Projet RDC

DÉVELOPPEMENT D'ALGORITHMES POUR LE SUIVI PAR SATELLITE DE LA COUVERTURE DE NEIGE AU SOL À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Rapport de recherche No R-904

Janvier 2007

Projet RDC

DÉVELOPPEMENT D'ALGORITHMES POUR LE SUIVI PAR SATELLITE DE LA COUVERTURE DE NEIGE AU SOL À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Préparé par :

INRS-ETE:

Karem Chokmani

Monique Bernier

Lisa-Marie Pâquet

Université de Sherbrooke :

Kalifa Goïta

Alain Royer

Félix Comtois-Boutet

Maxime Turcotte

Yuanzhi Zhang

Louis-Charles Forcier

Rapport no. R-904

présenté à

OURANOS et Hydro-Québec

Janvier 2007

ISBN 2-89146-529-6

AVANT PROPOS

Le présent rapport rend compte de l'état de l'avancement des travaux de recherche ainsi que des résultats préliminaires obtenus dans le cadre du projet intitulé : « Développement d'algorithmes pour le suivi par satellite de la couverture de neige au sol à l'échelle du bassin versant ».

Le premier chapitre du rapport expose le contexte du projet ainsi que la problématique générale de recherche. Le deuxième chapitre traite du premier objectif du projet qui porte sur la cartographie de l'étendue du couvert nival à l'aide de l'imagerie satellitaire. Quant au troisième chapitre, il traite du deuxième objectif du projet portant sur les méthodes d'estimation de l'équivalent en eau de la neige à partir des données micro-ondes passives satellitaires. Dans le dernier chapitre, sont présentés le résumé des activités de recherche réalisées au cours de la première année du projet ainsi qu'un aperçu des étapes jalons prévues pour l'année 2006-2007 et des résultats escomptés.

Les auteurs du rapport tiennent à remercier le CRSNG et OURANOS pour le soutien financier au projet ainsi qu'Hydro-Québec et le Centre Canadien de Télédétection pour leurs contributions en termes d'expertise et de fourniture de données.

TABLE DES MATIÈRES

AVAN'	Γ PROPOS		III
TABLI	E DES MAT	TIÈRES	v
LISTE	DES TABL	LEAUX	VII
LISTE	DES FIGU	RES	IX
1. IN	TRODUCT	TION	1
1.1	CONTEXT	E	1
1.2	PROBLÉM	ATIQUE DE LA RECHERCHE	1
1.3	OBJECTIFS	S	5
2. CA	ARTOGRA	PHIE HISTORIQUE DU COUVERT NIVAL	À PARTIR DES
IMAG	ES JOURNA	ALIÈRES NOAA-AVHRR ET DES IMAGES	SSM/I7
2.1	Introduc	CTION	7
2.2	Procédu	RE DE VALIDATION	8
2.3	ALGORITH	HME AVHRR	11
2.3	2.1 Doni	nées satellitaires	11
2.3	2.2 Défin	nition et étalonnage de l'algorithme	
2.3	2.3 Résu	ltats de la cartographie	
2.4	Algorith	HME SSM/I	19
2.4	!.1 Doni	nées satellitaires	
2.4	!.2 Défii	nition et étalonnage de l'algorithme	21
2.4	!.3 Valid	dation temporelle et spatiale des cartes SSM/I	22
2.5	Algorith	HME DE FUSION AVHRR-SSM/I	24
2.5	.1 Défii	nition et étalonnage de l'algorithme	24
2.5	5.2 Valid	dation temporelle et spatiale des cartes fusionnée	es AVHRR-SSM/I 26
2.6	CONCLUS	IONS	34

3.	CA	RTC	OGRAPHIE DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE À	PARTIR
D'	IMA	GES	AMSR-E	37
	3.1	Int	RODUCTION	37
	3.2	VA	LIDATION DES PRODUITS D'EEN FOURNIS PAR LE NSIDC	37
	3.2	.1	Données	37
	3.2	.2	Méthodologie	40
	3.2	.3	Résultats	40
	3.3	AL	GORITHME D'EEN BASÉ SUR AMSR-E ET ADAPTÉ AU QUÉBEC	44
	3.3	.1	Données	44
	3.3	.2	Méthodologie	44
	3.3	.3	Résultats préliminaires	47
	3.4	Co	NCLUSIONS	52
4.	CC	NCI	LUSIONS ET ÉTAPES JALONS POUR 2006-2007	53
	4.1	ÉТА	AT D'AVANCEMENT DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE	53
	4.2	Éта	APES JALONS POUR 2006-2007 ET RÉSULTATS ESCOMPTÉS	59
5.	RÉ	FÉR	ENCES	63
6.	AN	INEX	ŒS	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur AVHRR	12
Tableau 2 : Valeurs des seuils de classification des images NOAA-AVHRR	16
Tableau 3 : Matrice de confusion des résultats de la classification des échantillons de pixels qui ont servi pour valider l'algorithme de classification des images AVHRR	18
Tableau 4 : Résultats de la classification des images AVHRR (1987, 1992 et 1999) comparés aux observations de la neige au niveau des stations météorologiques de validation	19
Tableau 5 : Caractéristiques des données SMMR et SSM/I	20
Tableau 6 : Résolution spatiale brute au sol des données SMMR et SMM/I selon la fréquence d'acquisition. Les données sont ensuite re-échantillonnées à 25 km x 25 km dans la base de données EASE-Grid produite par NSIDC	20
Tableau 7 : Comparaison de la date de fin de couverture de neige mesurée au sol avec celle dérivée des images satellites micro-ondes passives, pour 21 stations météorologiques au Québec en 2003. Noter que deux stations ont donné des estimations aberrantes, non prises en compte dans la moyenne (La Grande Rivière, Kuujjuarapik).	23
Tableau 8 : Résultats de la classification à l'aide de l'algorithme de fusion AVHRR-SSM/I (1987, 1992 et 1999) comparés aux observations de la neige au niveau des stations météorologiques de validation	26
Tableau 9 : Statistiques moyennes des caractéristiques du couvert nival (n = nombre d'échantillons)	39
Tableau 10: Proportion de couverture de sol et fraction de la canopée dans les pixels des classes	39

Tableau 11 : Classification de la neige de l'algorithme du NSIDC	41
Tableau 12 : Performance des différents modèles.	48
Tableau 13 : Validation des modèles	48
Tableau 14 : Apprentissage pour la zone Taïga en combinant les données de 2003 et 2004. Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. La valeur moyenne de l'EEN est 225 mm, 350 points sont utilisés pour l'entraînement	50
Tableau 15 : Apprentissage pour la zone Maritime en combinant les données de 2003 et 2004. Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. La valeur moyenne de l'EEN est 175 mm, 478 points sont utilisés pour l'entraînement	50
Tableau 16 : Validation du réseau sur des données indépendantes dans la zone Maritime. Les données de 2003 et 2004 sont combinées. Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. Le nombre d'échantillons pour le test est de 480, avec une valeur moyenne de l'EEN de 225 mm.	51
Tableau 17 : Calendrier des activités réalisées durant la 1ère année (Objectif I)	56
Tableau 18 : Calendrier des activités réalisées durant la 1 ^{ère} année (Objectif I) (suite)	57
Tableau 19 : Calendrier des activités réalisées durant la 1ère année (Objectif II)	58
Tableau 20 : Étapes jalons pour l'année 2006-2007 (Objectif I)	60
Tableau 21 : Étapes jalons pour l'année 2006-2007 (Objectif II)	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des stations météorologiques d'Environnement Canada utilisées dans la validation des algorithmes de cartographie du couvert nival	Q
Figure 2: Traces des images Landsat-TM utilisées dans la validation des algorithmes de cartographie du couvert nival (la date d'acquisition de l'image est indiquée à l'intérieur du cadre)	
Figure 3 : Organigramme de l'algorithme de classification des images AVHRR	14
Figure 4 : Principe de la méthode de détection de neige à partir des données SSM/I	21
Figure 5 : Cartographie de la neige à l'aide de l'algorithme AVHRR, SSM/I et de fusion	27
Figure 6 : Résultats de la cartographie de la neige pour le 04 avril 1999	29
Figure 7 : Comparaison entre les résultats de cartographie de la neige en Abitibi à l'aide de l'imagerie Landsat-TM et a) l'algorithme de fusion; b) l'algorithme AVHRR	30
Figure 8 : Date de la fin de la fonte printanière par bassin versant produite par le MRCC pour la période 1980-1999	31
Figure 9 : Les bassins versants étudiés (le nom complet est donné dans la Figure 8). Les bassins ont été découpés sur la maille de calcul du MRCC	32
Figure 10 : Résultats de la cartographie de la neige compilés sur les bassins versants étudiés pour deux saisons printanières	33
Figure 11 : Couverture du sol (extrait de Latifovic, 2002). L'emplacement des stations de mesure de la neige est également indiqué	38
Figure 12 : Organigramme méthodologique pour l'évaluation des produits du NSIDC	41

Figure 13 : Erreur de classification à travers l'hiver	42
Figure 14 : Erreur normalisée de l'algorithme du NSIDC	42
Figure 15 : Moyenne de l'EEN sur le terrain	43
Figure 16 : EEN estimé NSIDC versus EEN sur le terrain (produit journalier à gauche, produit aux cinq jours à droite)	44
Figure 17: Organigramme méthodologique utilisé pour le développement d'algorithmes statistiques	45
Figure 18 : Schéma général du réseau de neurones considérés.	47
Figure 19 : Exemple d'évaluation du modèle basé sur 11V-37V avec un ajustement mensuel des coefficients. 2003 à gauche et 2004 à droite	49
Figure 20 : Entraînement du réseau de neurones avec les données des 5 canaux de AMSR-E (10.7, 18.7, 23.8, 36.5 et 89 GHz) en 2003	50
Figure 21 :: Test du réseau de neurones dans la zone Maritime. Comparaison entre les valeurs prédites par le réseau et les données indépendantes n'ayant pas été utilisées dans l'apprentissage.	51

1. Introduction

1.1 Contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'études multidisciplinaires menées par plusieurs chercheurs associés à OURANOS visant à valider les éléments importants du cycle hydrologique dans les simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) sur le Québec ainsi qu'à évaluer les effets estimés par le MRCC dans ses projections de changement climatique. Les études se basent sur l'examen des bilans hydrologiques annuels et interannuels et les résultats de diverses simulations du MRCC effectuées sur des fenêtres de 20 ans (1979-1999). La majeure partie des analyses est effectuée sur une vingtaine de grands bassins hydrographiques québécois et utilise des données d'observations d'écoulements obtenues grâce à la collaboration des organismes suivants : Hydro-Québec, Churchill Falls and Labrador Corporation (CFLCo), Alcan, Ministère de l'Environnement du Québec (MENV).

1.2 Problématique de la recherche

Le couvert nival est un facteur clé dans la modélisation de la circulation atmosphérique, du bilan hydrique, des phénomènes météorologiques ainsi que des changements climatiques. L'albédo élevé de la neige influence le bilan radiatif du système océan-terreatmosphère et son contenu en eau représente un grand réservoir hydrique. En effet, durant le cycle annuel, la neige couvre entre 10% à 40% de l'hémisphère nord (Hall *et al.*, 2001a; Cordisco *et al.*, 2003).

La source conventionnelle d'information sur le couvert nival (i.e., couverture de neige, le gel du sol, l'équivalent en eau de la neige) est le réseau de stations météorologiques où des observations journalières de la présence et/ou de la profondeur de la neige sont relevées. En raison de sa faible densité et sa distribution spatiale non optimale, ce réseau de stations ne permet pas de fournir des données assez précises pour cartographier

l'étendue et l'équivalent en eau du couvert nival de manière spatialement consistante à grande échelle avec une bonne résolution spatiale. Ce qui se traduit par une incapacité de suivre avec précision l'état de surface sur de longues périodes ainsi que de suivre l'évolution du couvert nival pendant des périodes critiques telles que la formation du couvert nival en automne ou la fonte de la neige au printemps.

Les données satellitaires dans le visible et l'infrarouge comme dans les micro-ondes passives (NOAA-AVHRR, SSM/I, AMSR-E) représentent alors des sources alternatives d'information sur le couvert nival. Elles pourraient être utilisées pour la validation des simulations du MRCC si des algorithmes adaptés à la géographie du territoire québécois (épaisseur et structure du couvert nival, types de végétation) étaient développés. Plusieurs produits satellitaires de la couverture nivale sont disponibles en temps réel. Toutefois, leur qualité varie considérablement en fonction des caractéristiques du capteur et de la plateforme, des procédures de traitement des images et des techniques de classification de la neige (Simic *et al.*, 2004).

Jusqu'en 1997, les produits opérationnels disponibles ont été les cartes hebdomadaires manuelles IMS (Ice Mapping System) couvrant l'hémisphère nord produites par le National Environmental Satellite Data and Information Service (NESDIS). Elles étaient réalisées manuellement à partir des images AVHRR et des satellites géostationnaires (GOES, METEOSAT). L'analyste se basait sur la dernière image claire pour délimiter manuellement l'étendue de la neige. Ensuite, le résultat était numérisé avec une résolution nominale de 190 km. Ce système a été amélioré pour produire des couvertures journalières avec une résolution de 23 km (Ramsay, 1998). À partir de 1999, la résolution spatiale du produit du NESDIS est passée à 5 km grâce à une autre amélioration du système IMS qui prend en compte les données du capteur de micro-ondes passives SSM/I embarqué sur le satellite DMSP (Romanov et al., 2000). Parallèlement, dès 1986, le National Operational Hydrological Remote Sensing Center (NOHRSC) mettait à la disposition des usagers une cartographie régionale de l'étendue journalière de la neige dans 3000 à 4000 bassins versants aux Etats-Unis et au sud du Canada (Bitner et al., 2002; Hall et al., 2002). Ces cartes sont produites d'une manière semi-automatique à partir des données AVHRR et GOES à une résolution spatiale nominale de 1 km. Également, depuis fin 1999, des cartes du couvert nival réalisées à partir des images MODIS sont disponibles : une couverture régionale quotidienne et hebdomadaire (étendue maximale de la neige pendant les 8 derniers jours) à une résolution de 500 m ainsi qu'une couverture globale d'une résolution de 0,5 degrés. Ce produit est toujours en phase de test et développement (Hall *et al.*, 1995; Hall *et al.*, 2001b; Hall *et al.*, 2002; Simic *et al.*, 2003).

La cartographie opérationnelle de l'équivalent en eau de la neige demeure encore peu avancée. Les méthodologies développées se basent principalement sur les micro-ondes actives (par exemple Bernier et al. (1999)), mais plus particulièrement sur les microondes passives. Des produits dérivés des données micro-ondes passives du capteur AMSR-E ont récemment été proposés à une résolution spatiale de 25 km (http://nsidc.org/data/). La précision associée à ces produits globaux est très variable notamment à cause de la diversité des conditions de neige et des types de couverture de surface à travers le globe. Les micro-ondes passives sont utilisées de manière quasi opérationnelle dans les Prairies canadiennes pour estimer l'EEN (Goodison et Walker, 1994) avec une précision de l'ordre de 10 à 15 mm. L'introduction d'algorithmes prenant en compte la couverture forestière (Goïta et al., 2003) a permis d'étendre l'applicabilité à l'ensemble du bassin du Mackenzie (Derksen et al., 2003). Les micro-ondes passives ont été testées dans le bassin de la rivière La Grande, au Québec, par des chercheurs de l'INRS dès la fin des années quatre-vingt-dix (De Sève et al., 1997) qui ont alors montré et analysé l'effet de saturation du signal au-delà d'une certaine quantité de neige au sol (150 mm d'EEN) ainsi que l'effet de contamination du signal due au couvert végétal et aux grandes étendues d'eau (De Sève et al., 2003). Plus récemment, certaines études ont démontré le potentiel de l'utilisation du modèle semi-physique de la Helsinki University of technology (HUT) pour la détermination de l'EEN en Finlande (Pulliainen et al., 1999) et dans l'ouest canadien (Roy et al., 2004). D'autre part, les chercheurs de l'IREQ testent actuellement trois différentes approches pour déterminer l'EEN dans la région du complexe hydroélectrique de la Grande : Réseau de neurones, relation linéaire entre les TB et les EEE mesurés, et approche physique (De Sève *et al.*, 2004).

Considérant que les simulations du MRCC couvrent une période de vingt ans (1979 à 1999), les produits opérationnels disponibles pour la cartographie de la neige ne permettent pas de fournir des données historiques sur une assez longue période (au minimum 25% de la période de simulation) et ce, pour plusieurs raisons : soit parce que la résolution et/ou la couverture spatiale sont inadéquates soit en raison de la non disponibilité d'une longue série continue d'observations. En effet, les cartes produites par le NOHRSC, de résolution de 1 km, présentent une couverture spatiale limitée. Celles produites par le NESDIS n'ont atteint une résolution convenable qu'après 1997. Quant aux cartes produites à l'aide des images MODIS, d'une résolution de 500 m, elles ne sont disponibles que depuis la fin de 1999. D'autre part, la faible fréquence temporelle des satellites de haute résolution spatiale limite leur utilisation dans le suivi temporelle de la couverture de la neige (Hall *et al.*, 2002).

Ainsi, les deux capteurs AVHRR (au moins deux images de jour par jour, 1 km de résolution) à bord du satellite NOAA (visible et infrarouge) et SSM/I (2 images par jour, 25 km de résolution) à bord du satellite DMSP (micro-ondes passives) ont été retenus pour développer des algorithmes de cartographie de la neige au sol adaptés aux conditions du Québec. Le choix de ces deux capteurs a été dicté par le fait que les deux offrent une longue série d'observations quotidiennes de la surface terrestre d'une qualité constante. De plus, les données sont disponibles en ligne (http://www.saa.noaa.gov). Ce qui les rend appropriées pour les études de changement climatique et le suivi temporel de l'état de la surface terrestre. La longue série temporelle que nous développerons pourrait s'enchaîner facilement par la suite avec les résultats générés à partir des capteurs de nouvelle génération, comme MODIS et AMSR-E.

En 2003, une procédure opérationnelle de suivi spatio-temporel de la couverture de la neige au sol à l'aide des images NOAA-AVHRR a été développée (Chokmani *et al.*, 2004; Chokmani *et al.*, 2005; Chokmani *et al.*, 2006). En parallèle, une méthode simple pour la détection de la couverture de la neige à partir des données micro-ondes passives du capteur SSM/I a été élaborée (Langlois, 2003; Langlois *et al.*, 2004). Par ailleurs, plusieurs auteurs ont démontré l'intérêt de l'utilisation conjointe des données satellitaires dans le visible et l'infrarouge et dans les micro-ondes passives pour cartographier

l'étendue de la neige et suivre son évolution dans le temps et dans l'espace (Ramsay, 1998; Koskinen *et al.*, 1999; Romanov *et al.*, 2000; Tait *et al.*, 2001; Bitner *et al.*, 2002; Cordisco *et al.*, 2003; Simic *et al.*, 2004). Par conséquent, il a été décidé de combiner les deux capteurs et de développer une procédure de fusion de la cartographie de la neige obtenue à l'aide des données optiques du capteur AVHRR et celles obtenues à l'aide du capteur de micro-ondes passives SSM/I. Cette procédure alliera la haute résolution spatiale du capteur AVHRR à la capacité de SSM/I de pénétrer les nuages.

En ce qui concerne l'estimation de l'EEN dans le domaine des micro-ondes passives, les travaux récents de l'université de Sherbrooke ont porté sur le développement d'algorithmes (Goïta *et al.*, 2003), l'adaptation et l'amélioration d'un modèle semiphysique (Roy *et al.*, 2004) et l'étude de l'atténuation due au couvert végétal dans l'Ouest canadien (Pardé *et al.*, 2005). La région d'étude, le Québec est un environnement particulier, par sa composition forestière diversifiée, par la quantité plus importante de neige que dans l'Ouest canadien et par les diverses conditions de températures. Ceci pose un problème important aux produits globaux comme ceux issus d'AMSR-E. L'utilisation d'une méthodologie empirique développée ailleurs ne donne pas les résultats escomptés dans un tel environnement.

1.3 Objectifs

Ce projet comporte deux objectifs ou volets principaux lesquels seront traités dans des chapitres différents soient les chapitres 2 et 3.

- 1) Développer et valider des méthodologies pour la cartographie historique du couvert nival à l'échelle d'un bassin versant à partir des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/ I.
 - a) Développer un algorithme de fusion des images journalières NOAA-AVHRR (1 km de résolution, 1 image par jour) et des images SSM/I (2 images/jour, 25 km de résolution).
 - b) Développer un algorithme de détection de la neige humide à partir des microondes passives (SSM/I).

- c) Explorer le potentiel des images composites hebdomadaires (NOAA-AVHRR) pour le suivi de l'étendue du couvert nival.
- 2) Développer et valider une méthodologie pour la cartographie de l'équivalent en eau de la neige (EEN) à partir d'images SSM/I et AMSR-E adaptée à l'environnement du territoire québécois, et à la Baie-James en particulier.
 - a) Valider et corriger des produits d'EEN fournis par le NSIDC.
 - b) Redéfinir un algorithme d'EEN basé sur AMSR-E adapté au Québec.

2. Cartographie historique du couvert nival à partir des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/I

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, il sera question du développement et de la validation d'algorithmes pour la cartographie historique du couvert nival au Québec à partir des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/ I en vue de la validation des sorties du MRCC (objectif I).

La période visée par la présente étude couvre les 13 dernières années des 20 ans de simulation du MRCC (1979 à 1999). Étant donné que les données SSM/I ne sont disponibles qu'à partir de 1987 et malgré que nous disposions de données AVHRR à partir de 1985, il a été décidé de se limiter à la période 1987-1999.

Dans le présent chapitre, les cinq points ci-dessous seront discutés :

- a) Développement d'une nouvelle version de l'algorithme de détection de la neige à l'aide des images NOAA-AVHRR qui intègre la variation temporelle des seuils de détection;
- b) Développement d'une nouvelle version de l'algorithme de détection de la neige à partir des micro-ondes passives (SSM/I) qui soit sensible à la présence de la neige humide;
- Développement d'un algorithme de fusion des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/I.
- d) Validation des résultats des différents algorithmes à l'aide des données au sol;
- e) Comparaison des résultats de cartographie de la neige à l'échelle de la vingtaine de bassins versants étudiés aux résultats de simulation du MRCC concernant la date de disparition du couvert nival. En effet, suite à l'extension

de la période d'étude, passant de 6 saisons hivernales (lors de la proposition initiale du projet) à 13 (1987-1999), il a été convenu, en commun accord avec l'équipe d'OURANOS, de concentrer les efforts de cartographie de la neige sur la période la plus critique à savoir la fonte printanière (entre le 1^{ier} avril et le 31 mai de chaque année).

Par ailleurs, l'exploration du potentiel des images composites hebdomadaires (NOAA-AVHRR) pour le suivi de l'étendue du couvert nival sera analysée lors de la deuxième année du projet. Quant à la cartographie du couvert nival pour la période automnale, soit l'établissement du couvert entre le 1^{er} octobre et le 15 décembre de chaque saison, elle pourra faire l'objet d'une étude éventuelle.

2.2 Procédure de validation

Afin de mesurer les performances des différents algorithmes développés, les observations de la profondeur de la neige au sol au niveau de 80 stations météorologiques d'Environnement Canada ont été utilisées comme références (Figure 1). Les résultats de classifications à l'intérieur d'une fenêtre de 3x3 pixels, centrée au-dessus de chaque station, ont été extraits. Ensuite, l'occurrence de chaque catégorie de surface à l'intérieur des fenêtres de pixels a été comptabilisée. L'ensemble de la fenêtre de 3x3 pixels a été considéré comme appartenant à la catégorie de surface la plus fréquente. Les fenêtres présentant un taux de couverture nuageuse supérieur à 50 % ont été écartées de la comparaison. Les statistiques d'occurrence ont été comparées avec les observations de la profondeur de la neige, ce qui permet de bâtir une matrice de confusion ou de contingence. Celle-ci fait l'inventaire des sites de référence selon leur appartenance aux différentes catégories de surface et leur affectation par l'algorithme à telle ou telle catégorie. La matrice de confusion permet de calculer les paramètres de performance de l'algorithme de classification, à savoir : le taux de succès de la classification, les erreurs d'omission et de commission et le coefficient Kappa.

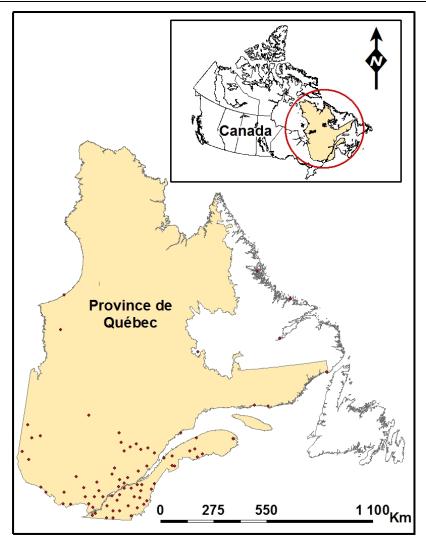


Figure 1 : Répartition des stations météorologiques d'Environnement Canada utilisées dans la validation des algorithmes de cartographie du couvert nival

Le taux de succès de la classification représente le rapport du nombre de sites bien classés dans une catégorie donnée par rapport au nombre total de sites de la catégorie en question. L'erreur d'omission représente la fraction de sites d'une catégorie donnée qui ont été faussement classés par l'algorithme dans d'autres classes de surface. L'erreur de commission donne la quantité de sites appartenant à d'autres classes de surface et qui ont été attribués par erreur à la catégorie en question. Toutefois, le taux de succès de la classification ainsi que les erreurs d'omission et de commission ne sont pas indépendants de la qualité de l'échantillonnage des pixels. Le coefficient Kappa (K) par contre permet de juger de la qualité de la classification indépendamment de l'échantillonnage. Il permet

aussi de mesurer le gain obtenu à l'aide de la méthode de classification par rapport à une classification complètement aléatoire. Les valeurs de K varient de 0 à 1: une valeur 0 n'indique aucun gain par rapport à une classification aléatoire et la valeur 1 correspond à une classification parfaite. Généralement, des valeurs supérieures à 0,40 indiquent une classification acceptable. K est calculé comme suit :

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} x_{i+} * x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^{r} x_{i+} * x_{+i}}$$
(1)

Où r est le nombre de lignes dans la matrice de confusion, x_{ii} est la valeur de la i^e diagonale de la matrice de confusion, x_{i+} est le total de la ligne i de la matrice, x_{+i} est le total de la colonne i et N représente la taille totale de l'échantillon.

Comme il peut être noté de la Figure 1, la majorité des sites de validation sont situées dans la partie sud/sud-ouest du territoire, ce qui peut biaiser le processus de validation. En conséquence, six scènes de Landsat-TM (30 m de résolution) ont été également employées pour valider les résultats de cartographie de la neige. Ces scènes sont uniformément réparties sur la région d'étude et à travers les principaux types d'occupation du sol présents sur le territoire (Figure 2). Les images Landsat ont été préalablement classifiées pour la présence ou pas de la neige (Dever, 2006). Cette classification a été réalisée en utilisant une version modifiée de l'algorithme proposé par Klein *et al.* (Klein *et al.*, 1998). Dans cette version modifiée, la détection de neige se fonde sur l'utilisation en commun du NDSI (Normalized Difference Snow Index) et du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ainsi que sur une procédure contextuelle d'identification et correction des pixels classés par erreur comme étant sans neige.

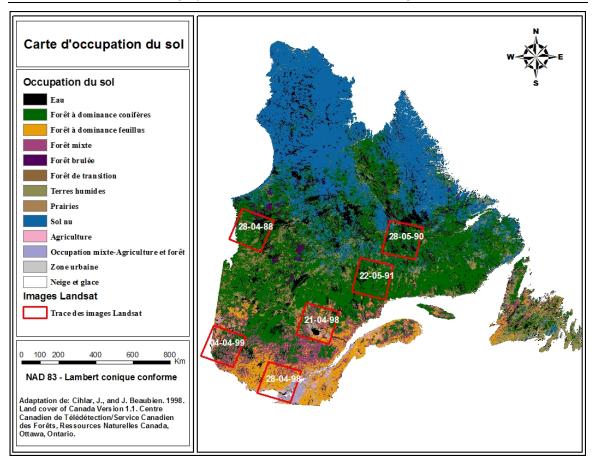


Figure 2 : Traces des images Landsat-TM utilisées dans la validation des algorithmes de cartographie du couvert nival (la date d'acquisition de l'image est indiquée à l'intérieur du cadre)

2.3 Algorithme AVHRR

2.3.1 Données satellitaires

Les données images utilisées ont été acquises par le capteur AVHRR, embarqué à bord de la série de satellites NOAA. Deux satellites sont en opération simultanément. De la sorte, n'importe quel point du globe est couvert par au moins quatre passages, quotidiennement. En allant de l'équateur vers les pôles le nombre de passages augmente. Le capteur AVHRR est un radiomètre balayeur mesurant le rayonnement dans cinq régions différentes du spectre électromagnétique (allant du visible jusqu'à l'infrarouge thermique en passant par l'infrarouge proche et l'infrarouge moyen). AVHRR couvre une

importante scène de 2700 km avec une résolution spatiale de 1,1 x 1,1 km au nadir (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur AVHRR.

Paramètres spatiaux

Angle de balayage : $\pm 55,4^{\circ}$

Champ balayé: 2700 km

Résolution spatiale : 1,1 x 1,1 km au nadir

2,4 x 6,9 km à la limite du champ balayé

Paramètres spectraux

Canal: 1 2 3 4 5

Région spectrale : rouge infrarouge infrarouge infrarouge infrarouge

proche moyen thermique thermique

Bande spectrale (µm): 0,58-0,68 0,725-1,10 3,55-3,93 10,3-11,3 11,5-12,5

Codage: 10 bits pour tous les canaux

Grâce à une entente de collaboration avec le Centre Canadien de Télédétection (CCT)¹ conclue en novembre 2005, nous avons eu accès à une banque exhaustive d'images AVHRR couvrant la période de 1985 à 2004. Les images proviennent du nouveau système EODM (Earth Observation Data Manager) (Latifovic *et al.*, 2005). Le système permet de gérer et manipuler une base d'images comptant plus de 200 000 scènes provenant de 11 générations du satellite NOAA (de la série 6 à 17). Il s'agit d'un système automatique de calibration radiométrique et de correction géométrique des images AVHRR. La calibration radiométrique permet de transformer les données brutes fournies par le capteur en paramètres physiques. Les données dans le visible et l'infrarouge proche (canaux 1 et 2) sont converties en albédo (A1 et A2). Les données dans l'infrarouge moyen et thermique (canaux 3, 4 et 5) sont converties en température de brillance (T3, T4 et T5). Cette opération permet également de comparer les données d'une même image ainsi que celles d'images de dates d'acquisition différentes d'un même capteur et/ou de

¹ Messieurs Alexander Trishchenko et Richard Fernandez, chercheurs au Centre Canadien de Télédétection, Ottawa.

capteurs de différentes séries. La correction géométrique, quant à elle, consiste à réduire les déformations spatiales dans les images et les rattacher à un système de projection usuel en se basant sur série de points d'appuis au sol. L'équipe du CCT, grâce au système EODEM, nous a fourni des images déjà découpées sur la région couvrant le territoire à l'étude (coin supérieur gauche : 79d29'44.4355"W, 63d55'54.9667"N; coin inférieur droit: 64d46'49.4477"W, 41d34'10.2657"N).

Afin de pouvoir suivre l'évolution de la neige au sol pendant la phase critique de fonte printanière, les images quotidiennes acquises du 1^{er} avril au 31 mai de chaque année ont été retenues. Pour les bassins de la région subarctique, des images couvrant le mois de juin seront aussi traitées. Les images du début de l'après-midi ont été privilégiées. Les images de mi-journée sont moins sensibles aux effets topographiques qui se manifestent par des variations dans les conditions d'illumination (Voigt *et al.*, 1999).

2.3.2 Définition et étalonnage de l'algorithme

L'algorithme de classification développé dans la présente étude a été inspiré de celui proposé par Voigt *et al.* (1999). Il s'agit d'un algorithme à seuils multi-canaux. Selon Voigt *et al.* (1999), la technique présentée surpasse la classification dirigée et non dirigée. Comparée aux observations au sol, la technique affiche un taux de réussite variant entre 60 % et 90 %. À la différence de la première version (Chokmani *et al.*, 2004), la version actuelle de l'algorithme tient compte de la variation temporelle des seuils de classification.

L'algorithme est conçu pour distinguer trois catégories de surface : neige, nuages et nonneige. Il est constitué d'une combinaison de six seuils séquentiels. Toutefois, le seuil utilisant la réflectance de la bande 3 est différent de celui proposé initialement par VOIGT *et al.* (1999). L'application des seuils va du moins restrictif au plus sévère. Un pixel qui réussi à passer à travers tous les seuils est classé comme neige, sinon il est catégorisé comme nuages ou autre (Figure 3) :

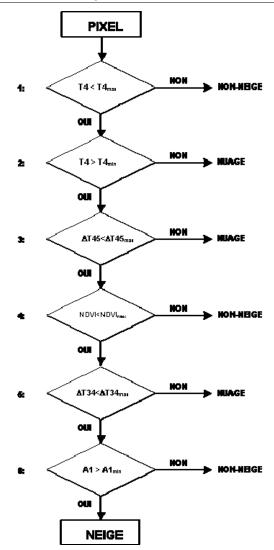


Figure 3: Organigramme de l'algorithme de classification des images AVHRR

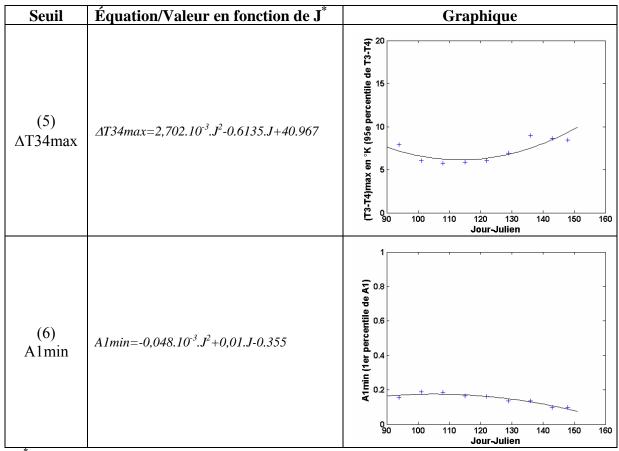
1. Le pixel doit avoir une valeur de température dans la bande 4 (T4) inférieure à la température maximale que pourrait avoir la neige. Sinon, le pixel est classé autre que neige ou nuage; 2. Le pixel doit aussi avoir une valeur de température dans la bande 4 (T4) supérieure à la température minimale que pourrait avoir la neige. Sinon, le pixel est classé en nuages (plus froids que la neige); 3. Le pixel doit avoir une différence de température entre les bandes 4 et 5 (ΔT45) inférieure à celle des voiles nuageux. Sinon, le pixel est classé en nuages; 4. Le pixel doit avoir un indice de végétation NDVI inférieur au maximum que pourrait avoir la neige. Sinon, le pixel est classé autre que neige ou nuage. Les valeurs de NDVI varient entre 1 et -1. Normalement, la neige présente des valeurs de NDVI négatives ou de faibles valeurs positives; 5. Le pixel doit avoir une différence de température entre les bandes 3 et 4 (ΔT34) inférieure à la valeur maximale que pourrait avoir la neige. Sinon, le pixel est classé en nuages. Dans la bande 3, la réflectance de la neige est beaucoup plus basse que celle des nuages bas; 6. Le pixel doit avoir une valeur de réflectance dans la bande (A1) supérieure à la valeur minimale de l'albédo que pourrait avoir la neige. Sinon, le pixel est classé autre que neige ou nuage. La neige a normalement un albédo dans le visible supérieur aux autres surfaces.

Dans le but d'étalonner l'algorithme de classification, nous avons sélectionné une série de 172 images des mois d'avril et de mai où les différentes catégories de surfaces (neige, nuages et non-neige) sont présentes. Les images identifiées se répartissent quasiment sur toute la période d'étude (1987, 1988, 1990-1992, 1996-1999). Ensuite, des échantillons de pixels ont été extraits à partir de chacune des images sélectionnées, au-dessus de zones appartenant aux trois catégories de surface présentes dans la scène. Ces zones ont été identifiées visuellement et délimitées manuellement dans le système PCI. La première moitié des pixels échantillonnés ont été consacrée pour l'étalonnage de l'algorithme. L'autre moitié a servi à sa validation.

Dans le but d'étalonner les seuils de l'algorithme, les percentiles des données radiométriques (T4, ΔT45, NDVI, ΔT34 et A1) des pixels consacrés à l'étalonnage ont été calculés. Les percentiles ont servi à bâtir les valeurs des seuils de l'algorithme. Par exemple, le 99^{ième} percentile de la T4 des pixels de neige correspond au premier seuil (T4max) et le 1^{ier} percentile au deuxième seuil (T4min). Par la suite, pour chaque seuil, la variation des valeurs du percentile en fonction de la date d'acquisition des images (en termes de jours juliens) a été étudiée et une équation polynomiale, exprimant la valeur du percentile/seuil en fonction du jour julien, lui a été éventuellement ajustée. Le Tableau 2 présente les valeurs des seuils de l'algorithme de classification des images AVHRR, pour la période printanière (du 1 avril au 31 mai). Il est à noter que les équations présentées au Tableau 2 ne sont valides que pour la période allant du 90^{ième} jour julien au 151^{ième}, c'est à dire du 1^{ier} avril au 31 mai. Au delà de cette période, les équations de calcul des seuils doivent adaptées.

Tableau 2 : Valeurs des seuils de classification des images NOAA-AVHRR

Seuil	Équation/Valeur en fonction de J*	Graphique
(1) T4max	T4max=1,682.10 ⁻³ .J ² -0,2105.J+281,491	290 (†£ 288 - + + + + + + + + + + + + + + + + + +
(2) T4min	T4min=0,358.10 ⁻³ .J ² +0,0923.J+247,43	270 14
(3) ΔT45max	$\Delta T45max=2$ ° K	NA
(4) NDVImax	NDVImax=0,127.10 ⁻³ .J ² -0,0291.J+1,832	0.34 (NOA) 0.32 0.30



* J : Jour-Julien

2.3.3 Résultats de la cartographie

L'algorithme de classification ainsi étalonné a été appliqué aux échantillons de pixels réservés pour la validation afin d'en mesurer les performances. Le Tableau 3 présente les résultats de comparaison entre ces échantillons de pixels et les résultats de leur classification dans chaque catégorie de surfaces identifiées à l'aide de l'algorithme. Il est à noter que l'algorithme réussi à identifier les trois catégories de surface avec un taux de succès élevé de l'ordre de 97%. Les nuages sont identifiés avec un taux de succès quasi parfait. En revanche, quoique la neige ait été classée avec un taux dépassant les 93%, elle a été la classe la plus affectée par l'erreur d'omission (près 7% des pixels ont été classés dans l'une ou l'autre des deux autres classes. Ceci est explicable par le fait que l'algorithme tel qu'il est défini est un algorithme sévère vis-à-vis la classe neige. En d'autres termes, l'algorithme étant basé sur les percentiles de la classe neige, les pixels de neige se trouvant aux extrémités des histogrammes de distribution des différents seuils

sont exclus au profit des deux autres classes, ce qui se traduit par une légère sous estimation de la présence de la neige.

Tableau 3 : Matrice de confusion des résultats de la classification des échantillons de pixels qui ont servi pour valider l'algorithme de classification des images AVHRR

Échantillons	Nombre total de pixels de	Classifica	Classification en % (arrondi)		
	validation	Neige	Non-neige	Nuages	
Neige	62430	93	4	3	
Non-neige	14533	1	98	1	
Nuages	62542	0	0	100	
Taux de succès global				97%	

Dans le but de vérifier la validité de l'algorithme AVHRR, les observations de la profondeur de neige au sol enregistrées au niveau des 80 stations météorologiques retenues pour la validation (§2.2; Figure 1) ont été comparées aux résultats de classification des images AVHRR. Étant donné qu'à la date de rédaction du présent rapport les analyses sont toujours en cours, nous présentons ici les résultats d'une sélection d'images. Il s'agit de 43 images acquises aux printemps 1987, 1992 et 1999. Pour se faire, les résultats de classifications à l'intérieur d'une fenêtre de 3x3 pixels, centrée au-dessus de chaque station ont été extraits. Ensuite, l'occurrence de chaque catégorie de surface à l'intérieur des fenêtres de pixels a été comptabilisée. L'ensemble de la fenêtre de 3x3 pixels autour du site a été considéré comme appartenant à la catégorie de surface la plus fréquente dans la fenêtre. Les fenêtres présentant un taux de couverture nuageuse supérieur à 50% ont été écartées de la comparaison. Les statistiques d'occurrence ont été par la suite utilisées dans la comparaison avec les observations de la profondeur de la neige (Tableau 4).

Pour l'ensemble des stations, plus de 40 % des dates ont été contaminées par les nuages. Pour les dates restantes, l'algorithme de classification a correctement identifié les conditions de surface (neige, non-neige) dans le voisinage de l'ensemble des stations dans 91 % des cas. Ceci correspond à une très bonne qualité de classification (K=0,77). Il est à noter que les résultats de classification concernant la classe neige concordent assez

bien avec les observations au sol avec un taux de succès pour cette classe de l'ordre de 84 %. En revanche, les performances de l'algorithme en ce qui concerne l'identification de la classe neige sont plus faibles que la classe non-neige. Ceci revient au fait que l'algorithme est plus sévère pour la détection de la classe neige. Ceci est également attribuable au fait que les conditions de sans neige sont sur représentées dans les jeux de validation, puisque la plupart des 80 stations sont localisées dans la partie sud / sud-ouest du territoire où ces conditions sont plus fréquentes.

Tableau 4 : Résultats de la classification des images AVHRR (1987, 1992 et 1999) comparés aux observations de la neige au niveau des stations météorologiques de validation

			Classification		
		neige	non-neige	nuages	Total
Observations	neige	187	36		223
	non-neige	42	598		640
	nuages			606	
	Total	229	634		863

	Succès	Omission	Commission	
neige	84%	16%	18%	
non-neige	93%	7%	6%	

Taux de succès global	91%
Карра	0.77

2.4 Algorithme SSM/I

2.4.1 Données satellitaires

Les principales caractéristiques des capteurs SSM/I sont résumées dans le Tableau 5 et le Tableau 6.

Tableau 5 : Caractéristiques des données SMMR et SSM/I

	SMMR	SSM/I		
Plate-forme	Nimbus-7	DMSP -F8; -F11; -F13		
Période de	26 oct.1978 - 20 août 1987	-F8: 7 sept. 1987 - 30 déc. 1991		
Mesure		-F11 : 3 déc. 1991 - 30 sept. 1995		
		-F13 : 3 mai 1995 - présent		
Canaux	6.6; 10.69; 18; 21; 37	19.35 ; 22.345 ; 37 ;85.5		
en GHz				
Polarisation	V et H	V et H		
		sauf 22 GHz, V seulement		
Acquisition	tous les 2 jours	journalière		
des données				
Largeur de la trace	780 km	1400 km		
au sol				
Angle de visée	50°2	53°1		

Tableau 6 : Résolution spatiale brute au sol des données SMMR et SMM/I selon la fréquence d'acquisition. Les données sont ensuite re-échantillonnées à 25 km x 25 km dans la base de données EASE-Grid produite par NSIDC.

18 GHz (SMMR)	55 km x 41 km
37 GHz (SMMR)	27 km x 18 km
19,35 GHz (SSM/I)	69 km x 43 km
37 GHz (SSM/I)	37 km x 28 km

Le National Snow and Ice Data Centre, NSIDC, (Boulder, Co.) produit une base de données interpolées et ré-échantillonnées selon une grille dont chaque pixel couvre une surface identique de 625 km2 (EASE Grid, Equal Area Scalable Earth). Pour plus de renseignements concernant les transformations (correspondance coordonnées géographiques / pixel EASE-Grid) et la projection des données dans cette grille, nous invitons le lecteur à visiter le site web du NSIDC et notamment la page consacrée à ce sujet : http://www.nsidc.org/data/docs/ease/ease_grid.html.

Chaque fichier de données regroupe alors l'ensemble des données journalières de l'Hémisphère Nord, pour 1 fréquence, 1 polarisation et la phase orbitale correspondante (montante ou descendante). Ces fichiers de données sont accompagnés de fichiers "latitude" et "longitude" permettant d'obtenir pour chaque point de grille les coordonnées géographiques correspondantes, ainsi qu'un fichier renseignant sur les heures de passage du satellite (en UTC, Universal Time Coordinated ou Temps Universel Coordonné).

2.4.2 Définition et étalonnage de l'algorithme

L'algorithme de détection de la neige se base sur des relations bien connues d'atténuation de la température de brillance de la surface par le couvert de neige (absorption et diffusion), qui est différente selon la fréquence du rayonnement considéré (dans ce cas 19 et 37 GHz). Ces algorithmes sont décrits en détail dans Langlois $et\ al.\ (2004)$ et Mialon $et\ al.\ (2005)$. La méthode de départ basée sur le gradient de température de brillance a été modifiée pour améliorer sa sensibilité. La nouvelle méthode proposée utilise un gradient d'émissivité ($\Delta \epsilon$) plutôt qu'un gradient de température de brillance. La méthode est décrite dans l'article Royer $et\ al.\ (2006)$, joint en annexe. Figure 4 illustre le principe utilisé.

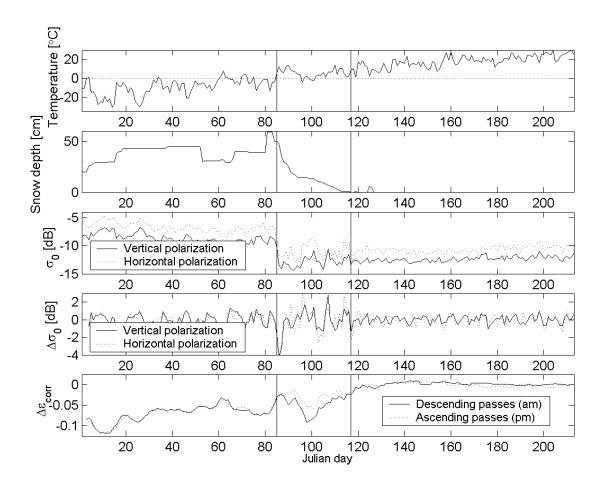


Figure 4 : Principe de la méthode de détection de neige à partir des données SSM/I.

On calcul le gradient d'émissivité ($\Delta\epsilon$) à deux fréquences 19 et 37 GHz (figure du bas). Cet indice est plus faible en présence de neige que pour une surface sans neige. Un seuil appliqué sur la variation de cet indice à partir de sa moyenne estivale permet de détecter le dernier jour couvert de neige. Cette figure correspond à la station de St-Ambroise (fraction de couverture de forêt: 43%) (48.57° N, 71.33° W). De haut en bas: température de l'air, épaisseur de neige au sol, coefficient de rétrodiffusion Ku (σ_0 , dB), Indice de gradient temporel du coefficient de rétrodiffusion ($\Delta\sigma_0$, dB) utilisé pour la détection de la neige humide au sol, et gradient fréquentiel d'émissivité ($\Delta\epsilon_t$). Les lignes verticales correspondent respectivement aux dates de début de neige humide et de fin de couverture de neige (Tiré de Royer *et al.* (2006)).

2.4.3 Validation temporelle et spatiale des cartes SSM/I

La validation de la méthode améliorée a été réalisée par comparaison à des stations météorologiques au sol pour deux années : 2003 et 2004, ainsi que par comparaison avec les données optiques générées par le Centre Canadien de télédétection (voir Royer et al. (2006) en annexe). L'erreur absolue est de l'ordre de 6 à 10 jours en moyenne. En relatif, les différences peuvent varier de +20 jours à -20 jours, avec une erreur moyenne de l'ordre de 1 jour ou moins (sur l'ensemble des données analysées, les dates en avance compensent celles en retard). Le tableau 3 présente les résultats pour 2004. Dans cette analyse, il faut bien considérer le problème que l'on compare ici une mesure ponctuelle dans une station météorologique en milieu découvert (aéroport par exemple) à une estimation de la couverture de neige sur une superficie de 25 x 25 km autour de ce point. La comparaison peut donc être, selon les conditions, problématique et sujette à caution.

Tableau 7 : Comparaison de la date de fin de couverture de neige mesurée au sol avec celle dérivée des images satellites micro-ondes passives, pour 21 stations météorologiques au Québec en 2003. Noter que deux stations ont donné des estimations aberrantes, non prises en compte dans la moyenne (La Grande Rivière, Kuujjuarapik).

2003		Fin de la couverture de neige (jour julien)		Différence (nombres	
Station	Latitude	Longitude	Observée	Calculée	de jours)
Gaspé	48.78	-64.48	111	87	24
Mont-Joli	48.60	-68.22	107	108	-1
Bagotville	48.33	-71.00	110	108	2
Robertval	48.52	-72.27	110	117	-7
La Grande Rivière	53.63	-77.70	90	(151)	-
Rivière-au-Tonnerre	50.28	-64.78	121	132	-11
Grandes Bergeronnes	48.25	-69.52	109	114	-5
Ste-Rose-du-Nord	48.40	-70.53	108	118	-10
Lac Humqui	48.28	-67.57	114	113	1
Rimouski	48.45	-68.52	104	108	-4
Lac Bouchette	48.22	-72.17	112	117	-5
Lac Ste-Croix	48.42	-71.75	110	117	-7
St-Ambroise	48.57	-71.33	117	113	4
St-Prime	48.62	-72.42	110	119	-9
Mont Brun	48.42	-78.73	111	109	2
Lac Berry	48.80	-78.28	126	109	17
Kuujjuarapik	55.28	-77.75	146	(172)	-
Cartwright	53.71	-57.03	145	135	10
Goose	53.32	-60.42	136	136	0
Nain	56.55	-61.68	152	155	-3
Wabush Lake	52.93	-66.87	151	149	2
Différence moyenne absolue et (relative):		6.5		(0.00)	

La validation de ce type d'approche est difficile non seulement à cause de la différence du type de données utilisés (ponctuelle vs surface de 625 km²) mais aussi de par les différentes définitions que l'on peut donner à la date de fin de neige (selon qu'il y a une petite rechute de neige après la fonte partielle ou totale du couvert, par exemple). Dans notre cas, nous avons considéré la première date de disparition du couvert nival. Notre analyse de la méthode proposée montre que sa performance dépend des conditions qui prévalent lors de la fonte de la neige. En effet, lorsque que la neige est très mouillée, l'émissivité du couvert se rapproche de celle de la surface (très humide) sans neige. Il est alors difficile de distinguer précisément la date de disparition de la couverture de neige. Dans les régions nordiques, où la neige disparaît généralement plus rapidement, l'algorithme est plus précis. Ce problème qui résulte de la physique du phénomène nous a amené à considérer l'analyse de la neige humide à partir des données micro-onde active (bande Ku sur QuickScat) qui permet de caractériser avec précision (à un jour près en moyenne), la date du début de la fonte de la neige (Figure 4). La combinaison des deux types de données permet de définir avec plus de précision la période de fonte de la neige printanière.

2.5 Algorithme de fusion AVHRR-SSM/I

2.5.1 Définition et étalonnage de l'algorithme

Afin de pallier aux inconvénients liés à chaque type de données : présence de nuages dans un cas et résolution spatiale insuffisante dans l'autre, il est possible de développer une procédure de fusion de la cartographie de la neige obtenue à l'aide des données optiques de AVHRR et celles obtenues à l'aide du capteur de micro-ondes passives SSM/I. Cette procédure permettra ainsi d'allier la haute résolution spatiale du capteur AVHRR à la capacité de SSM/I de pénétrer les nuages.

Romanov *et al.* (2000) ont développé un système automatique de cartographie de la neige à une résolution spatiale de 5 km utilisant les observations du visible et de l'infrarouge du capteur GOES (un satellite géostationnaire) et des données micro-ondes de SSM/I. Ils ont proposé une méthode de fusion de la cartographie de la neige par GOES et par SSM/I. Les auteurs ont démontré que la technique multi-capteurs semble aussi précise que les

produits IMS (Ice Mapping System) sinon meilleure surtout au niveau de la consistance de la série temporelle. Ce qui a été confirmé par Simic *et al.* (2004). Romanov *et al.* (2000) avancent aussi que l'application de cette méthodologie aux données AVHRR serait une amélioration à leur technique car les conditions d'observation de AVHRR sont meilleures que GOES (meilleure résolution spatiale, plus faible angle de visée, etc.). Tait *et al.* (2001) ont testé un prototype d'un système de détection de la couverture nivale en combinant les données optiques du capteur MODIS avec les données de SSM/I. Ils ont démontré l'utilité des techniques multi-capteurs pour l'amélioration de la détection de la neige.

La méthode proposée se base sur la fusion des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/I. La complémentarité des informations de ces deux types de données permettra une meilleure cartographie de la dynamique saisonnière de la neige. En effet, la couverture de neige journalière réalisée à partir des données AVHRR+SSM/I permettra de définir avec précision la date du début de l'enneigement, et la dynamique spatiale de la fonte au niveau du bassin versant. En somme, la méthodologie s'appuie sur nos réalisations dans l'estimation de l'étendue de la neige (§2.3 et §2.4) et sur les travaux réalisés par Romanov *et al.* (2000) et le Centre canadien de télédétection (Simic *et al.*, 2004).

Ainsi, vu la meilleure résolution spatiale du capteur AVHRR et la tendance de l'algorithme de SSM/I à surestimer la présence de la neige, il a été décidé, dans le cas d'absence de nuages, de se fier aux résultats produits par l'algorithme AVHRR et ceci même s'il y aurait divergence entre les deux types de données. Si le pixel a été classé comme nuages avec les données AVHRR, il reçoit automatiquement l'étiquette établie par la classification basée sur les données SSM/I. En revanche, étant conscients des limites des données SSM/I, dans la version finale de l'algorithme, nous introduirons des critères de décision supplémentaires. Ainsi, avant d'attribuer au pixel l'étiquette établie par les données SSM/I, les résultats de classification de ce pixel par l'algorithme de fusion à l'intérieur d'une fenêtre temporelle de ± 3 jours seront examinés afin de confirmer ou infirmer la présence éventuelle de neige.

2.5.2 Validation temporelle et spatiale des cartes fusionnées AVHRR-SSM/I

Étant donné qu'à la date de rédaction du présent rapport, les analyses sont toujours en cours, les résultats préliminaires présentés dans cette section le sont qu'à titre indicatif.

La Figure 5 présente les résultats de cartographie de la neige à l'aide des trois algorithmes et ce, pour deux dates différentes. La combinaison des résultats de cartographie des deux capteurs a très bien réussi à saisir la répartition spatiale du couvert nival. Ainsi, la ligne de front de neige est très bien définie surtout dans le cas où l'information provient des données AVHRR (meilleure résolution spatiale). En présence de nuages, les données SSM/I ont permis de combler l'absence d'information provenant de la surface. Mais, étant donné que l'algorithme SSM/I ne fonctionne pas au-dessus des pixels d'eau, il ne produit pas de résultats pour les pixels correspondant à la frange côtière et aux grandes étendues d'eau. Pour ces pixels d'eau, la cartographie provient de l'algorithme AVHRR malgré que dans certains cas les pixels AVHRR soient couverts de nuages. Il est à noter que dans ce cas, l'algorithme SSM/I surestime la présence de la neige par rapport à l'algorithme AVHRR. Selon les résultats du 06 mai 1999, le front de neige tel que produit par l'algorithme SSM/I est plus au sud par rapport à celui produit par l'algorithme AVHRR (Figure 5).

Tableau 8 : Résultats de la classification à l'aide de l'algorithme de fusion AVHRR-SSM/I (1987, 1992 et 1999) comparés aux observations de la neige au niveau des stations météorologiques de validation

			Classification				
		neige	non-neige	nuages	Total		
Observations	neige	349	69		418		
	non-neige	96	688		784		
	nuages			0			
	Total	445	757		1202		

	Succès	Omission	Commission
neige	83%	17%	22%
non-neige	88%	12%	9%

Taux de succès global	86%
Карра	0.70

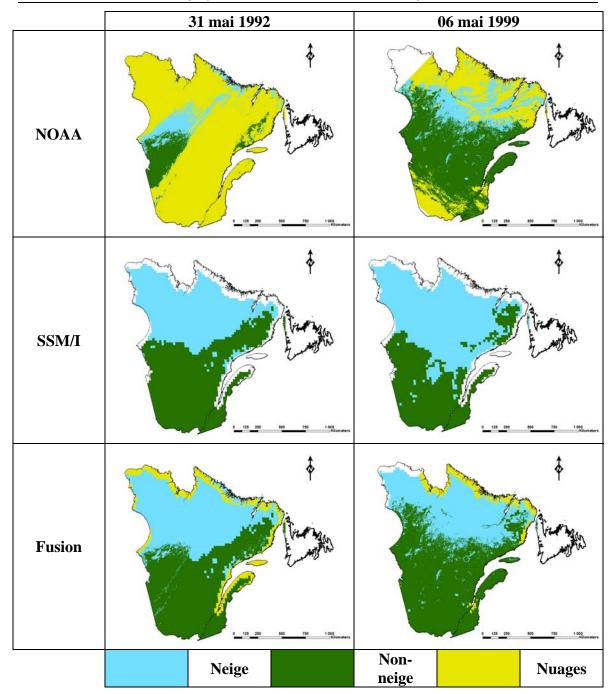


Figure 5 : Cartographie de la neige à l'aide de l'algorithme AVHRR, SSM/I et de fusion

Les résultats de cartographie du couvert nival à l'aide de l'algorithme de fusion pour les périodes printanières 1987, 1992 et 1999 ont été comparés aux observations de la neige au sol selon la procédure décrite plus haut (Tableau 8). Ainsi, l'algorithme identifie la présence ou non de la neige avec un taux de succès de 83% et 88%, respectivement. Le

taux de succès global et le cœfficient Kappa ont été respectivement, 86% et 0,70. Ceci représente en soit un bon résultat. Bien que les résultats pour la classe neige soient comparables, les performances globales de l'algorithme de fusion semblent être moins bonnes que celles de l'algorithme AVHRR (Tableau 4). Ceci serait attribuable à la permissivité présumée de l'algorithme SSM/I vis-à-vis de la classe neige qui se traduit par une erreur de commission sur la classe neige ainsi qu'une erreur d'omission sur la classe non-neige plus importante.

En plus de la validation temporelle locale, les résultats de cartographie de la neige ont été également validés spatialement à l'aide de l'imagerie à haute résolution Landsat-TM (§2.2). Les traitements étant en cours, nous ne présentons que les résultats de validation de l'image Landsat-TM acquise sur la région de l'Abitibi le 4 avril 1999, dans le secteur sud-ouest du territoire à l'étude (Figure 6). Il s'agit d'une région dominée par la forêt mixte (Figure 2). Selon l'image TM, le secteur est couvert au deux tiers de neige, surtout dans sa partie nord (Figure 6b et c). Quant à la carte de neige produite par l'algorithme AVHRR, la répartition spatiale de la neige y est comparable à celle de l'image TM (Figure 6d). Cependant, selon l'algorithme SSM/I, le secteur est couvert de neige en totalité (Figure 6e). Par conséquent, vu la présence de nuages dans la partie sud-ouest de la scène AVHRR (celle-ci a été acquise 2 heures environ plus tard que l'image TM, ce qui explique l'absence de nuages dans la scène TM), les résultats de la cartographie pour cette partie de l'image proviennent en exclusivité de l'algorithme SSM/I (Figure 6f). Ceci se traduit par une surestimation de la présence de la neige particulièrement dans cette partie de l'image. L'analyse statistique de ces résultats confirme ce constat (Figure 7). En effet, selon la cartographie produite par l'algorithme de fusion, même les pixels de 1 km présentant une couverture de neige inférieure à 5% (selon l'imagerie TM) ont été majoritairement identifiés (plus de 70%) comme appartenant à la classe neige (Figure 7a). En revanche, pour l'algorithme AVHRR, les pixels de 1 km présentant un couvert nival inférieur à 55% ont été classés majoritairement dans la catégorie non-neige (Figure 7a). Ceci signifie par ailleurs que la sensibilité de l'algorithme AVHRR à la présence de la neige dans le pixel se situe aux alentours d'une couverture de neige d'environ 50%. Il est à noter également qu'il s'agit de résultats préliminaires qui ne seront confirmés que lorsque les résultats de la fusion seront confrontées aux cinq autres cartes dérivées des images Landsat-TM (Dever, 2006).

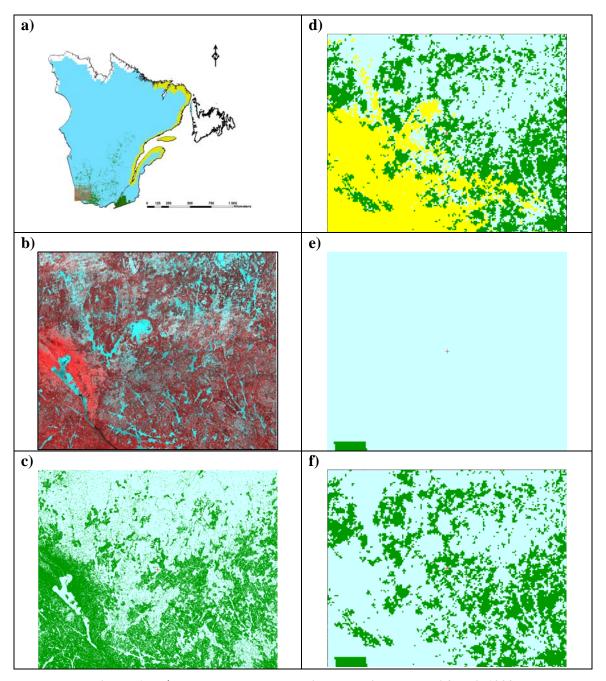


Figure 6 : Résultats de la cartographie de la neige pour le 04 avril 1999

a) carte produite à l'aide l'algorithme de fusion (la trace de l'image TM y est présentée); b) image TM de validation en pseudo couleur (TM5-TM4-TM3; la neige y est apparaît sous une teinte bleuâtre); c) carte de neige produite par l'algorithme Dever (2006) sur l'image TM; d) carte produite à l'aide l'algorithme AVHRR; e) carte produite à l'aide l'algorithme SSM/I; f) carte produite à l'aide l'algorithme de Fusion

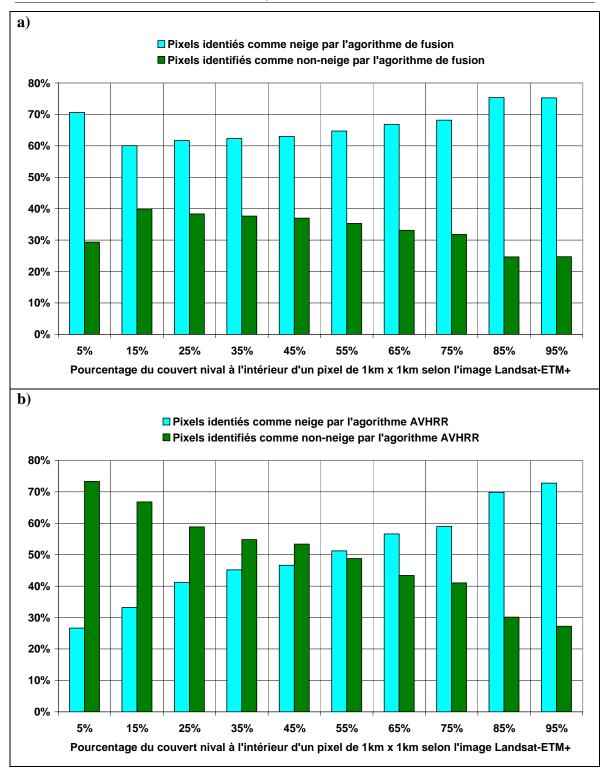


Figure 7 : Comparaison entre les résultats de cartographie de la neige en Abitibi à l'aide de l'imagerie Landsat-TM et a) l'algorithme de fusion; b) l'algorithme AVHRR

L'objectif ultime de l'objectif I est de produire des données de validation pour les sorties du MRCC concernant la date de la fin de la fonte printanière. La Figure 8 présente les résultats du MRCC pour ce paramètre pour la période de simulation de 1979-1999. Cette date correspond à une valeur de l'équivalent en eau de la neige sur le bassin versant de 10 mm. Afin de valider les résultats de simulation du MRCC nous avons compilé les résultats de cartographie obtenus à l'aide de l'algorithme de fusion sur une douzaine de bassins versants parmi la vingtaine de bassins retenus pour la validation (Figure 9).

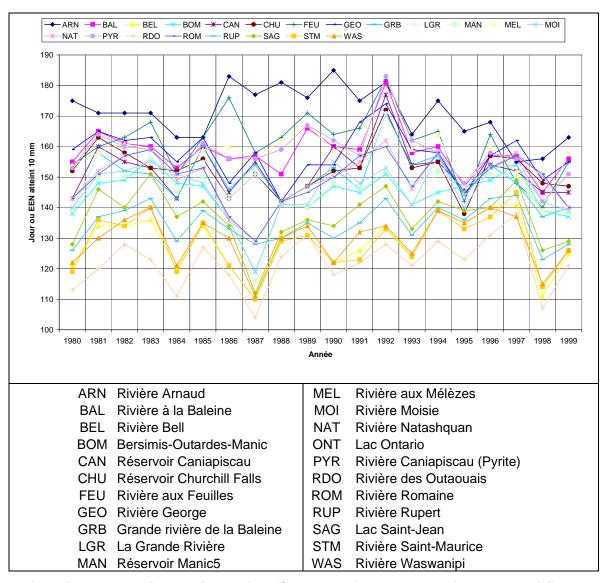


Figure 8 : Date de la fin de la fonte printanière par bassin versant produite par le MRCC pour la période 1980-1999

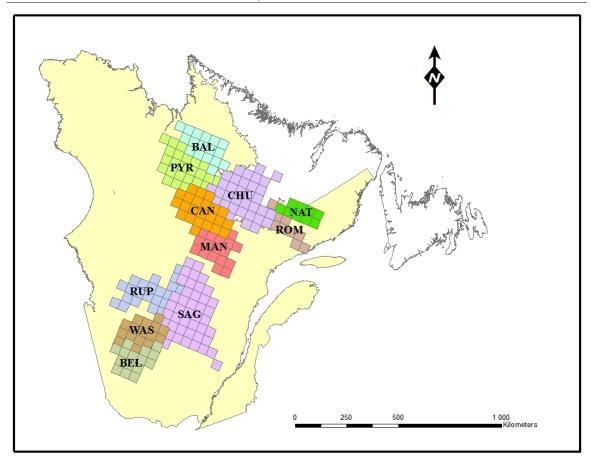


Figure 9 : Les bassins versants étudiés (le nom complet est donné dans la Figure 8). Les bassins ont été découpés sur la maille de calcul du MRCC

Nous présentons ici, les résultats de compilation pour la fonte printanière de 1992 et de 1999 (Figure 10). Les résultats pour toute la période à l'étude (1987-1999) seront présentés dans le rapport final. D'après la Figure 10, les dates de la fin de la fonte telles qu'estimées par le MRCC correspondent, dans plus de 80% des cas, à un pourcentage de couverture de neige inférieure à 20% de la surface du bassin. Dans 50% des cas, le pourcentage est à 10%. Dans deux cas (Manicouagan, le 31 mai 1992; Caniapiscau, le 25 mai 1999), le pourcentage du bassin versant couvert par la neige était supérieur à 30% d'après l'algorithme de fusion. L'examen des résultats de cartographie pour ces deux dates montre que les pixels de neige sur ces deux bassins proviennent exclusivement de la cartographie à l'aide de l'algorithme SSM/I qui surestime le couvert de neige.

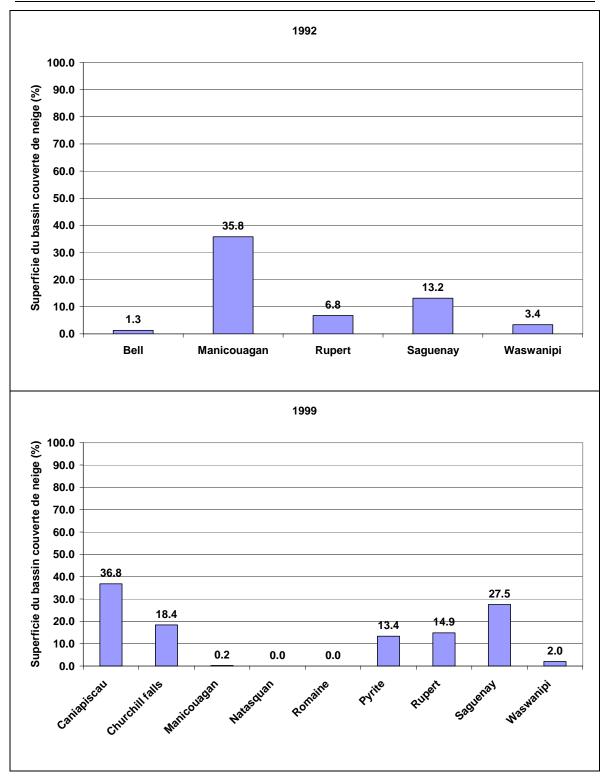


Figure 10 : Résultats de la cartographie de la neige compilés sur les bassins versants étudiés pour deux saisons printanières

2.6 Conclusions

Dans ce chapitre, il a été question du développement et de la validation d'algorithmes pour la cartographie historique du couvert nival au Québec à partir des images journalières NOAA-AVHRR et des images SSM/ I en vue de la validation des sorties du MRCC (objectif I). Ainsi, nous avons développé un algorithme de détection de la neige à l'aide des images NOAA-AVHRR qui intègre la variation temporelle des seuils de détection. Parallèlement, une nouvelle version de l'algorithme de détection de la neige à partir des micro-ondes passives (SSM/I) qui soit sensible à la présence de la neige humide, a été développée. Finalement, nous avons développé un algorithme de fusion qui combine les résultats de cartographie de la neige produite par les deux premiers algorithmes. Par la suite, les résultats des différents algorithmes ont été validés à l'aide des données au sol (stations météorologiques) et de l'imagerie Landsat-TM (haute résolution spatiale).

La période visée par l'étude couvre les 13 années : de 1987 à 1999. Il a été convenu, en commun accord avec l'équipe d'OURANOS, de concentrer les efforts de cartographie de la neige sur la période la plus critique à savoir la fonte printanière (entre le 1^{ier} avril et le 31 mai de chaque année). D'après les tests de validation effectués pour les saisons : 1987, 1992 et 1999, l'algorithme AVHRR a correctement identifié les conditions de surface (neige, non-neige) dans le voisinage des stations météorologiques de validation dans 91 % des cas. En revanche, quoique la neige ait été classée avec un taux dépassant les 84%, elle a été plus affectée par l'erreur d'omission : près 16% des pixels ont été classés dans la classe non-neige qui a été correctement identifiée dans 93% des cas.

L'algorithme SSM/I permet de détecter la date de disparition de la neige avec une erreur absolue de l'ordre de 6 à 10 jours, avec des variations relatives pouvant atteindre +20 à -20 jours. Il apparaît que les conditions de disparition de la neige (fonte lente rendant le couvert de neige très humide) augmentent l'erreur d'estimation de la date de disparition de la neige.

Par ailleurs, la combinaison des résultats des cartographies AVHRR et SSM/I permet de bien saisir la répartition spatiale du couvert nival et de suivre son évolution dans le temps. La comparaison des résultats de l'algorithme de fusion, pour les saisons : 1987, 1992 et

1999, avec les observations au sol de l'occurrence de la neige a montré que celui-ci peut détecter l'état de la surface (neige, non-neige) avec un taux de succès global de 86%. L'algorithme identifie la présence ou non de la neige avec un taux de succès de 83% et 88%, respectivement. La comparaison avec la cartographie à haute résolution (imagerie Landsat-TM) a cependant montré que l'algorithme surestime la présence de la neige en Abitibi (région dominée par la forêt mixte). La surestimation est vraisemblablement liée aux données SSM/I. Toutefois, il ne s'agit là que de résultats préliminaires qui doivent être validés sur le reste du territoire.

Les premiers résultats de compilation des données de cartographie de la neige sur une sélection de bassins versants, découpés sur la maille de calcul du MRCC, ont montré que dans plus de 80% des cas, la date de la fin de la fonte printanière estimée par le MRCC correspondent à des conditions où moins de 20% du bassin est couvert de neige.

3. Cartographie de l'équivalent en eau de la neige à partir d'images AMSR-E

3.1 Introduction

Cette seconde composante du projet se concentre sur l'estimation de l'équivalent en eau (EEN) de la neige à partir des micro-ondes passives. Elle évalue dans un premier temps, les produits globaux d'EEN livrés par le NSIDC. Ces produits ont été développés à partir de l'algorithme de Chang *et al.* (1987). Par la suite, on explore le développement d'un algorithme basé sur l'exploitation des données du capteur AMSR-E et adapté au Québec. Cette analyse est menée sur deux fronts : i) à partir de méthodes statistiques de régression multiple et ii) à partir de réseaux de neurones.

3.2 Validation des produits d'EEN fournis par le NSIDC

3.2.1 Données

La zone entourant les sites de mesures terrains dans la province de Québec est délimitée au sud par la latitude 45.1°N, au nord par 55.2°N à l'est par 61.5°O et à l'ouest par 79.3°O. Nous considérons dans cette étude la classification de neige proposée par Sturm (1995). Ainsi notre territoire d'étude est divisé en deux parties. La classe de neige Taïga au nord qui est un mélange de forêt boréale et de taïga et la classe de neige Maritime au sud (forêt boréale, forêt mixte, zone maritime atlantique). La Figure 11 montre la couverture du sol de la province et l'emplacement des différentes stations de mesure.

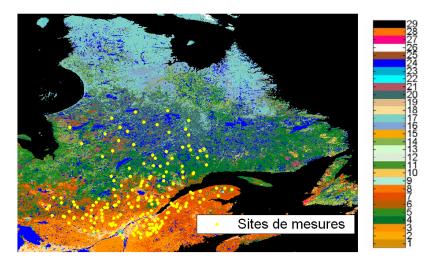


Figure 11 : Couverture du sol (extrait de Latifovic, 2002). L'emplacement des stations de mesure de la neige est également indiqué.

Les mesures de terrain utilisées s'échelonnent de mi-janvier à mi-mai. Ce sont des données d'Hydro-Québec auxquelles nous avons eu accès dans le cadre du projet. Le Tableau 9 montre les statistiques moyennes pour les deux grandes zones considérées. C'est dans la zone de Taïga que se trouvent les plus grandes quantités de neige. Celles-ci sont plus importantes en 2004 comparées à 2003. Les mesures de la taille des grains de neige ne sont pas disponibles dans ces données. Une campagne de terrain menée par A. Royer et son équipe en mars 2003 le long de la route entre Matagami, Radisson et LG4 donne une taille des grains moyenne d'environ 1 mm. La proportion des couvertures de sol dans l'ensemble des pixels EASE-Grid à l'étude ainsi que la proportion répartie selon les classes de neige se trouvent dans le Tableau 10. Les classes de couverture du sol ainsi que la couverture de la canopée des arbres correspondante aux pixels où sont situées les stations de mesures sont tirées du Landcover of North America 2000 (Latifovic *et al.*, 2002).

Tableau 9 : Statistiques moyennes des caractéristiques du couvert nival (n = nombre d'échantillons)

	n	EEN (mm)	Hauteur de neige (cm)	Densité (g / cm ³)
Ensemble des mesures	1406	170	66	27
2003	692	143	59	26
2004	714	196	72	28
Maritime	958	150	57	27
2003	495	134	54	26
2004	463	167	60	29
Taïga	350	222	88	26
2003	149	176	75	25
2004	201	256	98	26

Tableau 10: Proportion de couverture de sol et fraction de la canopée dans les pixels des classes

Classe	Légende	Couverture de	I	Proportion (%)			
		la canopée (%)	Total	Maritime	Taïga		
3	Forêt de feuillues, canopée fermée	100 - 60	18.7	25.4	0.8		
4	Forêt de conifères, canopée fermée	100 - 60	10.3	6.5	21.2		
5	Forêt de conifères, canopée ouverte	70 - 10	3.5	1.6	9.1		
6	Forêt de conifères et forêt mixte, canopée fermée	100 - 60	10.1	11.5	5.0		
7	Forêt mixte, canopée fermée	100 - 60	23.2	30.0	4.4		
8	Forêt mixte, canopée ouverte	70 - 10	8.1	11.6	0.0		
10	Arbustes feuillus, canopée ouverte	70 - 10	0.4	0.2	0.5		
11	Arbustes conifères, canopée ouverte	70 - 10	2.1	1.3	3.7		
14	Prairie avec arbres	20 - 1	2.3	0.7	6.9		
15	Prairie avec arbuste clairsemé		0.0	0.0	0.0		
16	Prairie polaire	20 - 1	0.1	0.1	0.4		
17	Prairie polaire avec arbuste nain	20 - 1	0.4	0.0	1.2		
18	Champ agricole	-	3.5	5.1	0.0		
19	Champ agricole avec boisés	20 - 1	0.5	0.7	0.0		
20	Forêt de conifères avec lichen, canopée ouverte	70 - 10	8.4	0.5	28.1		
21	Perturbations	20 - 1	0.7	0.1	2.3		
22	Zones urbaines et bâties	-	0.1	0.2	0.0		
23	Roches consolidés		0.0	0.0	0.0		
24	Eau	-	6.5	3.5	14.6		
25	Zone de brûlis	20 - 1	0.4	0.0	1.7		
27	Tourbière	40 - 20	0.2	0.3	0.1		
29	Océans		0.4	0.6	0.0		

Pour mener l'étude, nous avons récupéré les images de températures de brillance du capteur AMSR-E, produites depuis juin 2002. Les versions de l'algorithme pour produire ces images évoluent constamment. Les nouvelles versions corrigent certaines erreurs

d'étalonnage, de géo-localisation et de métadonnées. L'erreur radiométrique du capteur est d'environ 0,67 K et elle varie légèrement en fonction de la température.

Nous avons également récupéré le produit global de cartographie de l'équivalent en eau de la neige utilisant les données AMSR-E, disponible sur le site du NSIDC. Ce produit a une résolution spatiale de 25 km. L'EEN est généré en utilisant l'algorithme de Chang *et al.* (1987) et en intégrant différents tests afin d'éliminer les cas indésirables, comme par exemple la présence de glace, la neige mouillée, les données manquantes, etc... Nous avons considéré les trois versions du produit : journalière (une estimation par jour), aux cinq jours (valeur maximale de l'EEN pour une période 5 jours) et le produit mensuel qui représente la moyenne mensuelle des valeurs d'EEN estimées.

3.2.2 Méthodologie

La méthodologie de l'évaluation des produits EEN du NSIDC est résumée dans l'organigramme ci-dessous (Figure 12). Nous avons analysé les performances de l'algorithme au niveau de la détection de la présence de la neige dans un premier temps. Par la suite les estimations de l'EEN ont été comparées aux mesures de terrain disponibles dans le cadre du projet (§3.2.1), en tenant compte de la couverture du sol dans chacun des pixels considérés.

3.2.3 Résultats

Les résultats obtenus démontrent que 24% des observations terrain avec présence de neige n'ont pas été classifiées comme tel par la méthode du NSIDC (erreur d'omission). D'un autre côté, 70 % des observations classifiées comme sans neige contenait en réalité de la neige (erreur de commission). Les données aux cinq jours présentent les meilleurs résultats pour la détection de la neige. La précision générale de la classification de l'algorithme du NSIDC est de 78 %. Les résultats sont résumés dans le Tableau 11.

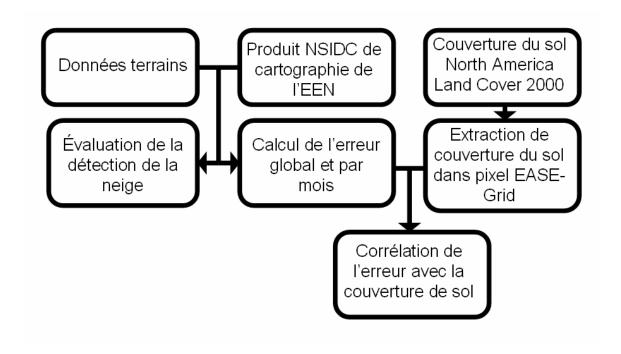


Figure 12 : Organigramme méthodologique pour l'évaluation des produits du NSIDC

Tableau 11 : Classification de la neige de l'algorithme du NSIDC

	Présence de neige	Absence de neige	Total	Erreur de commission (%)
Détecte la neige	632	0	632	0.0
Ne détecte pas de neige	200	86	286	70.0
Total	832	86	918	
Erreur d'omission (%)	24.0	0.0		

Nous avons effectué plusieurs tests pour mieux comprendre la cause des erreurs de classification. Nos analyses montrent que c'est le test de neige mouillée qui est la cause principale de la mauvaise classification. L'erreur de classification augmente au cours de l'hiver (Figure 13), fort probablement à cause d'une présence accrue de conditions de neige mouillée vers les mois d'avril et mai. Dans environ 75 % des cas où l'algorithme prédit avec succès l'absence de neige, l'EEN était inférieure à un et le test de neige mouillée était positif. Il existe donc une confusion entre ces deux classes et une meilleure classification de la neige est donc requise. Ce qui rejoint les préoccupations du premier volet du projet.

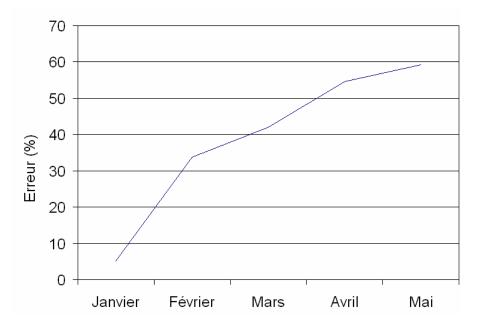


Figure 13 : Erreur de classification à travers l'hiver

Pour l'évaluation des valeurs estimées de l'EEN, nous avons exclu les valeurs nulles, ainsi que les pixels ayant un code correspondant à autre chose que la neige au sol. L'erreur normalisée a été calculée pour les trois types de produits NSIDC : journalier, aux cinq jours et mensuel (Figure 14). Pour mieux comprendre l'ampleur de la sous-estimation par l'algorithme de NSIDC, il peut être utile de comparer la moyenne de L'EEN sur le terrain avec celle des différents produits NSIDC (Figure 15).

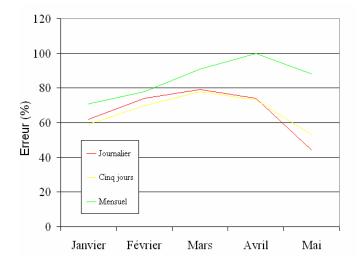


Figure 14 : Erreur normalisée de l'algorithme du NSIDC

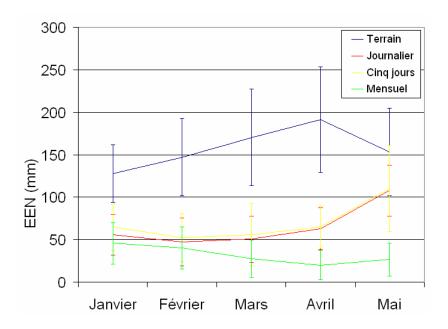
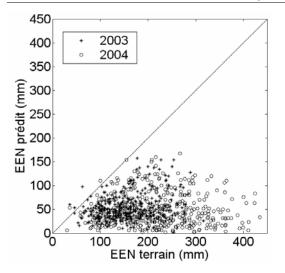


Figure 15 : Moyenne de l'EEN sur le terrain

L'erreur aux cinq jours est légèrement plus basse que l'erreur journalière. Le produit mensuel suit la même tendance générale. Il faut remarquer que l'EEN estimé par l'algorithme du NSIDC n'augmente pas en même temps que l'EEN sur le terrain. En fait, au début et à la fin de l'hiver, la tendance entre les deux est opposée. Le produit aux cinq jours semble représenter le meilleur compromis pour l'erreur et le nombre d'observations, étant donné que la couverture satellitaire est presque complète en cinq jours. Pour le produit aux cinq jours, l'EQM est de 123,5 mm et le biais est de -99,3 mm. Ce biais nous informe qu'il y a une forte sous-estimation de l'EEN. Cela est reflété dans la Figure 16 qui compare l'EEN prédit par l'algorithme du NSIDC avec les valeurs sur le terrain. Avec une moyenne pour l'hiver 2002-2003 de 162,3 mm, l'erreur normalisée est de 76 %. L'erreur est deux fois supérieure à l'erreur qui serait obtenue en utilisant la moyenne de l'EEN sur le terrain au lieu des valeurs estimées par l'algorithme du NSIDC, soit 38 %. On note dans le haut de la figure une valeur prédite de 480 mm et qui correspond au maximum supérieur pouvant être prédite par l'algorithme.



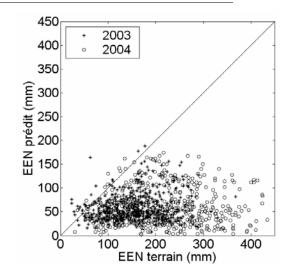


Figure 16 : EEN estimé NSIDC versus EEN sur le terrain (produit journalier à gauche, produit aux cinq jours à droite)

À la lumière des résultats obtenus, force est de constater que les produits NSDIC sont entachés d'erreurs importantes. Il y a donc lieu d'explorer d'autres alternatives.

3.3 Algorithme d'EEN basé sur AMSR-E et adapté au Québec

3.3.1 Données

Les données utilisées sont les températures de brillance AMSR-E, les données de neige mesurées sur le terrain, les données sur la couverture du sol. Toutes ces données ont déjà été décrites dans la section 3.2.1

3.3.2 Méthodologie

Deux approches sont explorées ici. La première approche est statistique. Elle est basée sur les régressions. La seconde utilise les réseaux de neurones.

3.3.2.1 Approche basée sur les régressions

La Figure 17 résume la démarche méthodologique utilisée.

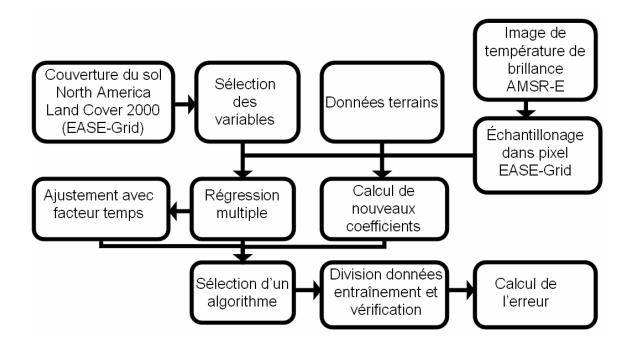


Figure 17: Organigramme méthodologique utilisé pour le développement d'algorithmes statistiques

Le premier modèle sélectionné est celui du NSIDC mais les coefficients de la régression linéaire ont été recalculés. Par la suite, d'autres variables sont envisagés pour remplacer celui du modèle NSIDC, faisant place à un modèle de régression multiple auquel on ajoute une constante qui devrait compenser pour le biais. La sélection de modèles alternatifs se fait en calculant un modèle de régression pour toutes les combinaisons possibles des variables considérées. L'EEN est la variable dépendante et il est corrigé pour l'effet de la forêt en la multipliant par un facteur (1 - aff ff). Pour chaque modèle la valeur du coefficient aff est variée de 0 à 0,9 par bond de 0,1 avec ff la fraction de forêt. Les statistiques d'erreurs sont ensuite calculées après avoir retransformé l'EEN corrigé en EEN sur le terrain. Pour s'assurer qu'il n'y ait pas de forte colinéarité entre les variables du modèle, l'indice de condition doit être plus petit ou égal à cinq. Le modèle avec le coefficient de détermination maximum est retenu pour les différents nombres de variables incluant le modèle avec seulement une constante ainsi que la fraction de forêt associée. Comme l'ajout d'une variable augmente le coefficient de corrélation, mis à part l'effet de la compensation pour l'effet de la forêt, la sélection du nombre de variables retenu est en fonction des critères suivants : l'augmentation du coefficient de détermination avec l'ajout d'une variable, le coefficient de détermination maximum pouvant être obtenu en ajoutant la totalité des variables. Deux autres modèles sont sélectionnés, un pour la classe de neige Maritime et un pour la classe de neige Taïga.

Les résidus des modèles sont ensuite tracés en fonction de l'EEN sur le terrain et en fonction du temps. La corrélation des résidus avec d'autres variables non incluses dans le modèle est également analysée, soit la latitude, la longitude, l'altitude, le jour julien, la densité, la hauteur de neige et l'équivalent en eau de la neige sur le terrain. Finalement, les modèles sont validés avec des données indépendantes et les statistiques d'erreurs sont calculées.

Nous avons également introduit un facteur d'ajustement pour tenir compte de la variation du couvert nival au cours de la saison. Ainsi, l'erreur des modèles est calculée par mois et par année pour l'ensemble des pixels ainsi que pour les classes de neige Taïga et Maritime. Les coefficients des modèles sont ajustés à chaque mois. L'erreur de ces nouveaux modèles est alors calculée sur une base mensuelle. Comme dans les autres cas, les modèles sont ensuite validés avec les données indépendantes.

3.3.2.2 Approche basée sur les réseaux de neurones

L'analyse statistique exhaustive présentée en partie ci-dessus montre que les modèles de régression sont très limités dans l'estimation de l'EEN dans les conditions du Québec. Même avec des données plus performantes et une nouvelle fréquence, comme 11 GHz, les résultats obtenus apparaissent trop entachés d'erreurs importantes. La régression linéaire, même multiple, n'arrive pas à prendre en compte toutes les interactions complexes entre les micro-ondes et le couvert de neige. D'autres méthodologies plus élaborées doivent être investiguées, comme par exemple les approches physiques ou l'utilisation d'un réseau de neurones. C'est cette dernière voie qui est privilégiée dans ce projet.

Nous considérons un réseau à rétro-propagation. Les données déjà décrites seront utilisées également dans le réseau de neurones. Nous considérons les deux classes Maritime et Taïga. Nous utilisons l'ensemble des fréquences du capteur AMSR-E. La Figure 18 schématise l'approche utilisée. L'analyse est faite étape par étape en examinant

la contribution individuelle de chaque fréquence et polarisation dans l'estimation de l'EEN. Les fréquences et polarisations sont ensuite combinées par étape jusqu'à la combinaison optimale. Les données sont divisées en deux parties comme dans l'analyse basée sur les régressions. La première partie des données est utilisée pour entraîner le réseau. La seconde sert à le tester. Jusqu'à présent nous avons généré beaucoup de résultats intermédiaires qui sont entrain d'être étudiées.

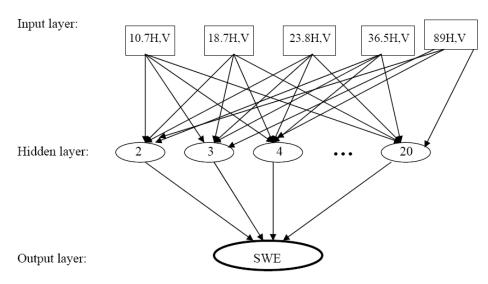


Figure 18 : Schéma général du réseau de neurones considérés.

3.3.3 Résultats préliminaires

3.3.3.1 Approche basée sur les régressions

Plusieurs combinaisons ont été étudiées en utilisant la méthode de la régression pas à pas. Malgré la multitude de tests réalisés, les résultats obtenus, quoique très souvent significatifs du point de vue statistique, ne sont pas pratiquement mieux que les estimations faites à partir de l'algorithme du NSIDC. Nous présentons quelques résultats pour illustrer. Le Tableau 12 montre les meilleurs résultats obtenus sur l'ensemble du territoire, sans distinction basée sur les classes de neige. Les deux combinaisons (19H-37H) et (11V-37V) ressortent comme étant les meilleures. Ces résultats sont statistiquement significatifs, mais les coefficients de détermination sont faibles et l'erreur moyenne atteint environ 50%.

Tableau 12 : Performance des différents modèles.

	Condition	ff	R	R^2	Seuil	EQM	EQM
	Index				significatif	standardisé	(mm)
Sans variable	1	0.1	0.117	0.014	0.002	0.49	84
Tb(19H-37H)	3	0.0	0.205	0.042	0.000	0.48	82
2003	3	0.0	0.335	0.112	0.000	0.43	61
2004	2	0.0	0.145	0.021	0.006	0.45	89
Tb(11V-37V)	2	0.1	0.326	0.106	0.000	0.46	79
2003	2	0.1	0.377	0.142	0.000	0.42	60
2004	2	0.2	0.301	0.091	0.000	0.44	86
Avec toutes les variables	ı	0.3	0.409	0.167	0.000	0.45	76

Le Tableau 13 illustre la validation des modèles de régression à partir des données indépendantes. Rappelons que dans chaque cas le nombre d'échantillons a été divisé en deux parties, la première pour le développement et la seconde pour la validation (voir Tableau 9 pour le nombre d'échantillons).

Tableau 13 : Validation des modèles

	R	R^2	Seuil significatif	EQM	EQM	Biais
				standardisé	(mm)	(mm)
Tb(19H-37H)	0.150	0.023	0.000	0.48	82	-1
2003	0.247	0.061	0.000	0.44	63	0
2004	0.099	0.010	0.062	0.46	90	-2
Tb(11V-37V)	0.251	0.063	0.000	0.47	80	-1
2003	0.274	0.075	0.000	0.44	63	1
2004	0.236	0.056	0.000	0.45	88	-2

L'introduction d'un ajustement par mois n'a pas apporté d'améliorations très significatives (Figure 19). Les mois de début (janvier) et de fin de l'hiver (mai) manquent souvent de données, ce qui limite la validation. De la même manière, nous avons examiné les résultats en considérant les deux subdivisions en fonction de la classe de neige.

Pour la classe Maritime, on obtient un coefficient de détermination maximal de 0,15 dans toutes les combinaisons considérées basées sur l'indice 11V-37V. Ce coefficient monte à

0,31 lorsqu'on introduit l'ajustement mensuel. Les résultats obtenus avec 19H-37H sont légèrement inférieurs, mais restent dans le même ordre de grandeur.

Pour la classe Taïga, le coefficient de détermination maximal, sans ajustement du temps est de 0,27 pour l'indice 11V-37V. Il monte à 0,54 avec l'ajustement mensuel des coefficients. C'est une amélioration importante, mais l'erreur d'estimation de l'EEN demeure encore élevée. Comme précédemment les résultats avec 19H-37H sont dans les mêmes ordres de grandeur.

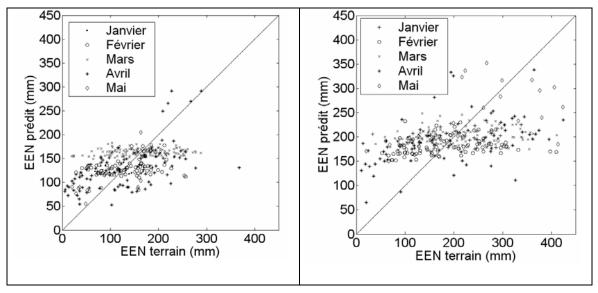


Figure 19 : Exemple d'évaluation du modèle basé sur 11V-37V avec un ajustement mensuel des coefficients. 2003 à gauche et 2004 à droite.

3.3.3.2 Approche basée sur les réseaux de neurones

La Figure 20 montre un exemple de performance du réseau au niveau de l'apprentissage.

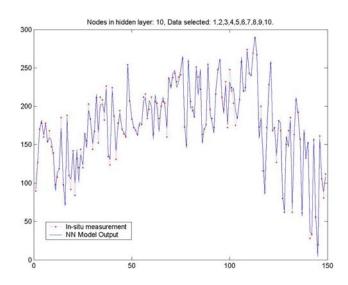


Figure 20 : Entraînement du réseau de neurones avec les données des 5 canaux de AMSR-E (10.7, 18.7, 23.8, 36.5 et 89 GHz) en 2003.

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'analyse des erreurs au niveau de l'apprentissage, en fonction des paramètres du réseau (Tableau 14, Tableau 15). Cette erreur peut descendre jusqu'en bas de 10%, dépendant de la configuration considérée.

Tableau 14 : Apprentissage pour la zone Taïga en combinant les données de 2003 et 2004.

Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. La valeur moyenne de l'EEN est 225 mm,

350 points sont utilisés pour l'entraînement.

nodes	2	5	10	15	20
\mathbb{R}^2	0.30	0.57	0.72	0.86	0.95
RMSE (mm)	64	51	41	29	16
RMSE (%)	29	23	18	13	7

Tableau 15 : Apprentissage pour la zone Maritime en combinant les données de 2003 et 2004. Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. La valeur moyenne de l'EEN est 175 mm, 478 points sont utilisés pour l'entraînement.

nodes	2	5	10	15	20
\mathbb{R}^2	0.30	0.44	0.65	0.77	0.87
RMSE (mm)	51	45	36	29	21
RMSE (%)	29	26	21	16	12

Le réseau entraîné a été testé sur les données indépendantes. Le Tableau 16 résume les erreurs obtenues pour la zone Maritime. La comparaison de l'EEN estimé et l'EEN mesuré est illustrée par la Figure 21.

Tableau 16 : Validation du réseau sur des données indépendantes dans la zone Maritime. Les données de 2003 et 2004 sont combinées. Toutes les fréquences et polarisations sont utilisées. Le nombre d'échantillons pour le test est de 480, avec une valeur moyenne de l'EEN de 225 mm.

nodes	2	5	10	15	20
R^2	0.47	0.60	0.74	0.81	0.89
RMSE (mm)	64	56	45	39	29
RMSE (%)	28	25	20	17	13

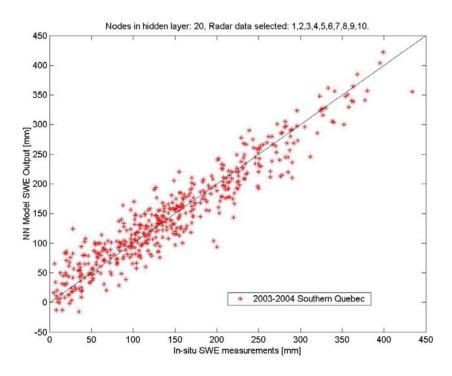


Figure 21 : Test du réseau de neurones dans la zone Maritime. Comparaison entre les valeurs prédites par le réseau et les données indépendantes n'ayant pas été utilisées dans l'apprentissage.

Pour résumer, les résultats obtenus jusqu'à présent avec les réseaux de neurones doivent être considérés comme préliminaires. Plusieurs tests et analyses sont en cours. Mais à la lumière de ce qui est déjà obtenu, cette avenue apparaît comme très prometteuse pour l'estimation de l'EEN dans les conditions hivernales complexes du Québec.

3.4 Conclusions

Ce chapitre a d'abord présenté l'évaluation des produits globaux d'EEN du NSIDC et par la suite a exploré le développement d'algorithmes adaptés au Québec pour l'estimation de l'EEN basés sur l'exploitation des données du capteur AMSR-E. Cela comprenait un premier volet consacré à l'utilisation des méthodes statistiques de régression multiple et un deuxième dédié à l'exploration du potentiel des réseaux de neurones fins.

La comparaison des résultats de l'EEN tels que produits par l'algorithme du NSIDC avec des mesures in situ de l'EEN effectuées au Québec en 2003 et 2004, a montré que ceux-ci sont entachés d'une grande incertitude. L'erreur dépasse les 50% pendant la fonte printanière (avril, mai). Par conséquent, la décision d'explorer d'autres alternatives pour l'estimation de l'EEN à partir des données AMSR-E est amplement justifiée.

En ce qui concerne la technique de régression, la variable dépendante, à savoir l'EEN mesuré in situ et corrigé pour l'effet de la forêt, a été reliée à plusieurs combinaisons de variables explicatives. Ces variables étaient les différentes fréquences du capteur AMSR-E. Cela a permis de bâtir plusieurs modèles régressifs qui ont été testés à l'aide d'un jeu indépendant de mesures de l'EEN. Leur performance a été comparée à celle obtenue avec les données NSIDC. Les résultats ne sont pas meilleurs que les estimations faites à partir de l'algorithme du NSIDC.

Pour le réseau de neurones artificiels, les données de l'ensemble des fréquences du capteur AMSR-E ont été utilisées pour l'apprentissage du système. Les résultats préliminaires calculés à l'aide d'un jeu de données indépendant ont montré que l'approche neuronale apparaît très prometteuse pour l'estimation de l'EEN dans les conditions hivernales complexes du Québec.

4. Conclusions et étapes jalons pour 2006-2007

4.1 État d'avancement des activités de recherche

Les activités de recherche qui étaient prévues dans le cadre de l'objectif I pour la 1^{ière} année du projet, ont été réalisées à 80%. Le détail des activités réalisées (8 blocs) et leur période de réalisation sont donnés au Tableau 17. Toutefois, les principales réalisations sont énumérées ci-dessous.

- Un algorithme de détection de la neige à l'aide des images NOAA-AVHRR qui intègre la variation temporelle des seuils de détection, a été développé et appliqué sur une série d'images AVHRR couvrant 13 périodes printanières (1987 à 1999). Il est à noter que l'emploi des images AVHRR en provenance de la base de données du Centre Canadien de Télédétection a constitué un grand atout pour le projet (une longue série d'images d'une qualité constante). Cependant, le traitement de cette masse supplémentaire de données a constitué une charge de travail additionnelle qui a contribué à décaler l'échéancier par rapport à ce qui a été initialement proposé lors de la définition du projet.
- Une nouvelle version de l'algorithme de détection de la neige à partir des microondes passives (SSM/I) qui utilise l'émissivité au lieu de la température de brillance.
- Une nouvelle approche de détection de la neige humide qui utilise les données microondes passives SSM/I et actives de QuickSCAT (Annexe).
- Un algorithme de fusion AVHRR/SSM/I qui combine les résultats de cartographie de la neige produite par les deux premiers algorithmes.
- La validation des résultats des différents algorithmes à l'aide des données au sol (stations météorologiques) et de l'imagerie Landsat-TM (haute résolution spatiale).

Concernant l'algorithme de fusion, la comparaison des résultats pour avec les observations au sol de l'occurrence de la neige (trois saisons) a montré que celui-ci peut détecter l'état de la surface (neige, non-neige) avec un taux de succès global de 86%. La comparaison avec la cartographie à haute résolution (Landsat) a cependant montré que l'algorithme surestime la présence de la neige en Abitibi (forêt mixte). La surestimation est vraisemblablement liée aux données SSM/I. Toutefois, il ne s'agit là que de résultats préliminaires, la validation n'ayant été faite que sur une seule des cinq images Landsat.

- La compilation des données de cartographie de la neige sur une sélection de bassins versants, découpés sur la maille de calcul du MRCC. La compilation faite pour deux années (1992, 1999) montrent que dans plus de 80% des cas, la date de la fin de la fonte printanière estimée par le MRCC correspond à des conditions de moins de 20% de couverture de neige sur le bassin.
- Un rapport de stage de fin d'études portant sur la classification des images Landsat a été réalisé (Dever, 2006).

Les activités de recherche qui étaient prévues dans le cadre de l'objectif 2, pour la 1^{ière} année du projet, ont été réalisées à 70%. Le détail des activités réalisées (6 blocs) et leur échéancier sont présentés au Tableau 19. Ces réalisations sont résumées ci-dessous :

- L'évaluation des produits EEN du NSIDC : ce travail est terminé et a mis en évidence des erreurs trop importantes dans ces données ce qui limite considérablement leur utilisation d'un point de vue pratique.
- Développement d'algorithmes statistiques : l'ensemble des traitements sont réalisés. Quelques résultats méritent encore d'être interprétés et une synthèse exhaustive sous forme d'article sera produite. Le travail montre que la fréquence 10.7 GHz de AMSR-E peut jouer un rôle important dans l'estimation de l'EEN dans les conditions du Québec. De plus, les régressions linéaires multiples ou pas ne peuvent pas modéliser adéquatement les interactions entre les micro-ondes et le couvert de neige au Québec.

Par conséquent, une estimation satisfaisante de l'EEN en utilisant ces régressions ne semble pas possible avec les données actuelles de micro-ondes passives.

- Deux mémoires de maîtrise, l'un sur l'évaluation des produits NSIDC (Comtois-Boutet, 2006) et l'autre sur les algorithmes statistiques (Turcotte, 2006) seront normalement déposés d'ici le mois de décembre 2006.
- Les recherches basées sur l'utilisation des réseaux neurones sont engagées comme alternative. Les résultats préliminaires obtenus sont très encourageants, mais méritent encore d'être analysés en profondeur.

Tableau 17 : Calendrier des activités réalisées durant la 1^{ère} année (Objectif I)

Composante	Activités	Période	
	• Réunion de tous les partenaires à l'INRS	• Novembre 05	
Bloc 1 : Pré-traitement	• Révision des procédures de prétraitement (calibration, correction atmosphérique, BRDF, etc.)	• Automne 05	
des images AVHRR	• Implantation des procédures révisées (programmation EASI)	• Automne 05	
provenant du site américain	Application à l'ensemble des images	• Automne 05	
Bloc 1.Bis: Images	Transfert et archivage de nouvelles images AVHRR journalières composites	• Jan 06	
AVHRR fournies par le CCT	Transfert et archivage de nouvelles images AVHRR simple orbite	• Jan 06	
	Réunion de tous les partenaires à Montréal	• Février 06	
Établissement des cartes de référence à partir des images TM	 Recherche et sélection d'images Landsat TM pour la validation de l'algorithme AVHRR/SSMI Identification d'un algorithme de cartographie de la neige à partir des images Landsat TM Prétraitement des images Landsat TM Application de l'algorithme Validation de l'algorithme par rapport aux 	 Fév-Mars 06 Fév-Mars 07 Mars 06 Mars-Avr 06 Avr-Mai 06 	
	observations au sol et par rapport à l'occupation du sol • Compilation des résultats sur la maille d'AVHRR	• Juin 06	
Bloc 3 Sélection des images AVHRR	• Sélection visuelle des images AVHRR qui seront utilisées pour la calibration et la validation de l'algorithme AVHRR amélioré (minimum de nuages)	• Oct-Nov 05	
	 Identification, délimitation et extraction manuelle des d'échantillons de pixels à partir des images AVHRR sélectionnées 	• Mars 06	

Tableau 18 : Calendrier des activités réalisées durant la $1^{\rm ère}$ année (Objectif I) (suite)

Composante	Activités	Période	
Bloc 4	Intégration des échantillons dans Matlab	• Mars 06	
Raffinement de	• Analyse statistique en fonction des classes et l'occupation du sol	• Mars 06	
l'algorithme AVHRR	 Raffinement de l'algorithme de classification (tenir compte du voisinage, seuils fixes ou variables en fonction du temps, l'occupation du sol et/ou des paramètres spectraux) Validation de l'algorithme (vs échantillons vs observations météo vs résultats BLOC 2) 	Mai 06Juin-juillet 06	
Bloc 5	Raffinement de l'algorithme SSM/I	• Fév- Sept 06	
	• Transfert des images SSM/I traitées par le CARTEL à l'INRS	Octobre 06	
Bloc 6	Développement de l'algorithme de fusion de AVHRR et SSM/I	• Juin-juillet06	
Algorithme de fusion	Projection des résultats de <u>l'algorithme modifié</u> <u>de SSM/I</u> à la même projection et la résolution que les images NOAA-AVHRR	Octobre 06	
	• Validation des résultats de l'algorithme de fusion au niveau local (par rapport aux observations aux stations météorologiques et les cartes TM) et au niveau des bassins versants.	Octobre 06	
Bloc 7	• Développement d'un algorithme de détection de la neige humide.	• Fév-Sept 06	
	• Rédaction d'un article (#1, Royer et al, soumis)	• Sept-Oct 06	
Bloc 8	Rédaction du rapport pour le CRSNG	• Mai 06	
	Rédaction d'un rapport d'étape	• Sept-Oct 06	

Tableau 19 : Calendrier des activités réalisées durant la 1ère année (Objectif II)

Composante	Activités	Période	
	Réunion de tous les partenaires à l'INRS	• Novembre 05	
Bloc 1:	Collecte des produits EEN du NSIDC, et des	• Automne 05	
Collecte des	données AMSR-E	• Automne 05	
données	• Récupération et analyse partielle des mesures de terrain.		
Bloc 2:	Choix de la carte de couverture des sols et	• Jan – Fév 06	
Analyse de la	extraction de l'information sur la fraction de		
couverture des	couvert.		
sols			
	Réunion de tous les partenaires à Montréal	• Février 06	
Bloc 3	Analyse des différentes versions	• Mars-Avr 06	
Évaluation des	• Évaluation de la performance de détection de la	• Av-Juin 06	
produits EEN	neige		
	• Comparaison des produits EEN aux mesures de terrain et analyse des erreurs	• Mai-Août 06	
Bloc 4	Analyse des corrélations	Avril-Mai 06	
Algorithme	Développement et tests de combinaisons diverses	• Mai – Août 06	
régression	• Évaluation des erreurs et synthèse des meilleurs	• Août – Oct 06	
multiple	algorithmes		
Bloc 5	Choix et configuration du réseau	• Mars 06	
Réseau de	Analyse de la contribution individuelle des	• Av-Juin 06	
neurones	différentes fréquences et polarisation	• Juillet-Oct 06	
	Essai d'intégration de l'ensemble des fréquences		
Bloc 6	Rédaction du rapport pour le CRSNG	• Mai 06	
• Rédaction d'un rapport d'étape		• Sept-Oct 06	

4.2 Étapes jalons pour 2006-2007 et résultats escomptés

Tableau 20 et Tableau 21 décrivent les activités qui seront réalisées au cours de la prochaine année ainsi que leur échéancier. Le Tableau 20 donnent les étapes jalons concernant la réalisation de l'objectif 1 et le Tableau 21 celles concernant l'objectif 2.

La principale étape jalon est la rencontre prévue en décembre 2006 ou janvier 2007, à Montréal, avec nos partenaires de l'IREQ et d'OURANOS afin de discuter des algorithmes retenus, des résultats préliminaires et de l'orientation des travaux. Cette rencontre sera précédée d'une réunion de travail des partenaires universitaires le 27 novembre afin de principalement discuter des modifications à apporter à l'algorithme de fusion. Il y aura au moins une autre rencontre pour présenter les résultats finaux aux partenaires en septembre 2007.

Les principaux résultats escomptés pour 2007 sont :

- La validation de l'algorithme de fusion AVHRR/SSM/I et la comparaison avec les sorties du modèle MRCC pour les 13 saisons printanières retenues.
- L'amélioration de l'algorithme de fusion AVHRR/SSM/I en lieu du développement d'un algorithme d'images composites AVHRR. En effet, l'algorithme de fusion pourra aussi intégrer une composante temporelle dans le cas de persistance de la couverture nuageuse.
- L'amélioration et la validation de l'approche des réseaux de neurones pour la cartographie de l'ÉEN à partir des données AMSR-E.

L'ensemble des résultats seront publiés sous forme d'articles (6 prévus dont un premier soumis), de deux mémoires de maîtrise (Comtois-Boutet, 2007 ; Turcotte, 2007) et d'un rapport de stage de fin d'études (Dever, 2006). Un rapport final auquel seront annexés les publications sera aussi préparé.

Tableau 20 : Étapes jalons pour l'année 2006-2007 (Objectif I)

Composante	Activités	Période
	• Réunion des partenaires universitaires à Québec	• Novembre 06
	• Réunion de tous les partenaires à Montréal	• Décembre 06
Bloc 1: Images	Application de l'algorithme à l'ensemble des images AVHRR	• Oct-Déc 06
AVHRR simples	Rédaction d'un article (2) sur les seuils de classification de l'algorithme	• Jan-Avr 07
Bloc 2	Amélioration de l'algorithme de fusion	• Jan-Mars 07
Fusion SSM/I	 Application de l'algorithme de fusion à l'ensemble des dates 	• Mars-Avr 07
AVHRR	• Compilation des résultats au niveau de la maille de calcul de MRCC	• Mai 07
	• Rédaction d'un article (3) sur l'algorithme de fusion et comparaison avec les sorties du modèle MRCC	• Juin-Juillet07
Bloc 3	Rédaction du rapport final au CRSNG et du rapport scientifique	• Été 07
	• Réunion de tous les partenaires à l'INRS Présentation des résultats finaux du projet	• Septembre 07

Tableau 21 : Étapes jalons pour l'année 2006-2007 (Objectif II)

Composante	Activités	Période	
	• Réunion des partenaires universitaires à Québec	Novembre 06	
	• Réunion de tous les partenaires à Montréal	• Décembre 06	
Bloc 1 : Évaluation produits EEN et régression multiple	 Dépôt des deux mémoires de maîtrise Synthèse des résultats et production d'un article (4) 	Dec 06Nov06-Mars07	
Bloc 2	Analyse et compilation des résultats	• Oct 06 - Déc 06	
Réseau de neurones	• Production d'un article (5) sur les réseaux de neurones	• Déc 06 – Av07	
Bloc 3	Intégration de données exogènes	• Fév-Juin 07	
Amélioration du réseau	 Intégration de simulations de modèles physiques Synthèse et écriture d'un article (6) 	Fév-Juin 07Juin-Sept 07	
Bloc 4	• Rédaction du rapport final au CRSNG et du rapport scientifique		
	• Réunion de tous les partenaires à l'INRS Présentation des résultats finaux du projet	Septembre 07	

5. Références

- Bernier M., Fortin J. P., Gauthier Y., Gauthier R., Roy P., Vincent P. 1999.

 Determination of snow water equivalent using Radarsat in Eastern Canada.

 Hydrological Processes 13: 3031-3042.
- Bitner D., Carroll T., Cline D., Romanov P. 2002. An assessment of the differences between three satellite snow cover mapping techniques. *Hydrological Processes* **16**: 3723-3733.
- Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K. 1987. Nimbus-7 derived global snow cover parameters. *Annals of Glaciology* **9**: 39-44.
- Chokmani K., Bernier M., Beaulieu V., Philippin M., Slivitzky M. 2004. Suivi spatiotemporel du couvert nival à l'aide des données NOAA-AVHRR. Québec, Canada, Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement: 73.
- Chokmani K., Bernier M., Gauthier Y. 2006. Suivi spatio-temporel du couvert nival du Québec à l'aide des données NOAA-AVHRR. *Revue des Sciences de l'Eau* **19**(3): 163-179.
- Chokmani K., Bernier M., Slivitzky M. 2005. Validation of a method for snow cover extent monitoring over Quebec (Canada) using NOAA-AVHRR data. *EARSeL* eProceedings **4**(1): 106-118.
- Cordisco E., Prigent C., Aires F. 2003. Sensivity of satellite observations to snow characteristics. *IEEE IGARSS '03*, Toulouse, France.
- De Sève D., Bernier M., Fortin J. P., Walker A. E. 1997. Preliminary Analysis of Snow Microwave Radiometry of Snow Cover with SSM/I Passive Microwave Data: The Case of La Grande River Watershed (Québec). *Annals of Glaciology* **25**: 353-361.
- De Sève D., Évora N., Tapsoba D., Choquette Y., Ducharme P. 2004. Preliminary Analysis of Snow Water Equivalent Estimation Over La Grande River Watershed using SSMI data: Comparison of Two Neural Network Approach. *Eos*

- Transactions. Joint Assembly of the CGU, AGU, SEG and EEGS, Montreal, Canada.
- De Sève D., Tapsoba D., Evora N. D., Ducharme P. 2003. Cartographie de la neige au sol à l'aide de la télédétection. Présentation au COGE. *COGE*.
- Derksen C., Walker A. E., Goodison B. E. 2003. A comparison of 18 seasons of in situ and passive microwave-derived snow water equivalent estimates in Western Canada. *Remote Sensing of Environment* **88**: 271-282.
- Dever K. 2006. Cartographie de la couverture de neige au Québec à l'aide d'images Landsat TM. École supérieure des géomètres et topographes. Le Mans, France, Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Goïta K., Walker A. E., Goodison B. E. 2003. Algorithms development for the retrieval of snow water equivalent in the boreal forest using passive microwave data. *International Journal of Remote Sensing* **24**(5): 1097-1102.
- Goodison B. E., Walker A. E. 1994. Canadian development and use of snow cover information from passive microwave satellite data. *ESA/NASA Int. Workshop, Passive microwave remote sensing of land-atmosphere interactions*, Saint Lary, France.
- Hall D. K., Rhoads J. D., Salomonson V. V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 54: 127-140.
- Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. 2001a. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. 2003.
- Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., DiGirolamo N. E., Bayr K. J. 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment* **83**: 181-194.
- Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., Scherfen G. R. 2001b. Earth Observing System (EOS) Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS) global snow-cover maps. *IAHS-AISH Publication* 267: 55-60.
- Klein A. G., Hall D. K., Riggs G. A. 1998. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. *Hydrological Processes* **12**: 1723-1744.

- Koskinen J., Metsamaki S., J. G., Janne S., Matikainen L., Hallikainen M. 1999. Snow monitoring using radar and optical satellite data. *Remote Sensing of Environment* **69**: 16-29.
- Langlois A. 2003. Étude de la variation spatio-temporelle du couvert nival par télédétection micro-ondes passives et validation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). *Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL*). Sherbrooke, Canada, Université de Sherbrooke.
- Langlois A., Royer A., Fillol E., Frigon A., Laprise R. 2004. Evaluation of the snow cover variation in the Canadian regional climate model over eastern Canada using passive microwave satellite data. *Hydrological Processes* **18**: 1127-1138.
- Latifovic R., Trishchenko A. P., Chen J., Park W. B., Khlopenkov K. V., Fernandes R., Pouliot D., Ungureanu C., Luo Y., Wang S., Davidson A., Cihlar J. 2005. Generating historical AVHRR 1 km baseline satellite data records over Canada suitable for climate change studies. *Canadian Journal of Remote Sensing* 31(5): 324-346.
- Latifovic R., Zhu Z., Cihlar J., Giri C. 2002. Land cover of North America 2000, Natural Resources Canada, Canada Center for Remote Sensing, US Geological Service EROS Data Center.
- Mialon A., Fily M., Roy A. 2005. Seasonal snow cover extent from microwave remote sensing data: comparison with existing ground and satellite based measurements. *EARSeL eProceedings* **4**(2): 215-225.
- Pardé M., Goïta K., Royer A., Vachon F. 2005. Boreal Forest Transmissivity in the Microwave Domain Using Ground-Based Measurements. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters* **2**(2): 169-171.
- Pulliainen J. T., Grandell J., Hallikainen M. T. 1999. HUT snow emission model and ist applicability to snow water equivalent retreival. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **37**(3): 1378-1390.
- Ramsay B. H. 1998. The interactive multisensor snow and ice mapping system. Hydrological Processes 12: 1537-1546.

- Romanov P., Gutman G., Csisar I. 2000. Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data. *Journal of Applied Meteorology* **39**: 1866-1880.
- Roy V., Goïta K., Royer A., Walker A. E., Goodison B. E. 2004. Snow water equivalent retrieval in a Canadian boreal environment from microwave measurements using the HUT snow emission model. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* **42**(9): 1850-1859.
- Royer A., Goïta K., Kohn J., De Sève D. 2006. Monitoring Dry, Wet and No- Snow Conditions from Satellite Microwave Observations. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*: (soumis en août 2006).
- Simic A., Fernandes R., Brown R., Romanov P., Park W. 2004. Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES+SSM/I snow cover products over Canada based on surface snow depth observations. *Hydrological Processes* **18**: 1089-1104.
- Simic A., Fernandes R., Brown R., Romanov P., Park W., Hall D. K. 2003. Validation of MODIS, VEGETATION, and GOES+SSM/I snow cover products over Canada based on surface snow depth observations. *IEEE IGARSS '03*, Toulouse, France.
- Tait A., Barton J. S., Hall D. K. 2001. A prototype MODIS-SSM/I snow-mapping algorithm. *International Journal of Remote Sensing* **22**(17): 3275-3284.
- Voigt S., Koch M., Baumgartner M. F. 1999. A multichannel thershold technique for NOAA AVHRR data to monitor the extent of snow cover in the Swiss Alps. *IAHS-AISH Publication* **256**: 35-43.

6. Annexes

Royer A., Goïta K., Kohn J., DeSève D. (2006). Monitoring Dry, Wet and No- Snow Conditions from Satellite Microwave Observations. *IEEE Geosciences and Rem. Sens. Letters* (soumis)

L'INRS n'étant pas propriétaire des droits d'auteur de cet article, nous ne pouvons le diffuser. Nous vous prions de bien vouloir nous excuser pour ce désagrément.Since INRS does not own the copyrights for this paper, we are not allowed to distribute it. Sorry for the inconvenience.