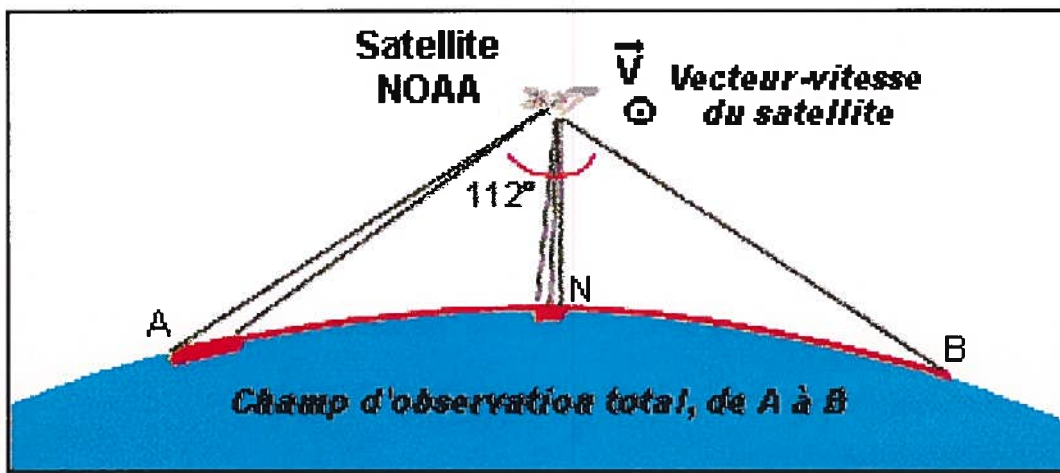


Figure 8: Géométrie de visée du capteur AVHRR (tiré du site web http://www.educnet.education.fr/meteo/sat_met/satellit/html)

Les données VIS/PIR utilisées dans le présent travail proviennent du National Snow and Ice Data Center NSIDC au Colorado. Le CD du Northern Hemisphere EASE-Grid Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent renferme des données hebdomadaires sur la présence ou l'absence du couvert de neige ainsi que l'étendue de la glace de mer.

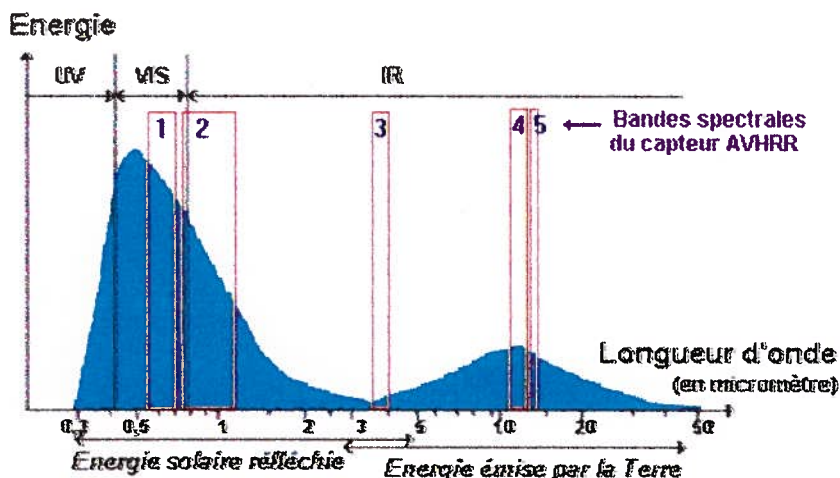


Figure 9: Situation du visible proche infrarouge dans le spectre électromagnétique (tiré du site web http://www.educnet.education.fr/meteo/sat_met/satellit/html/satmt42.htm)

Les données s'étendent donc d'octobre 1966 à juin 2001. Celles-ci résultent d'une synthèse de données d'AVHRR, GOES et des données d'autres satellites fonctionnant dans le visible ramenées à un intervalle de 7 jours. C'est le dernier jour sans nuage qui est gardé dans le fichier final. La couverture spatiale est la même que dans le cas de SSM/I, soit l'hémisphère Nord sur 721 lignes et 721 colonnes à 25 km de résolution. Les données sont binaires et associent une série de valeurs à la présence de neige et de glace de mer qu'il est possible de reclassifier pour isoler le couvert neigeux.

6.2. Description des modèles

6.2.1. Le Modèle Régional Canadien du Climat

Le groupe qui est dédié au développement du MRCC est celui du Laboratoire de modélisation régionale du climat de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le groupe du MRCC a pour but de mettre au point un outil efficace pouvant reproduire les caractéristiques physiques et thermodynamiques du climat à l'échelle régionale. Parmi ceux-ci, on dénote la température, les flux radiatifs, le vent, l'humidité, la rétention d'eau, la neige etc. Les équations numériques du MRCC sont fondées sur le noyau dynamique du modèle de mésoéchelle compressible communautaire (MC²), mis au point par André Robert et ses collègues au Centre Coopératif de Recherche à Mésoéchelle (CCRM) (Laprise et

al., 1995). Le MC² est basé sur les équations de champ d'Euler non hydrostatiques et entièrement élastiques, résolues au moyen d'un algorithme directeur semi-implicite et semi-lagrangien (SISL) des plus perfectionné, permettant le calcul de la circulation atmosphérique à toutes les échelles spatiales (www.mrcc.uqam.ca).

Toutes les variables du MRCC, dont quelques-unes sont énumérées plus haut, sont distribuées sur une grille en projection stéréographique polaire à l'horizontale et en coordonnées verticales de Gal-Chen. Ce type de modèle à aire limitée est très utile et de plus en plus utilisé dans les centres de recherche climatique car il permet de réduire la résolution spatiale sur le domaine d'étude. De plus, on peut faire des recherches dans n'importe quelle partie du globe à condition d'en spécifier les coordonnées et de connaître les conditions frontières à la région d'étude à partir des analyses atmosphériques NCEP (National Center for Environmental Prediction). La résolution spatiale du modèle est suffisante pour représenter des phénomènes tels précipitations et le développement des nuages.

Dans le cas de la présente recherche, le champ qui nous intéresse est celui de l'équivalent en eau de la neige au sol (kg/m^2). Le MRCC fourni une grille de 100 x 100 pixels de 30 km de résolution dont on a éliminé 9 points (Figure 10) au pourtour du domaine constituant une zone éponge dans laquelle le modèle intègre graduellement les données qui le pilote (analyses atmosphériques NCEP). Les données NCEP qui sont utilisées concernent les paramètres de vent, d'humidité et de températures. En fait, les premiers pixels (situés au pourtour de l'image), sont conditionnés à 100% par les données de vent, de température et d'humidité du NCEP après quoi les pixels suivants sont conditionnés par un pourcentage de données de vent et du modèle comme tel. Au fur et à mesure que nous approchons de la fin de la zone éponge, la contribution des données NCEP diminue au profit des données générées par le

MRCC, de sorte que la grille finale de 82 x 82 pixels n'est conditionnée que par les données du modèle (domaine libre).

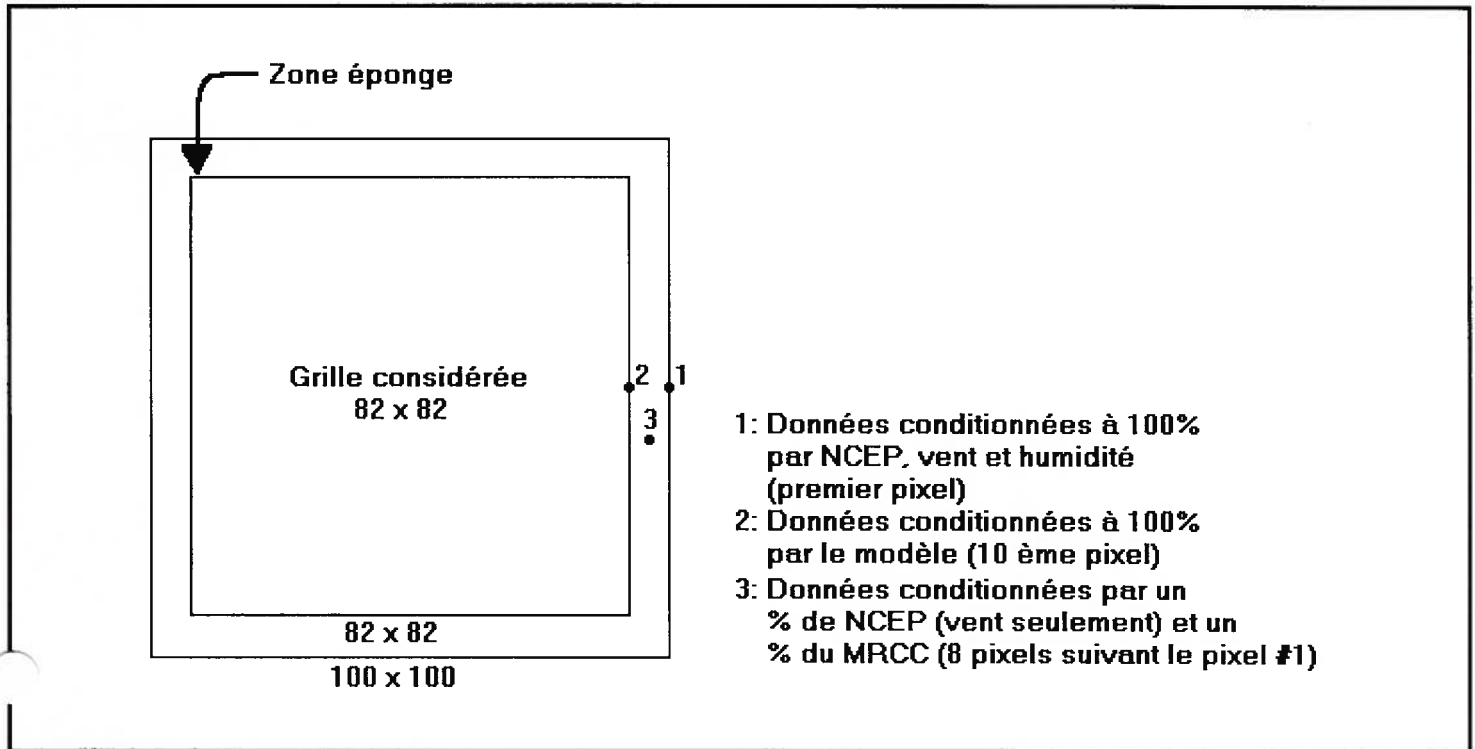


Figure 10: Illustration du fonctionnement des données NCEP conditionnant les données du MRCC

Les résultats sont archivés toutes les 6 heures et la valeur fournie à chaque point de la grille correspond à ce qui est obtenu par le modèle à 16 heures (heure locale) simulant ainsi le passage du satellite polaire orbital. Ce modèle se veut donc un excellent interpolateur dans le cas des données manquantes dans certains territoires comme le Québec où peu de données sont disponibles dans les régions du Moyen Nord et du Grand Nord. Par exemple, certaines stations météorologiques peuvent être séparées de plus de 400 km (Frigon et al., 2002). La simulation du champ de neige que nous étudierons s'étend du mois de mars 1992 au mois de juin 1995. Cependant, les premiers mois constituent la période d'initialisation (spin up) de sorte que les données utilisables s'étendent du 1^{er} août 1992 au 30 juin 1995. Ceci est trop court pour une analyse climatique, mais suffisant pour déterminer l'habileté du modèle à bien simuler des champs de

surface variés, et très peu d'expériences de validation sur une longue période ont été réalisées à partir des données satellitaires.

6.2.2. Les réanalyses d'équivalent en eau (EEN) du SMC

Ces réanalyses nous donnent l'équivalent en eau de la neige en mm. Les résultats de EEN sont issus d'un couplage entre une analyse de profondeur de neige faite par Brasnett en 1999 et employée de manière opérationnelle au Centre Météorologique Canadien (CMC). Cette analyse a été appliquée pour générer une grille journalière de 0.3° de latitude et de longitude concernant l'épaisseur de neige et d'équivalent en eau. Plus de 8000 observations/jour ont été obtenues du U.S. cooperative stations et d'autres stations météorologiques canadiennes comme données de départ dans l'analyse (Brown et al., 2003). Ces données in-situ sont recueillies depuis les années 50 dans un nombre de stations qui a plus que quadruplé en 2000. Celles-ci se situent particulièrement dans les régions peuplées du sud du Canada. Cependant, le nombre de stations rapportant l'épaisseur du couvert nival a diminué depuis 1995 (environ 15%) en réponse aux réductions de budget et d'automatisation. Brown et Braaten ont travaillé à reconstruire les données manquantes qui ont aussi servi dans l'analyse.

La première étape utilise simplement un modèle d'accumulation, de vieillissement et de fonte de neige conditionné par des données de température de l'air et des précipitations toutes les 6 heures provenant du European Centre for Medium-range Weather Forecasting (ECMWF) ERA-15. La grille de neige ainsi obtenue est de 0.3° de latitude et de longitude et le modèle a tourné avec un pas de temps de 1 heure utilisant une interpolation linéaire de la température de l'air. La deuxième étape concerne le contrôle de la qualité. Certaines observations ont été rejetées :

- Si la station indique de la neige alors que le modèle du paragraphe précédent indique le contraire.
- Si l'épaisseur de neige entre les deux diffère de plus de 40 cm.

Finalement, l'interpolation statistique est un procédé qui suppose que les fonctions de corrélations verticales (Nord-Sud) et horizontales (Est-Ouest) pour les données journalières d'épaisseur de neige ont des distances de 120 km et 800 m respectivement. De plus, quelques stations ont été éliminées si leur altitude était à 400m de plus que l'altitude moyenne de tous les points de la grille. Les résultats ainsi obtenus de EEN et de profondeur de neige correspondent assez bien avec les données au sol. La validation avec SSM/I est donc d'autant plus importante qu'intéressante.

6.3. Autres bases de données utilisées

6.3.1. Occupation du sol

Les données d'occupation du sol proviennent de l'image produite par le Centre Canadien de Télédétection et le Ministère des Ressources Naturelle du Canada (Cihlar, J., and J. Beaubien, 1998). Ce produit est le fruit des efforts du Laurentian Forest Research Centre, du Canadian Forest Service et finalement du Centre Canadien de Télédétection. La figure 11 renferme l'occupation du sol en 31 classes pour tout le Canada à 1 km de résolution dérivée des données satellites AVHRR.

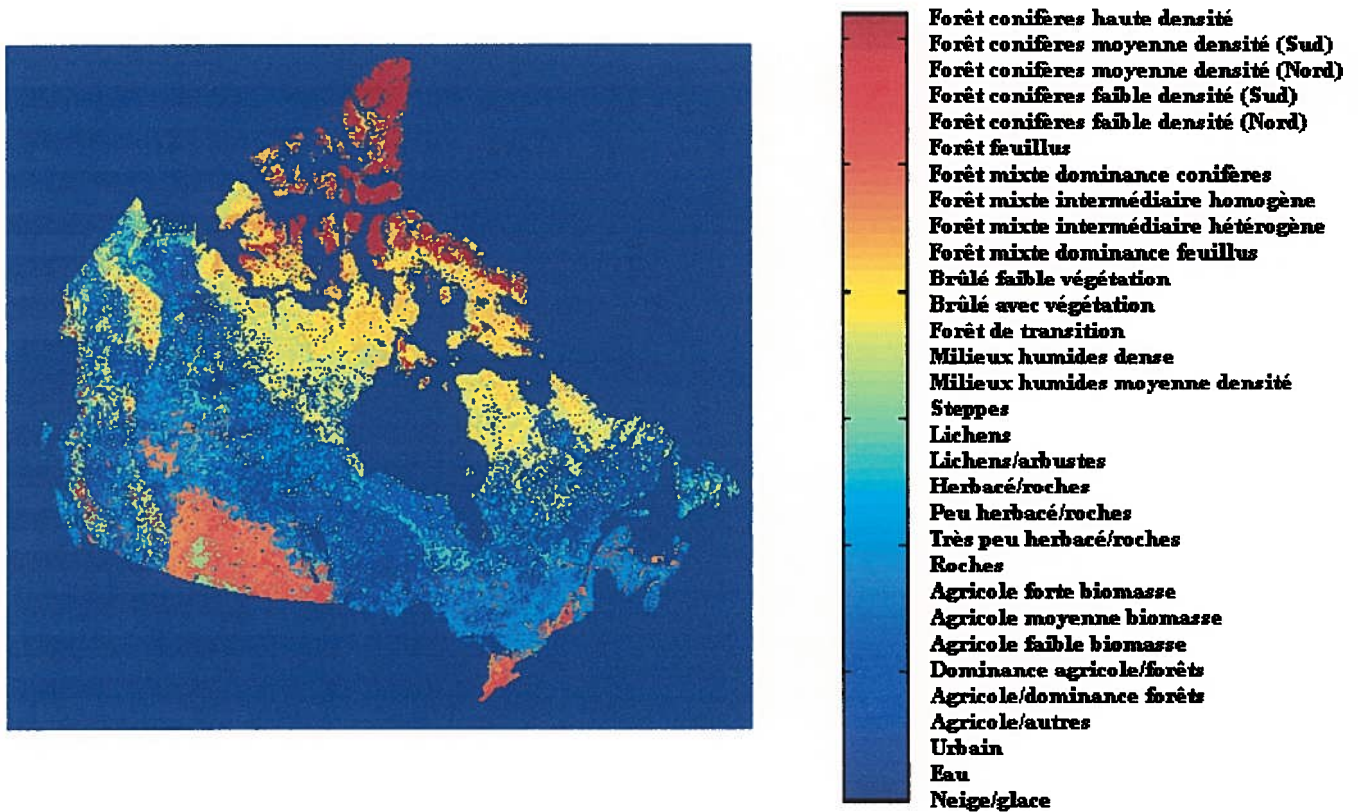


Figure 11: Occupation du sol au Canada en 31 classes (Cihlar, J., and J. Beaubien, 1998)

Cette image est en projection Lambert Conique Conforme (LCC) E008 NAD83. Un fichier de latitudes et un autre de longitudes sont disponibles et par conséquent il est relativement facile de passer en EASE-Grid (projection des images du capteur SSM/I). Au niveau de la télédétection micro-ondes passives, la densité de végétation influence le signal mesuré. Une reclassification de la zone d'étude sera donc de mise lors de la classification des images de neige SSM/I en fonction de la densité de végétation.

6.3.2. Les données météorologiques

La base de données météorologiques est issue de 2 CD-ROM (Western Canada et Eastern Canada) produits par le Service Météorologique du Canada (SMC, 2000). On y retrouve des données quotidiennes sur les températures, les précipitations de neige et sur l'épaisseur de neige au sol de 3 478 stations

météorologiques de l'Ontario, du Québec et des provinces de l'Atlantique tirées des Archives climatologiques nationales d'Environnement Canada. Le champ qui nous intéresse est celui de l'épaisseur de neige au sol et la base de données est disponible pour toute la période des relevés des stations jusqu'en 1997. La hauteur de neige accumulée au sol est mesurée à plusieurs points de la zone immédiate, puis on établit la moyenne.

6.3.3. Les données d'occupation d'eau du NTDB

Cette base de données contient la fraction d'eau du Canada à 1km de résolution que nous utiliserons pour établir un seuil de tolérance pour notre classification des images du capteur SSM/I. Cette couverture d'eau a été produite par le National Topographic Data Base (NTDB) et analysée durant la saison d'été pour éviter d'être biaisée par la fonte de neige et des masses d'eau englacées. Le système de grille utilisé est en projection Lambert Conique Conforme (LCC) définie dans la zone NAD83 tout comme la base de données de l'occupation du sol. La fraction d'eau varie de 1 (0%) à 32767 (100%) où la valeur 0 indique qu'aucune valeur n'est disponible. Par conséquent, pour extraire la fraction d'eau, nous devons diviser la valeur obtenue par 32766.

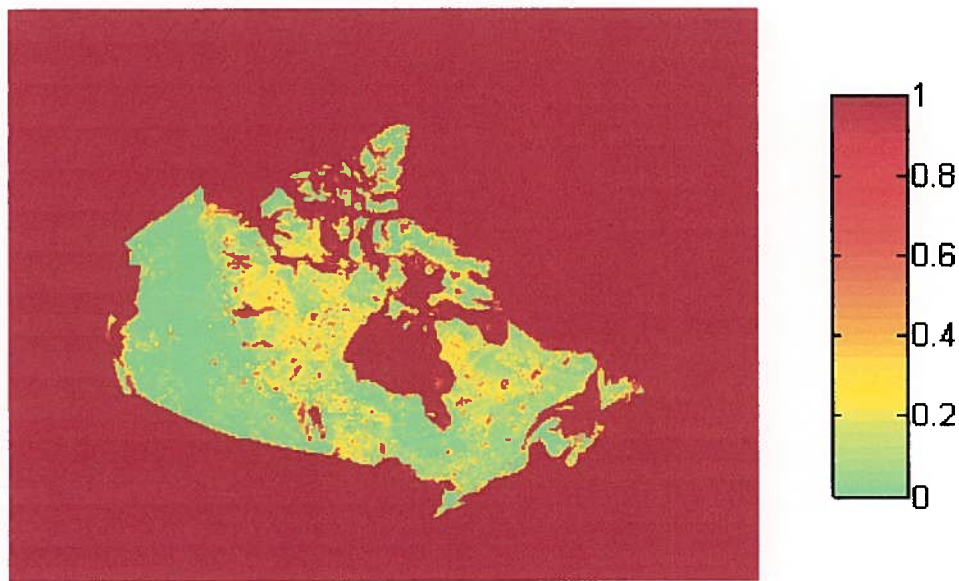


Figure 12: Fraction décimale de l'occupation de l'eau au Canada (Fernandes et al., 2001) reprojétée sur la EASE-Grid à 25 km.

7. Méthodologie

L'organigramme de la figure 13 détaille les grandes étapes de traitement et des analyses effectuées :

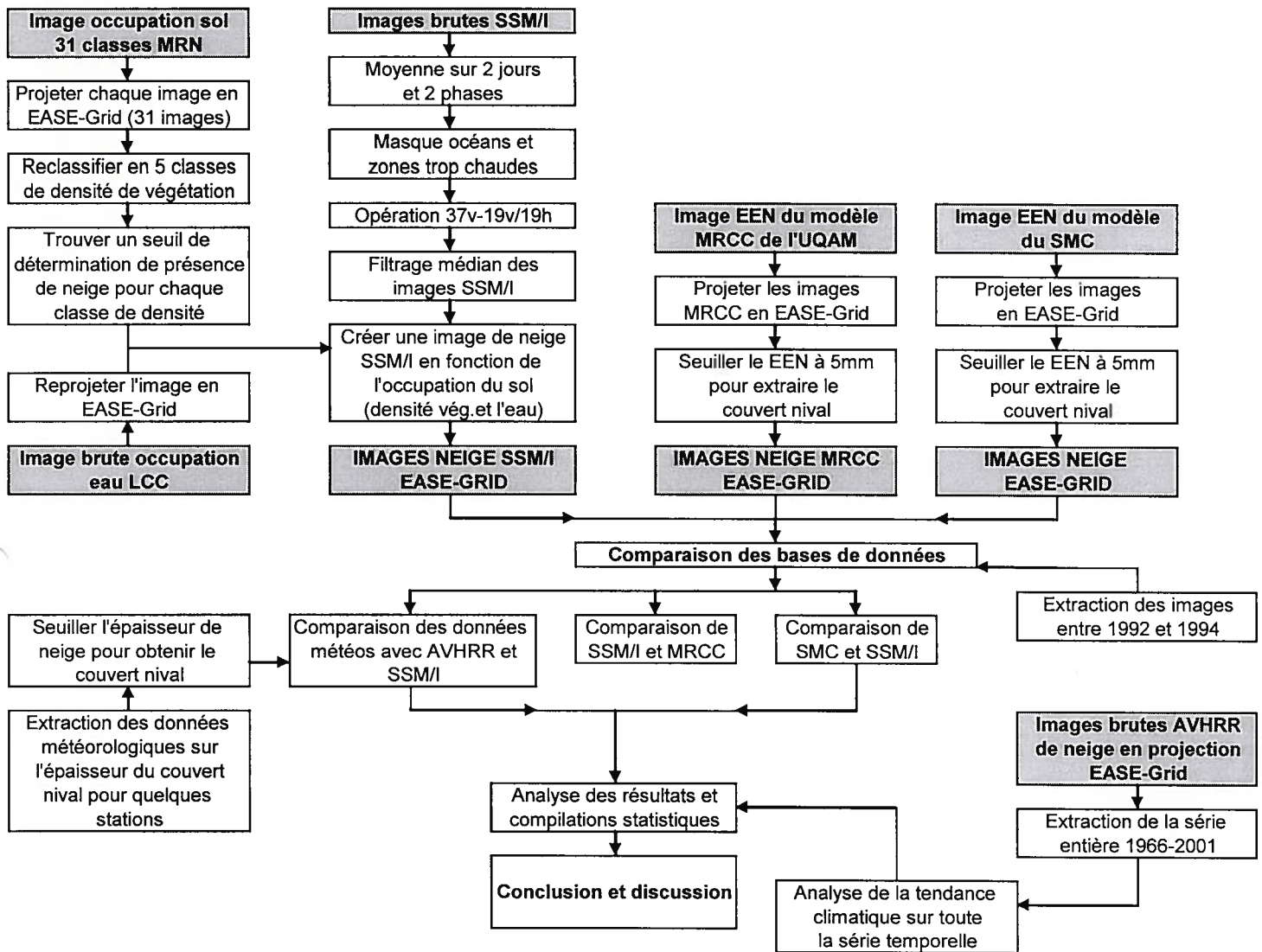


Figure 13: Organigramme de la méthodologie

7.1. Assimilation et extraction des bases de données satellites

La première base de données satellites qui est traitée est évidemment celle des micro-ondes passives. À partir du signal mesuré dans 2 fréquences différentes et 2 polarisations (19GHz V, 19GHz H et 37GHz V), nous allons extraire le couvert nival. Pour y arriver, nous devons traiter à la fois l'occupation du sol (densité de végétation) et les données météorologiques qui permettent de valider l'équation suivante :

$$\Rightarrow 37\text{GHz V} - 19\text{GHz V} / 19\text{GHz H} \quad [\text{éq. 11}]$$

La normalisation à 19GHz en polarisation horizontale permet de réduire le facteur de température de surface T_s et par conséquent isoler le $\Delta\epsilon$ qui, lui, est directement influencé par la présence ou l'absence de couvert nival. En minimisant le facteur T_s , nous pouvons moyenner les images sur 2 phases différentes (ascendante et descendante). Nous avons remarqué sur la figure 7 que ce n'est pas toute la zone d'étude qui est couverte par le passage de SSM/I. Par conséquent, il se trouve régulièrement des zones où nous avons absence de données de T_b sur les images brutes. Pour palier à ce problème, nous devons faire une moyenne sur les images de sorte que nous aurons une zone d'étude complètement couverte. Pour ce faire nous avons effectué 4 tests de moyenne sur les images brutes 19GHz V, 19GHz H et 37GHz V :

1. $[(A_j + D_j)] / \text{nombre d'images}$ [éq. 12]

moyenne sur 1 jour

2. $[(A_j + D_j) + (A_{j+1} + D_{j+1})] / \text{nombre d'images}$ [éq. 13]

moyenne sur 2 jours

$$3. [(A_j + D_j) + (A_{j-1} + D_{j-1})] / \text{nombre d'images} \quad [\text{éq. 14}]$$

moyenne sur 2 jours

$$4. [(A_j + D_j) + (A_{j+1} + D_{j+1}) + (A_{j-1} + D_{j-1})] / \text{nombre d'images} \quad [\text{éq. 15}]$$

moyenne sur 3 jours

où A et D sont les T_b de chaque phase (ascendante et descendante) tandis que j est le jour julien considéré.

La périodicité de SSM/I, c'est-à-dire le temps que requiert le capteur pour couvrir la Terre entière, est d'un peu plus de 72 heures (3 jours). Cependant, la zone d'étude simulée par le MRCC est couverte en 2 jours et 2 phases (équations 13 et 14). Nous pouvons moyennner sur 2 phases (1 phase de jour et 1 phase de nuit) puisque la normalisation à 19GHz en polarisation horizontale permet de réduire le facteur de température de surface T_s qui varie en fonction du jour et de la nuit. Une erreur peut s'introduire dans notre algorithme si la neige fond durant le jour puisque l'émissivité de la neige mouillée est beaucoup plus forte que celle de la neige sèche en raison de la faible diffusion à l'intérieur du couvert nival. En effet, la présence de l'eau dans le couvert nival a pour conséquence d'atténuer la constante diélectrique augmentant ainsi l'émissivité de la neige à la manière d'un corps noir (Prigent et Aires, 2003).

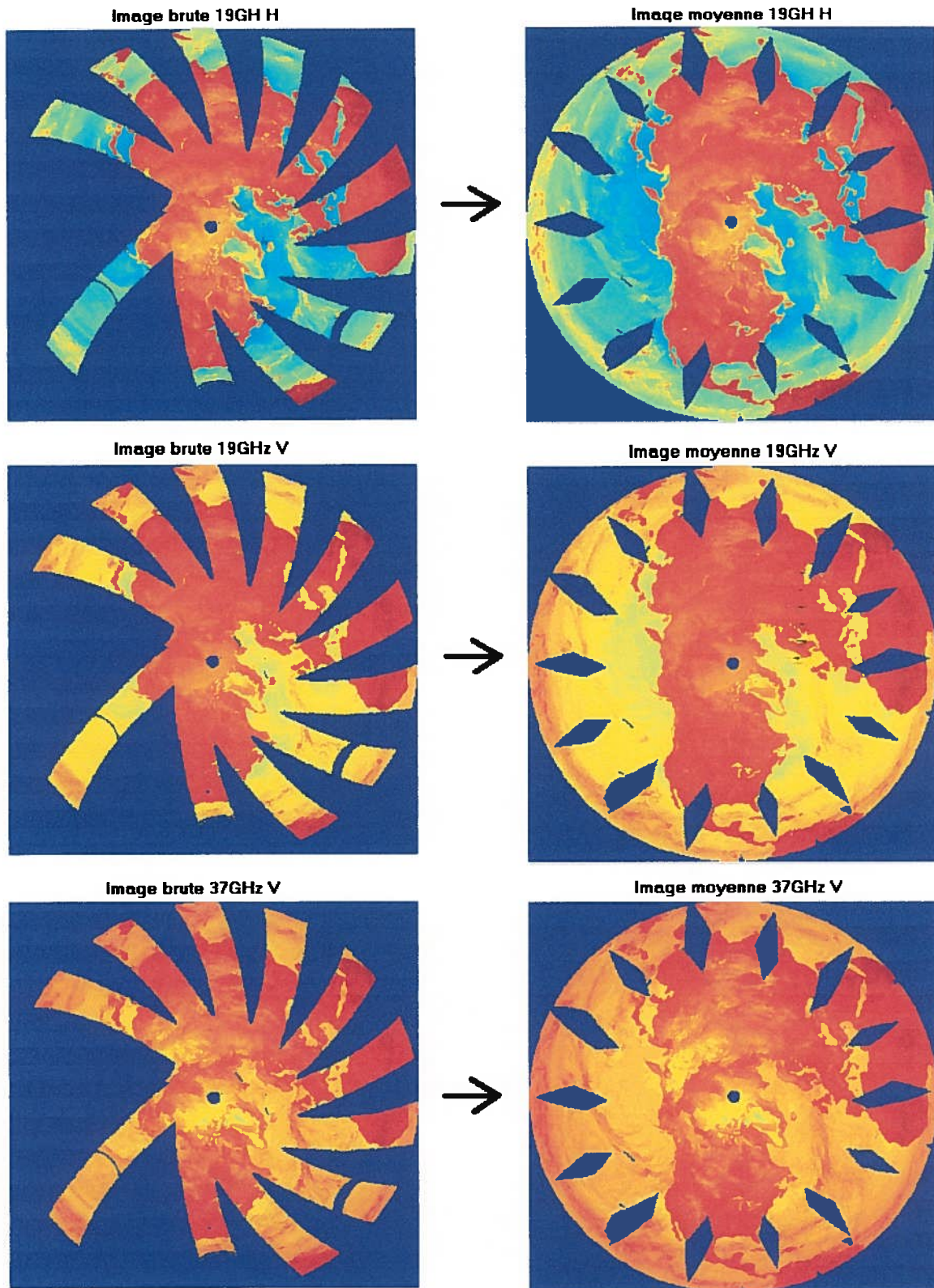


Figure 14: Images brutes et moyennes sur 2 jours pour chaque fréquence utilisée

Sur les images (Figure 14 à droite et Figure 15), on voit bien que la zone du MRCC est couverte complètement et le lissage sur 2 jours et 2 phases est donc suffisant. Nous pouvons donc maintenant appliquer notre algorithme qui permet d'extraire la neige du signal en micro-ondes passives. Pour chaque jour, nous obtenons donc une image semblable à la figure 15.

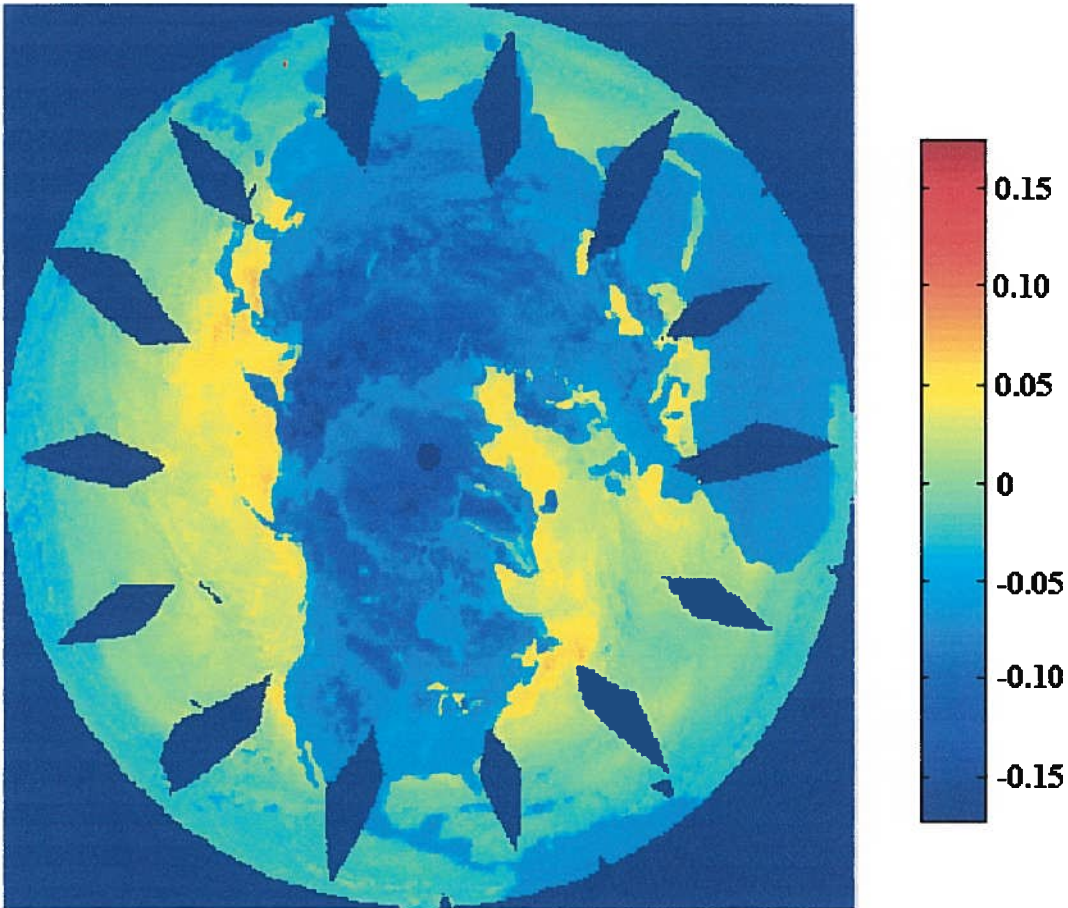
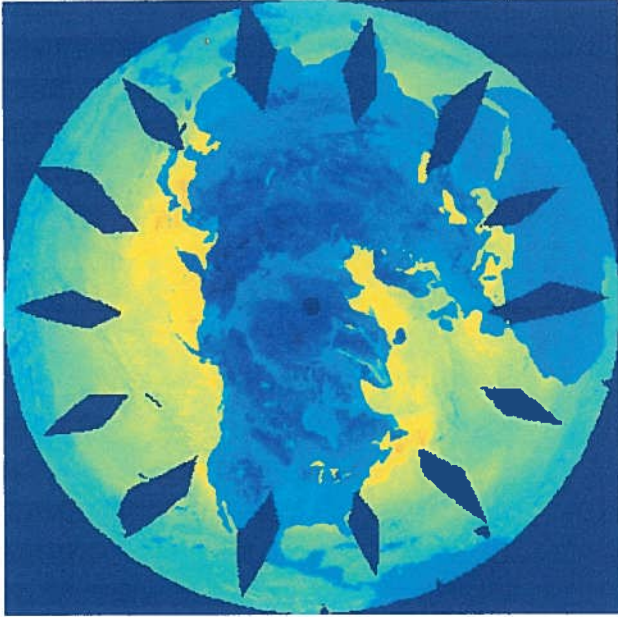
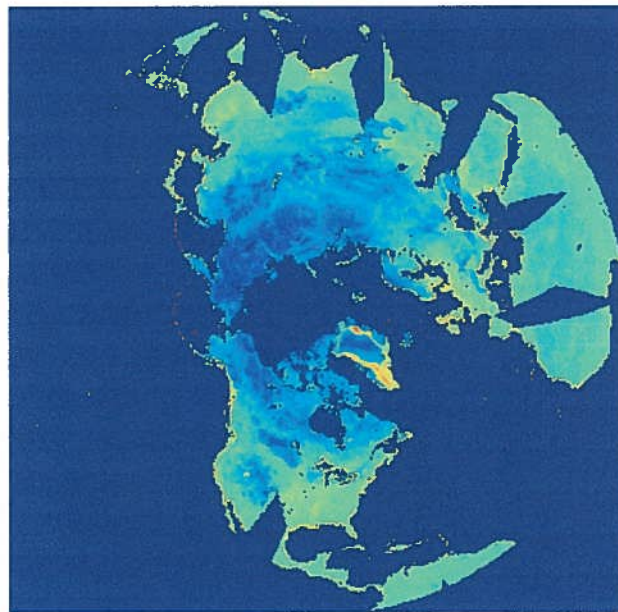


Figure 15: Image de la différence normalisée des températures de brillance issue de l'opération $(37V - 19V) / 19H$ moyennée sur 2 jours

Comme nous travaillons sur le couvert nival, nous voulons éliminer les océans et les pixels ayant trop d'eau. Concernant les océans, il existe dans la base de données AVHRR un masque fait sur les océans en projection EASE-Grid qu'il est possible de superposer à nos images (Figure 16) pour éviter de considérer la neige présente sur les masses d'eau gelées. Par conséquent, nous considérerons toujours le même nombre de pixels sur le territoire d'étude.

Image 37V - 19V / 19H**Masque NSIDC****Résultat de la superposition***Figure 16: Superposition du masque sur les océans aux images SSM/I*

Le résultat consiste en une image par jour sur toute la série temporelle, qui s'étend de août 1992 à juin 1995 (1064 images), dont on peut extraire la valeur de ΔT_b pour chaque pixel considéré. Le signal ainsi extrait permet de retracer la présence ou l'absence de couvert nival en fonction d'un seuil trouvé

préalablement en relation avec les données météorologiques et les données d'occupation du sol. Cependant, comme l'illustre la figure 17, le signal contient beaucoup de bruit en particulier dans les zones de transitions de saison, c'est-à-dire lors de l'automne et du printemps. Il se peut alors que nous perdions des jours de neige en hiver ou que nous en ajoutions en été en fonction du seuil utilisé. Un filtrage médian a été appliqué et retient la valeur médiane sur 25 jours. L'application de ce filtre sur les 1064 jours de données pour chacun de pixels permet de régulariser le signal ΔT_b pour ainsi éviter de créer des erreurs en appliquant le seuil adapté. Ceci permet donc de régulariser les résultats surtout à l'automne et au printemps ou le bruit est plus significatif. Le filtre médian est évidemment mieux approprié qu'un filtre moyen puisque ce dernier peut être influencé par les variations extrêmes ce qui n'est pas le cas de la médiane. La différence entre les 3 filtres est discutée dans la section 7.2..

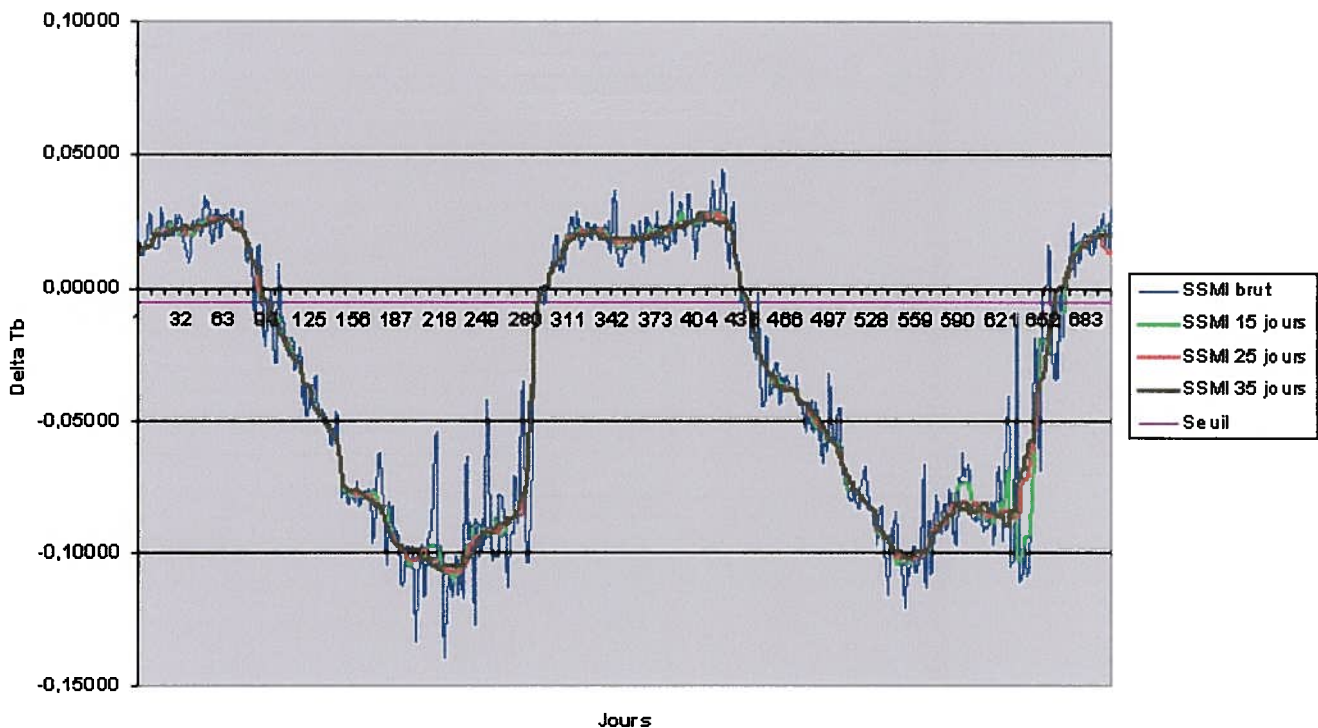


Figure 17: Comparaison des filtres médians sur 15, 25 et 35 jours du signal brut ΔT_b sur toute la base de donnée (1992-1994) pour la région de Kuujuaq (Nunavik)

À partir des images finales SSM/I, il est donc maintenant possible de produire des images de neige SSM/I auxquelles nous donnerons 3 valeurs (figure 18):

- 0 = Masque sur l'eau et le territoire exclus de l'étude
- 1 = présence de neige
- 2 = absence de neige

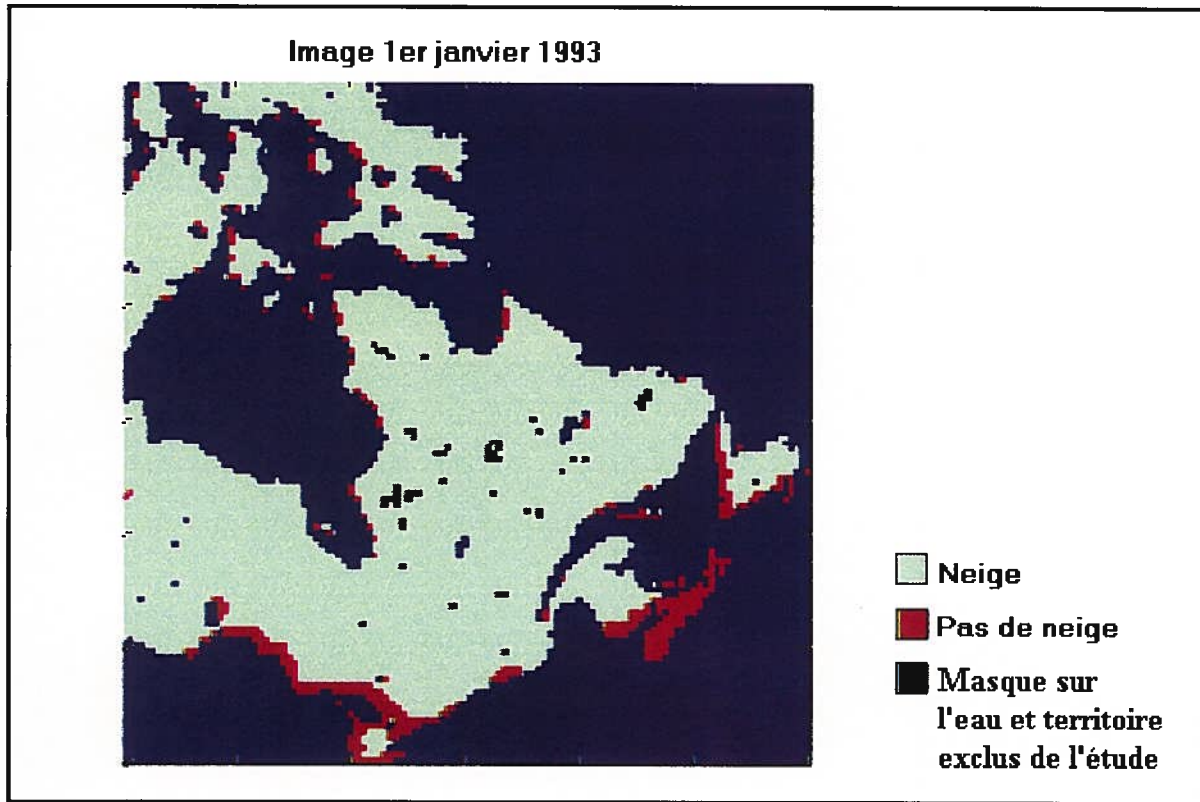


Figure 18: Image de neige de SSM/I en projection EASE-Grid

Un effet de bord est présent sur la figure 18. Ceux-ci sont habituellement dus à la proximité d'une grande masse d'eau qui vient fausser la T_b perçue par le capteur. Pour éliminer ces effets, nous créons une zone tampon sur les côtes pour éviter de considérer de tels pixels. De plus, nous avons éliminé les pixels ayant plus de 40% d'eau.

Nous avons fait le test sur 10%, 20%, 30%, 40%, 50% et 60% et le seuil à 40% est le plus raisonnable comme le démontre la figure 19.



Figure 19: Masque sur les pixels ayant une fraction d'eau supérieure à 40%

7.2. Validation de SSM/I avec les données météorologiques

Nous devons reclassifier l'image d'occupation du sol de 31 classes en 4 classes de densité de végétation : dense, non dense, toundra et agricole. La figure 20 illustre le pourcentage de chaque type de densité de végétation pour chacun des pixels de la zone d'étude.

Nous avons préalablement extrait la zone couverte par le modèle de l'image d'occupation du sol. Nous avons maintenant le pourcentage de chaque type d'occupation du sol pour chacun des pixels de la zone d'étude. Nous devons mettre en relation ces valeurs avec les données météorologiques contenues dans une région donnée. À l'aide du CD-ROM des données météorologiques canadiennes (SMC, 2000), un seuil est identifié sur les différences normalisées de températures de brillance dans le but de déterminer la présence ou l'absence

de neige, en plus de valider l'algorithme utilisé. Nous avons effectué une première comparaison avec ces données de neige météorologiques et des données de neige issues de SSM/I.

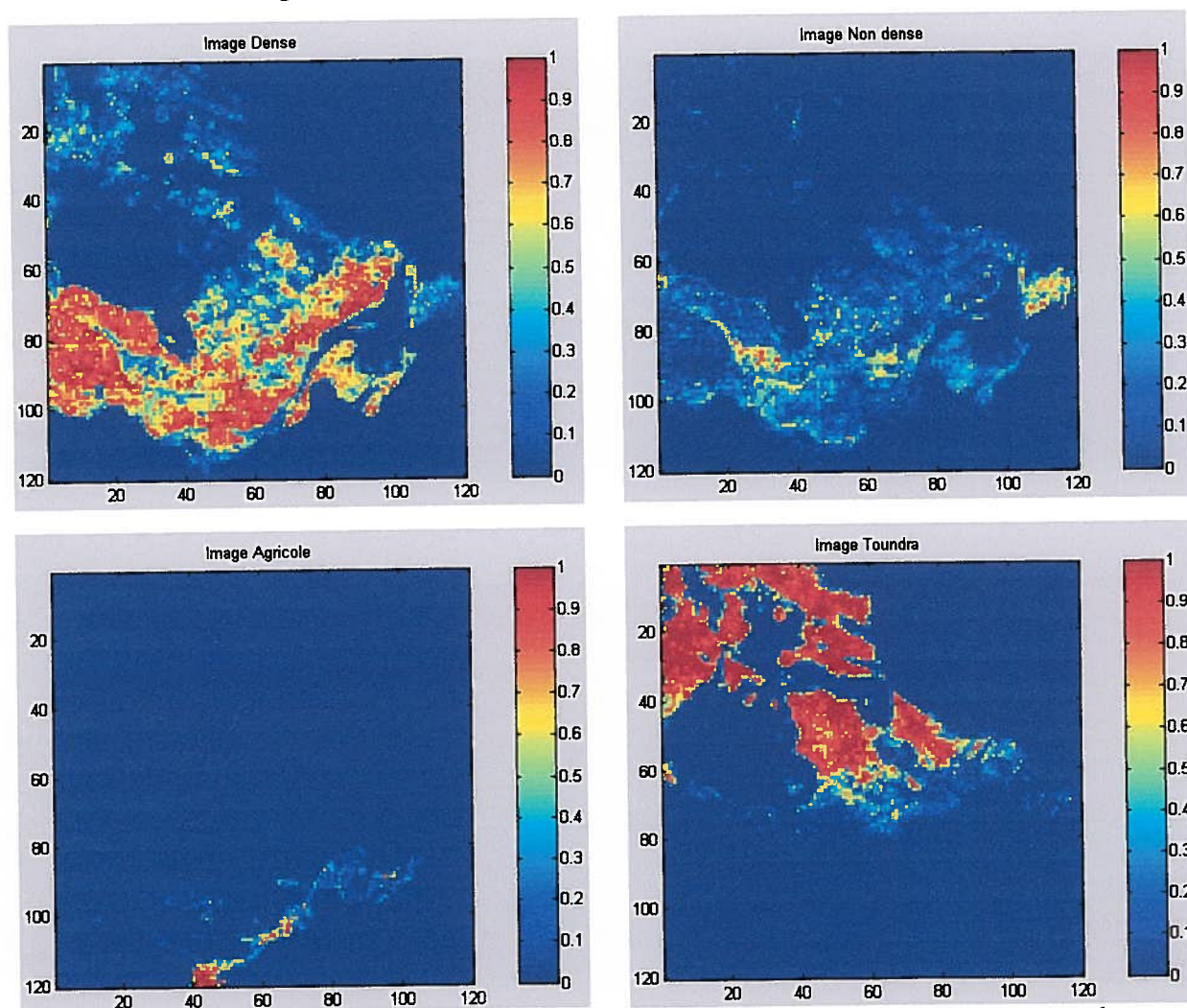


Figure 20: Répartition des différents types d'occupations du sol par densité au Québec

La comparaison des données SSM/I aux données des stations météorologiques permet de valider les données SSM/I en plus d'indiquer quel seuil utiliser pour déterminer la présence ou l'absence de neige au sol. À l'aide de l'image d'occupation du sol au Canada (Figure 11), nous sommes en mesure d'établir la densité de végétation pour chacune des régions où se trouvent les stations météorologiques. Les données météorologiques fournissent de l'information sur l'épaisseur du couvert nival à chaque jour. Nous devons donc seuiller ces

données pour déterminer à partir de quelle épaisseur de neige on peut considérer que le capteur SSM/I perçoit le couvert nival (Figure 17). Il apparaît qu'une épaisseur de 5 cm ou moins de neige au sol peut être considérée comme négligeable pour les images SSM/I, sauf pour les zones de toundra où aucun seuil n'est utilisé. Le tableau 2 donne les seuils associés aux 16 stations considérées le long d'un transect Nord-Sud. Nous considérons ici les données binaires de neige pour SSM/I et pour les données météorologiques :

1 = couvert nival présent

0 = couvert nival absent

No station	Station	Coordonnées	Végétation*	Seuil SSM/I Tb	Seuil météo cm
1	Baie St-Paul	47.25N 70.30W	Dense	-0,015	5
2	Brome	45.11N 72.34W	Dense	-0,015	5
3	Bécancour	46.20N 72.26W	Dense	-0,015	5
4	Duchesnay	46.52N 71.39W	Dense	-0,015	5
5	Causapscal	48.37N 67.23W	Dense	-0,015	5
6	La Pocatière	47.30N 70.30W	Dense	-0,015	5
7	Ormstown	45.12N 74.05W	Agricole	-0,02	5
8	Iberville	45.33N 73.25W	Agricole	-0,02	5
9	St-Hubert	45.50N 73.42W	Agricole	-0,02	5
10	LG2-A	53.38N 77.42W	Non dense	-0,005	5
11	Chapais-2	49.47N 74.51W	Non dense	-0,005	5
12	Shefferville	54.48N 66.49W	Non dense	-0,005	5
13	LG4-A	53.54N 73.40W	Non dense	-0,005	5
14	Nain-A	56.33N 61.41W	Toundra	-0,005	0
15	Saglek	58.20N 62.35W	Toundra	-0,005	0
16	Kuujuak	58.60N 68.25W	Toundra	-0,005	0

* dérivé du Canadian Land Cover, CCRS

Tableau 2: Seuils utilisés sur les ΔT_b et l'épaisseur du couvert nival pour les 16 stations étudiées

Les variations du nombre de jour de neige sont relativement petites entre les trois filtres. En effet, le filtrage à 15 jours nous donne 307 jours de neige, et les filtres à 25 et 35 jours donnent 303 et 300 jours de neige respectivement sur toute la série qui s'étend du 1^{er} août 1992 au 30 juin 1994 (Figure 17). Nous pouvons maintenant comparer directement les deux bases de données pour chacune des régions considérées et déterminer la marge d'erreur associée. Le milieu de toundra a un seuil plus sensible et des fluctuations d'environ 0.001 sur

le seuil de -0.005 peuvent changer de beaucoup les résultats de la comparaison des données météorologiques avec SSM/I. Le seuil de la végétation dense est un peu moins sensible où une fluctuation d'environ 0.005 sur le seuil de -0.02 est nécessaire pour faire varier les résultats. Pour comparer le nombre de jour de neige SSM/I et le nombre de jour de neige des stations météorologiques, nous avons seulement considéré les périodes de transition entre les saisons (Figure 21). Entre 1992 et 1994, nous avons 4 transitions, l'automne correspond à la période allant du 1^{er} août au 28 février et le printemps du 1^{er} mars au 31 juillet.

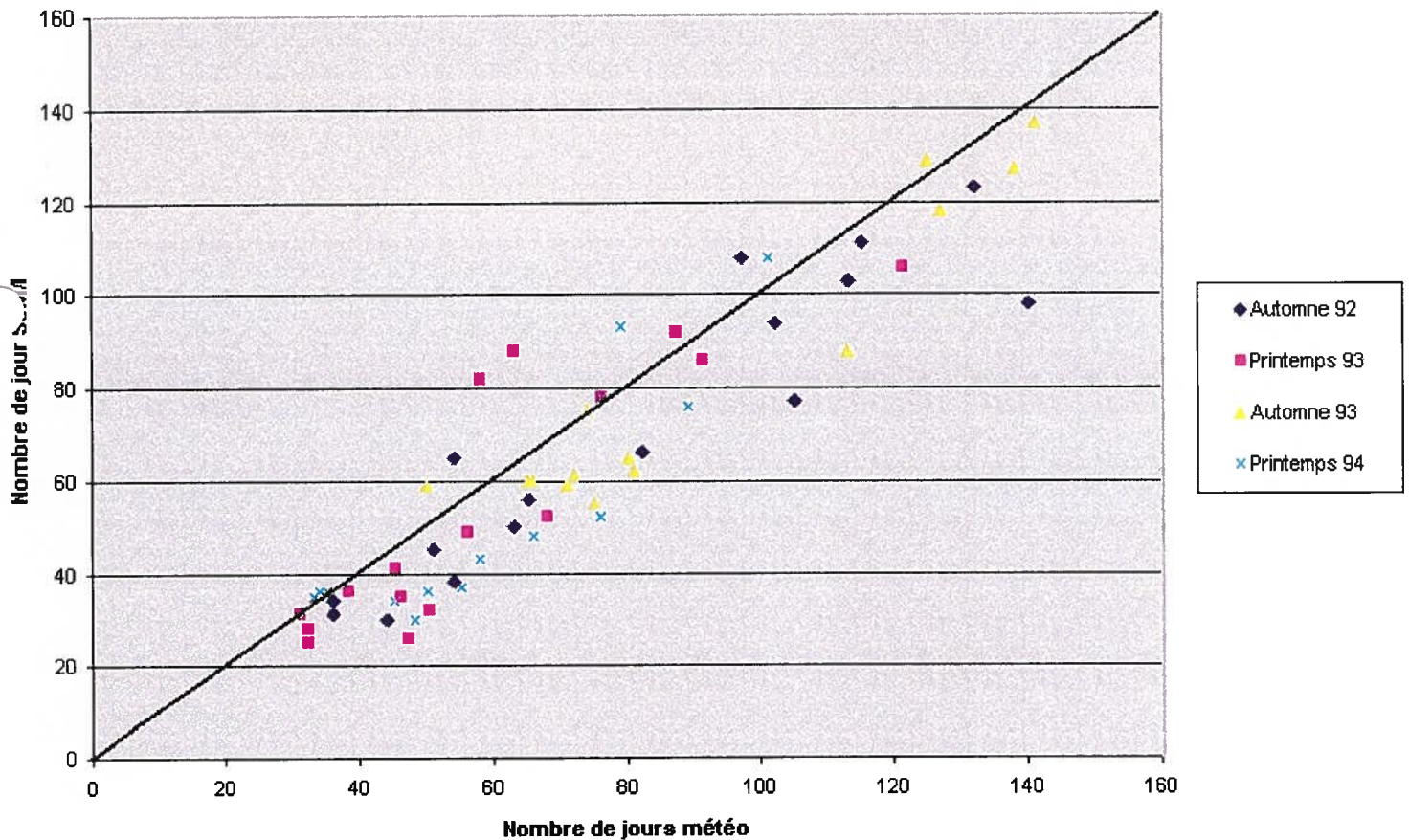


Figure 21: Comparaison du nombre de jours de neige entre SSM/I et la base de données météorologiques des 16 stations (voir tableau 2)

L'analyse de régression donne une pente de 0.92 et une erreur-type (erreur quadratique) de 11.77 jours par transition (août – février pour l'automne et mars – juillet pour le printemps) calculée en moyenne sur toute la série temporelle qui

s'étend de août 1992 à juin 1994 (4 transitions) et sur les 16 stations sélectionnées (Tableau 2).

La figure 22 illustre l'écart entre le nombre de jour de neige météo et SSM/I pour les 16 stations et pour chaque période :

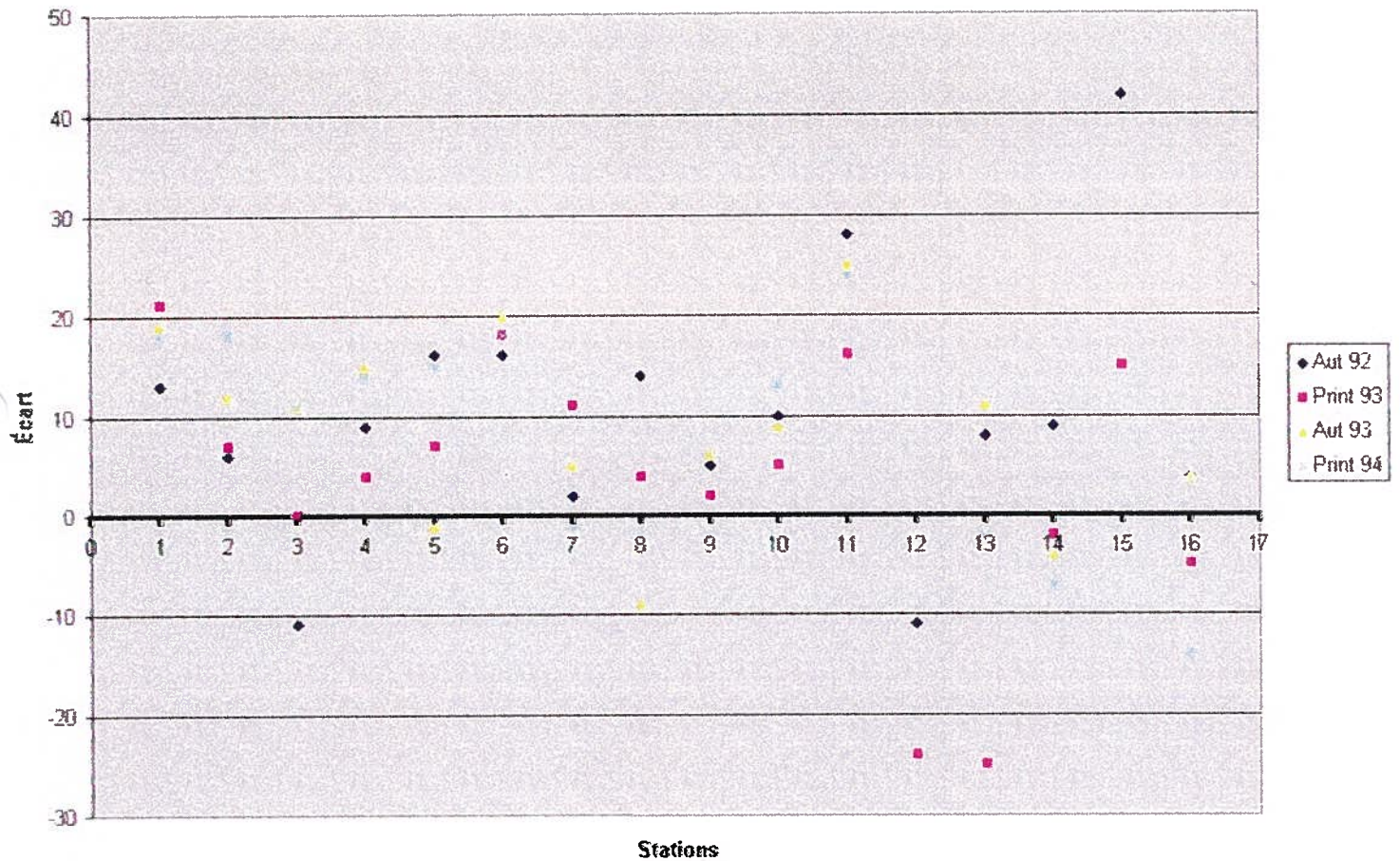


Figure 22: Écart entre le nombre de jours de neige des données météorologiques et des données SSM/I (données météorologiques – SSM/I)

	Aut 92	Print 93	Aut 93	Print 94	Moyenne
Baie St-Paul	13.00	21.00	19.00	18.00	17.75
Brome	6.00	7.00	12.00	18.00	10.75
Bécancour	11.00	0.00	11.00	11.00	8.25
Duchesnay	9.00	4.00	15.00	14.00	10.50
Causapscal	16.00	7.00	1.00	15.00	9.75
La Pocatière	16.00	18.00	20.00	18.00	18.00
Ormstown	2.00	11.00	5.00	1.00	4.75
Iberville	14.00	4.00	9.00	2.00	7.25
St-Hubert	5.00	2.00	6.00	2.00	3.75
LG2-A	10.00	5.00	9.00	13.00	9.25
Chapais-2	28.00	16.00	25.00	24.00	23.25
Shefferville	11.00	24.00			17.50
LG4-A	8.00	25.00	11.00	2.00	11.50
Nain-A	9.00	2.00	4.00	7.00	5.50
Saglek	42.00	15.00			28.50
Kuujjuak	4.00	5.00	4.00	14.00	6.75
Moy % erreur	12.75	10.38	10.79	11.36	12.06

Tableau 3: Différence absolue entre le nombre de jours de neige météo et le nombre de jours de neige SSM/I

On remarque dans la figure 22 une différence positive qui démontre encore une fois que le nombre de jours de neige météo est en moyenne plus élevé que le nombre de jours de neige SSM/I. Chaque saison se comporte légèrement différemment au niveau de l'erreur et c'est pourquoi nous avons calculé l'erreur pour chacune de celles-ci (tableau 3). Pour chaque saison, nous avons fait la moyenne de l'écart absolu entre le nombre de jours de neige SSM/I et le nombre de jour de neige météo en fonction du nombre de jours de la saison considérée. L'écart absolu en jour ne varie pas beaucoup entre les saisons et se situe entre 10.38 jours pour le printemps 1993 et 12.75 jours pour l'automne 1992 avec une moyenne relative de 12.06 jours pour les 4 saisons combinées.

	Aut 92	Print 93	Aut 93	Print 94	Moyenne
Baie St-Paul	4.76	12.26	7.80	18.46	10.82
Brome	2.73	5.52	4.39	11.54	6.04
Bécancour	6.36	1.38	4.39	7.69	4.96
Duchesnay	4.29	3.87	6.34	6.92	5.36
Causapscal	7.00	0.61	3.90	6.15	4.42
La Pocatière	6.00	9.09	7.80	12.31	8.80
Ormstown	0.95	4.76	1.46	0.77	1.99
Iberville	5.00	2.07	5.85	1.54	3.62
St-Hubert	0.95	0.65	1.95	2.31	1.46
LG2-A	4.21	2.86	3.41	8.46	4.74
Chapais-2	15.00	9.70	11.71	20.00	14.10
Shefferville	5.50	15.76			10.63
LG4-A	4.21	14.86	5.37	3.08	6.88
Nain-A	4.09	4.14	1.95	5.38	3.89
Saglek	20.50	9.09			14.80
Kuujuak	1.00	3.03	1.95	10.77	4.19
Moy % erreur	5.78	6.23	4.88	8.24	6.28

Tableau 4: Comparaison de l'erreur absolue en fonction des saisons et des stations

Le pourcentage d'erreur absolue dans le tableau 4 est calculé en fonction de la saison considérée (nombre de jours). L'erreur moyenne pour les 4 périodes est de 6.28% avec une variation entre 4.88% et 8.24%. L'erreur étant relativement faible, nous pouvons considérer les images SSM/I comme référence compte tenu de l'erreur possible sur les données météorologiques très ponctuelles.

7.3. Extraction et traitement des données MRCC

Les données brutes du MRCC que nous utilisons sont celles de l'équivalent en eau de la neige en kg/m^2 qui, en supposant une densité de 1 g/cm^3 , est donc équivalent à des mm de EEN. Ces sorties sont à une résolution de 30 km sur une projection stéréographique polaire (Figure 23). Tel que mentionné dans la section 6.3.1., la grille a une dimension de 100 x 100 pixels que nous voulons comparer avec les résultats de SSM/I.

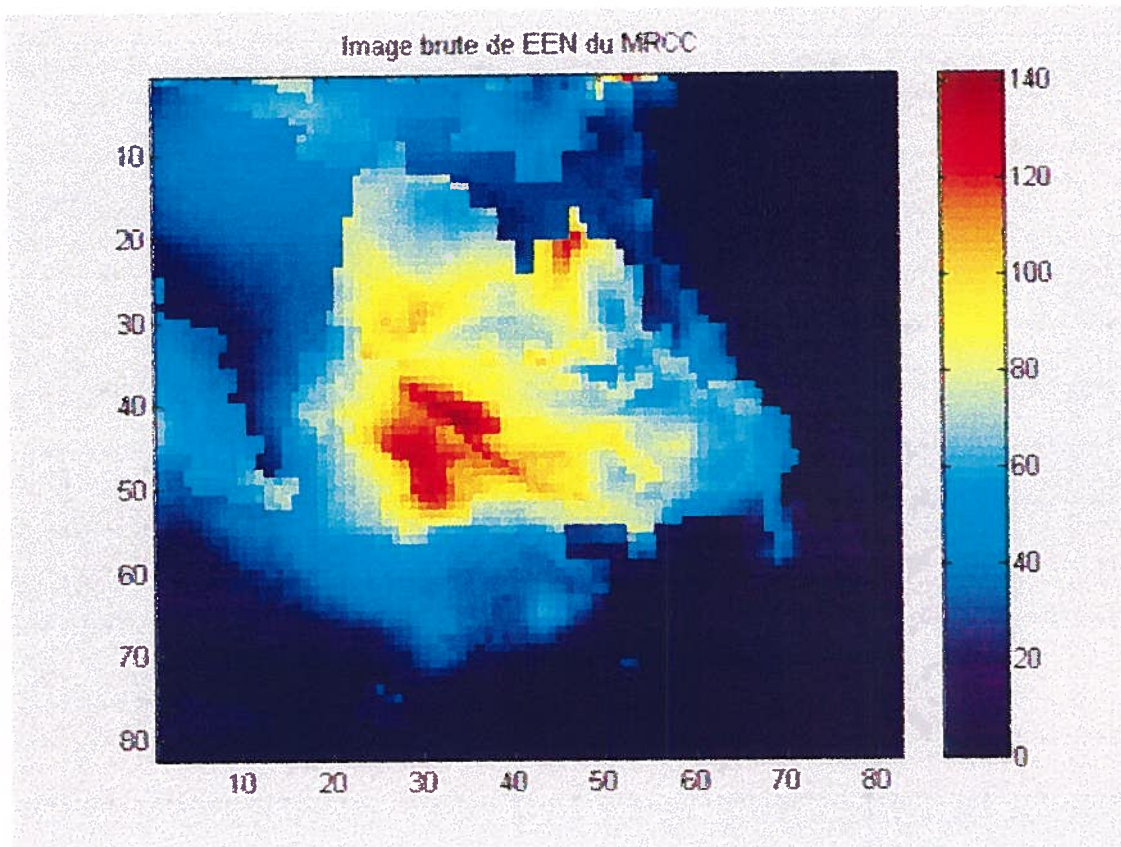


Figure 23: Image brute de EEN du MRCC en projection stéréographique polaire

Nous devons maintenant passer de la grille MRCC à la EASE-Grid pour comparer les deux bases de données. Nous devons passer d'une projection stéréographique polaire avec une résolution de 30 km à une projection EASE-Grid avec une résolution de 25 km. Cette opération est possible avec les fichiers de latitudes et de longitudes présents dans les deux bases de données. Avec un échantillonnage au plus proche voisin, nous pouvons passer d'une projection à l'autre (Figure 24).

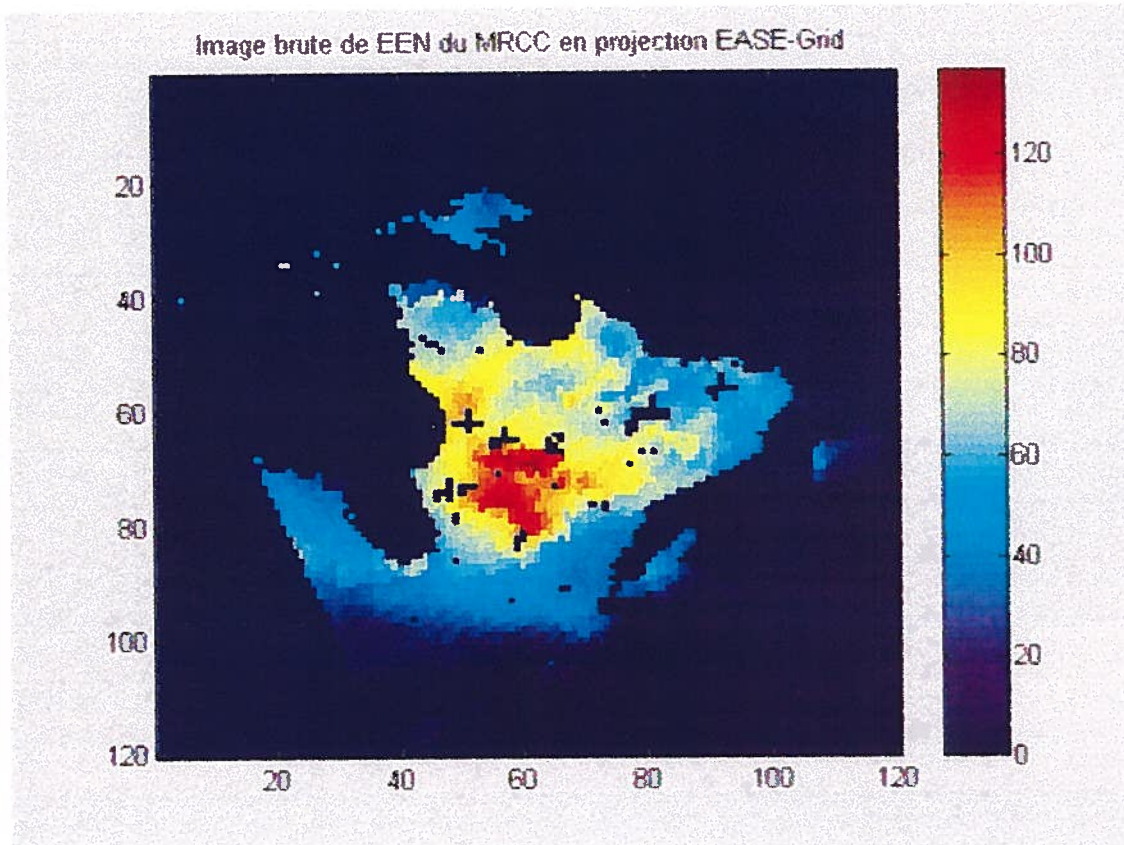


Figure 24: Image brute de EEN MRCC en projection EASE-Grid avec le masque

Nous avons extrait l'information sur le couvert nival à partir de ces images de EEN en utilisant plusieurs seuils : 0 kg/m^2 , 5 kg/m^2 et 10 kg/m^2 . Les résultats montrent que le seuil à 5 kg/m^2 est le plus plausible par rapport au seuil de détection du capteur SSM/I et de la précision du modèle pour détecter la présence de couvert nival. La figure 25 illustre l'image ainsi obtenue où nous avons pris soin d'enlever la péninsule du Groenland, comme nous l'avons fait pour les images SSM/I, puisque cette dernière, englacée toute l'année, fausse les données et un différent traitement de ΔT_b devrait être appliqué pour l'étudier.

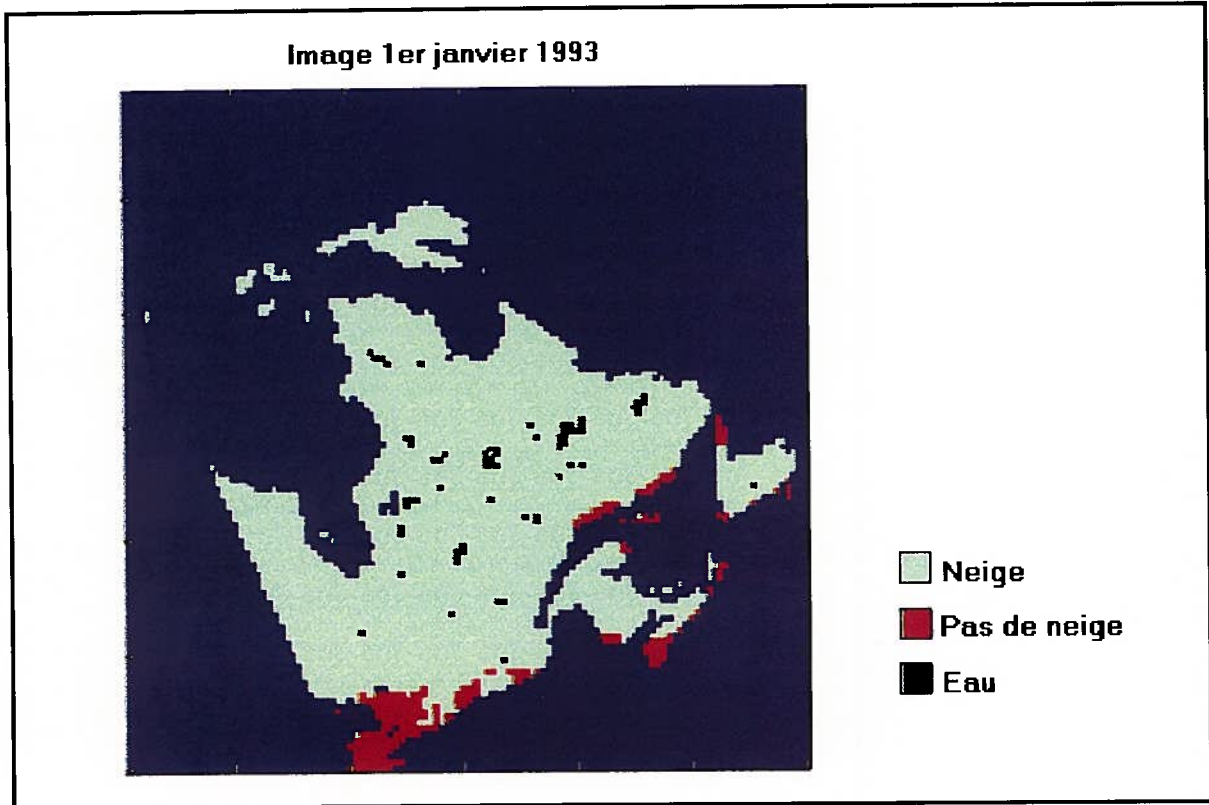


Figure 25: Image de neige du MRCC en projection EASE-Grid

7.4. Extraction et traitement des données du SMC

Ces données d'équivalent en eau de la neige en mm du SMC sont aussi sur une grille différente que SSM/I (section 6.3.2.). Tel que nous l'avons fait dans le cas des images du MRCC, nous projetons ces images du SMC en EASE-Grid. La figure 26 illustre l'image obtenue.

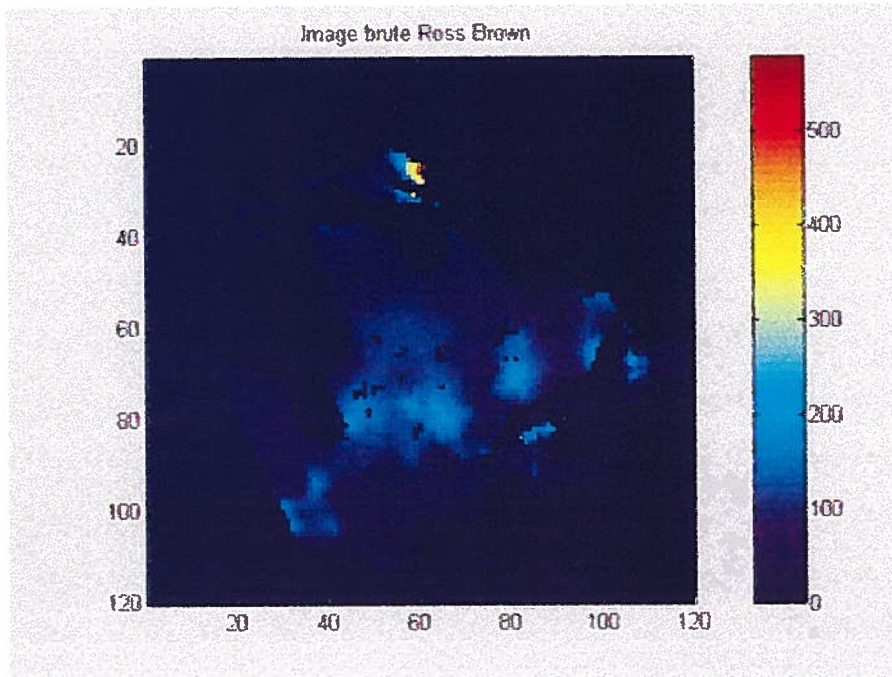


Figure 26: Image brute de EEN du SMC en projection EASE-Grid

Afin d'extraire le couvert nival, le même seuil appliqué au MRCC est utilisé.

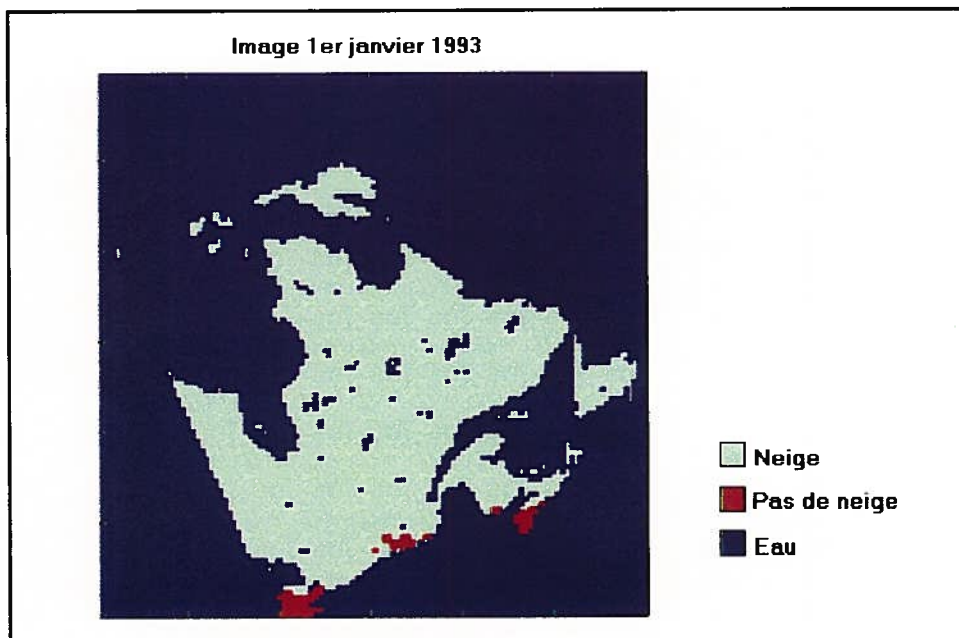


Figure 27: Image de neige du SMC en projection EASE-Grid

7.5. Mise en concordance spatiale et temporelle des bases de données

Comme le changement de projection de résolution est déjà fait, la concordance spatiale des données ne nécessite ici que l'application du masque sur la zone tampon qui élimine les effets de bords tel que mentionné dans la section 7.1.1.. La figure 28 illustre le masque que nous avons appliqué aux images avant d'en faire la comparaison ainsi que les images finales.

Les données du MRCC sont issues d'une synthèse d'une image à tous les 6 heures ramenées à 1 image par jour (héliosynchrone). Les données SSM/I sont aussi journalières, nous avons au départ 2 images par jour (phases ascendante et descendante) que nous avons ramenées à 1 image par jour avec l'opération de moyenne des images. Les données des analyses de EEN du SMC sont aussi journalières et par conséquent, la comparaison entre les trois dernières bases de données est possible.

Finalement, les images AVHRR sont hebdomadaires. Pour comparer cette base de données avec celle de SSM/I qui est journalière, le cumul en jours de SSM/I divisé par 7 nous donne une valeur de présence ou absence de neige pour chaque semaine SSM/I. La concordance spatiale ne représente pas un problème puisque les données AVHRR sont issues de la EASE-Grid tout comme les données SSM/I.

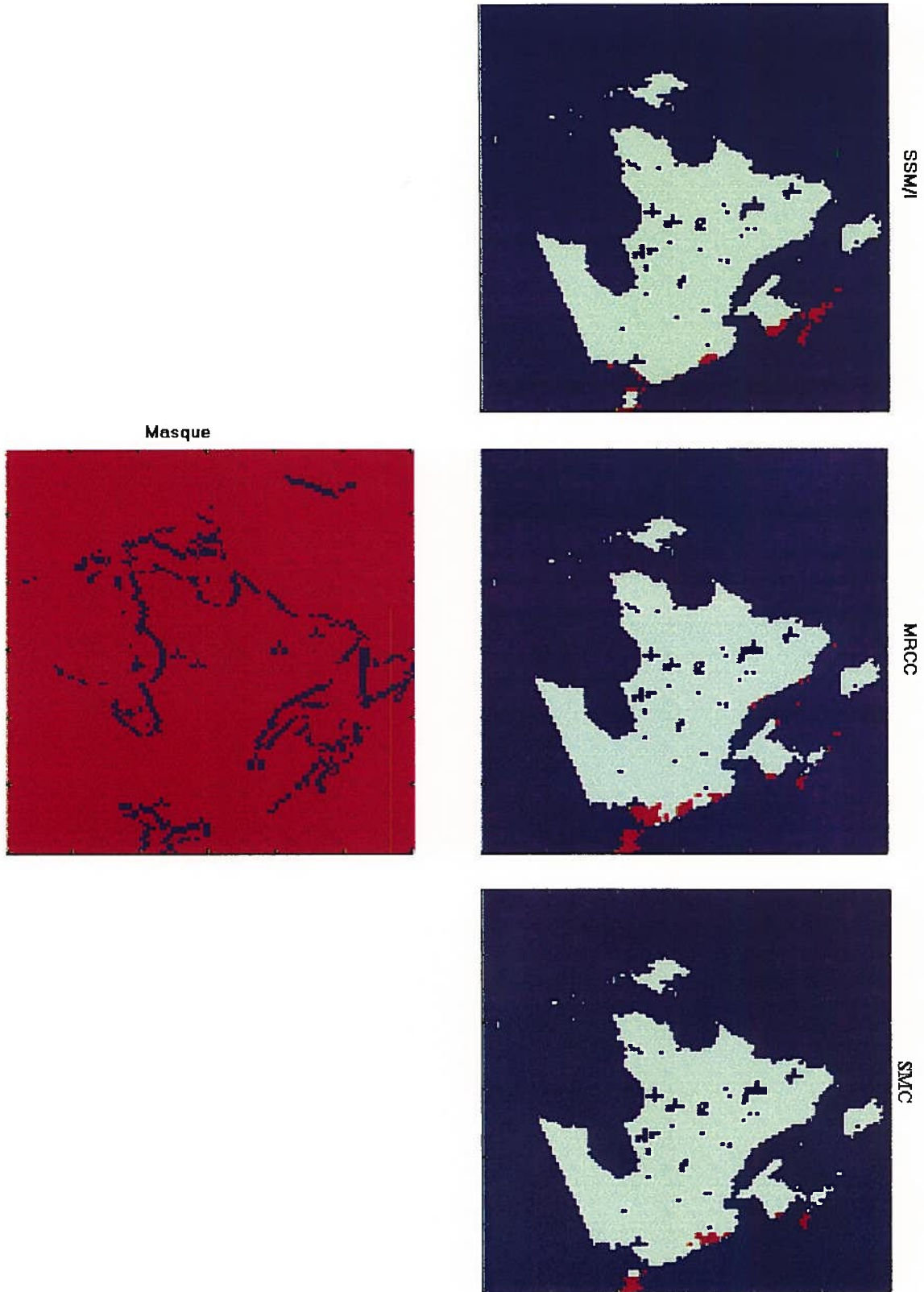


Figure 28: Mise en concordance spatiale des bases de données (1^{er} janvier 1993)

7.6. Extraction complète de la série AVHRR

La série des données de couvert nival VIS/PIR d'AVHRR est la plus longue du genre et s'étend de 1966 à 2001. Nous étudions donc cette base de données de façon spatiale (étude du nombre de pixels enneigés) dans un premier temps et de façon temporelle (étude du nombre de semaines de neige) dans un deuxième temps.

Nous avons extrait des données de neige sur toute la série temporelle pour tenter d'évaluer son comportement au fil des ans pour les 4 mêmes zones que dans le cas de la comparaison de SSM/I vs les données du SMC et le MRCC.

Les données brutes de AVHRR contiennent plusieurs fichiers de couverts nivaux et de glace que nous devons regrouper pour avoir des images binaires de présence ou d'absence de neige. Les données sont classées comme suit :

0 = pixel libre de neige

1 = pixel couvert de neige

2 = glace de mer

3 = glace de mer (lors de la reprojection)

4 = océan

5 = pixel couvert de neige (lors de la reprojection)

6-252 = non utilisé

253 = impossible à classer

254 = pixel de coin (en dehors de l'Hémisphère Nord)

255 = océan

Pour créer une image binaire de neige, nous avons regroupé les valeurs 1 et 5 (Figure 29).

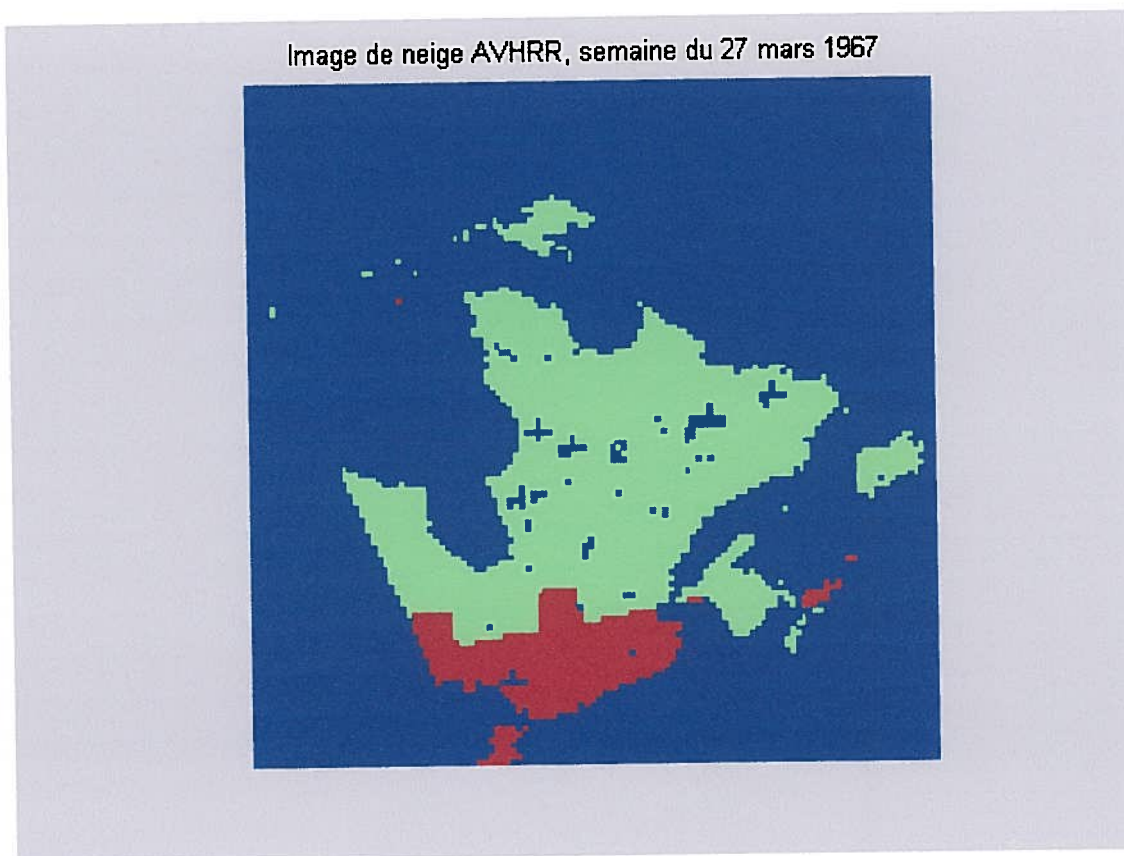


Figure 29: Image de neige de AVHRR en projection EASE-Grid pour la semaine du 27 mars 1967

8. Résultats et analyse

8.1. SSM/I

8.1.1. SSM/I vs AVHRR

Cette section concerne la comparaison de deux bases de données sur différentes échelles temporelles. La base de données du capteur est journalière et celle de AVHRR est hebdomadaire. Pour arriver à comparer les deux bases de données, nous avons cumulé les données SSM/I que nous diviserons par 7 pour obtenir une donnée équivalente hebdomadaire.

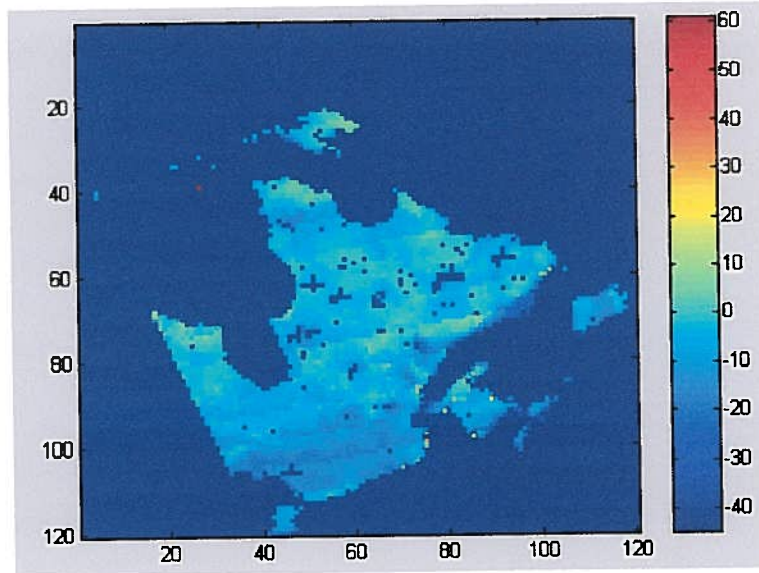


Figure 30: Différence entre le cumul du nombre de semaines de neige SSM/I et le cumul du nombre de semaines de neige AVHRR entre août 1992 et juin 1994

Nous avons donc comparé la valeur de cette différence pour 4 régions données au nord, au sud, à l'est et à l'ouest (Figure 31) sur 100 semaines considérées entre août 1992 et juin 1994 :

Nord : -6.21 semaines	=>	6.21%
Sud : -13.91 semaines	=>	13.91%
Est : -3.29 semaines	=>	3.29%
Ouest : -5.11 semaines	=>	5.11%

La différence semble plus marquée au sud avec une différence de près de 14 semaines. On peut donc dire que AVHRR tend à surestimer le couvert nival présent au sol. Ceci peut être dû à plusieurs facteurs notamment au fait qu'un couvert nuageux peut être considéré comme étant un couvert nival dans le domaine du visible/proche infrarouge.

8.1.2. SSM/I vs SMC

Nous comparons maintenant les données de neige des images SSM/I aux données de EEN du SMC:

- Images de neige SSM/I issues du seuillage des valeurs :

$$\frac{Tb\ 37\ GHz\ V - Tb\ 19\ GHz\ V}{Tb\ 19\ GHz\ H}$$

- Images de neige EEN du SMC issues d'un seuillage à 5mm d'équivalent en eau mis en projection EASE-Grid.

Nous avons comparé les 2 bases de données dans un premier temps pour 4 zones différentes et dans un deuxième temps pour tout le Québec. L'étendue des zones étudiées est de 11 x 11 pixels pour une étendue globale de 75 625 km² pour chacune des zones et la surface du Québec est de 3452 pixels (2.16 x 10⁶ km²).

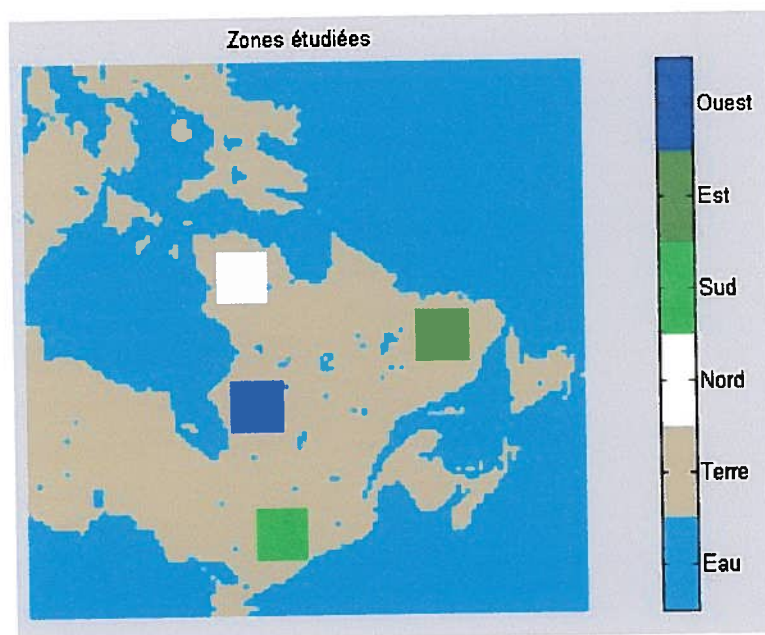


Figure 31: 4 zones d'études pour la comparaison de SSM/I avec les analyses du SMC

Les résultats obtenus sur 4 périodes de transition et sur les 4 zones (nord, sud, est, ouest) sont présentés dans le tableau 5 et les figures 32 et 33. La variation temporelle journalière de l'erreur du modèle par rapport aux données satellites prises comme référence (graphiques à la page suivante) est analysée par rapport au nombre de pixels :

$$\Delta N = \frac{\text{Nombre de pixels de neige SSM/I} - \text{Nombre de pixels de neige du SMC}}{\text{Nombre de pixel total de la zone étudiée}}$$

[éq. 16]

	Aout-Février 1992-1993		Mars-Juillet 1993		Aout-Février 1993-1994		Mars-Juin 1994	
	Transition AUTOMNE		Transition PRINTEMPS		Transition AUTOMNE		Transition PRINTEMPS	
	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.
NORD	-1.6	8.4	-15.9	18.1	-5.0	8.0	-7.6	10.2
SUD	-36.0	36.0	-32.7	32.9	-29.6	29.6	-27.2	27.6
EST	-4.6	9.3	-15.0	18.1	-4.6	8.6	-22.4	25.2
OUEST	-9.4	11.3	-19.8	21.8	-14.1	15.7	-16.9	18.9
QUÉBEC	-7.6	7.7	-8.8	8.8	-7.6	7.8	-16.2	16.2

Tableau 5: Erreur moyenne et erreur quadratique moyenne (en % de surface ΔN) pour la comparaison de SSM/I avec les analyses du SMC sur 4 transitions, 4 zones et pour tout le Québec

L'erreur est maximale puisque nous n'avons considéré que les valeurs différentes de 0. L'erreur au printemps est toujours supérieure à celle de l'automne, la période de la fonte étant plus difficile à déterminer que celle de l'arrivée de la neige. Le Nord et l'Est correspondent aux erreurs les plus faibles l'automne (< 5 %). Au printemps, les 3 zones (Nord, Est et Ouest) donnent une erreur inférieure à 20 % au printemps, et le Sud a la plus grande erreur (~ 30 %). Globalement, ces résultats montrent que les analyses du SMC tendent à surestimer légèrement la présence de neige de 10 % (en surface).

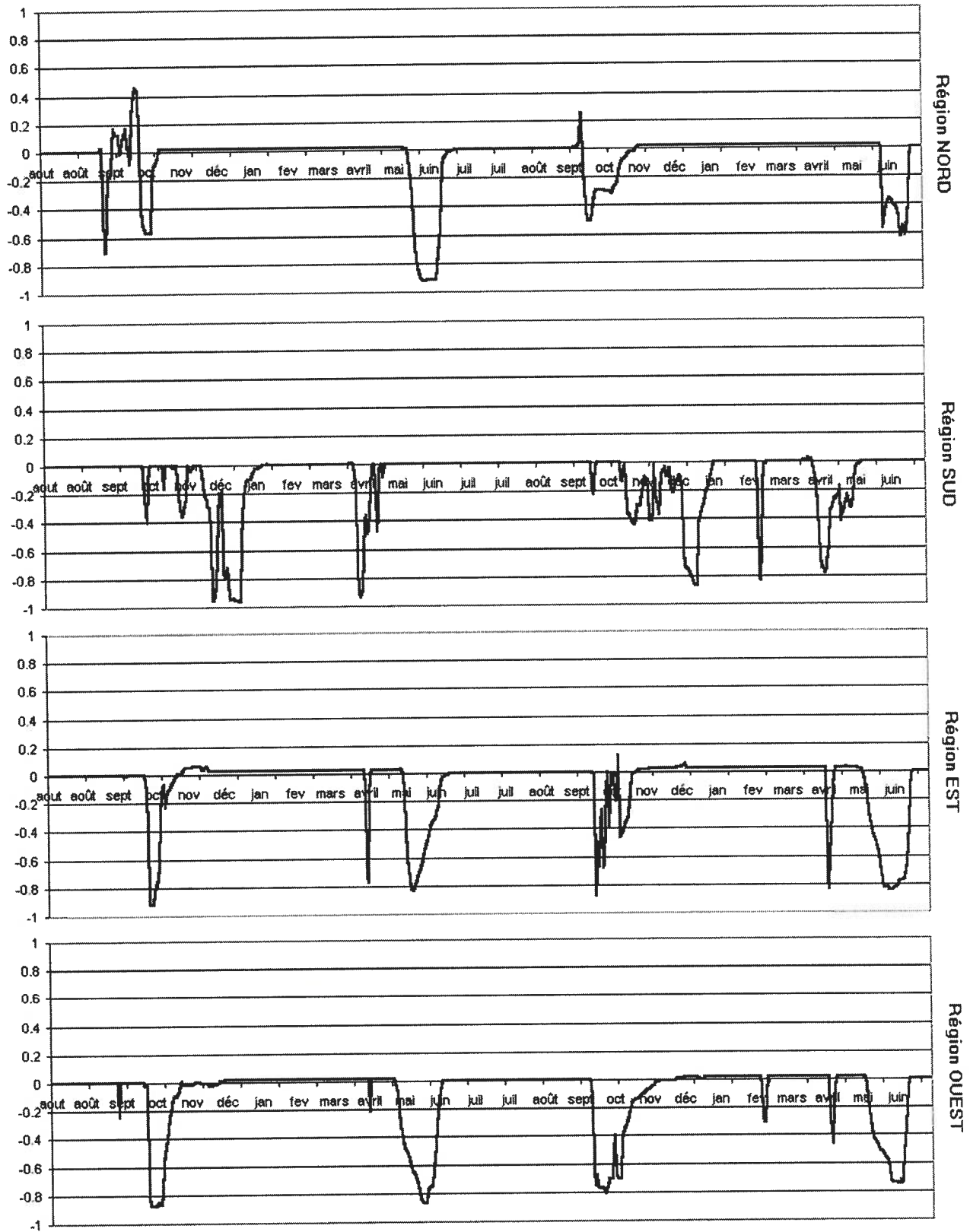


Figure 32: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour 4 zones pour SSM/I vs SMC

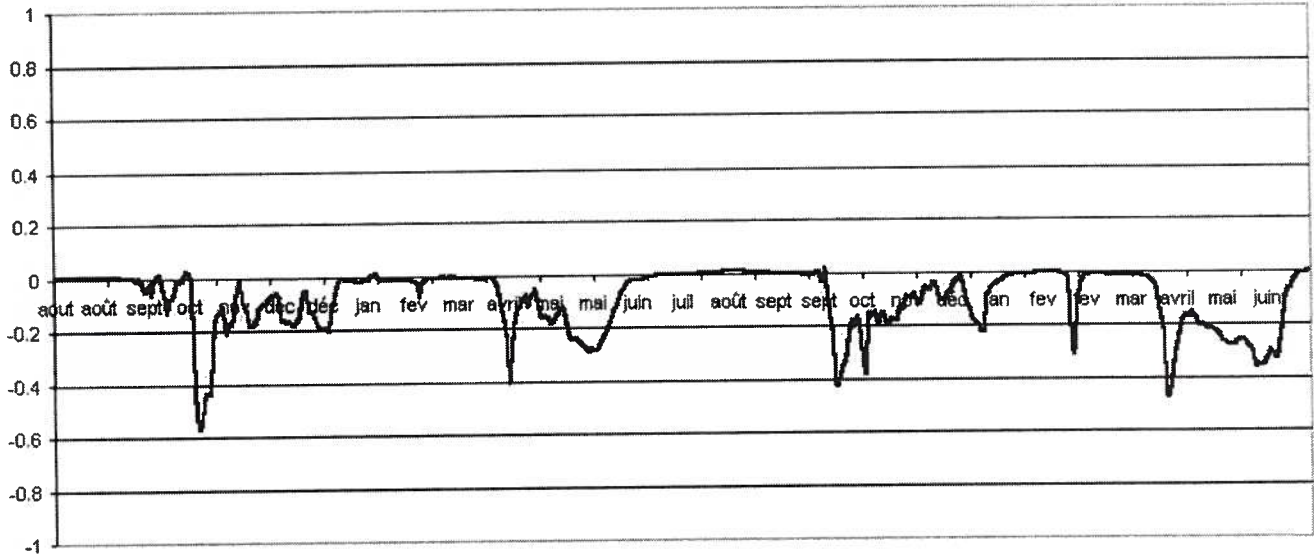


Figure 33: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour le Québec pour la comparaison de SSM/I avec le SMC

Les figures 32 et 33 mettent en évidence les moments où les différences apparaissent à l'automne et au printemps. Les différences entre les 2 années (1993 et 1994) ne sont pas significatives.

À partir de ces résultats, il est aussi possible d'analyser les variations spatiales de l'erreur, soit la répartition des omissions et des commissions pour chaque jour. Nous présentons dans les figures 34, 35, 36 et 37 des exemples de la comparaison pour 4 jours durant les transitions de printemps et d'automne. L'erreur se situe souvent à la bordure de la zone sans neige, pouvant ainsi produire un problème d'interpolation entre les stations pour les analyses du SMC.

Omission : Lorsque les analyses du SMC n'indiquent pas de neige alors que SSM/I indique de la neige.

Commission : Lorsque les analyses de Brown et al. (2003) indiquent de la neige alors que SSM/I n'indique pas de neige.

Neige : Lorsque les 2 bases de données indiquent de la neige.

No neige : Lorsque les 2 bases de données n'indiquent pas de neige.

Masque : Masque sur les bords pour éviter les « effets de bords » courants en bordure des océans et aussi pour masquer les Etats-Unis (Maine, N.H. Vermont et N.Y) en raison de la disponibilité de certaines données notamment au niveau de l'occupation du sol.

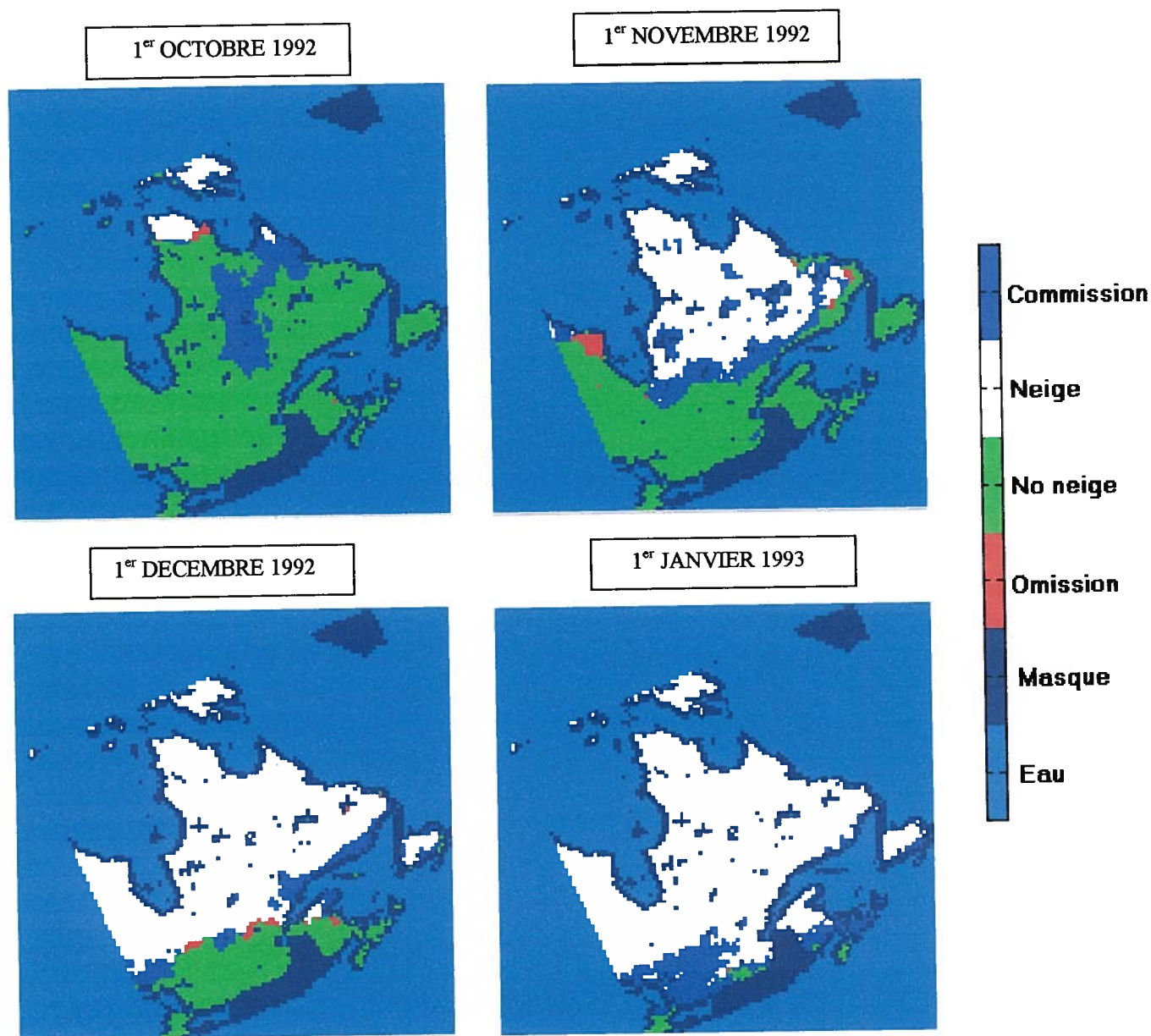


Figure 34: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1992 pour la comparaison SSM/I vs SMC

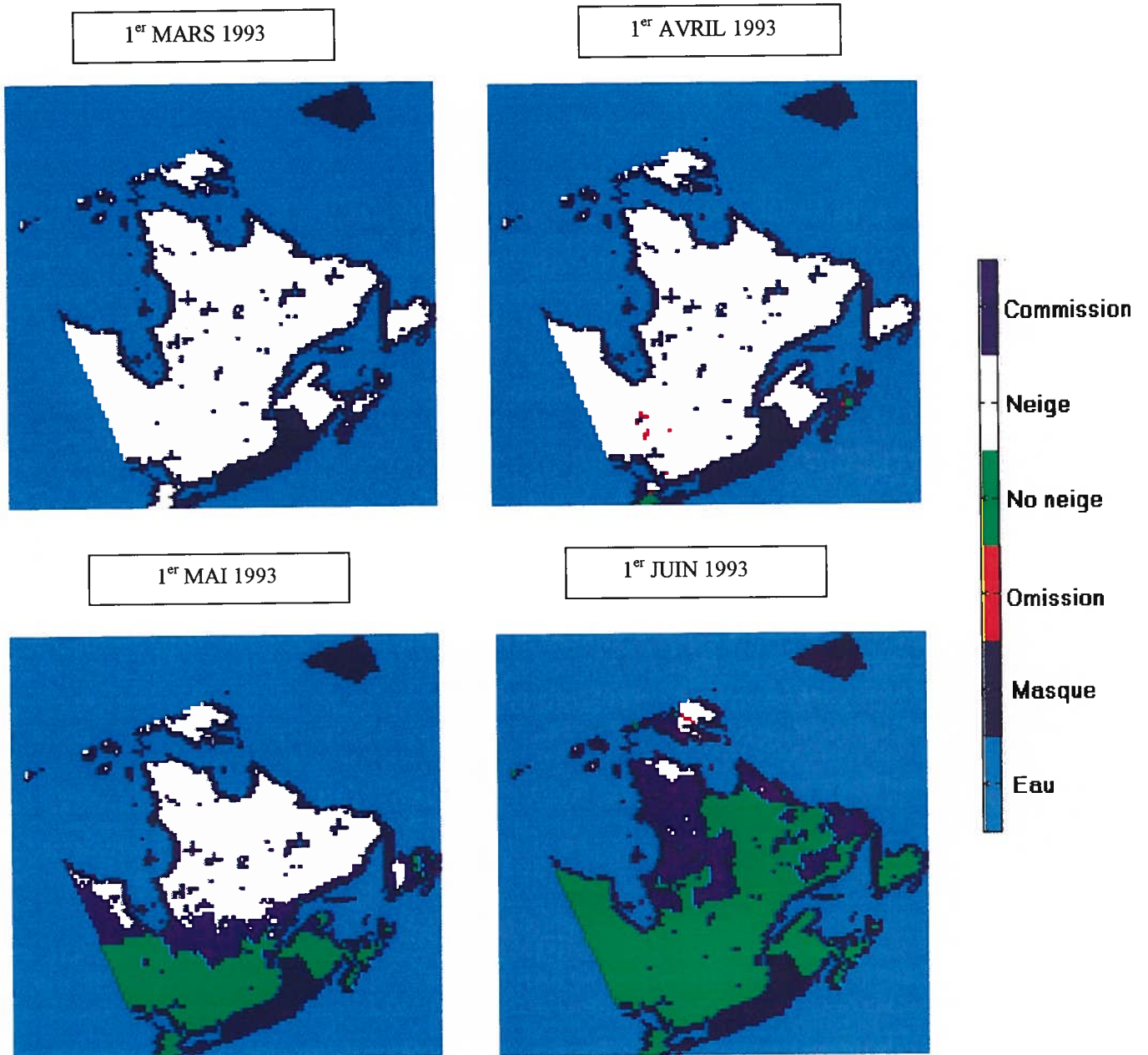


Figure 35: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1993 pour la comparaison SSM/I vs SMC

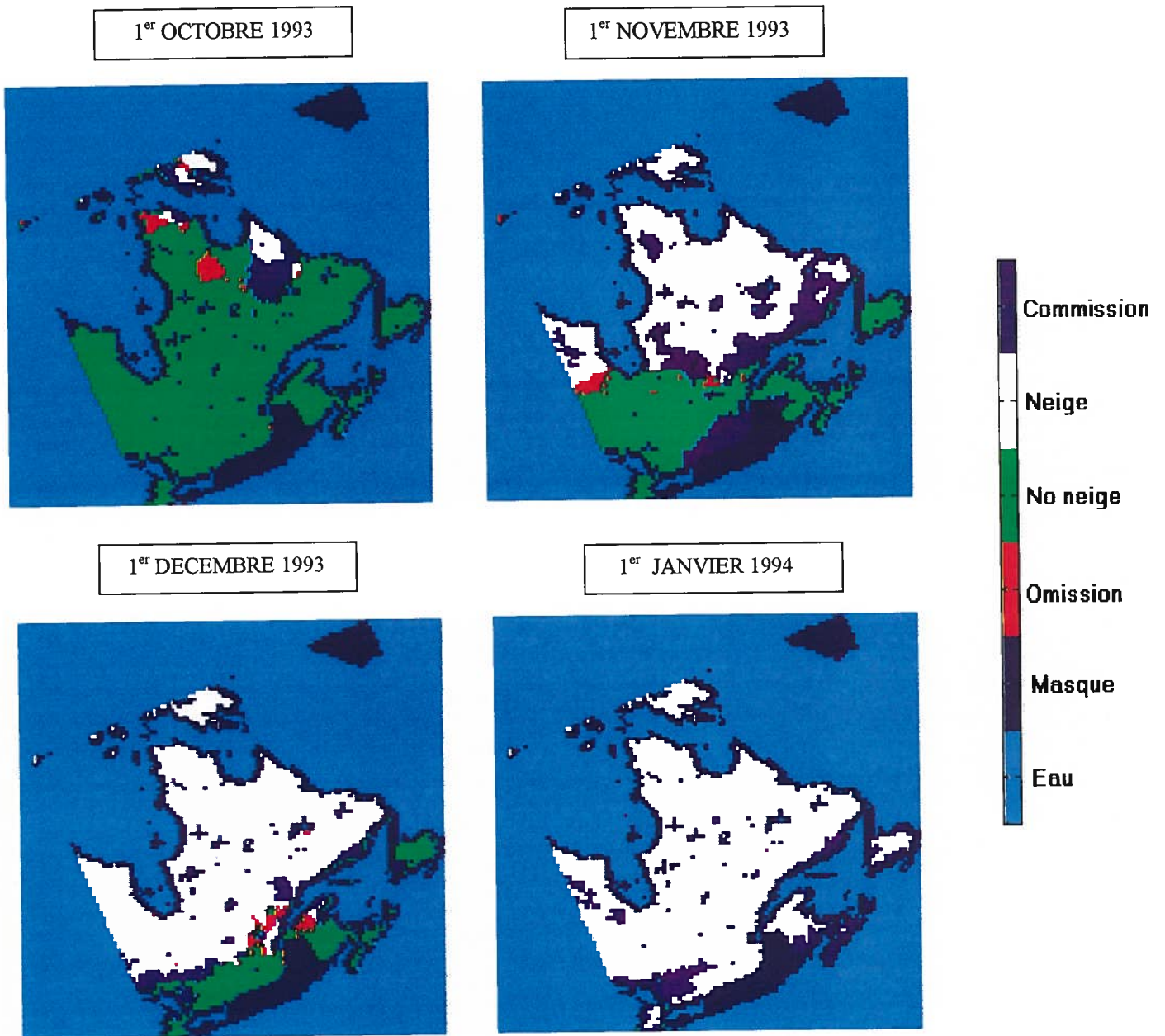


Figure 36: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1993 pour la comparaison SSM/I vs SMC

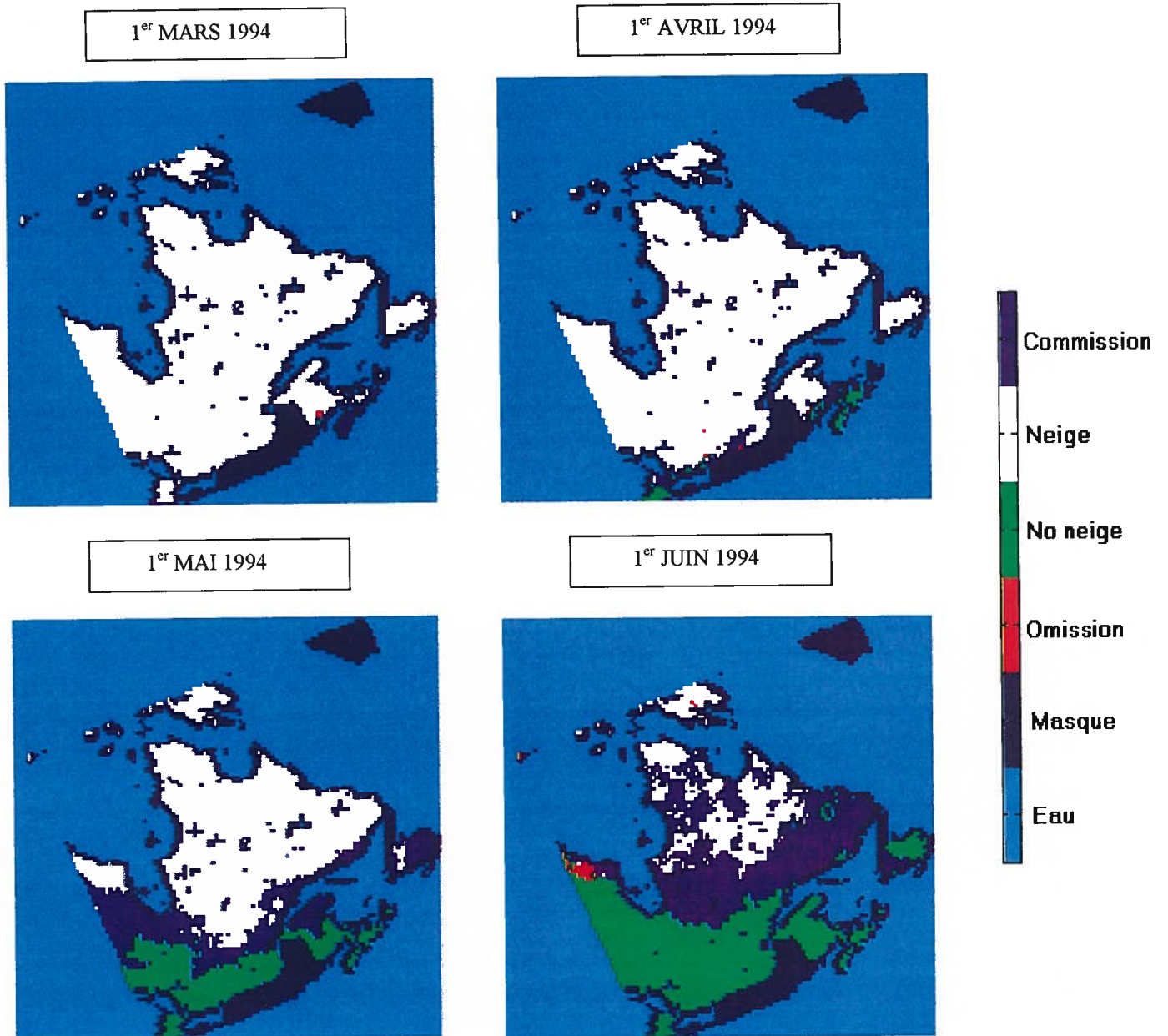


Figure 37: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1994 pour la comparaison SSM/I vs SMC

8.2. SSM/I vs MRCC

Cette section concerne un des objectifs principaux de ce travail, soit celui de valider un modèle de simulation climatique à l'aide de la télédétection micro-onde. Un seuillage à 5 kg/m² de EEN a aussi été appliqué au modèle et les images résultantes ont été reportées sur la projection EASE-Grid de SSM/I. Nous avons pris ici 4 zones d'étude dans le Québec qui sont les mêmes que dans le cas de la comparaison avec les analyses du SMC. Les résultats obtenus pour ces 4 zones et pour le Québec entier sont présentés dans le tableau 6 et les figures 38 et 39 (Équation 16).

	Aout-Février 1992-1993 Transition AUTOMNE		Mars-Juillet 1993 Transition PRINTEMPS		Aout-Février 1993-1994 Transition AUTOMNE	
	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.
NORD	25.0	25.0	-8.3	12.0	15.8	17.1
SUD	-6.7	28.5	64.5	64.5	-5.5	23.9
EST	64.6	68.3	24.6	33.2	35.5	36.2
OUEST	21.6	30.5	47.9	48.0	8.9	14.5
QUÉBEC	6.6	7.8	9.4	9.5	7.5	9.6

	Mars-Juillet 1994 Transition PRINTEMPS		Aout-Février 1994-1995 Transition AUTOMNE		Mars-Juin 1995 Transition PRINTEMPS	
	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.	Erreur moy.	Erreur quad.
NORD	-15.8	18.2	10.37	10.55	26.31	26.31
SUD	35.7	47.3	10.64	33.88	32.61	34.35
EST	26.1	37.1	15.75	28.98	8.77	37.68
OUEST	37.3	41.9	22.67	22.67	63.71	63.72
QUÉBEC	8.3	9.6	3.16	4.59	14.1	14.57

Tableau 6 : Erreur moyenne et erreur quadratique moyenne (en % de surface ΔN) sur 6 transitions, 4 zones et tout le Québec pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC

Les figures 38 et 39 montrent l'évolution de l'erreur dans le temps pour les 4 zones et tout le Québec. On remarque que le modèle sous-estime en général le couvert nival.

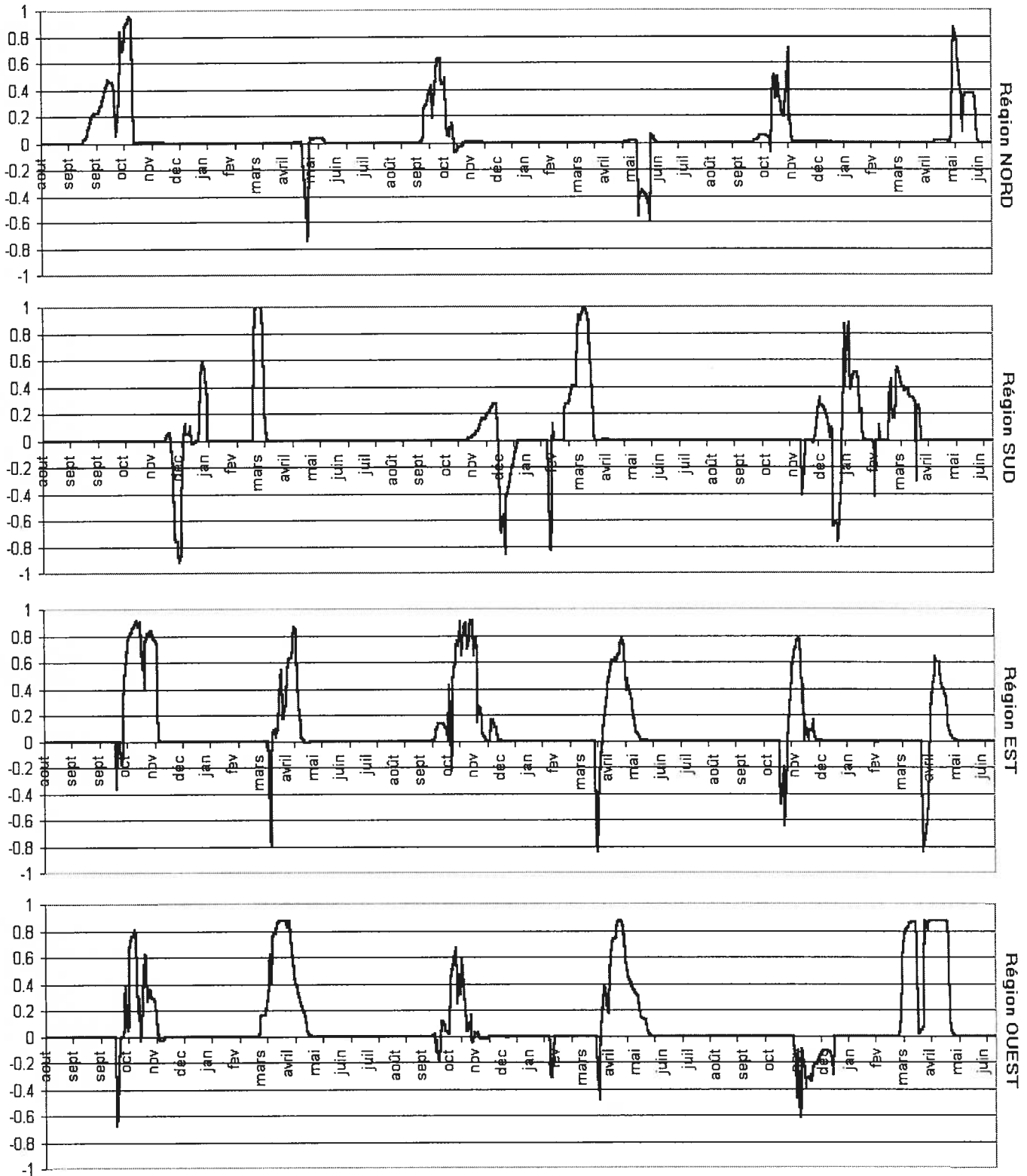


Figure 38: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour 4 zones, pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC

En reportant l'erreur moyenne sur la série temporelle pour tout le Québec on obtient :

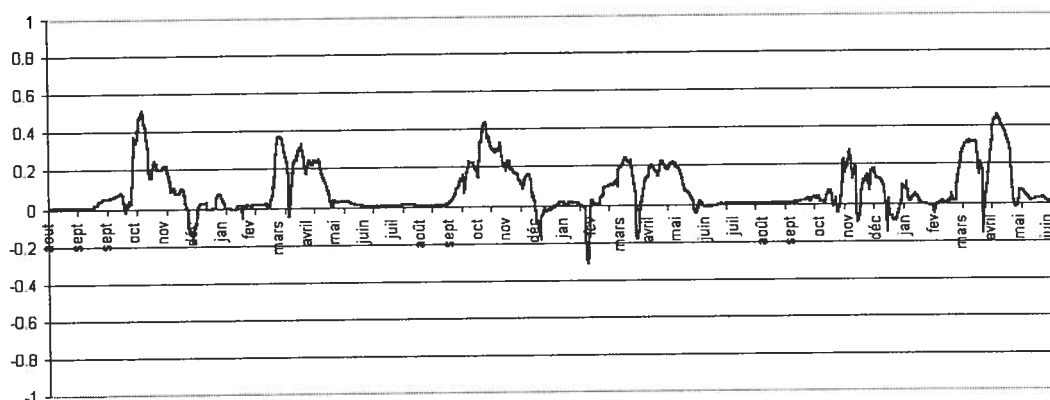


Figure 39: Variation du nombre de pixels de neige (ΔN en %) en fonction du temps pour le Québec pour la comparaison de SSM/I avec le MRCC

En effet, dans le modèle l'hiver arrive plus tard et le printemps arrive plus tôt de sorte que la période d'enneigement est plus courte. Le décalage varie de 52 jours à 24 jours pour l'automne et de 52 jours à 23 jours pour le printemps en fonction des sites d'étude (Figure 38). Ces erreurs se situent dans les périodes de transition entre les saisons, avec une erreur légèrement plus grande au printemps qu'à l'automne. Sur l'ensemble du territoire et pour les périodes analysées, il apparaît que le modèle génère une couverture de neige avec une erreur moyenne de 9.3% en surface par transition, ce qui traduit un bon fonctionnement du modèle. Localement, cette erreur peut cependant atteindre 30-40%. L'analyse du comportement du modèle montre que cette erreur résulte de 2 phénomènes : a) le modèle sous-estime les précipitations de neige (précipitations en pluie plutôt qu'en neige), et b) le modèle est trop chaud au printemps, précipitant la fonte de neige. Nous avons effectué un test statistique entre les différences inter-annuelles entre l'automne et le printemps à savoir si la différence est significative ou non. Avec un seuil de 5%, pour avoir des différences significativement différentes, la valeur β doit être inférieur à 1.65 :

$$\beta = \frac{\text{Moyenne 1} - \text{Moyenne 2}}{\sqrt{\frac{\sigma_1}{n_1} + \frac{\sigma_2}{n_2}}} \quad [\text{éq. 17}]$$

où σ représente l'écart-type et n le nombre de jours considérés dans la transition (automne et printemps). Nous remarquons que les différences sont significativement différentes entre les automnes 1992-1993 ($\beta = 1.62$) et 1993-1994, ainsi que pour les printemps 1993 et 1994 ($\beta = 0.0868$).

Nous avons analysé les zones où nous sommes en présence de commissions et d'omissions. Nous parlons de commission lorsque le MRCC dit qu'il y a neige au sol alors que SSM/I ne détecte pas de neige, tandis que nous sommes en omission si le modèle ne génère pas de neige dès que SSM/I détecte de la neige au sol. Nous avons cumulé le total de ces deux situations dans la figure 40 sur toute la série temporelle.

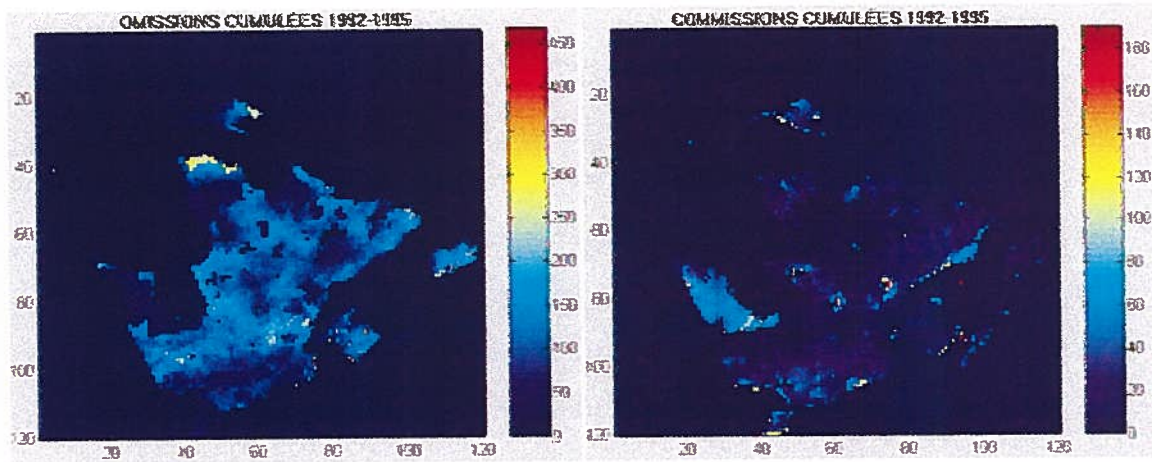


Figure 40: Omission totale (gauche) et commission totale (droite) cumulées sur toute la série temporelle de août 1992 à juin 1995 (1064 jours). Les données du MRCC sont prises comme référence.

Comme vu précédemment, on remarque que le MRCC sous-estime en général le couvert nival (omissions plus importantes) de façon assez uniforme sur le territoire. Il est à noter que nous avons masqué sur ces images les zones côtières puisqu'elles renferment des effets de bords qui sont des erreurs liées à

la proximité de l'eau. Il est aussi possible de faire l'étude des variations spatiales des omissions et commissions en fonction des saisons comme dans le cas de la comparaison de SSM/I avec les réanalyses de EEN du SMC. Les figures 41, 42, 43 et 44 montrent un exemple de la répartition des erreurs du modèle pour 4 dates particulières durant les transitions. Ces images montrent clairement le retard du modèle à l'automne et son avance (fonte prématurée) au printemps. La moyenne globale des omissions se situe à 100 jours correspondant à 9.39% sur toute la série (1064 jours) tandis que la moyenne globale des commission est de 20 jours (1.88%) sur la période.

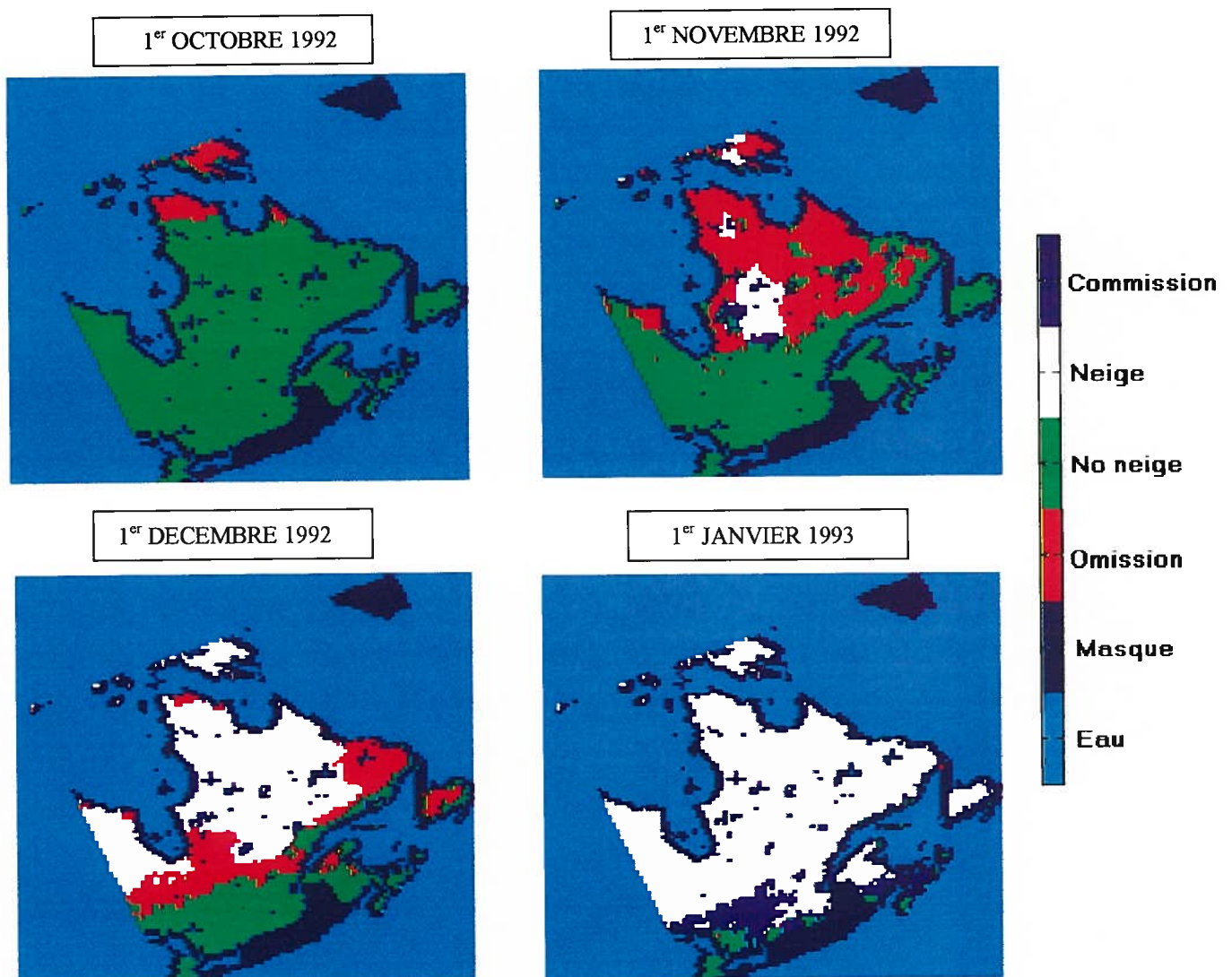


Figure 41: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1992 pour la comparaison SSM/I vs MRCC

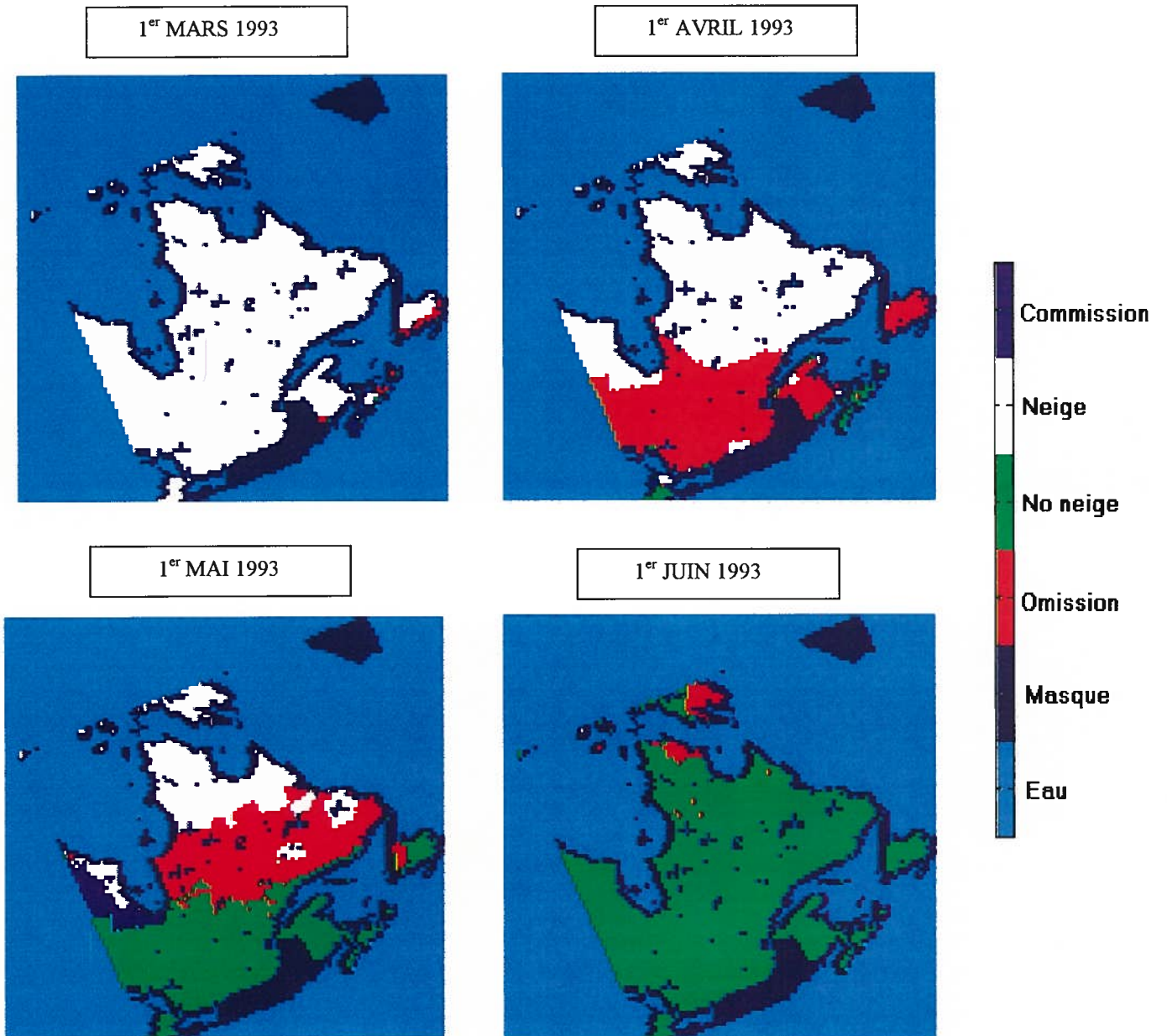


Figure 42: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1993 pour la comparaison SSM/I vs MRCC

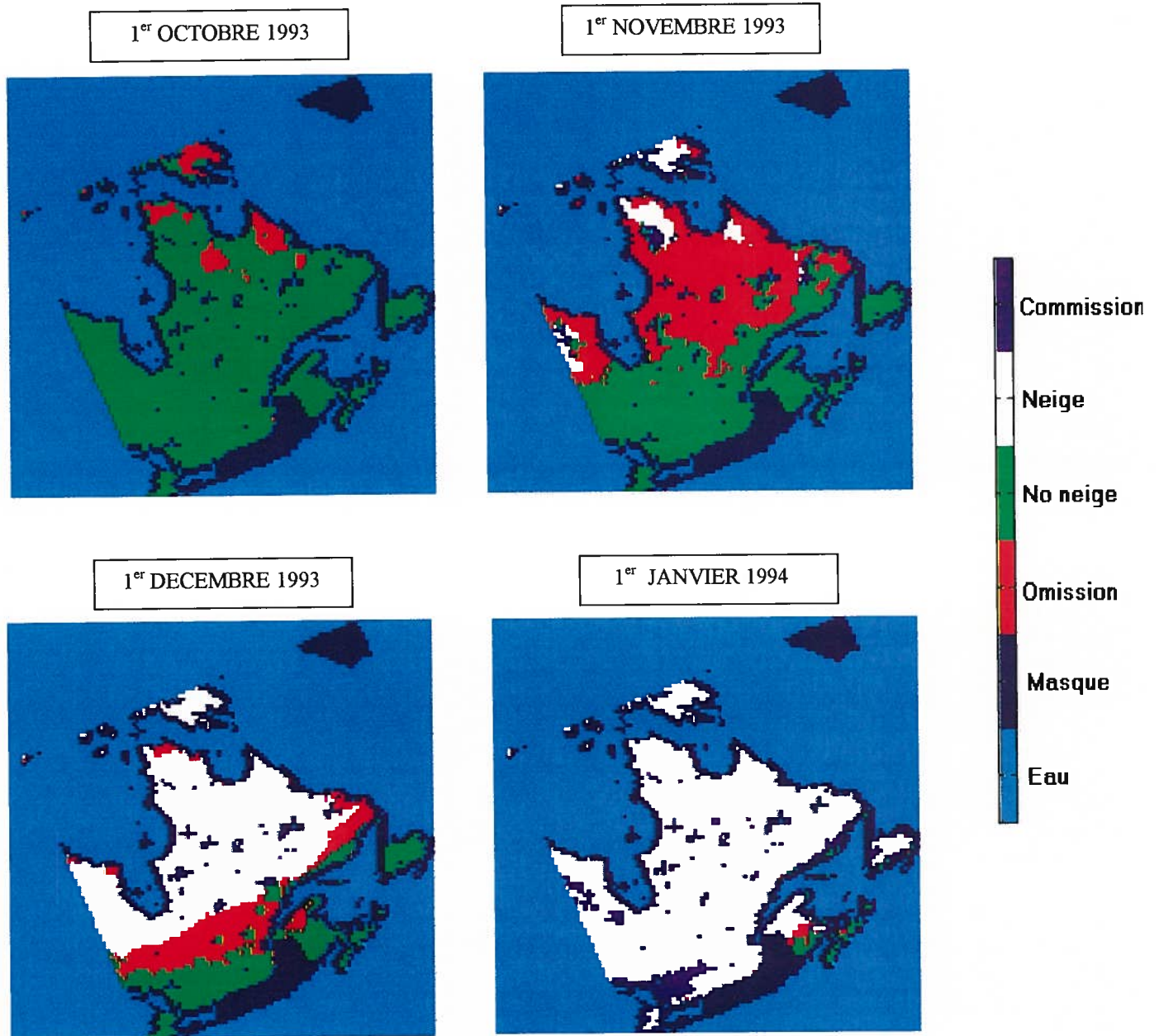


Figure 43: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude à l'automne 1993 pour la comparaison SSM/I vs MRCC

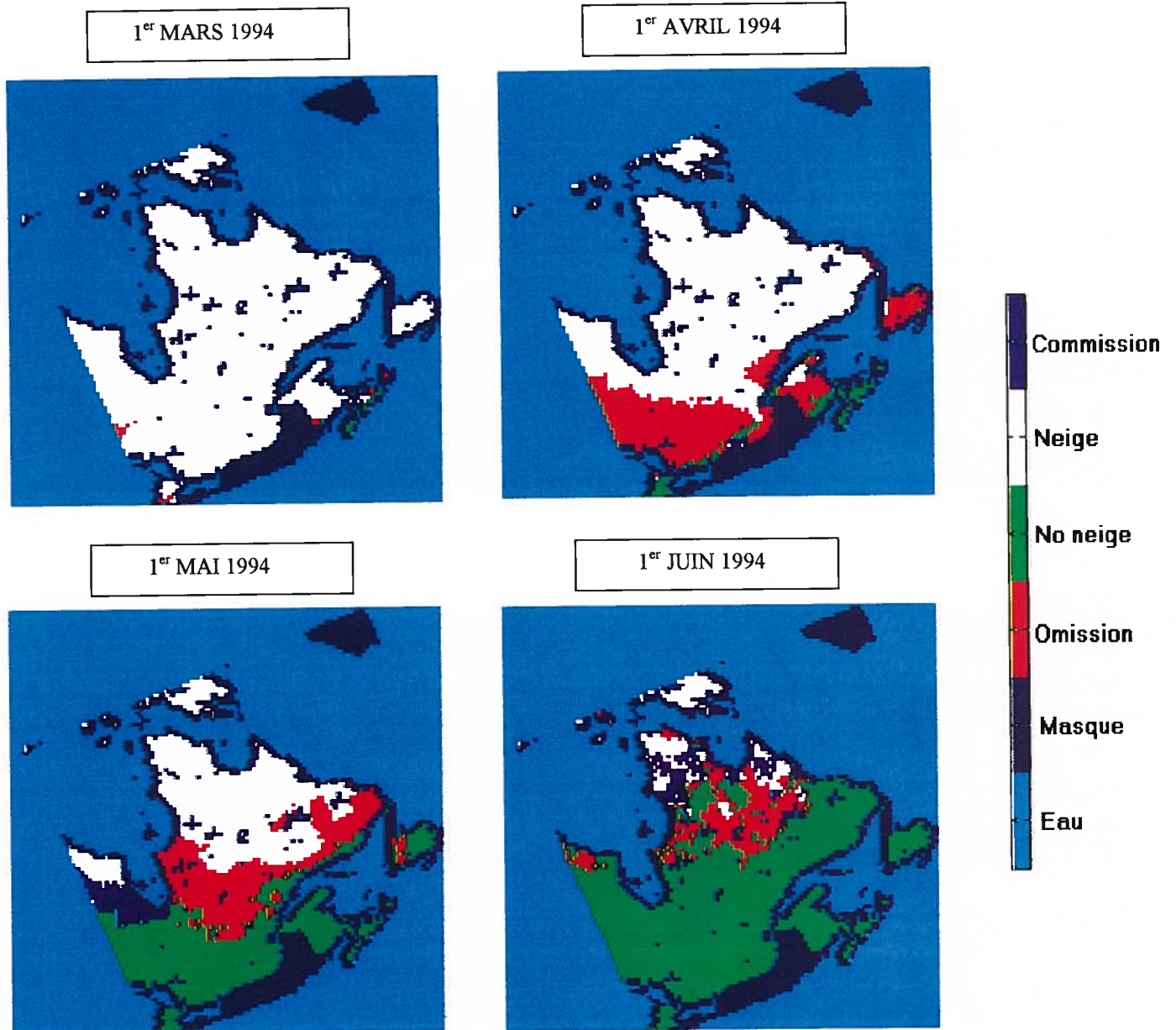


Figure 44: Illustration des omissions et des commissions sur le site d'étude au printemps 1994 pour la comparaison SSM/I vs MRCC

Pour bien comprendre l'erreur du modèle, il ne faut pas seulement l'illustrer de façon temporelle ou spatiale séparément. Évidemment, une figure d'omissions ou de commissions permet de voir où se situe l'erreur pour un moment donné ou cumulée sur la période (figure 40). Cette erreur est retrouvée majoritairement à la limite de la neige, c'est-à-dire dans la zone de transition entre les zones couvertes de neige et de celles qui ne le sont pas. Cette zone de transition se déplace vers le Sud au fur et à mesure que l'automne avance, elle se stabilise durant l'hiver pour ensuite remonter vers le Nord avec la fonte au printemps. C'est ce que nous avons illustré sur la figure 45, qui montre le déplacement de l'erreur du modèle en fonction de la latitude et du temps (août 1992 et juin 1995).

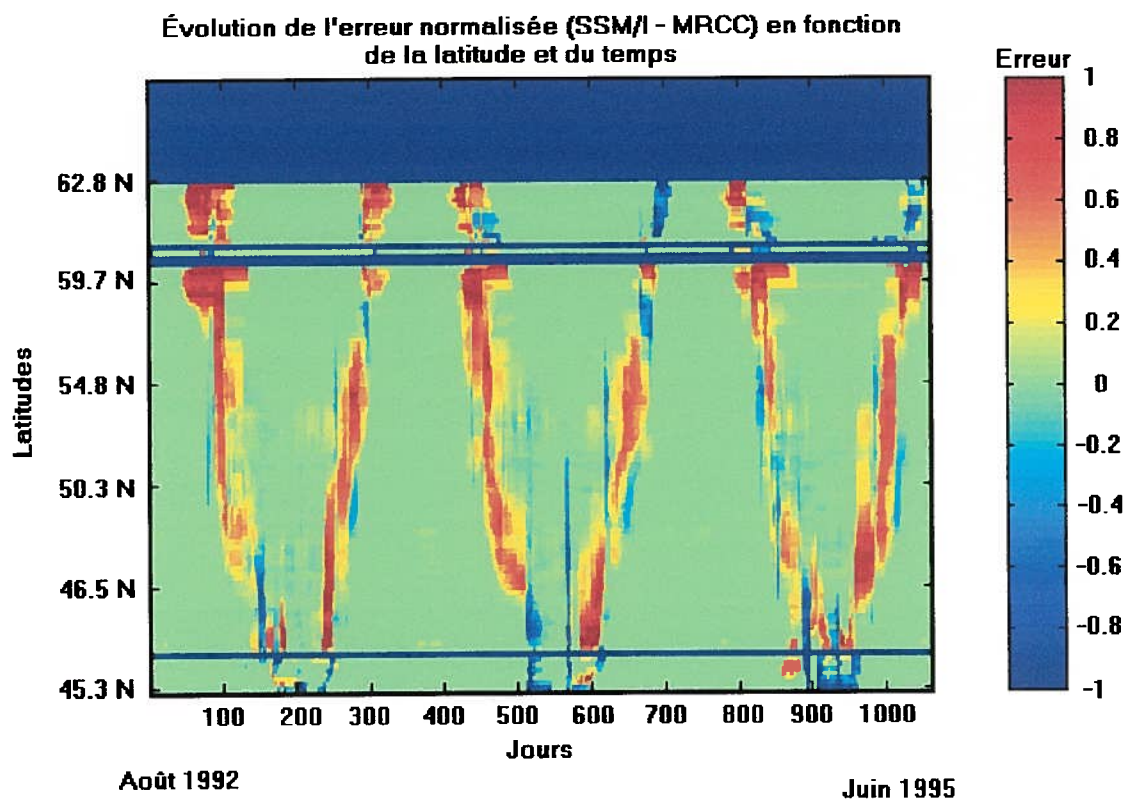


Figure 45 : Évolution de l'erreur du modèle en fonction de la latitude et du temps (les lignes correspondent à des zones où il n'y a pas de données)

Pour chaque latitude, nous avons fait le calcul de la moyenne:

$$\frac{\text{Pixels de neige SSM/I} - \text{Pixels de neige MRCC}}{\text{Nombre de pixel (présent à cette latitude)}} \quad [\text{éq. 18}]$$

On remarque bien le fait que l'erreur se déplace du Nord au Sud à l'automne et qu'elle se stabilise durant l'hiver où l'erreur est parfois nulle.

8.3. Analyse de la tendance climatique issue de AVHRR

Nous présentons ici les résultats de l'analyse du couvert nival à partir de la base de données AVHRR du NSIDC de 1966 à 2001 sur une base hebdomadaire. Nous avons extrait les données de neige pour les 4 mêmes zones que l'analyse précédente (Figure 46).

Moyenne du nombre de pixels de neige par zone pour chaque hiver

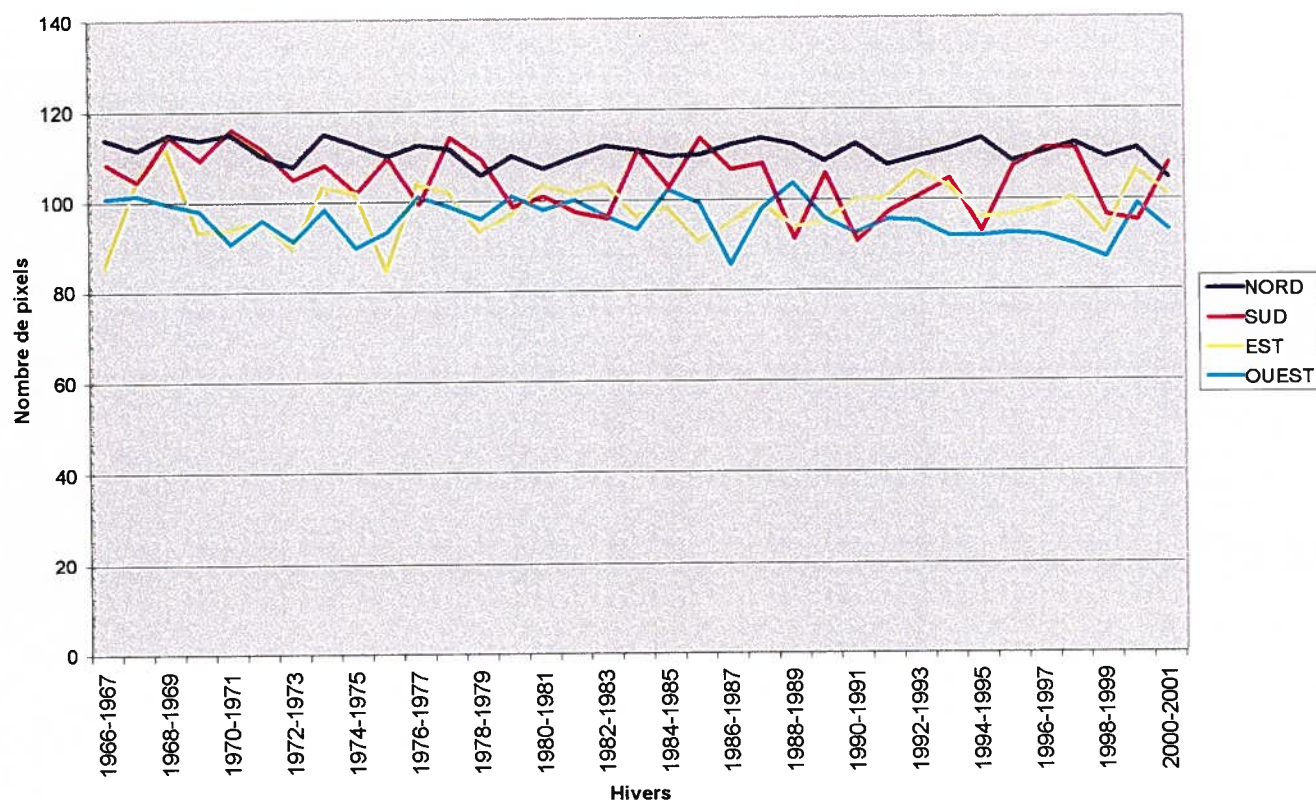


Figure 46: Moyenne du nombre de pixels de neige par zone et par hiver depuis 1966

La figure 46 montre une légère tendance à la baisse dans la quantité de pixels de neige par hiver pour chacune de ces zones sauf pour l'Est. Cependant, ces baisses ne sont pas très marquées. La pente est plus marquée pour la région sud (-0.25 pixel/hiver) ce qui représente une perte de plus de 5600 km² de surface enneigée depuis 1966 tandis que pour la région ouest on observe -0.16 pixel/hiver. La région nord observe une légère baisse (-0.09 pixel/hiver) alors que l'est est la seule région à observer un peu plus de neige depuis 1966 (+0.08 pixel/hiver). Nous avons calculé le nombre de semaines cumulées de neige par hiver et par région pour tenter d'évaluer la durée d'enneigement depuis 1975.

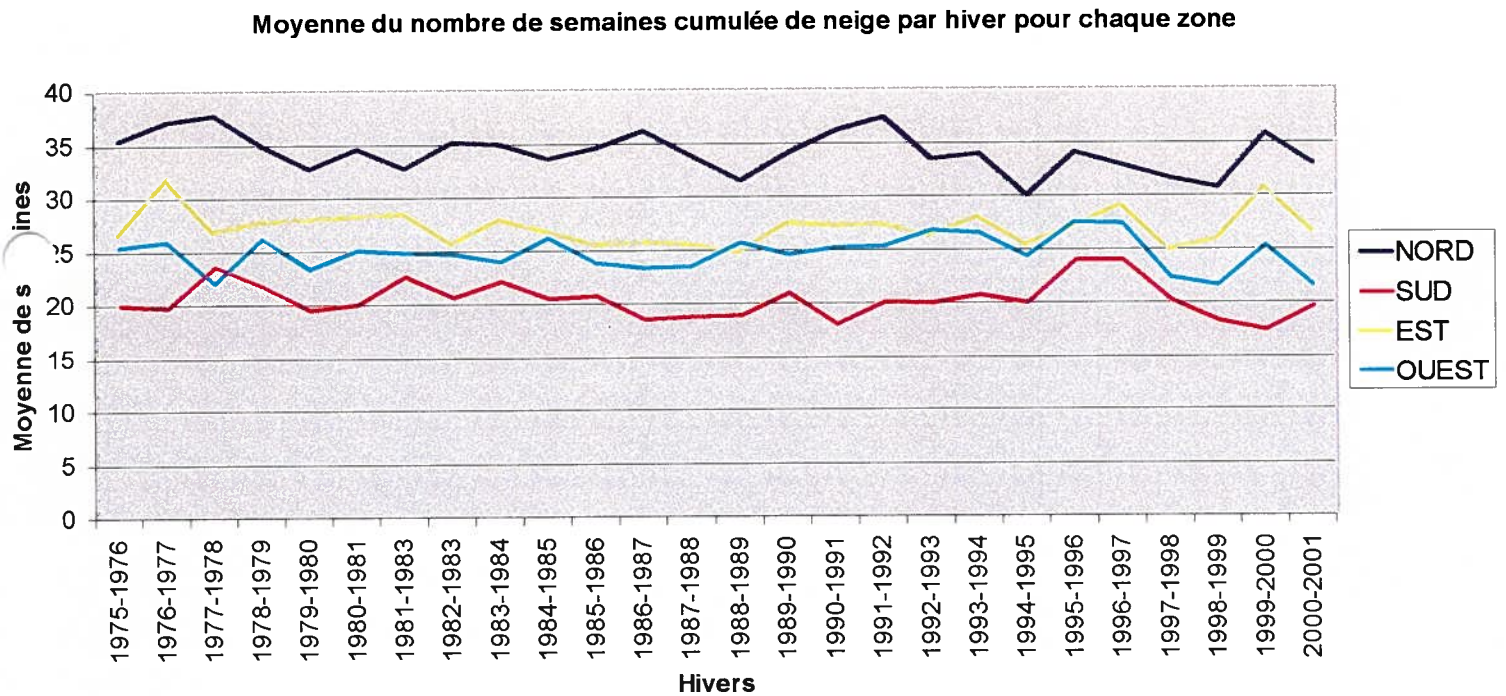


Figure 47: Durée d'enneigement en semaines pour chaque hiver entre 1975 et 2001

Encore ici on dénote une baisse assez faible de la durée d'enneigement. La région nord a la plus forte baisse (-0.118 sem/hiver) correspondant à une perte de 3 semaines d'hiver sur 26 ans. Le sud, l'est et l'ouest ont des valeurs beaucoup plus petites (-0.0429 sem/hiver, -0.0361 sem/hiver, -0.0147 sem/hiver). Donc pour les deux types d'analyse (nombre de pixels de neige et nombre de semaines de neige), nous observons une baisse depuis les 30 dernières années de l'enneigement au Québec. Cependant cette baisse est faible compte tenu de la période relativement courte climatologiquement, parlant et il devient difficile de qualifier la raison de celle-ci (cycle climatique).

9. Conclusion et discussion

Au niveau de la méthode de la variation spatio-temporelle du couvert nival, la différence normalisée des températures de brillance en fonction de la densité de végétation présente s'est avérée efficace par rapport aux données météorologiques. Cependant, la précision des données météorologiques sur l'épaisseur du couvert de neige peut être biaisée par différents facteurs dont :

- les vents qui peuvent entraîner une sous-estimation significative (40% à 60% si les vents sont supérieurs à 5 m/s à 8 m/s) entraînant d'importantes erreurs notamment dans l'Arctique (Goodison, 2000)
- les pertes dues à la neige mouillée
- les pertes par évaporation
- les précipitations « traces »

De plus, les stations météorologiques sont ponctuelles et comme nous les comparons à des données satellites du capteur SSM/I de résolution de 25 km, les données de la station peuvent ne pas être représentatives du pixel considéré. L'étude du climat nécessite de grands territoires d'étude et c'est la raison pour laquelle la télédétection est nécessaire à ce type d'analyse. La télédétection visible et proche infrarouge du capteur AVHRR offre aussi une bonne résolution spatiale de 25 km mais, avec le désavantage d'être hebdomadaire et dépend fortement de la nébulosité. Les synthèses hebdomadaires sont utilisées pour minimiser cet inconvénient, mais cela peut biaiser les données de façon significative et, de plus, les intervalles entre les images ne sont pas toujours réguliers. Les données du capteur SSM/I en micro-ondes passives offrent l'avantage de ne pas dépendre de la nébulosité en plus d'être journalières contrairement aux données hebdomadaires visible et proche infrarouge du capteur AVHRR. Ces données peuvent donc être prises à des intervalles plus réguliers sans dépendre des conditions météorologiques (Basist et al., 1996). Par conséquent, l'extraction du couvert nival d'une telle série est beaucoup plus intéressante et permet donc de mieux valider des données journalières des

différents modèles de simulation climatique tels le MRCC et celui des analyses du SMC.

Cependant, une incertitude dans les données de neige de SSM/I provient avec la présence de bruit que l'on retrouve au printemps et à l'automne. Ce bruit qui influence le seuil est principalement dû au changement de la taille et de la forme des grains de neige et à la présence de neige mouillée. Premièrement, la forme sphérique change avec le métamorphisme de la neige, que ce soit le métamorphisme destructif ou de contact. Cette évolution de la forme et la taille des grains de neige après s'être déposés sur le sol devrait être considérée (Armstrong et al., 1993). Quelques modèles d'évolution de la forme des grains ont été développés (Navarre, 1974; Marbouty, 1980), qui auraient compliqué considérablement l'algorithme actuellement utilisé. Deuxièmement, lorsque le couvert de neige est mouillé, la réponse micro-onde change dramatiquement. La présence d'eau liquide dans le couvert neigeux altère les caractéristiques de l'émission micro-onde telle l'absorption interne qui augmente significativement (à la manière d'un corps noir). Cette augmentation d'absorption se traduit donc par une augmentation d'émission qui peut passer au-dessus du seuil en particulier au printemps.

Ce couvert de neige extrait du capteur SSM/I avec les différences normalisées de températures de brillance ($(T_b 37\text{GHz V} - T_b 19\text{GHz V}) / T_b 19\text{GHz H}$), sous-estime légèrement le couvert nival par rapport aux données météorologiques avec une pente de 0.92 et un biais de 7.33 jours. La comparaison des données de neige du capteur SSM/I avec le capteur AVHRR démontre une surestimation significative du couvert nival par ce dernier, probablement dû au fait que le couvert nuageux peut être considéré comme de la neige au sol dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Le Sud du Québec semble le plus touché par cette surestimation avec en moyenne près de 14 semaines de plus de neige entre les 1^{er} août 1992 et le 30 juin 1994.

La comparaison des images de neige du capteur SSM/I avec le modèle de simulation climatique MRCC démontre une sous-estimation globale du modèle concernant le couvert nival en retardant l'arrivée de la neige à l'automne et précipitant la fonte au printemps. Pour tout le territoire d'étude, cette sous-estimation varie entre 7.8% et 11.9% en fonction de la saison considérée. Cette erreur s'explique par le fait que le modèle utilise une approche d'une couche simple au sol (sol et surface considérés dans la même couche). Cette couche utilise l'énergie disponible pour fondre la neige avant de réchauffer le sol (fonte plus rapide). À l'automne le contraire se produit, c'est-à-dire que la couche doit geler avant de refroidir la surface sous 0°C, et le MRCC est généralement trop chaud à cet endroit se traduisant par un enneigement tardif (Frigon et al., 2002). La comparaison avec les analyses du SMC (Brown et al., 2003) indique une surestimation du couvert nival de la part du modèle. Cette surestimation est de l'ordre de 7.7% à 16.2%, toujours en fonction de la saison considérée.

Finalement, l'extraction de la série complète des données de neige issues du capteur AVHRR permet de retracer certains indices de changement climatique dans un contexte temporel d'une part, et spatial d'autre part. On observe que le nombre de semaines cumulées de neige dans 4 régions du Québec (nord, sud, est et ouest) diminue. Le nord connaît la baisse la plus significative avec -0.118 semaine d'hiver par année qui correspond à un peu plus de 3 semaines de moins d'hiver en 2001 par rapport à 1975. Concernant la surface enneigée, 3 des 4 zones considérées montrent une baisse dont la plus importante se retrouve au sud avec plus de 5600 km² de moins de surface enneigée en 2001 par rapport à 1966.

Il semble donc que la télédétection est essentielle à l'étude du climat, en particulier au niveau du suivi du couvert nival. Parmi les capteurs micro-ondes actuellement en orbite, le plus récent est AMSR (Advanced Microwave Scanner Radiometer). AMSR-E est sur le satellite EOS-AQUA de la NASA et AMSR est sur le satellite ADEOS II de la NASDA. Les données de AMSR-E avec plus de

canaux et une meilleure résolution spatiale (ATDB, 2000) sont archivées par le NSIDC à l'Université du Colorado à Boulder. Ce capteur poursuit plusieurs buts dont la cartographie de l'équivalent en eau de la neige à échelle globale qui deviendra un produit standard de AMSR-E (SWEMAP). SWEMAP est actuellement structuré pour identifier la neige avec les propriétés uniques de sa température de brillance (Chang et al., 2000). Le développement d'algorithmes pour cartographier l'équivalent en eau de la neige est un processus évolutionnaire. Les algorithmes précis changent au fur et à mesure que le couvert de neige évolue. Ces cartes d'EEN vont donc étendre et augmenter la valeur de la série Nimbus-7 SMMR pour la période 1978-1987 (Chang et al., 1987) et celle de SSM/I pour la période de 1987 à aujourd'hui. Le but principal est donc de combiner les produits de neige de SMMR, SSM/I et AMSR-E qui sont disponibles comme inputs à échelle régionale pour la validation de modèles de simulation climatique comme l'a fait état cette recherche. La télédétection est donc un outil essentiel pour valider les modèles de simulation climatique et pour suivre l'évolution de différents paramètres climatologiques comme le couvert nival. Ces résultats permettent aussi la comparaison avec d'autres bases de données satellites de neige tels AVHRR en plus d'offrir de meilleures séries temporelles qui deviennent un produit très intéressant pour les modélistes qui tentent de mieux comprendre l'environnement ainsi que l'impact de l'Homme sur celui-ci.

10. Références

Armstrong, R.L. and M.J. Brodzik. 2002. Northern Hemisphere EASE-Grid Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent Version 2. Boulder, CO, USA: National Snow and Ice Data Center. CD-ROM.

Armstrong, R.L., A.T.C. Chang, A. Rango and E.G. Josberger, (1993) Snow depth and grain size relationships with relevance for passive microwave studies, *Annals of Glaciology*, 17, p. 171-176.

Basist, A., Garret, D., Ferraro, R., Grody, N. and Mitchell, K., (1996) A comparison between Snow Cover products Derived from Visible and Microwave Satellite Observations. *Journal of applied meteorology*, vol. 35 p. 163-177.

Bechtold, P., Bazile, E., Guichard, F., Mascart, P., Richard, E. 2001. A Mass Flux Convection Scheme for Regional and Global Models. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 127, p. 869-886.

Bonn, F., Rochon, G., (1991) *Précis de télédétection: Principes et méthodes*, Vol. 1, PUQ/AUPELF, 485 p.

Brasnett, B., (1999) A global analysis of snow depth for numerical weather prediction, *J. Appl. Meteorol.*, 38, p. 726-740.

Brown, R., Brasnett, B., and Robinson, D., (2003) Gridded North American Monthly Snow Depth and Snow Water Equivalent for GCM Evaluation, *Atmosphere-Ocean*, 41(1) p. 1-14.

Brown, R., and Goodisons, B., (1996) Interannual variability in reconstructed canadian snow cover, 1915-1992. *Journal of Climate*, vol. 9, p. 1299-1316.

Carsey, Franck (1992) Remote Sensing of ice and snow : review and status. International Journal of Remote sensing, vol.13 no.1, p.5-11.

Caya, D., et R. Laprise, (1999): A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. Mon. Wea. Rev. 127 (3), p. 341-362.

Chang, A.T.C., J.L. Foster and D.K. Hall (1987) Nimbus-7 derived global snow cover parameters, Annals of Glaciology, 9, p. 39-44.

Chang, A.T.C., Rango, A., (2000) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm, Version 3.1, November 30, 2000, 41 p.

Cihlar, J., and J. Beaubien. (1998). Land cover of Canada Version 1.1. Special Publication, NBIOME Project. Produced by the Canada Centre for Remote Sensing and the Canadian Forest Service, Natural Resources Canada. Available on CD ROM from the Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Ontario.

De Sève, D. (1999) 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. INRS-eau, Université du Québec, 121 p.

Fernandes, R.A., Pavlic, G., Chen, W., and Fraser, R. 2001. Canada-wide 1-km water fraction derived from National Topographic Data Base maps. Natural Resources Canada.

Frigon, A., Caya, D., Slivitzky, M. and Tremblay, D. 2002: Investigation of the hydrologic cycle simulated by the Canadian Regional Climate Model over the Quebec/Labrador territory. In: Beniston, M. (ed), Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Advances in Global Change Research, 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, p. 31-55.

Gal-Chen, T., Sommerville, R.C. (1975) On the use of a coordinate transformation for the solution of Navier-Stokes, J. Comput. Phys, 17, p. 209-228.

Giguère, M., R. Laprise, D. Caya and S. Biner. 2000. An implicit scheme for the ground energy equation in the CRCM. In WMO Research activities in atmospheric and oceanic modelling, Report no. 30, February 2000, H. Ritchie Ed., WMO/TD-No. 987, p. 4.13-4.14.

Goodison, B.E. et Walker, A.E (1993) Use of snow cover derived from satellite passive microwave data as an indicator of climate change. Annals of glaciology, vol.17, p.137-142.

Grody, N.C. et Basist, A.N. (1996) Global identification of snowcover using SSM/I measurements. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol.34, no.1, p.237-249.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, New York, 2001.

Kurvonen, L., Hallikainen, M. 1997. Influence of Land-Cover category on brightness temperature of snow, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol 35, No. 2, p. 367-378.

Laprise, R., et A. Plante, 1995: SLIC: A semi-Lagrangian Integrated-by-cell mass-conserving numerical transport scheme. Mon. Wea. Rev., 123 (2), p. 553-565.

Laprise, R., D. Caya, G. Bergeron et M. Giguère, 1997: The formulation of André Robert MC2 (Mesoscale Compressible Community) model. Atmos.-Ocean 35 (1).

McFarlane and al., (1992) The Canadian Climate Centre second generation general circulation model and its equilibrium climate, J. Clim., 5, p. 1013-1044.

Marbouty, D., (1980) An experimental study of temperature-gradient metamorphism, Journal of Glaciology, 26, p.303-312.

Mätzler, C., (1987) Applications of the interaction of microwaves with natural snow cover, Remote sensing reviews, vol. 2, p. 259-387.

National Snow and Ice Data Center. 1998*. NOAA/NASA Pathfinder SSM/I Level 3 EASE-Grid Brightness Temperatures. Digital data available from nsidc@kryos.colorado.edu. Boulder, Colorado. NSIDC Distributed Active Archive Center, University of Colorado at Boulder.

Navarre, J.P., (1974) Modèle unidimensionnel d'évolution de la neige déposée, La météorologie, p. 109-120.

Pivot, F., Duguay, C. et Kergormard, C. (1998) Étude de la variation spatio-temporelle du couvert nival dans la région de Churchill (Canada), à l'aide des données de télédétection micro-ondes passives SSM/I. Publications de l'association internationale de climatologie, vol.11, p.53-60.

Prigent, C., Aires, F., Rossow, W B. 2003. Retrieval of Surface and Atmospheric Geophysical Variables over Snow-Covered Land from Combined Microwave and Infrared Satellite Observations, Journal of Applied Meteorology, v.42, n.3, p.368, 13 p.

Rosenfeld, S., Grody, N., (2000) Anomalous microwave spectra of snow covered observed from Special Sensor Microwave/Imager measurements, Journal of geophysical research, vol. 105, no. D11, June 16, 2000, p. 14 913 – 14 925.

SMC. 2000 : CD-ROM Canadien des données de neige. Projet CRYSYS, Division des processus climatiques et observations terrestres, Service météorologique du Canada, Downsview, Ontario, janvier 2000.

Annexe 1 – Principaux programmes (code MatLab)

Programme 1 : Moyenne sur les images

```

direc_asc = 'C:\...\'; % Déclaration des répertoires des images brutes
files_asc = dir(direc_asc);

direc_desc = 'C:\...\';
files_desc = dir(direc_desc);

direc_asc2 = 'C:\...\';
files_asc2 = dir(direc_asc2);

direc_desc2 = 'C:\...\';
files_desc2 = dir(direc_desc2);

nbFiles=size(files_asc,1);
nbFiles=size(files_desc,1);
nbFiles=size(files_asc2,1);
nbFiles=size(files_desc2,1);

for k=3:nbFiles-1

% Ouverture des fichiers a traiter (images ascendantes et descendantes)
file_asc = ['C:\...\',files_asc(k).name];
file_titre = files_asc(k).name;
lecture_asc=fopen(file_asc,'rb');

file_desc = ['C:\...\',files_desc(k).name];
file_titre = files_desc(k).name;
lecture_desc=fopen(file_desc,'rb');

file_asc2 = ['C:\...\',files_asc2(k+1).name];
file_titre2 = files_asc2(k+1).name;
lecture_asc2=fopen(file_asc2,'rb');

file_desc2 = ['C:\...\',files_desc2(k+1).name];
file_titre2 = files_desc2(k+1).name;
lecture_desc2=fopen(file_desc2,'rb');

% Lecture de toute les images ascendantes et descendantes
image_asc=fread(lecture_asc,[721,721],'uint16');
image_desc=fread(lecture_desc,[721,721],'uint16');
image_asc2=fread(lecture_asc2,[721,721],'uint16');
image_desc2=fread(lecture_desc2,[721,721],'uint16');

fclose(lecture_asc);

```



```
fclose(lecture_desc);  
fclose(lecture_asc2);  
fclose(lecture_desc2);
```

```
affichage=sprintf('Image %d sur %d',k-2,nbFiles-2);  
disp(affichage);
```

%Boucle sur tout les $(jA + jD) + (j+1A + j+1D) / \text{nombre d'images}$

```
index_diff0_asc=find(image_asc);  
index_diff0_desc=find(image_desc);  
index_diff0_asc2=find(image_asc2);  
index_diff0_desc2=find(image_desc2);
```

```
index_asc=zeros(721,721);  
index_desc=zeros(721,721);  
index_asc(index_diff0_asc)=1;  
index_desc(index_diff0_desc)=1;
```

```
index_asc2=zeros(721,721);  
index_desc2=zeros(721,721);  
index_asc2(index_diff0_asc2)=1;  
index_desc2(index_diff0_desc2)=1;
```

```
clear index_diff0_asc;  
clear index_diff0_desc;  
clear index_diff0_asc2;  
clear index_diff0_desc2;
```

```
index_denominateur=(index_asc+index_asc2+index_desc+index_desc2);
```

```
clear index_asc;  
clear index_asc2;  
clear index_desc;  
clear index_desc2;
```

```
index_temp=find(index_denominateur==0);  
index_denominateur(index_temp)=1;
```

```
clear index_temp;
```

```
% CALCUL DE LA MOYENNE DES IMAGES
```

```
moy(k).image
```

```
=(image_asc+image_asc2+image_desc+image_desc2)./index_denominateur;
```

```
moy(k).name = sprintf('Image_37v[%03d]',(k-2));
```

```
    % Écriture des images dans un répertoire de sortie avec le titre moy(k).name
```

```
    fichier_output = ['C:\...\', moy(k).name];
```

```
    fid = fopen (fichier_output,'w+');
```

```
    fwrite (fid,moy(k).image,'float32');
```

```
    fclose(fid);
```

```
end
```

Programme 2 : Opération (37v – 19v) / 19h

```

direc_19h = 'C:\...\';
files_19h = dir(direc_19h);

```

```

direc_19v = 'C:\...\';
files_19v = dir(direc_19v);

```

```

direc_37v = 'C:\...\';
files_37v = dir(direc_37v);

```

```

nbFiles=size(files_19h,1);
nbFiles=size(files_19v,1);
nbFiles=size(files_37v,1);

```

```

for k=3:nbFiles

```

```

    file_19h = ['C:\...\',files_19h(k).name];
    file_titre = files_19h(k).name;
    lecture_19h=fopen(file_19h,'rb');

```

```

    file_19v = ['C:\...\',files_19v(k).name];
    file_titre = files_19v(k).name;
    lecture_19v=fopen(file_19v,'rb');

```

```

    file_37v = ['C:\...\',files_37v(k).name];
    file_titre = files_37v(k).name;
    lecture_37v=fopen(file_37v,'rb');

```

```

    image_19h=fread(lecture_19h,[721,721],'float32');
    image_19v=fread(lecture_19v,[721,721],'float32');
    image_37v=fread(lecture_37v,[721,721],'float32');

```

```

    fclose(lecture_19h);
    fclose(lecture_19v);
    fclose(lecture_37v);

```

```

    diff(k).image =(image_37v-image_19v)./image_19h;
    diff(k).name = sprintf('Image_delta_Tb[%03d]',(k-2));

```

```

    fichier_output = ['C:\...\', diff(k).name];
    fid = fopen (fichier_output,'w+');
    fwrite (fid,diff(k).image,'float32');
    fclose(fid);

```

```

end

```

Programme 3 : Filtrage médian des images SSM/I

```
direc = 'C:\...\';
files = dir(direc);

nbFiles=size(files,1);

m=0;

% Remplissage des vecteurs
for k=1:nbFiles
    file = ['C:\...\',files(k).name];
    file_titre = files(k).name;
    lecture=fopen(file,'rb');

    m=m+1;
    i=1;
    fprintf(1,'\nRemplissage du vecteur %i',m);

    for i=1:14400
        i
        image(i)=fread(lecture,1,'float32');
        vecteur(i,m)=image(i);
    end
    fclose(lecture);
end

% Filtrage de chaque vecteur!!

for i=1:14400
    A(i,:) = medfilt1(vecteur(i,:),25);
end
```

```
% Reconfiguration des images filtrées
for m=1:30

    for i = 1:14400
        filt(m).image(i) = A(i,m);
    end
    m=m+1;
end

for m=1:30
    filt(m).image=reshape(filt(m).image,120,120);
    filt(m).name = sprintf('Image_filtree[%03d]',m+150);

    temp=rot90(filt(m).image,1);

    fichier_output = ['C:\...\', filt(m).name];
    fid = fopen (fichier_output,'w+');
    fwrite (fid,temp,'float32');
    fclose(fid);
end
```

Programme 4 : Seuillage des images

```
lecture_dense=fopen('C:\...\Dense_ssmi.raw','rb');
temp_dense=fread(lecture_dense,[721,721],'float32');
temp_dense2=flipdim(temp_dense,1);
image_dense_temp=temp_dense2(160:279,350:469);
image_dense=flipdim(image_dense_temp,1);
```

```
lecture_nodense=fopen('C:\...\Nodense_ssmi.raw','rb');
temp_nodense=fread(lecture_nodense,[721,721],'float32');
temp_nodense2=flipdim(temp_nodense,1);
image_nodense_temp=temp_nodense2(160:279,350:469);
image_nodense=flipdim(image_nodense_temp,1);
```

```
lecture_agricole=fopen('C:\...\Agricole_ssmi.raw','rb');
temp_agricole=fread(lecture_agricole,[721,721],'float32');
temp_agricole2=flipdim(temp_agricole,1);
image_agricole_temp=temp_agricole2(160:279,350:469);
image_agricole=flipdim(image_agricole_temp,1);
```

```
lecture_toundra=fopen('C:\...\Toundra_ssmi.raw','rb');
temp_toundra=fread(lecture_toundra,[721,721],'float32');
temp_toundra2=flipdim(temp_toundra,1);
image_toundra_temp=temp_toundra2(160:279,350:469);
image_toundra=flipdim(image_toundra_temp,1);
```

```
% Différents seuils pour les occupations du sol
Seuil_dense = -0.015;
Seuil_nodense = -0.005;
Seuil_agricole = -0.02;
Seuil_urbain = -0.02;
Seuil_toundra = -0.005;
%Seuil_eau = 30-40-50% ==> NA;
```

```
image_seuil_dense=image_dense.*Seuil_dense;
image_seuil_nodense=image_nodense.*Seuil_nodense;
image_seuil_agricole=image_agricole.*Seuil_agricole;
image_seuil_urbain=image_urbain.*Seuil_urbain;
image_seuil_toundra=image_toundra.*Seuil_toundra;
```

```
image_finale_seuils=image_seuil_dense+image_seuil_nodense+...;
```



```

% Boucle sur toutes les images SSM/I
direc = 'C:\...\';
files = dir(direc);

nbFiles=size(files,1);

% Ouverture et lecture d'une image test SSM/I filtrée...1er janvier 1992
for k=3:nbFiles

file = ['C:\...\',files(k).name];
file_titre = files(k).name;
lecture_ssmi=fopen(file,'rb');

image_ssmi=fread(lecture_ssmi,[120,120],'float32');

% On veut une image finale avec 3 valeurs...Neige, No neige, Eau

index_neige=find(image_ssmi<=image_finale_seuils);
neige=zeros(120,120);
neige(index_neige)=1;

index_noneige=find(image_ssmi>image_finale_seuils);
noneige=zeros(120,120);
noneige(index_noneige)=2;

image_temp_neige=neige+noneige;

% On enlève les pixels contenant trop d'eau ==> brouille le signal
index_eau=find(image_eau>=0.4);
eau=ones(120,120);
eau(index_eau)=0;

affichage=sprintf('Image %d sur %d',k-2,nbFiles-2);
disp(affichage);

image_finale=image_temp_neige.*eau;

% Écriture de l'image dans un nouveau répertoire...
files(k).name = sprintf('Image_neige_ssmi[%03d]',k);

fichier_output = ['C:\...\', files(k).name];
fid = fopen (fichier_output,'w+');
fwrite (fid,image_finale,'float32');
fclose(fid);

end

```

```
nbFiles=size(files_mrcc,1);

for k=603:nbFiles

    % Ouverture et lecture des images...
    file_mrcc = ['C:\...\',files_mrcc(k).name];
    file_titre_mrcc = files_mrcc(k).name;
    lecture_mrcc=fopen(file_mrcc,'rb');

    image_mrcc_temp=fread(lecture_mrcc,[120,120],'float32');

    file_ssmi = ['C:\...\',files_ssmi(k).name];
    file_titre_ssmi = files_ssmi(k).name;
    lecture_ssmi=fopen(file_ssmi,'rb');

    image_ssmi_temp=fread(lecture_ssmi,[120,120],'float32');

    % Reclassification des images

    index_mrcc1=find(image_mrcc_temp==1);
    mrcc1=zeros(120,120);
    mrcc1(index_mrcc1)=5;

    index_mrcc2=find(image_mrcc_temp==2);
    mrcc2=zeros(120,120);
    mrcc2(index_mrcc2)=3;

    image_mrcc_temp2=mrcc1+mrcc2;
    image_mrcc=image_mrcc_temp2.*masque_final;

    index_ssmi1=find(image_ssmi_temp==1);
    ssmi1=zeros(120,120);
    ssmi1(index_ssmi1)=2;

    index_ssmi2=find(image_ssmi_temp==2);
    ssmi2=zeros(120,120);
    ssmi2(index_ssmi2)=1;

    image_ssmi_temp2=ssmi1+ssmi2;
    image_ssmi=image_ssmi_temp2.*masque_final;

    pre_final=image_mrcc-image_ssmi;
    final=pre_final.*masque_tampon2;
```

```
final2=final-ocean;  
index_ocean2=find(ocean==-1);  
final2(index_ocean2)=5;  
final2(1,1)=1;  
final2(1,2)=2;  
final2(1,3)=3;  
final2(1,4)=4;
```

```
affichage=sprintf('Image %d sur %d',k-2,nbFiles-2);  
disp(affichage);
```

```
files(k).name = sprintf('Image_4classes[%03d]',k-2);
```

```
fichier_output = ['C:\...\', files(k).name];  
fid = fopen (fichier_output,'w+');  
fwrite (fid,final2,'float32');  
fclose(fid);
```

```
end
```