

**Université du Québec
INRS-Eau Terre et Environnement**

**Évaluation de l'apport des images MODIS désagrégées à
250m de résolution spatiale pour la cartographie de l'étendue
du couvert nival dans l'Est du Canada à l'aide de l'algorithme
SNOWMAP**

Par
Chaima Touati

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître es Sciences (M.Sc.) en Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Directeur	Karem Chokmani INRS-ETE
Examineur interne	Monique Bernier INRS-ETE
Examineur externe	Marie-Christine Bélanger La Financière agricole du Québec

Août 2014

Remerciements

Je tiens à remercier personnellement mon directeur Karem Chokmani pour ces judicieux conseils lors du déroulement de ce projet et pendant la rédaction. Merci aussi à toute l'équipe de Télédétection Spatiale de l'INRS-ETE pour la bonne compagnie, les encouragements et les conseils. Un merci spécial à Anas El Alem pour son aide lors des travaux de traitement d'images MODIS et à Sophie Roberge qui m'a aidé énormément pendant la rédaction de mon rapport.

Je tiens à remercier aussi mon pays la Tunisie et spécialement le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche Scientifique et des Technologies de l'information et de la communication représenté ici au Canada par la Mission Universitaire de Tunisie en Amérique du Nord (MUTAN) qui m'a offert une bourse d'excellence pendant les deux années de ma maîtrise. Je remercie aussi le Centre Canadien de Télédétection (CCT) pour leur algorithme de désagrégation des images MODIS qui a inspiré l'objectif du présent travail.

Merci aussi aux membres de jury d'évaluation Madame Monique Bernier et Madame Marie-Christine Bélanger, pour avoir accepté de réviser mon mémoire. Leurs commentaires et suggestions m'ont permis de mieux expliquer mes résultats de recherche.

Une pensée particulière est adressée à ma famille, ma mère Souad, mon père Abdellatif, ma sœur Amina et mon frère Mohamed pour leur amour inconditionnel, leur soutien. Je vous aime !

Résumé

Pendant l'hiver, le couvert nival couvre plus que 40% de la surface de l'hémisphère nord. Il présente un élément clé pour le cycle hydrologique du Québec et influence chimiquement, biologiquement et géologiquement le sol. Par conséquent, une bonne connaissance du couvert nival sera utile pour plusieurs besoins scientifiques. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) fournit des produits journaliers du couvert nival à 500 m de résolution spatiale. Il s'agit du produit MOD10A1. SNOWMAP l'algorithme original qui le génère a été amélioré de façon continue depuis son développement en 1989 jusqu'à maintenant. En 2006, le Centre Canadien de Télédétection (CCT) a développé un nouvel algorithme permettant de désagréger les images MODIS de 500 m de résolution à 250 m. En s'inspirant de cet algorithme, ce présent projet tend à cartographier la neige sur l'Est du Canada (Québec et les provinces maritimes). L'objectif principal est d'appliquer l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m). Par la suite, des matrices d'erreur comparant les cartes du couvert nival issues de produit MODIS du couvert nival: MOD10A1 et celles de la nouvelle application de l'algorithme SNOWMAP-250 m sont développées. Ces matrices ont démontré une meilleure performance pour la nouvelle application de l'algorithme avec une précision plus élevée en milieu ouvert qu'en milieu fermé et en hiver qu'au printemps. En fait, en milieu ouvert ou de transition, l'algorithme a détecté la neige avec succès à partir d'une saturation en neige au niveau de pixel inférieur à 60% alors qu'en milieu fermé la bonne décision est prise à partir d'un degré de saturation supérieur à 65% et atteint même 95% pour une végétation très dense.

Mots-clés : couvert nival, neige, algorithme de cartographie, MODIS, SNOWMAP, Est du Canada, désagrégation spatiale.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
1. Introduction	13
1.1 Contexte.....	13
1.2 Problématique.....	15
1.3 Objectifs de la recherche.....	17
1.4 Originalité de la recherche.....	17
1.5 Plan du document	17
2. Revue de littérature.....	18
2.1 Télédétection du couvert nival.....	18
2.1.1 Domaine du visible et de proche infrarouge et de l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes 18	
2.1.2 Domaine de l'infrarouge thermique.....	21
2.1.3 Domaine des micro-ondes	22
2.2 Capteur MODIS : caractéristiques, produits opérationnels et algorithmes de détection de la neige	27
2.2.1 Caractéristiques techniques et produits opérationnels de capteur MODIS	27
2.2.2 Algorithmes de cartographie de la neige développés pour le capteur MODIS	29
2.2.3 Validation du produit de neige MODIS	38
3. Méthodologie.....	40
3.1 Zone d'étude	40

3.2	Imagerie satellitaire, produits utilisés et leur prétraitements.....	43
3.2.1	Images LANDSAT à 30 m	43
3.2.2	Produit MODIS du couvert nival (MOD10A1)	46
3.2.3	Images MODIS désagrégées à 250 m	46
3.2.4	Produit MODIS de nuages	49
3.2.5	Masque de nuages du capteur LANDSAT	50
3.3	Validation des cartes de neige de 250m et du produit MODIS, MOD10A1 du couvert nival	50
4.	Résultats et discussion.....	54
4.1	Cartes de neige.....	54
4.2	Évaluation de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m à l'Est du Canada	58
4.3	Comparaison des résultats de validation de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 et de son application sur des images MODIS désagrégées à 250 m	70
5.	Conclusion	72
6.	Références bibliographiques	74
	Annexe I.....	89
	Annexe II.....	91
	Annexe III.....	100

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Réflectance de la neige et de la glace dans la partie visible du spectre électromagnétique.....	18
Tableau 2.2. Caractéristiques des capteurs optiques utilisés dans la détection de la neige (adapté de Dietz <i>et al.</i> , 2012).	21
Tableau 2.3. Émissivité de la neige par rapport aux autres éléments de la surface terrestre (Grody, 1997).	22
Tableau 2.4. Caractéristiques des principaux capteurs micro-ondes passives pour la détection du couvert nival (Dietz <i>et al.</i> , 2012).	24
Tableau 2.5. Récapitulation des exemples des études développées en se basant sur les micro-ondes passives (Derksen <i>et al.</i> , 2003a).....	25
Tableau 2.6. Caractéristiques des principaux capteurs micro-ondes actifs utilisés dans la détection de la neige (Dietz <i>et al.</i> , 2012).	26
Tableau 2.7. Caractéristiques généraux du capteur MODIS (http://ladsweb.nascom.nasa.gov/).	27
Tableau 2.8. Numéro et largeur des bandes spectrales de MODIS (Hall <i>et al.</i> , 1995).	28
Tableau 2.9. Produits MODIS Calibration, Atmosphère, Terre et Cryosphère (http://modis.gsfc.nasa.gov/).....	29
Tableau 2.10. Seuils utilisés par l’algorithme SNOWMAP pour détecter la neige par le capteur MODIS.	34
Tableau 2.11. Résultats des études de validation des différentes versions du produit MOD10A1 avec des images Landsat (Kristi <i>et al.</i> , 2012)	39
Tableau 3.1. Caractéristiques spatiales et spectrales du capteur LANDSAT-TM5 (Yi <i>et al.</i> , 2008).....	43
Tableau 3.2. Localisation des tuiles LANDSAT utilisés pour la validation de l’application de l’algorithme SNOWMAP- 250 m	44
Tableau 3.3. Correspondance des codes MODIS-250 m et MOD10A1 (National Snow and Ice Data, 2014).	46
Tableau 3.4. Bandes MODIS désignées pour l’étude du sol (Luo <i>et al.</i> , 2008).	47

Tableau 3.5. Caractéristiques de projection du produit MODIS de niveau 3 (Trishchenko <i>et al.</i> , 2006).....	47
Tableau 3.6. Exemple d'une matrice de confusion MODIS/LANDSAT.....	52
Tableau 4.1 : Résultats de l'étude de l'occupation du sol des 11 tuiles LANDSAT	58
Tableau 4.2. Localisation des trois tuiles LANDSAT utilisées pour la validation milieu ouvert, de transition et fermé.....	60
Tableau 4.3. Résultats de la validation LANDSAT de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m en milieu ouvert, de transition et fermé	67
Tableau 4.4. Résultats de la validation LANDSAT de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m en milieu fermé en utilisant les seuils observés dans chaque tuile.....	68
Tableau 4.5. Récapitulatif des matrices de confusion de l'algorithme SNOWMAP appliqué sur le produit MODIS MOD10A1 vis-à-vis à son application sur des images MODIS désagrégées à 250 m.....	70

Liste des figures

Figure 2.1. Réflectance de la neige et des nuages pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,4 et 2,5 μm du spectre électromagnétique (Jensen, 2007).	19
Figure 2.2. Réflectance de la neige en fonction de la dimension des cristaux de glace pour un angle d'incidence de 60° (Bonn <i>et Rochon</i> , 1992).	20
Figure 2.3. Diagramme conceptuel de l'algorithme SNOWMAP (Hall <i>et al.</i> , 1995).	32
Figure 2.4. Zones de décision de l'algorithme SNOWMAP (Hall <i>et al.</i> , 1995).	33
Figure 2.5. Seuils utilisés pour la détection du couvert nival en milieu ouvert (partie hachurée) et en milieu fermé (partie rouge) (Klein <i>et al.</i> , 1998).	34
Figure 2.6. Organigramme de l'algorithme SNOWMAP (Hall <i>et al.</i> , 1995).	35
Figure 2.7. Organigramme de l'algorithme de cartographie de la neige de Notarnicola <i>et al.</i> , (2013) (Notarnicola <i>et al.</i> , (2013)).	37
Figure 3.1. Localisation de la zone d'étude : l'Est du Canada	40
Figure 3.2. Répartition des stations météorologiques au Canada en activité pendant l'année 2012 (Ressources naturelles Canada, 2012).	41
Figure 3.3. Classification climatique de Québec selon le projet de NATGRID élaboré pendant l'année 2001. La légende est représentée dans le tableau (Environnement Canada, 2001).	42
Figure 3.4. Capture des images LANDSAT de 30 m de résolution utilisées pour l'étude de validation	44
Figure 3.5. Vue d'ensemble des traitements réalisés pour la production des cartes du couvert nival à 250 m	49
Figure 3.6. Schéma d'extraction des informations de classification à partir des images LANDSAT et MODIS.	51
Figure 4.1. Cartes de neige du printemps 2006 issues de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m	56
Figure 4.2. Cartes de neige de l'automne 2006 issues de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m	57

Figure 4.3. Applications de l'algorithme SNOWMAP sur l'image MODIS désagrégée à 250 m et LANDSAT prises le 06 mai 2008 : 1 et 2 représentent respectivement une souestimation et une surestimation du couvert nival. 61

Figure 4.4. Statistiques de la validation LANDSAT de l'algorithme SNOWMAP-250 m..... 64

Figure 4.5. Statistiques de la validation Landsat de l'algorithme SNOWMAP0-250 m. 66

1. Introduction

1.1 Contexte

Dans l'hémisphère Nord, au plus fort de l'hiver, le couvert nival s'étend sur près de 46×10^6 km² (Serreze *et al.*, 1999), soit à peu près 50% de la superficie de l'Hémisphère Nord (Armstrong *et al.*, 2001, Frei *et al.*, 1999). La neige est la plus grande caractéristique temporaire de la surface terrestre (Yang *et al.*, 2001). Elle intervient dans la circulation atmosphérique grâce aux changements de l'albédo due à la rétroaction neige-albédo, dans la conductivité thermique ainsi que dans la capacité thermique et aérodynamique de la surface terrestre (Frei *et al.*, 2010). Elle contrôle aussi la disponibilité de l'eau dans certains écosystèmes (Clifford, 2010). Dans certains pays comme la Norvège, la Suisse et le Canada d'importantes quantités d'électricité sont générées par l'eau. Par conséquent, le stock de neige qui fond pendant la saison printanière joue un rôle important dans l'approvisionnement en énergie (Vikhamar *et al.*, 2002, De Sève *et al.*, 2007, Evora *et al.*, 2008). Par conséquent, une bonne estimation du couvert nival est utile pour suivre dans le temps et dans l'espace le climat, les ressources hydriques et pour améliorer la modélisation hydrologique (Leathers *et al.*, 1998, Todhunter, 2001, Graybeal *et al.*, 2006, Dyer, 2008) et climatique (Foster *et al.*, 1996, Roesch *et al.*, 1999, Frei *et al.*, 2005, MacKay *et al.*, 2006). Par ailleurs, le couvert nival protège le sol du gel et des froids les plus intenses. En fait, sous 10 cm de neige, la température augmentera de 3°C par rapport à celle de l'air. En présence de cette couche, le système racinaire peut traverser les failles du sol ou des roches afin d'absorber l'eau. Lors de la période de fonte, la présence du couvert nival assure un dégel «humide». Ce qui est moins préjudiciable pour la végétation qu'un dégel «sec». Ce couvert est donc limitatif pour la répartition spatiale de la faune et de la flore (Goodison *et al.*, 1989).

L'accumulation et la fonte printanière de la neige sont considérées comme les changements saisonniers les plus rapides sur la surface terrestre nécessitant un suivi aussi bien spatial que temporel (Robinson *et al.*, 1993, Robinson *et al.*, 2000). En fait, des changements dans l'étendue spatiale et dans les volumes de neige et de glace ont un impact significatif sur les écosystèmes, les ressources en eau et les activités humaines. Selon les études menées dans un contexte de changements climatiques, une diminution de la couverture neigeuse est observée globalement à

partir des années 1960 (Brown, 2000, Lemke *et al.*, 2007) alors que dans certaines régions comme la Chine, il s'agit d'une tendance à la hausse (de 1978 à 2006) (Qin *et al.*, 2006).

Afin de surveiller la neige à l'échelle globale, continentale, régionale et locale, diverses bases de données continues, cohérentes et précises sur le couvert nival ont été développées depuis plus de trois décennies (Chang *et al.*, 1990, Bonn *et al.*, 1993, Rott *et al.*, 1994, Grody *et al.*, 1996, Foster *et al.*, 1999, De Sève *et al.*, 2001, König *et al.*, 2001, Li *et al.*, 2001, Nghiem *et al.*, 2001, Tait *et al.*, 2001, Akyürek *et al.*, 2002, Hall *et al.*, 2002, Kelly *et al.*, 2003, Miller *et al.*, 2005, Pepe *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2008a, Hyvarinen *et al.*, 2009, Strozzi *et al.*, 2009, Hall *et al.*, 2010, Clifford *et al.*, 2010, Dietz *et al.*, 2012). La neige a été détectée avec succès pour la première fois en avril 1960 par le satellite ESSA-3 à une résolution spatiale de 3,7 km en utilisant un système avancé de caméra *Advanced Vidiction Camera System* (AVCS) sensible à la partie du spectre électromagnétique située entre 0,5 et 0,75 μm (Singer *et al.*, 1963). Par la suite, en 1966, le *Scanning Radiometer* (SR) et le *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) ont été utilisés par le *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) afin de cartographier la neige (Matson *et al.*, 1986). De plus, le *National Environmental Satellite Data and Information System* (NESDIS) a commencé à utiliser les satellite opérant dans le visible. En utilisant des images issues d'*Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) et des satellites géostationnaires (GOES, METEOSAT), des cartes hebdomadaires du couvert nival ont été digitalisées. Il s'agit du produit *Ice Mapping System* (IMS). Au début, ces résultats étaient produits à une résolution de 190 km. Par la suite, en utilisant le proche infrarouge et les micro-ondes passives (AVHRR, GOES, SSMI, etc.), ces produits ont été remplacés par des cartes journalières à une résolution de 25 km (Ramsay, 1998, Ramsay, 2000, Helfrich *et al.*, 2007). À partir de 1999, en se basant sur les données issues du capteur micro-ondes passives (SSM/I) du *Satellite Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) et les données *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), les produits de *National Environmental Satellite Data* (NESDIS) sont passés à une résolution de 5 km (Ramsay *et al.*, 2000, Romanov *et al.*, 2000, Helfrich *et al.*, 2007). En parallèle, des cartes journalières du couvert nival à une résolution de 1 km ont été élaborées par le *National Operational Hydrological Remote Sensing Center* (NOHRSC) pour 3000 à 4000 bassins versants aux États-Unis et au sud du Canada (Bitner *et al.*, 2002, Hall *et al.*, 2002). Enfin, depuis 2000, les images du *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) monté à bord des satellites TERRA et AQUA ont été utilisées afin d'élaborer des cartes journalières à 500 m de résolution (Hall *et al.*, 2001).

Cette télédétection du couvert nival est développée sur une base temporelle (intra- et/ou interannuelle) et/ou spatiale. Elle vise à évaluer soit son étendue spatiale (Hall *et al.*, 1985, Bernier, 1987, Rott, 1987, Lucas et Harrison, 1990, Massom, 1991, König *et al.*, 2001, Solberg *et al.*, 2006, Amlien, 2008, Dietz *et al.*, 2012), son équivalent en eau (EEN) (Chang *et al.*, 1987, Salmonson *et al.*, 1995, Grody *et al.*, 1996, Derksen *et al.*, 2005b, Derksen, 2008) ou sa sous-fraction sur un pixel donné (Salmonson *et al.*, 2003, Salmonson *et al.*, 2006, Riggs *et al.*, 2005, Niu *et al.*, 2007).

1.2 Problématique

Au Canada, l'hydroélectricité assure environ 60% de la production d'électricité. Au Québec, 98% de l'énergie produite par Hydro-Québec est issue de 59 centrales hydroélectriques et deux centrales thermiques, ce qui correspond à une puissance installée de 35,7 GW et un actif de 25,8 G\$. L'énergie électrique ainsi produite répond aux besoins de la population québécoise au complet et l'excédent est vendu aux provinces du Nouveau-Brunswick et de l'Ontario ainsi qu'aux États du Nord-est des États-Unis (New York, Maine et Vermont) (www.hydroquebec.com).

Au final, en dépit des besoins d'information concernant le couvert nival (§ 1.1), les scientifiques n'ont accès qu'à une base de données concentrée géographiquement et limitée temporellement (Chokmani *et al.*, 2009, Roberge, 2013). Ceci résulte des conditions extrêmes (température de fonte, vent, couvert nival épais, végétation diversifiée, etc.) qui sont présentes lors des travaux de terrain et de la rareté des stations de mesure. En fait, les stations météorologiques à l'Est du Canada sont installées dans les zones urbaines et rurales au sud du Québec et en Ontario. On en retrouve un nombre limité au nord du Québec et dans la province de Terre-Neuve-et-Labrador (§ 3.1). De plus, les réseaux de mesure *in situ* de la hauteur de neige et des relevés d'enneigement sont concentrés aux latitudes méridionales et aux basses élévations (Brown *et al.*, 2008).

Dans le but de combler ces lacunes, l'équipe de télédétection de l'INRS-ETE a développé un algorithme pour cartographier la neige au Québec (Chokmani *et al.*, 2006a, Chokmani *et al.*, 2006b, Chokmani *et al.*, 2009). À partir des données journalières issues du capteur AVHRR (visible et infrarouge, 1km de résolution) et SSM/I à bord du satellite DMSP (micro-ondes passives, 25 km de résolution), des cartes journalières du couvert nival ont été développées pour les mois d'avril et mai, de 1988 à 1999. Ces cartes ont une résolution spatiale de 1 km x 1 km. La précision globale de la cartographie atteint 86%. Cette précision a été déterminée après une validation faite avec les observations de la hauteur de neige au sol au niveau des stations

météorologiques d'Environnement Canada. Ces dernières sont offertes en ligne (www.nival.ete.inrs.ca) sous la forme d'un atlas de neige interactif. Le produit ainsi développé a contribué à une validation de la partie neige du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) (Caya *et al.*, 1999) sur l'Est du Canada (Wirtensohn, 2010). Dans le but d'étendre la version originale de l'algorithme sur des images issues de la nouvelle génération du capteur AVHRR-KLM, Roberge (2013) a étalonné un algorithme binaire (neige-non neige) de détection du couvert nival à six seuils hiérarchiques applicables à l'Est du Canada pour la période 1988 à 2011. Afin d'étudier la performance de son algorithme, les résultats ont été validés à partir des observations locales de neige au sol à 20 stations météorologiques et sept stations *Gamma Monitoring* (GMON) (Roberge, 2013). La précision globale est de l'ordre de 95%. Par contre, le taux de détection de la neige a été estimé à plus de 90% en milieu agricole alors qu'il diminue pour atteindre 65% en milieu forestier.

Plusieurs algorithmes ont été utilisés pour la cartographie du couvert nival. L'algorithme SNOWMAP a été développé en 1989 pour classifier un pixel de 500 m de résolution spatiale comme neige ou non-neige (Hall *et al.*, 1995, Klein *et al.*, 1998). Sa précision globale est de l'ordre de 99% pour un milieu ouvert, en ciel clair et pour un pixel saturé en neige (Klein *et al.*, 1998). Il est appliqué par la NASA depuis 2000 sur des données issues du capteur MODIS pour offrir un produit journalier du couvert nival. Sa résolution de 500 m est la plus fine pour les capteurs optiques (Hall *et al.*, 2001). En 2006, le Centre Canadien de Télédétection (CCT) a développé une nouvelle technique de désagrégation permettant d'avoir des images MODIS de 250 m de résolution. Cela permet d'avoir une meilleure précision de la cartographie du couvert nival. Jusqu'à présent, cette nouvelle technique n'a pas été appliquée pour la cartographie de la neige à l'Est du Canada avec l'algorithme SNOWMAP. Le présent projet vise à développer des cartes journalières du couvert nival à une résolution de 250 m en utilisant un produit MODIS d'une résolution de 500 m, et en y appliquant la nouvelle technique de désagrégation du CCT. Il sera donc possible de cartographier la neige à l'Est du Canada en utilisant l'algorithme SNOWMAP avec une résolution de 250 m. Ce projet permettra donc de rendre disponible une nouvelle série historique sur le couvert nival pour l'Est du Canada.

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer l'apport des images MODIS désagrégées à 250 m de résolution spatiale pour la cartographie de l'étendue du couvert nival dans l'Est du Canada à l'aide de l'algorithme SNOWMAP, l'un des algorithmes de cartographie de la neige les plus performants. L'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m a été validée avec des images LANDSAT-TM à 30 m de résolution spatiale prises dans des occupations de sol variées ainsi qu'avec le produit MOD10A1 de l'étendue spatiale du couvert nival à 500 m de résolution lui aussi issu de l'application de l'algorithme SNOWMAP.

1.4 Originalité de la recherche

Ce projet débouchera sur des contributions scientifiques originales. En effet, il s'agit de la première évaluation systématique de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m pour l'Est du Canada. Cette technique automatique de cartographie de l'étendue spatiale de la neige aura une résolution plus fine qu'auparavant (250 m au lieu de 500 m). Cela améliorera a priori la précision globale de la classification binaire de type neige/non neige sur la zone d'étude et en particulier dans les zones forestières dont la précision a été reconnue comme étant moyenne par plusieurs études (Notarnicola *et al.*, 2013).

1.5 Plan du document

Ce document est réparti en quatre parties suivant l'introduction. Le chapitre 2 présente la théorie et les notions fondamentales reliées à la présente étude. Le chapitre 3 détaille l'approche méthodologique. Le chapitre 4 explique les résultats de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m et les compare avec le produit MODIS du couvert nival MOD10A1 à 500 m de résolution spatiale. Le chapitre 5 conclue en proposant des solutions pour dépasser les points faibles observés dans les présents résultats lesquels peuvent présenter un point de départ pour des études futures.

2. Revue de littérature

La neige peut être considérée comme un milieu dense constitué de petits diffuseurs (grains de glace) séparés par de l'air ou parfois de l'eau (Bonn *et al.*, 1993). La glace peut être aussi décrite de la même façon sauf que cette fois-ci, les diffuseurs seront des bulles d'air ou des impuretés. Pour la neige, la taille des grains varie entre 10^{-6} m et 10^{-2} m alors que pour la glace les tailles des cristaux sont encore plus variables (Li *et al.*, 2001). Dans la nature, le type de neige fraîche dépend des conditions de croissance des cristaux lors de leur formation dans les nuages. Les neiges récemment tombées se déposent les unes sur les autres sur le substratum, ce qui forme un empilement de couches: le couvert nival.

Au début, les techniques de détection du couvert nival et ses caractéristiques physiques et spectrales seront présentées (§ 2.1). Par la suite, les caractéristiques du spectromètre imageur à résolution moyenne (MODIS), source principale de la base de données de ce projet, ainsi que les algorithmes qui l'utilisent pour la détection du couvert nival (SNOWMAP en particulier) seront discutés (§ 2.2).

2.1 Télédétection du couvert nival

2.1.1 *Domaine du visible et de proche infrarouge et de l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes*

La neige est considérée comme étant l'une des surfaces les plus réfléchissantes présentes à la surface de la terre. Son albédo, le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie incidente, varie entre 30% et 90% selon les caractéristiques morphologiques et physiques du couvert nival (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Réflectance de la neige et de la glace dans la partie visible du spectre électromagnétique (Hall *et al.*, 1985).

Type de neige	Neige fraîche	Neige tassée	Glace
Albédo	81%-92%	52%-81%	30%-50%

Dans le domaine du visible (0,39-0,75 μm) et du proche infrarouge (0,78-3 μm) du spectre électromagnétique, le couvert nival est dominé par les mécanismes de réflexion de la lumière solaire. Cette réflectivité peut atteindre 80% dans la partie visible du spectre électromagnétique

(Klein *et al.*, 2000, König *et al.*, 2001) et même 90% (Hall *et al.*, 1985) pour une neige pure et fraîchement tombée (Figure 2.1). La réflectance de la neige diminue drastiquement entre les longueurs de 1 μm (80%) à 1,5 μm (<10%) (Jensen *et al.*, 2007). Par ailleurs, contrairement aux hyperfréquences, la profondeur de pénétration du rayonnement visible à travers la neige ne dépasse pas quelques centimètres (Li *et al.*, 2001)

Dans la partie visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique, la réflectance de la neige et des nuages est presque la même. Par contre, dans l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes (spécialement entre 1,5 μm et 2,5 μm), la réflectance reste élevée pour les nuages alors qu'elle est presque nulle pour la neige (Hall *et al.*, 1995, Jensen *et al.*, 2007). Cet aspect facilite la discrimination neige-nuage (Hall *et al.*, 2002, Pepe *et al.*, 2005) (Figure 2.1). En fait, dans la région située entre 1,55 et 1,75 μm , les nuages ont une réflectance élevée et apparaissent clairs dans l'image satellitaire alors que la neige, avec sa faible réflectance, apparaît foncée. Pour cette raison, la bande infrarouge à courtes longueurs d'ondes (cinquième bande LANDSAT *Thematic Mapper* (TM) 1,55-1,75 μm) est utilisée pour distinguer la couverture de la neige des nuages (fins, minces, hauts ou bas) (Dozier *et al.*, 1989). Sur le plan pratique, la probabilité de distinguer avec succès les surfaces neigeuses des surfaces nuageuses en utilisant une seule bande est faible (Miller *et al.*, 2005). Par contre, avec une combinaison de plusieurs bandes spectrales et une série de tests, il est possible de minimiser les erreurs de fausse classification (King *et al.*, 1997, Hall *et al.*, 2002, Klein *et al.*, 2003, Ackerman *et al.*, 2010).

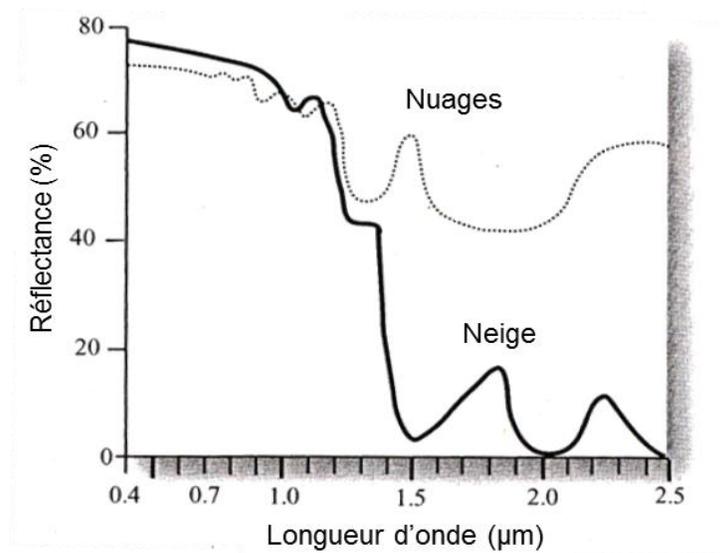


Figure 2.1. Réflectance de la neige et des nuages pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,4 et 2,5 μm du spectre électromagnétique (Jensen, 2007).

Selon la figure 2.2, le spectre de réflectance de la neige varie en fonction de la longueur d'onde et de la taille des grains de neige. En fait, dans la partie visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique (entre 0,4 et 3 μm), la réflectance diminue avec la taille des grains. Plusieurs capteurs ont été utilisés pour étudier la taille des grains. Citons à titre d'exemple l'utilisation du capteur LANDSAT (Bourdelle *et al.*, 1993) ou AVIRIS (Nolin *et al.*, 2000).

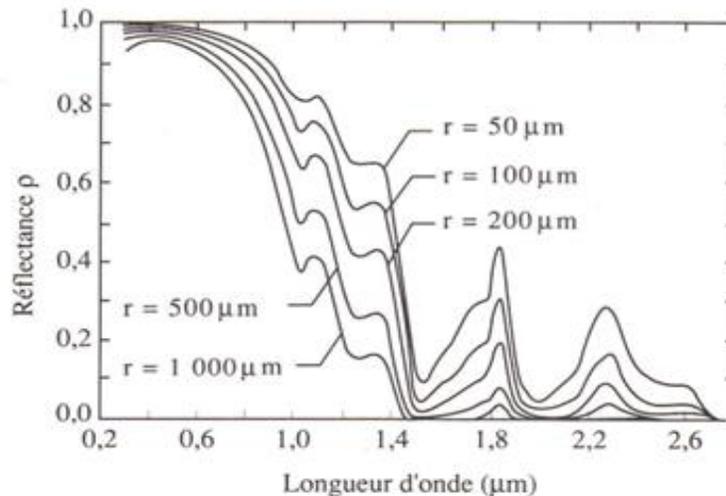


Figure 2.2. Réflectance de la neige en fonction de la dimension des cristaux de glace pour un angle d'incidence de 60° (Bonn et Rochon, 1992).

Dietz (2012) passe en revue l'ensemble des capteurs utilisables pour la détection du couvert nival dans la partie visible et infrarouge à courtes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique (Tableau 2.2). La résolution spatiale de ces capteurs varie entre 8000 m (pour les données GOES) et 30 m (pour les données LANDSAT). Par ailleurs, la fréquence d'acquisition des données peut être journalière (AVHRR et MODIS), entre 1 et 2 jours (SPOT), entre 2 et 3 jours (ENVISAT), de 16 jours (LANDSAT 4-5, 7 et 8), de 18 jours (LANDSAT 1-3) et elle atteint même 3 heures pour les données GEOS. Le champ de balayage de ces capteurs varie aussi. Il couvre 1100 km pour le capteur LANDSAT *Thematic Mapper* (TM). Par conséquent, le choix du capteur le plus approprié à une étude donnée dépend de ses caractéristiques présentées plus en détails au tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques des capteurs optiques utilisés dans la détection de la neige (adapté de Dietz et al., 2012).

Satellite/ Capteur	Période d'acquisition	Bandes spectrales (µm)	Résolution spatiale (m)	Champ balayé	Fréquence d'acquisition
LAND 1-3/ MSS	1972-1993	0,5-0,6;0,6-0,7;0,7-0,8;0,8-1,1	79	185 km	18 jours
LAND 4-5/ TM	1982-2013	0,45-0,52;0,52-0,6;0,63-0,69 0,76-0,9;1,55-1,75;2,09-10,4- 2,35;12,5	30,120	185 km	16 jours
LAND 7/ ETM+	1999-aujourd'hui	0,45-0,52;0,52-0,6;0,63-0,69 0,78-0,9;1,55-1,75;2,09-2,35; 10,4-12,5;0,52-0,9	15, 30, 60	185 km	16 jours
LAND 8	2013-aujourd'hui	0,43-0,45; 0,45-0,51; 0,52-0,6; 0,63-0,68; 0,84-0,88; 1,56-1,66 2,1-2,3; 0,5-0,68; 1,36-1,39; 10,6-11,2; 11,5-12,5	15, 30, 100	185 km	16 jours
TERRA &AQUA /MODIS	2000- aujourd'hui	36 bandes spectrales comprises Entre 0,62 et 14,38	250,500, 1000	2330 km	2 par jours
NOAA/ AVHRR	1978-aujourd'hui	0,58-0,68;0,72-1,00;1,58-1,64 3,55-3,93;10,3-11,3;11,5-12,5	1100	2700 km	Quotidienne
GOES	1975-aujourd'hui	0,52-0,72;3,78-4,03;6,47-7,02; 10,2-11,2;11,5-12,5	1000,4000, 8000	Couverture complète de la terre	À chaque 3 heures
SPOT/ VEGETA- TION	1998-aujourd'hui	0,43-0,47;0,61-0,68;0,78-0,89; 1,58-1,75	1150	2200 km	1-2 jours
ERS2/ ATSR2	1995/ aujourd'hui	0,55;0,66;0,87;1,6;3,7;10,8;12,0	1000	512 km	2-3 jours
ENVISAT/ AATSR	2002-2012	0,55;0,66;0,87;1,6;3,7;11;12,0	1000	500 km	2-3 jours
ENVISAT/ MERIS	2002-2012	15 bandes spectrales comprises entre 0,39 et 1,04	300	1150 km	2-3 jours

2.1.2 Domaine de l'infrarouge thermique

L'émissivité d'un matériau (ϵ) est un nombre sans dimension, représentant le rapport entre l'énergie rayonnée par une surface lorsqu'elle est soumise à un flux incident et le flux lui-même (Bonn et al., 1993). Il s'agit d'une notion parallèle à l'albédo; l'émission concerne les radiations émises par la terre, tandis que l'albédo concerne le rayonnement solaire. Elle prend des valeurs entre 0 et 1. L'émissivité dépend de plusieurs facteurs tels que la température, l'état de la surface et la direction et la longueur d'onde du rayonnement. Pour un corps noir elle est d'ordre 1. Le tableau 2.3 présente des valeurs d'émissivité attribuées aux principaux types de surface.

Tableau 2.3. Émissivité de la neige par rapport aux autres éléments de la surface terrestre (Grody, 1997).

Type de surface	Émissivité*
Glace	0,92-0,97
Neige	0,97-0,99
Eau	0,99
Sol nu (sable sec-sable humide)	0,94 (0,84-0,9; 0,91-0,94)
Prairies	0,98
Blé	0,97
Maïs	0,96
Vignes, verges	0,95

* L'émissivité de la majorité des matériaux est mesurée à 0 °C mais n'évolue pas de façon significative à température ambiante

Dans la partie entre 3 et 100 μm , l'émissivité dépend quasi uniquement de la température et peu de la taille des grains et de la densité de la neige. Pour ces raisons, des capteurs thermiques sensibles uniquement à la surface de la neige sont utilisés dans cette partie du spectre. Il s'agit par exemple de AVHRR ou de ATSR (Key *et al.*, 1997).

2.1.3 Domaine des micro-ondes

Les micro-ondes représentent la partie du spectre électromagnétique qui s'étend de 1 mm à 1 m (fréquences 300 GHz à 300 MHz). Ces longueurs d'onde ont la capacité de traverser les nuages, la bruine, la poussière ainsi que la pluie fine. Ceci s'explique par le fait que ces longueurs d'onde sont insensibles à la diffusion atmosphérique (De Sève *et al.*, 2001). Dans le domaine des micro-ondes passives, l'émission d'un couvert neigeux est dominée par plusieurs propriétés: la taille et la forme des grains, la densité, la stratification verticale, la rugosité de surface, la polarisation ainsi que la végétation en modifiant substantiellement les caractéristiques du rayonnement sortant (Bonn *et al.*, 1993). La détection du couvert nival par les hyperfréquences peut être passive (micro-ondes passives) ou active (micro-ondes actives).

Domaines des micro-ondes passives

Les capteurs passifs détectent l'énergie émise naturellement dans les hyperfréquences. Elles sont généralement des balayeurs ou des radiomètres. La télédétection dans les micro-ondes passives est semblable à celle du thermique (§ 2.1.2), mais cette fois-ci l'énergie émise est généralement très faible. Ainsi, afin d'enregistrer le signal émis, la zone balayée par les micro-ondes passives doit être assez grande (Ressources naturelles Canada, 2014).

À la fin de l'année 1960 et au début de l'année 1970, les données des micro-ondes passives ont commencé à être utilisées par les Soviétiques avec des satellites COSMOS-234 et 384 (Künzi *et al.*, 1982). Par la suite, entre 1970 et 1980, les satellites Nimbus sont utilisés afin de suivre la distribution du couvert nival. En utilisant les données issues des capteurs *Nimbus-E Microwave Spectrometer* (NEMS) et *Electrically Scanned Microwave Spectrometer de Nimbus 5* (ESMR), les premières cartes de la distribution du couvert nival ont été développées pour l'ensemble de l'hémisphère nord (Künzi et Staelin, 1975). Cet algorithme utilise les fréquences 22.2 et 31.4 GHz pour élaborer un gradient de température à partir duquel la décision de présence ou d'absence de la neige sera prise (De Sève *et al.*, 2001). En 1987, Chang *et al.* ont établi une formule simple qui relie la différence de température de brillance à la polarisation horizontale (18 GHz et 37 GHz) avec la profondeur de la neige. Cette relation a été appliquée pour produire des cartes mondiales de profondeur de neige à partir des mesures prises par le *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR) installé à bord du satellite NIMBUS-7. Un algorithme similaire a été élaboré par Goodison en 1989 et plus tard en 1995 pour obtenir l'équivalent en eau de la neige dans les prairies canadiennes à partir des observations prises par le *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I) embarqué à bord de la plate-forme du satellite météorologie du département américain de la défense (DMSP). En 2002, le *Earth Observing System* (EOS) de la NASA a lancé l'*Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System* (AMSR-E) permettant de mesurer quotidiennement l'équivalent en eau de la neige (Cavalieri *et al.*, 2014).

Malgré le développement de ces algorithmes et le lancement continu de nouveaux satellites et capteurs, la résolution spatiale des mesures actuelles et des produits dérivés reste grossière (12-30 km), ce qui n'est pas conforme aux exigences de nombreuses applications en particulier le cas de la prévision numérique temporelle et régionale des modèles hydrologiques (Dietz *et al.*, 2012). Le tableau 2.4 présente les caractéristiques (plateforme, fréquence, polarisation, angle d'incidence, fréquence d'acquisition et champ balayé) des trois capteurs SSMR, SSM/I et AMSR-E (Dietz *et al.*, 2012).

Tableau 2.4. Caractéristiques des principaux capteurs micro-ondes passives pour la détection du couvert nival (Dietz *et al.*, 2012).

	SMMR		SSM/I		AMSR-E	
En opération depuis	1978/1987		1987/aujourd'hui		2002/2011	
Plateforme	NIMBUS-7		DMSP		AQUA	
Fréquences et IFOV	6,6 GHz	156 x 156	n/a		6,9 GHz	74 x 43
(km x km)	10,7 GHz	97 x 97	n/a		10,6 GHz	51 x 30
	18,0 GHz	60 x 60	19,3 GHz	69 x 43	18,7 GHz	27 x 16
	21,0 GHz	60 x 60	22,2 GHz	60 x 40	23,8 GHz	31 x 18
	37,0 GHz	30 x 30	37,0 GHz	37 x 29	36,5 GHz	14 x 8
	n/a		85,5 GHz	15 x 13	89,0 GHz	6 x 4
Polarisation	Horizontale, verticale		Horizontale, verticale		Horizontale, verticale	
Angle d'incidence	49°		53°		53°	
Fréquence d'acquisition	Le jour suivant		Quotidienne		Quotidienne	
Champ balayé	780 km		1400 km		1600 km	

L'utilisation des micro-ondes passives est très performante pour le suivi de l'étendu du couvert nival sous son état sec et humide (Grody *et al.*, 1996). Pour la neige sèche, surtout pour les fréquences supérieures à 15 GHz, les micro-ondes passives sont sensibles aux variations de l'épaisseur et de la densité du couvert nival (De Sève *et al.*, 2001). En fait, au fur et à mesure que l'épaisseur du couvert nival augmente, l'intensité des micro-ondes diminue (Hallikainen, 1984). Cette diminution est causée par la redistribution de l'énergie due à la variation de volume de la neige (Ulaby *et al.*, 1986). Par contre, l'évaluation de la fonte présente une limitation pour les micro-ondes passives. En fait, l'eau liquide disponible dans la neige influence le signal émis. Dans le cas d'une neige mouillée, l'émission du couvert nival est confondue avec celle d'un sol humide sans neige. En se basant sur ces phénomènes, plusieurs algorithmes ont été développés avec les micro-ondes passives pour cartographier l'étendu du couvert nival, sa profondeur ou son équivalent en eau (Tableau 2.5).

Tableau 2.5. Récapitulation des exemples des études développées en se basant sur les micro-ondes passives (Derksen *et al.*, 2003a).

Étude	Capteur
Kunzi <i>et al.</i> , 1982	SMMR
Chang <i>et al.</i> , 1987	SMMR
Foster <i>et al.</i> , 1991	SMMR
Rott <i>et al.</i> , 1991	SSM/I
Walker <i>et al.</i> , 1993	SSM/I
Goodison <i>et al.</i> , 1995	Développé pour SMMR et non appliqué pour SSM/I
Hiltbrunner, 1996	SMMR
Goodison <i>et al.</i> , 1996	SSM/I
Goita <i>et al.</i> , 1997	SSM/I
Foster <i>et al.</i> , 1997	SMMR
Trait, 1998	SSM/I
Singht <i>et al.</i> , 2000	SSM/I
Armstrong et Brodzik, 2001	SSM/I SMMR
Kelly <i>et al.</i> , 2001	AMSR-E
Pulliainen <i>et al.</i> , 2001	SSM/I
Josberger <i>et al.</i> , 2002	SSM/I
Goita <i>et al.</i> , 2003	SSM/I
Foster <i>et al.</i> , 2004	AMRS-E
Che <i>et al.</i> , 2008	SSM/I SMMR
Derksen <i>et al.</i> , 2010	AMRS-E
Derksen <i>et al.</i> , 2011	AMRS-E
Liyun <i>et al.</i> , 2012	AMRS-E
Tao <i>et al.</i> , 2013	AMRS-E

Les données enregistrées par les capteurs micro-ondes passifs sont des températures de brillance (T_b). La température de brillance (ou la température radiative apparente T_b) d'une surface correspond à la température d'un corps noir délivrant la même luminance que la surface étudiée sur une bande spectrale (λ_1 - λ_2) (Bonn *et al.*, 1993). Sa formule est la suivante :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_{\lambda}(T_B) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_{\lambda}(T) \varepsilon_{\lambda} \quad \text{Équation 1}$$

Où :

β_{λ} : Luminance du corps noir,

ε_{λ} : Émissivité de la surface : $\sigma T_B^4 = \varepsilon T^4$,

σ : Constante de Stefan-Boltzman et il vaut $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

Domaines des micro-ondes actifs

Un capteur actif à hyperfréquences produit sa propre énergie pour illuminer la cible. Il est donc capable de fonctionner jour et nuit. Les capteurs micro-ondes actifs se divisent en deux catégories : les imageurs et les non-imageurs (les altimètres et les diffuseurs). La différence entre les deux est que le profil tracé de la cible visée est dans une seule dimension pour les non-imageurs alors qu'il est bidimensionnel pour les imageurs. Le plus connu de ces capteurs est le *RADio Detection and Ranging* (RADAR). En se basant sur la mesure du signal rétrodiffusé et le délai entre sa transmission et sa réception, la cible ainsi que sa portée seront déterminées (Ressources naturelles Canada, 2014).

Le capteur actif parvient à bien détecter la neige humide (Wang *et al.*, 2008) mais éprouve des difficultés en conditions sèches où le résultat de l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et le sol sous-jacent sera observé et non pas les cristaux de neige (König *et al.*, 2001). En fait, plus la neige est humide, plus la profondeur de pénétration du signal diminue (Rott *et al.*, 1994). Par ailleurs, les produits qui ont été fournis par les micro-ondes actives offrent une résolution plus fine par rapport aux micro-ondes passives mais avec un intervalle de survol plus long (24 jours pour RADARSAT-1/2, 35 jours pour ENVISAT ASAR et 11 jours pour TERRASAR-X; König *et al.*, 2001, Nghiem *et al.*, 2001, Strozzi *et al.*, 2009). Le tableau 2.6 récapitule les caractéristiques techniques des différents capteurs micro-ondes actives utilisés pour la détection du couvert nival.

Tableau 2.6. Caractéristiques des principaux capteurs micro-ondes actives utilisés dans la détection de la neige (Dietz *et al.*, 2012).

Satellite/Capteur	En opération depuis	Bandes	Résolution spatiale	Champ balayé	Fréquence d'acquisition
ADEOS-I/NSCAT	1996/1997	Ku (14,0 GHz)	50 km	2 x 600 km	Le jour suivant
QSCAT/SEAWINDS	1999/2009	Ku (13,4 GHz)	25 km	1800 km	Quotidienne
ADEOS-II/SEAWINDS	2002/aujourd'hui	Ku (13,4 GHz)	25 km	1800 km	Quotidienne
METOP/ASCAT	2005/aujourd'hui	C (5,25 GHz)	25 km, 50 km	2 x 550 km	Le jour suivant
RADARSAT-1/SAR	1995/2013	C (5,3 GHz)	8-100 m	45-500 km	24 jours
RADARSAT-2/SAR	2007/aujourd'hui	C (5,4 GHz)	3-100 m	20-500 km	24 jours
ENVISAT/ASAR	2002/2012	C (5,3 GHz)	30, 150, 1000 m	60-100, 400 km	35 jours
JERS-1/SAR	1992/1998	L (1,275 GHz)	18 m	75 km	44 jours
TERRASAR-X/SAR	2008/aujourd'hui	X (9,6 GHz)	1, 3, 18 m	10, 50, 150 km	11 jours
TANDEM-X/SAR	2010/aujourd'hui				

2.2 Capteur MODIS : caractéristiques, produits opérationnels et algorithmes de détection de la neige

2.2.1 Caractéristiques techniques et produits opérationnels de capteur MODIS

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) est un spectro-radiomètre installé à bord des satellites TERRA (EOS-AM) et AQUA (EOS-PM) lancés respectivement le 1^{er} décembre 1999 et le 4 mai 2002. TERRA passe du nord de l'équateur au sud le matin et AQUA l'après-midi. Les caractéristiques générales du capteur MODIS sont représentées dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7. Caractéristiques généraux du capteur MODIS (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>).

Lancement	1999 (TERRA), 2002 (AQUA)
Orbite	705 km d'altitude, 10h30 nœud descendant (TERRA) ou 13h30 nœud ascendant (AQUA), héliosynchrone quasi-polaire, circulaire
Dimensions de la fauchée	2330 km sur 10 km
Méthode de balayage	Faisceau transversal
Délai de ré-observation	1 à 2 jours
Taille	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Poids	228,7 kg
Puissance	162,5 W (seul moyen de l'orbite)
Quantification	12 bits
Résolution spatiale	250 m (bandes 1-2) 500 m (bandes 3-7) 1000 m (bandes 8-36)
Durée de vie théorique	6 années

MODIS a été lancé par la NASA afin de répondre aux exigences du programme *Earth Observation System* (EOS). À cet effet, les données recueillies par le capteur MODIS améliorent la compréhension de la dynamique terrestre et des phénomènes naturels qui se produisent sur la terre, les océans et l'atmosphère. Elles interviennent aussi dans la validation de plusieurs modèles hydrologiques et climatiques, dans le suivi des changements planétaires ainsi que dans la protection de l'environnement. Pour cette étude, seules les données issues du satellite TERRA ont été utilisées car la bande 6 de MODIS sur AQUA (moyen infrarouge) a été endommagée fortement lors de son lancement (Salmonson et Appel, 2003).

Ce spectro-radiomètre a une sensibilité radiométrique (12 bits) dans 36 bandes spectrales, allant de 0,4 μm à 14,4 μm , couvrant ainsi cinq parties du spectre électromagnétique : le visible (VIS), le proche infrarouge (PIR), l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes, le moyen infrarouge et l'infrarouge à longues longueurs d'ondes (ou infrarouge thermique) (Salomonson et Appel, 2003).

Les deux premières bandes (0,6-0,90 μm) ont une résolution nominale de 250 m au nadir. Alors que, de la 3^{ème} à la 7^{ème} bande (0,4-2,1 μm), la résolution spatiale est de 500 m. Pour les 29 bandes restantes (0,4-14,4 μm), une résolution de 1 km a été adoptée. Le tableau 2.8 présente le numéro et la longueur des bandes spectrales de MODIS.

Tableau 2.8. Numéro et largeur des bandes spectrales de MODIS (Hall et al., 1995).

Bande MODIS #	Longueur d'onde (μm)	Bande MODIS #	Longueur d'onde (μm)
1	0,620-0,670	19	0,915-0,965
2	0,841-0,876	20	3,66-3,84
3	0,459-0,479	21	3,93-3,99
4	0,545-0,565	22	3,93-3,99
5	1,230-1,250	23	4,02-4,08
6	1,628-1,652	24	4,43-4,50
7	2,105-2,155	25	4,48-4,55
8	0,405-0,420	26	1,36-1,39
9	0,438-0,448	27	6,54-6,90
10	0,483-0,493	28	7,18-7,48
11	0,526-0,536	29	8,40-8,70
12	0,546-0,556	30	9,58-9,88
13	0,662-0,772	31	10,78-11,28
14	0,673-0,683	32	11,77-12,27
15	0,743-0,753	33	13,19-13,49
16	0,862-0,877	34	13,49-13,79
17	0,890-0,920	35	13,79-14,09
18	0,931-0,941	36	14,09-14,39

Les données satellitaires issues du capteur MODIS sont disponibles gratuitement sur le site de NASA. Elles sont distribuées selon différents niveaux de traitement, radiométrique, atmosphérique, topographique ou géométrique préalablement élaborés et traités par l'*EOS Data and Operation System* (EDOS) dans le but de fournir des produits gratuits et exploitables (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Celles-ci regroupent un large champ d'étude qui se répartit en quatre catégories (Doutreleau et al., 2011) :

- L'atmosphère : regroupant les aérosols, les nuages et la vapeur d'eau,
- La cryosphère : regroupant la glace et la neige. Les produits sont élaborés et fournis auprès du *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC) de Boulder, au Colorado,
- La terre : regroupant les données d'écosystèmes, de radiation et d'occupation de sols,
- L'eau : regroupant la réflectance des océans et la température des mers.

Le tableau 2.9 fournit plus de détails sur chaque domaine individuellement et les produits MODIS offerts.

Tableau 2.9. Produits MODIS Calibration, Atmosphère, Terre et Cryosphère (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

	Calibration	
MOD 10A1		Chiffres de Radiance Level-1A
MOD 02		Level-1B Radiances géolocalisées calibrées
MOD 03		données de géolocalisation
	Atmosphère	
MOD 04		Aérosol
MOD 05		Vapeur d'eau
MOD 06		Produit de nuage
MOD 07		Profil atmosphérique
MOD 08		Produit atmosphérique
MOD 35		Masque nuage
	Terre	
MOD 09		Produit de réflectance
MOD 11		Température et émissivité de surface
MOD 12		Couverture du sol/changement de couverture
MOD 13		Indices de végétation (NDVI)
MOD 14		Les anomalies et les incendies
MOD 15		Indices foliaires
MOD 16		Évapotranspiration
MOD 17		Photosynthèse nette et productivité primaire
MOD 43		Réflectance
MOD 44		Couverture végétal
	Cryosphère	
MOD 10A1		Couverture de neige
MOD 29		Couverture des glaces de mer

2.2.2 Algorithmes de cartographie de la neige développés pour le capteur MODIS

Afin de faciliter la compréhension des algorithmes de cartographie de la neige, une présentation des seuils et des paramètres utilisés sera utile. En fait, les algorithmes de détection de la neige se basent principalement sur deux indices : le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) et le *Normalized Difference Snow Index* (NDSI).

Le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) est un indice utile pour surveiller la végétation durant l'année (Tucker, 1979 et 1986). Il intervient d'une façon directe dans l'analyse de l'évolution saisonnière de la végétation et d'une façon indirecte dans les algorithmes de détection du couvert nival dans les zones forestières (Hall *et al.*, 2001). Sa valeur est comprise entre -1 et +1. Les valeurs les plus élevées sont associées à une forte densité de végétation et à une grande verdure des feuillages des plantes (NOAA, 2007). Le NDVI est négatif pour les nuages, l'eau et la neige puisqu'ils ont tous un indice de réflexion plus élevé dans le visible que dans le proche infrarouge. Le principe de cet indice se base sur le fait que la signature spectrale de la

végétation a un pic très marqué dans la partie proche infrarouge par rapport à la bande rouge. La normalisation effectuée par la somme des deux bandes du proche infrarouge et du rouge vise à réduire les effets d'éclairement (changements des conditions d'illumination, angle de vue) et de la pente (Bariou *et al.*, 1985).

La formule du NDVI est la suivante :

$$NDVI = \frac{R_{PIR} - R_{Rouge}}{R_{PIR} + R_{Rouge}} \quad \text{Équation 2}$$

Où :

- R_{PIR} : La réflectance d'un pixel dans le canal proche infrarouge,
- R_{Rouge} : La réflectance d'un pixel dans le canal rouge.

Et pour les capteurs MODIS et LANDSAT :

$$NDVI \approx \frac{MODIS(R_2 - R_1)}{MODIS(R_2 + R_1)} \approx \frac{LANDSAT\ TM(R_4 - R_3)}{LANDSAT\ TM(R_4 + R_3)} \quad \text{Équation 3}$$

Où :

- R_1 : La réflectance du canal rouge (0,62-0,67 μm) de MODIS,
- R_2 : La réflectance du canal infrarouge (0,84-0,87 μm) de MODIS,
- R_3 : La réflectance du canal vert (0,52-0,60 μm) de LANDSAT,
- R_4 : La réflectance du canal Rouge (0,63-0,68 μm) de LANDSAT.

Le *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) est un indice qui a été développé par Crane et Anderson en 1984 dans le cadre du Programme de Satellite Météorologique du Département américain de la Défense (*Defense Meteorological Satellite Program* : DMSP). Il est analogue au NDVI (Tucker, 1986). Il est partiellement normalisé à l'effet atmosphérique, insensible aux conditions d'illumination et indépendant de la réflectance d'une bande en particulier (Salmonson *et al.*, 2006). Il permet de distinguer la neige ainsi que la glace des sols, des roches ainsi que des nuages, surtout celles de type cumulus (Dozier *et al.*, 1989, Hall *et al.*, 1995). Des études ont démontré qu'il est efficace en terrain accidenté. Son équation est représentée ci-dessous.

$$NDSI = \frac{R_{Rouge} - R_{SWIR}}{R_{Rouge} + R_{SWIR}} \quad \text{Équation 4}$$

Pour le satellite TERRA l'équation du NDSI est la suivante :

$$NDSI(Terra) \approx \frac{MODIS(R_4 - R_6)}{MODIS(R_4 + R_6)} \approx \frac{LANDSAT\ TM(R_2 - R_5)}{LANDSAT\ TM(R_2 + R_5)} \quad \text{Équation 5}$$

Où :

R_4 : La réflectance du canal vert/jaune (0,54-0,56 μm) de MODIS,

R_6 : La réflectance du canal infrarouge (1,62-1,65 μm) de MODIS,

R_2 : La réflectance du canal bleu (0,45-0,51 μm) de LANDSAT,

R_5 : La réflectance du canal proche infrarouge (0,84-0,88 μm) de LANDSAT.

Pour le satellite AQUA à cause d'un problème de dysfonctionnement de la bande 6, le NDSI est calculé en se référant à la bande 7 (2,10-2,15 μm) (Salmonson et Appel., 2003) (Équation 6). En fait, la corrélation entre les bandes 6 et 7 est élevée (Salomonson *et al.*, 2006).

$$NDSI(Aqua) \approx \frac{MODIS(R_4 - R_7)}{MODIS(R_4 + R_7)} \approx \frac{LANDSAT\ TM(R_2 - R_5)}{LANDSAT\ TM(R_2 + R_5)} \quad \text{Équation 6}$$

Où :

R_4 : La réflectance du canal vert/jaune (0,54-0,56 μm) de MODIS,

R_7 : La réflectance du canal infrarouge (2,10-2,15 μm) de MODIS,

R_2 : La réflectance du canal bleu (0,45-0,51 μm) de LANDSAT,

R_5 : La réflectance du canal proche infrarouge (0,84-0,88 μm) de LANDSAT.

Depuis le milieu des années 80, l'algorithme SNOWMAP a été utilisé pour cartographier la neige avec des données LANDSAT à l'échelle de bassins versants (Dozier, 1989). Par la suite, il a été amélioré en incorporant l'indice de végétation (NDVI) pour la détection de la neige en forêt dense, ce qui n'était pas possible avec l'algorithme original. Selon des études statistiques, en milieu ouvert (prairies) lorsque le ciel est clair et que le pixel est saturé en neige (100% de neige), l'erreur de classification est inférieure à 1%. Dans les zones forestières, l'erreur est plus élevée (Hall *et al.*, 2001, 2007 et 2010). Mensuellement, l'erreur a été estimée à des valeurs comprises entre 5 et 10% dans les forêts de l'Hémisphère Nord alors qu'il ne dépasse pas 8% en ciel clair (Klein *et al.*, 1998). SNOWMAP a été appliqué par la suite sur les données issues du capteur MODIS (Hall *et al.*, 1995), ce qui offre un produit journalier du couvert nival de 500 m de résolution. Ce dernier fournit aussi des produits hebdomadaires du couvert nival. La figure 2.3 résume le principe de l'algorithme SNOWMAP.

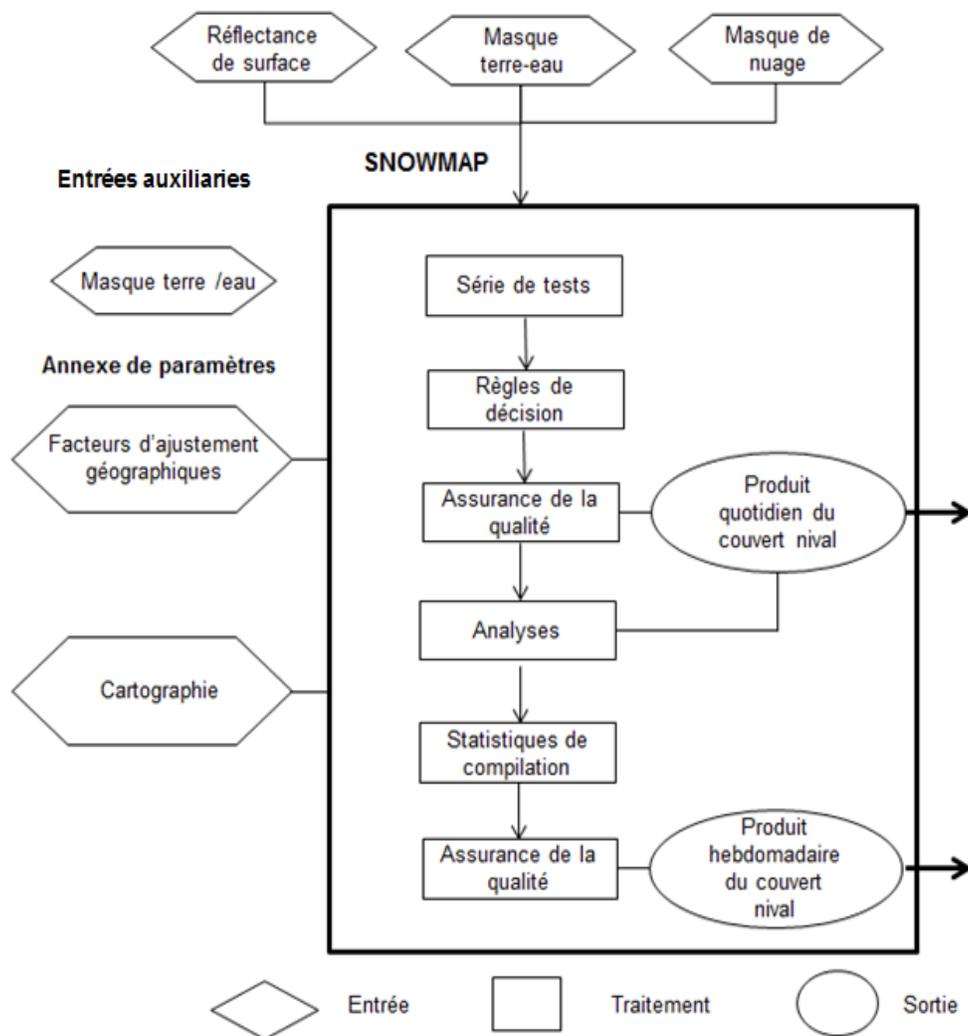


Figure 2.3. Diagramme conceptuel de l'algorithme SNOWMAP (Hall *et al.*, 1995).

En milieu ouvert, un pixel couvert par 50% et plus de neige et qui a un NDSI supérieur à 0,4 est classifié *a priori* comme neige (Klein *et al.*, 1998, Hall *et al.*, 2001) (Figure 2.4). Ce seuil a été vérifié après une comparaison faite entre une carte élaborée le 10 mai 1992 par l'algorithme SNOWMAP à partir d'une scène de Sierra Nevadas et une carte du couvert neigeux obtenue par le travail de Rosenthal *et al.* (1996).

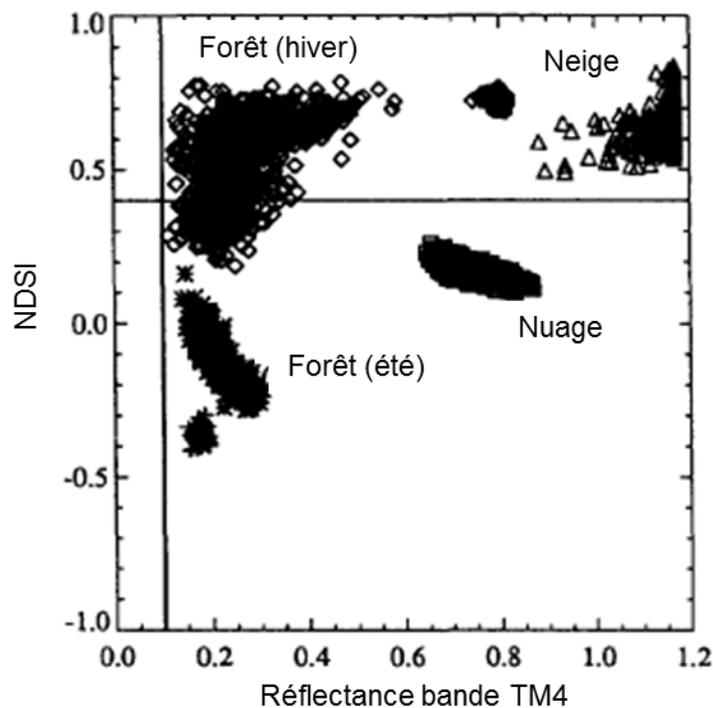


Figure 2.4. Zones de décision de l'algorithme SNOWMAP (Hall *et al.*, 1995).

Sur le plan pratique, cette condition n'est pas toujours vérifiée. En fait, l'eau peut avoir aussi un NDSI supérieur à 0,4. La confusion possible entre l'eau et la neige a été résolue en testant la réflectance de la bande proche infrarouge (bande 4 de LANDSAT ou 2 de MODIS). Si elle est inférieure à 11%, le pixel est classifié comme eau. Mais avant de prendre la décision finale et classifier le pixel comme neige, un recours à la réflectance de la bande verte (bande 4 MODIS ou bande 2 LANDSAT) est adopté afin d'empêcher les pixels ayant une basse réflectance dans le visible d'être classifiés comme neige (Klein *et al.*, 1998). En fait, si sa réflectance est inférieure à 10%, le pixel est classifié comme non-neige. Donc un pixel donné est classifié comme neige lorsque la réflectance des deux bandes est supérieure aux seuils (bande 4 LANDSAT ou 2 MODIS supérieure à 11% et bande 4 MODIS ou 2 LANDSAT supérieure à 10%) et le NDSI est supérieur à 0,4 (Figure 2.4, Figure 2.5, Figure 2.6 et Tableau 2.10).

En milieu fermé (forêts), une combinaison de l'indice normalisé de neige et de la végétation est appliquée et le pixel est classifié comme neige s'il satisfait aux équations indiquées dans le tableau 2.10. De plus, les bandes thermiques 31 (10,78-11,28 μm) et 32 (11,77-12,27 μm) de MODIS ont été aussi utilisées afin de mieux estimer la surface neigeuse dans les forêts (Key *et al.*, 1997). En fait, les bandes 31 et 32 représentent une fenêtre atmosphérique où une partie

faible de l'émission est absorbée par l'atmosphère. En se basant sur ces deux bandes, il était possible d'éliminer de 93% à 98% de la neige faussement détectée (Klein *et al.*, 1998).

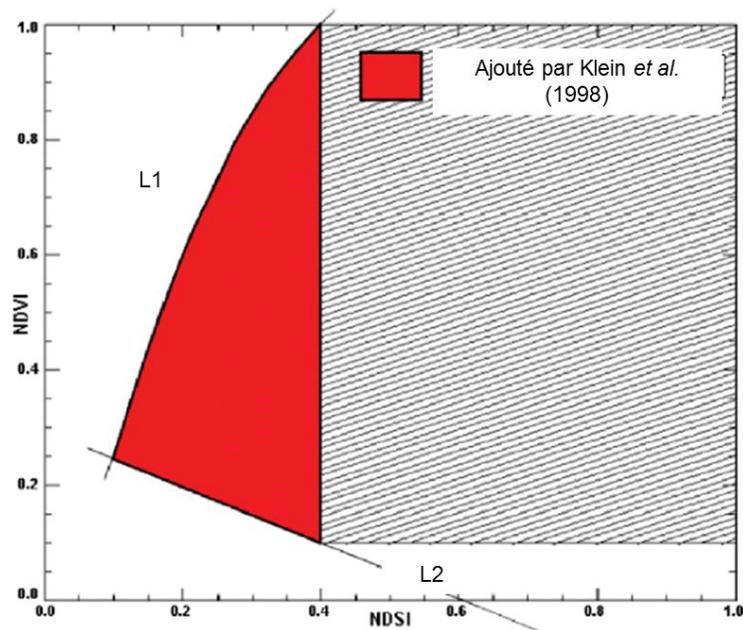


Figure 2.5. Seuils utilisés pour la détection du couvert nival en milieu ouvert (partie hachurée) et en milieu fermé (partie rouge) (Klein *et al.*, 1998).

Tableau 2.10. Seuils utilisés par l'algorithme SNOWMAP pour détecter la neige par le capteur MODIS.

Zone d'étude	Seuil	Valeur
Zone non forestière	NDSI	0,4
	Réflectance de la bande infrarouge MODIS (bande 2 : 0,84-0,87 µm)	0,11
	ou de la bande verte MODIS (bande 4)	
Zone forestière	L1*	$NDSI = (-4,78 * NDVI^2) + (4,9 * NDVI) - 0,198$
	NDVI et NDSI	$NDSI = (-0,5 * NDVI) + 0,3$
	L2	0,11
	Réflectance de la bande infrarouge MODIS (bande 2) ou de la bande verte MODIS (bande 4)	0,1

*Les paramètres ont été actualisée en communiquant personnellement avec George Riggs en 2014.

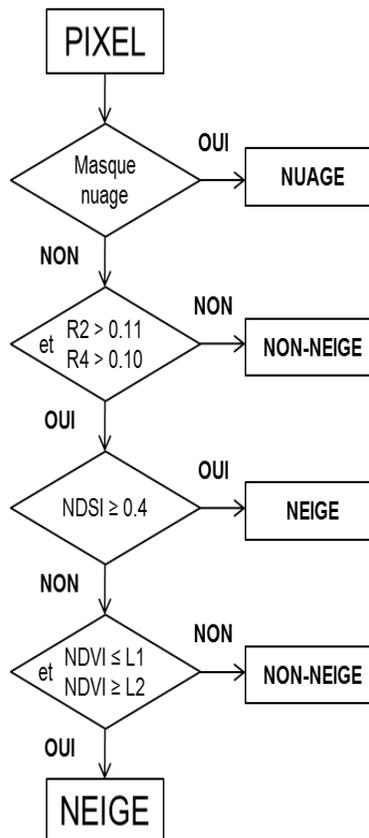


Figure 2.6. Organigramme de l'algorithme SNOWMAP (Hall *et al.*, 1995).

En Europe Centrale (42° N-5° N, 5° E-30° E) , dans le but de cartographier la neige à 250 m de résolution, Notarnicola *et al.* (2013) ont développé un nouvel algorithme. Des produits issus des capteurs TERRA et AQUA de MODIS sont utilisés. Il s'agit des produits :

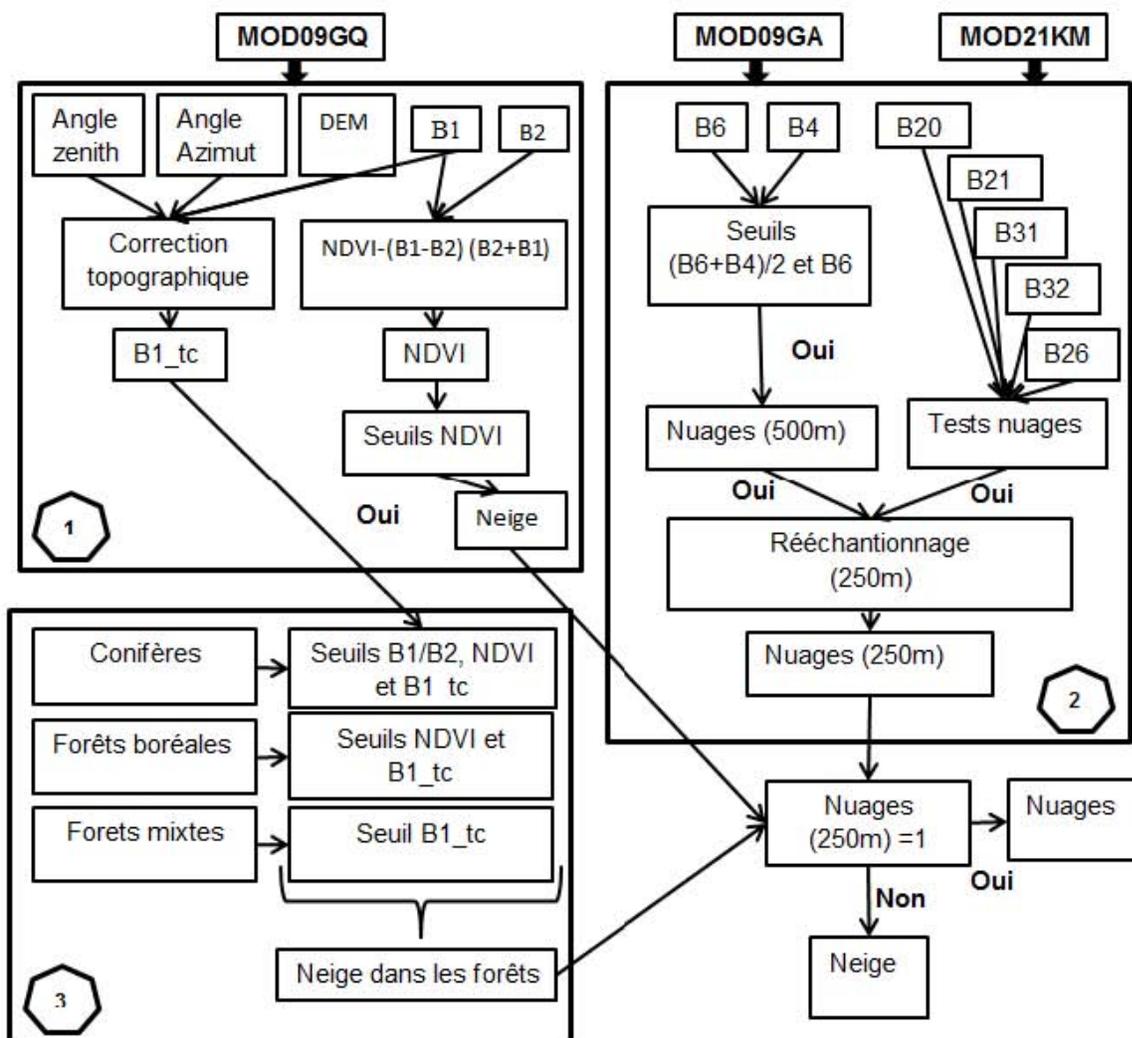
- MOD09GQ-MYD09GQ et MOD09GA-MYD09GA (TERRA-AQUA): produits de réflectance de surface à 250 m (MOD09GQ-MYD09GQ) et à 500 m (MOD09GA-MOD09GA) de résolution spatiale. Ce sont des produits à 7 bandes spectrales : bande 1 (0,620-0,670 μm), 2 (0,841-0,876 μm), 3 (0,459-0,479 μm), 4 (0,545-0,565 μm), 5(1,230-1,250 μm), 6 (1,628-1,652 μm), et 7 (2,105-2,155 μm). L'algorithme utilise les deux premières bandes de 250 m de résolution pour détecter la neige alors que pour les nuages se sont les bandes 4 et 6 de 500 m de résolution.
- MOD021KM-MYD021KM (TERRA-AQUA) : réflectance des nuages à 1 km de résolution spatiale. Les bandes utilisées dans l'algorithme sont : 20 (3,660-3,840 μm), 21 (3,929-3,989 μm), 26(1,360-1,390 μm), 31(10,780 -11,280 μm) et 32 (11,770-12,270 μm).

- MOD03-MYD03 (TERRA-AQUA) : Données de géolocalisation.

L'algorithme de Notarnicola *et al.* (2013) comporte trois étapes. La première s'intéresse aux *inputs* et leurs prétraitements (re-projection et calibration). La deuxième classe la zone d'étude en neige, non neige ou nuage en utilisant les données issues des capteurs AQUA et TERRA. Enfin, la troisième combine les résultats de classification des deux capteurs.

Ici, il faut rappeler que seulement la bande rouge et proche infrarouge du produit MOD09GQ de MODIS ont 250 m de résolution spatiale. Dans la zone ouverte, l'algorithme se base juste sur la réflectance de ces deux bandes et l'indice normalisé de végétation pour classer un pixel donné comme neige. Pour la zone forestière, une étude supplémentaire de la variation mensuelle (septembre-mai) de la réflectance du couvert nival avec la végétation (conifères, forêts boréales et forêts mixtes) est développée. En se basant sur cette étude, des seuils sensibles à la couverture végétale sont définis. De plus, un rapport entre la réflectance de l'image MODIS à classer et une autre de référence sans neige (pendant l'été) et prise pendant le jour est calculé. Pour le masque des nuages, les *inputs* sont les deux produits MOD21KM (bandes 20, 21, 3 et 26) et MOD09GA (bandes 6 et 4) ayant 1 km de résolution lesquels vont subir un ré-échantillonnage à 250 m. La figure 2.7 présente une vue d'ensemble de l'algorithme de Notarnicola *et al.* (2013).

Malgré que cet algorithme ait comme but d'aboutir à une classification binaire neige/non neige, comme il est le cas de l'algorithme SNOWMAP (utilisé dans le présent projet), plusieurs points empêchent de l'appliquer à l'Est du Canada. En fait, seulement les deux premières bandes de produit MOD09GQ sont utilisées, ce qui augmentera à priori les erreurs de fausse classification. De plus, les seuils utilisés pour la zone forestière ne s'adaptent qu'aux caractéristiques de la végétation en Europe Centrale. Une application de l'algorithme de Notarnicola *et al.* (2013) à l'Est du Canada, nécessite donc un suivi de la variation du NDVI avec l'occupation de sol, hétérogène et très diversifiée, de la zone d'étude afin de définir de nouveaux seuils.



Où :



Classification neige milieu ouvert



Classification neige milieu fermé



Classification nuages

- B1 réflectance du canal 1 de MOD09GQ
- B2 réflectance du canal 2 de MOD09GQ
- B4 réflectance du canal 4 de MOD09GA
- B6 réflectance du canal 6 de MOD09GA
- B1_tc réflectance topographiquement corrigée (tc) du canal 1 de MOD09GQ
- B21, B22, réflectances des canaux 21, 22, 31, 32 et 26 de MOD21KM

Figure 2.7. Organigramme de l'algorithme de cartographie de la neige de Notarnicola *et al.*, (2013) (Notarnicola *et al.*, 2013).

2.2.3 Validation du produit de neige MODIS

Afin de valider les produits MODIS du couvert nival, des comparaisons MODIS-autres images satellitaires et MODIS-stations de mesure ont été appliquées (Bitner *et al.*, 2002, Bussieres *et al.*, 2002, Hall *et al.*, 2002, Klein *et al.*, 2003, Maurer *et al.*, 2003, Drusch *et al.*, 2004, Simic *et al.*, 2004, Brubaker *et al.*, 2005, Zhou *et al.*, 2005, Ault *et al.*, 2006, Stroeve *et al.*, 2006, Hall *et al.*, 2007, Liang *et al.*, 2008, Wang *et al.*, 2009, Frei *et al.*, 2010, Gao *et al.*, 2010, Hall *et al.*, 2010, Notarnicola *et al.*, 2013).

Le tableau 2.11 résume les erreurs estimées dans les études de validation de la couverture de neige avec le produit MOD10A1. Ce tableau fournit des informations sur le nombre des sites de validation dans les différentes zones d'étude. Selon les résultats obtenus, l'erreur de classification du produit MOD10A1 dépend des caractéristiques du territoire à étudier. Par exemple, le taux d'erreur obtenu variait de 1,5% pour les jours clairs en Xinjiang Chine face à 32,6% au bassin versant de Quesnel au Québec. Selon les résultats mentionnés, ce taux d'erreur élevé au Québec encourage la poursuite de travaux supplémentaires de cartographie du couvert nival sensibles aux caractéristiques particulière de cette zone d'étude (Simic *et al.*, 2004).

Tableau 2.11. Résultats des études de validation des différentes versions du produit MOD10A1 avec des images Landsat (Kristi *et al.*, 2012)

Étude	Région	Période d'étude	Erreur (%)	Critères	Sites utilisés
Maurer <i>et al.</i> (2003)	Bassin versant de Colombia Bassin versant de Missouri	Novembre 2000- Avril 2001	19 19 26 31	Conditions sans nuages Pixels forestiers Conditions sans nuages Pixels forestiers	762 sites SNOTEL* et 1330 sites COOP**
Klein et Baenett. (2003)	Grande Bassin d'Upper Rio	13 octobre 2000-mars 2001 1 octobre 2000 9 juin 2002	4.4 25.5 11.2 14.8	Neiges mixtes Neiges faussement détectées Neiges mixtes Neiges faussement détectées	15 sites SNOTEL
Zhou <i>et al.</i> (2005)	Grande Bassin d'Upper Rio	2000-2004	3.2-17.4 0-7.5	Neiges mixtes Neiges faussement détectées	4 sites SNOTEL
Simic <i>et al.</i> (2004)	Canada	Janvier Juin 2001	7 10-20 1-10 2-7 1-3 10-18	Conditions sans nuages Forêts claires à feuilles persistantes Forêts à feuilles caduques Herbes dominantes (claires) Neiges mixtes Neiges faussement détectées	2000 sites de profondeur de neige Canadiens
Parajka et Bloschl. (2006)	Australie	2000-2005	5.3 15.8 3.5	Tous les jours clairs Neiges mixtes Neiges faussement détectées	754 sites de profondeur de neige
Ling <i>et al.</i> (2008a)	Xinjiang, Chine	2002-2005	13.3	Tous les jours clairs	20 sites de profondeur
Ling <i>et al.</i> (2008 b)	Xinjiang, Chine	2001-2005	1.5	Tous les jours clairs	20 sites de profondeur
Dong et Pters-Lidard. (2010)	Californie, Nevada et Colorado	2000-2005	23.8-54.8 5.7 <1.4 20 5 55 17 7	<i>In situ</i> profondeur de la neige 1-2cm <i>In situ</i> profondeur de la neige 3cm <i>In situ</i> profondeur >4 cm Neiges mixtes (tous) Neiges faussement détectées (tous) T _{mp} > 0°C, 5 cm mélangées 5°C < T _{mp} < 0°C T _{mp} < -5°C; 5 cm (mélangées)	245 sites SNOTEL et US.HCN
Tong <i>et al.</i> (2009)	Bassin versant de Quesnel, Québec	2000-2007	9.23-32.65	Tous les jours clairs	4 sites de profondeur
Gao <i>et al.</i> (2010)	Pacifique Nord-Ouest, US	2006-2008	9.6	Tous les jours clairs	244 sites SNOTEL

3. Méthodologie

Ce chapitre présente la zone d'étude, la base de données utilisée, constituée des images MODIS et LANDSAT et du produit MOD101A1 du couvert nival, et de leurs prétraitements respectifs. Une explication de la méthodologie adoptée sera développée autour des points suivants :

- 1) Désagrégation des images MODIS 500 m à 250 m,
- 2) Validation des cartes de neige obtenues à partir des images MODIS désagrégées à 250 m à l'aide des images LANDSAT à 30 m de résolution d'une part et du produit MOD10A1 du couvert nival (500 m de résolution), d'autre part.

3.1 Zone d'étude

Le territoire d'étude est l'Est de Canada comprenant le Québec et les provinces Maritimes (Nouveau Brunswick et Nouvelle-Écosse et l'Île-du-Prince-Édouard) (Figure 3.1). Cette région est caractérisée par une distribution spatiale non-optimale du réseau d'observation du couvert nival et une variabilité météorologique, pédologique, temporelle et spatiale du couvert nival (épaisseur, étendue, etc.).

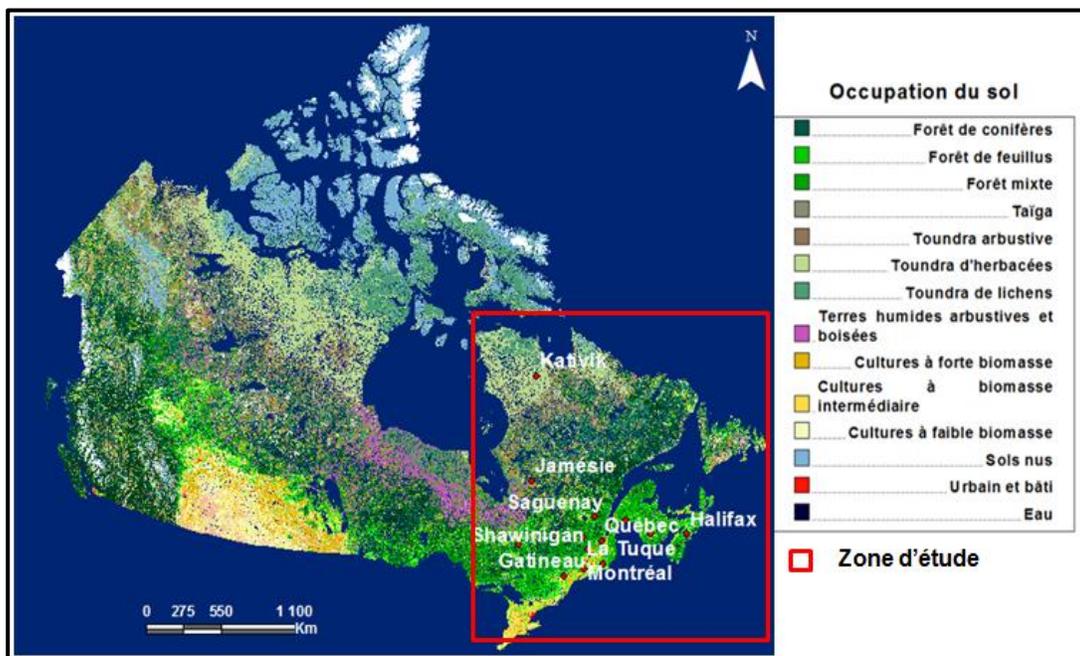


Figure 3.1. Localisation de la zone d'étude : l'Est du Canada

L'enregistrement des données climatiques de l'Est du Canada est assuré par un réseau de 139 stations météorologiques auxquelles environ 150 stations seront ajoutées (Environnement Canada, 2012). La répartition spatiale des stations météorologiques à l'Est du Canada montre une distribution inégale. Le territoire est caractérisé par une concentration des stations dans les régions urbanisées et rurales du sud du Québec et de l'Ontario. Alors que dans la partie nord du Québec et de la province de Terre-Neuve-et-Labrador, les stations de mesure sont très limitées (Figure 3.2). De plus, le Canada possède aussi de vastes réseaux de mesure *in situ* de la hauteur de neige et des relevés d'enneigement. Ces réseaux sont concentrés aux latitudes méridionales et aux faibles élévations (Brown *et al.*, 2000). Par conséquent, la banque des données obtenues par les stations de mesure disponibles actuellement est insuffisante pour un suivi continu de l'étendue spatiale de la neige contrairement aux images satellitaires qui couvrent une grande surface terrestre et qui ont une fréquence courte et régulière. La solution est d'utiliser les informations issues des capteurs satellitaires.

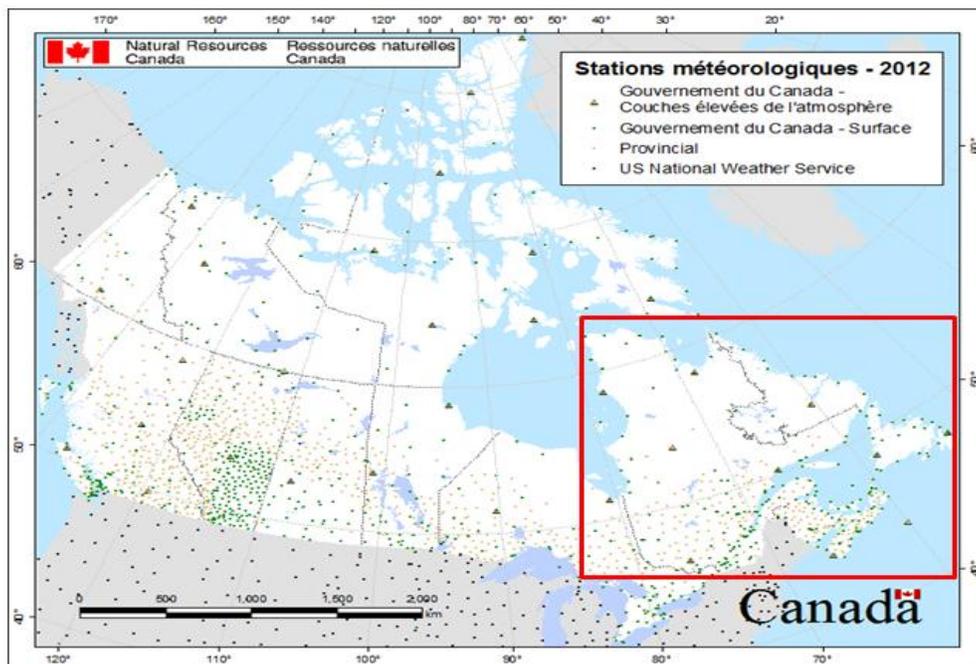


Figure 3.2. Répartition des stations météorologiques au Canada en activité pendant l'année 2012 (Ressources naturelles Canada, 2012).

Selon la classification climatique de l'année 2001, élaborée par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), l'Est du Canada est divisé en 15 régimes climatiques (Figure 3.3). Cette classification a été réalisée en utilisant un modèle numérique d'altitude (MNA) à 1 :250 000 et en superposant neuf variables climatiques sur chaque pixel : température annuelle T^0 moyenne, amplitude journalière moyenne des températures,

température moyenne des trois mois les plus chauds, température moyenne des trois mois les plus froids, précipitation annuelle totale en millimètres, précipitation en millimètres des trois mois les plus chauds, précipitation en millimètres des trois mois les plus froids, durée annuelle moyenne de la saison de croissance en jours et le nombre annuel de degrés-jours de croissance. Ces données matricielles ont subi une classification agglomérante non hiérarchique. Cette méthode a permis de choisir les attributs en les pondérant afin de définir le nombre de classes.

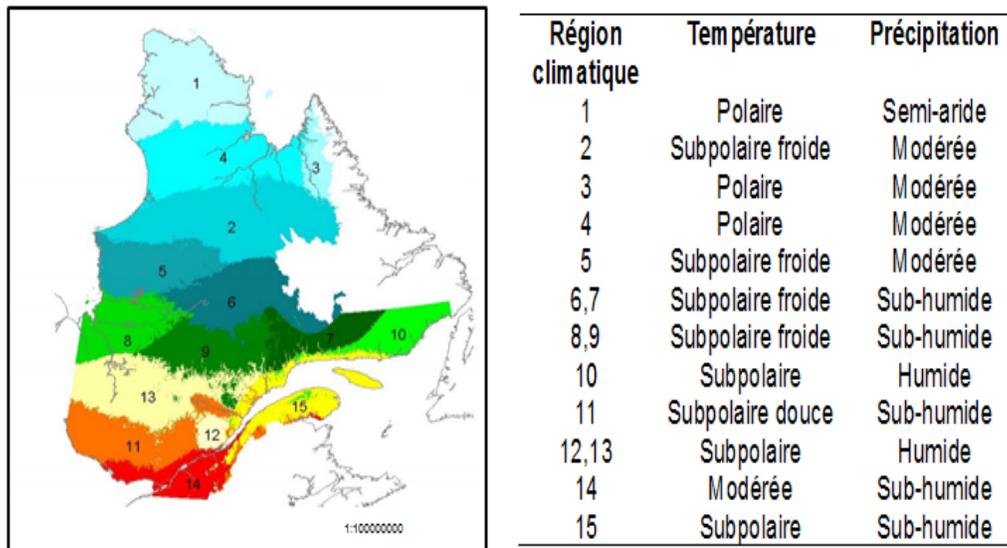


Figure 3.3. Classification climatique de Québec selon le projet de NATGRID élaboré pendant l'année 2001. La légende est représentée dans le tableau (Environnement Canada, 2001).

L'occupation du sol est l'un des principaux paramètres affectant la distribution du couvert nival. Il s'avère que celle-ci est très diversifiée dans l'Est du Canada. La zone d'étude correspond à une mosaïque de toundra, de forêts denses (de conifères, mixtes, de feuillus), de zones agricoles et urbaines. La forêt boréale est considérée comme étant l'une des principales sources d'erreur de l'algorithme SNOWMAP (Foster *et al.*, 1991). Cette zone forestière sera utile pour évaluer la différence de précision par l'application de l'algorithme SNOWMAP sur l'Est du Canada avec des images MODIS désagrégées à 250 m par rapport à celle du produit MOD10A1. Pour ce projet, les cartes d'occupation de sol offerte par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) de l'année 2000 à 2011 sont utilisées lors de la validation (Figure 3.1).

3.2 Imagerie satellitaire, produits utilisés et leur prétraitements

Afin de suivre le couvert nival sur l'Est du Canada, une série historique d'images couvrant les années 2000 à 2013 a été construite. Deux périodes du cycle hydrologique ont été retenues : la première s'étendant du 1^{er} octobre au 31 décembre de chaque année et la seconde du 16 mars au 31 mai. Il s'agit respectivement de la période d'établissement et de fonte de la neige pour lesquelles un suivi spatio-temporel est nécessaire pour plusieurs raisons. En fait, la période de fonte intervient dans la gestion des barrages (débit entrant, quantité des sédiments apportée par les ruissellements, etc.) et représente un indicateur direct de l'équivalent en eau de la neige en fin d'hiver (Royer *et al.*, 2010).

3.2.1 Images LANDSAT à 30 m

Le capteur LANDSAT a été lancé en 1982. Il s'agit d'un capteur à sept bandes spectrales (trois dans le visible et quatre dans l'infrarouge (Tableau 3.1). La bande 6, dans l'infrarouge thermique, est utilisée pour suivre la température de surface.

Tableau 3.1. Caractéristiques spatiales et spectrales du capteur LANDSAT-TM5 (Yi Luo *et al.*, 2008)

Bande	Résolution	Longueur d'onde (µm)	Description
1	30m	0,45 à 0,52	Bleu
2	30m	0,54 à 0,61	Vert
3	30m	0,63 à 0,69	Rouge
4	30m	0,78 à 0,90	Proche infrarouge
5	30m	1,55 à 1,75	Infrarouge à ondes courtes
6	120m	10,45 à 12,05	Infrarouge thermique
7	30m	2,09 à 2,35	Infrarouge à ondes courtes

Sur le plan pratique, les images LANDSAT ne sont pas fréquemment utilisées pour suivre l'évolution du couvert nival quotidiennement mais plutôt pour les études de validation. En fait, le temps de revisite est de l'ordre de 16 jours. De plus, son potentiel de détection des nuages est faible (Dozier, 1989, Hall *et al.*, 1995).

Pour valider les applications de l'algorithme SNOWMAP sur l'Est du Canada dans ses deux versions (cartes de neige à 500 m et 250 m), 11 images LANDSAT ont été sélectionnées (Figure 3.4, Tableau 3.2). Le choix a été fait en fonction de l'occupation du sol, la localisation géographique et la couverture nuageuse. Plus précisément, les images ont été téléchargées afin qu'elles couvrent une diversité d'occupation du sol (milieu fermé, zone de transition et milieu

ouvert) et réparties sur tout le territoire et qu'elles aient une couverture nuageuse inférieure à 10% pour minimiser les erreurs de discrimination neige-nuages.

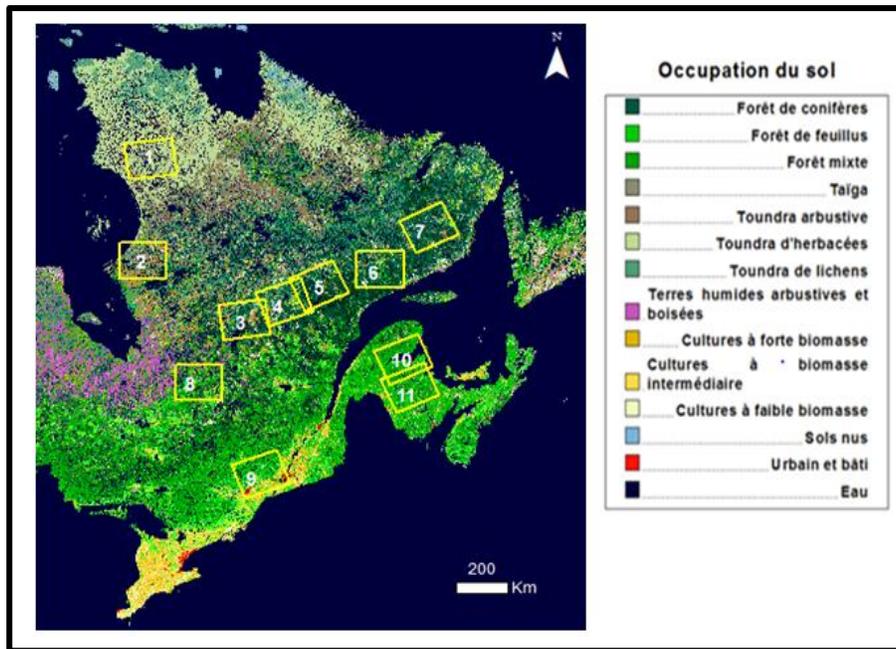


Figure 3.4. Capture des images LANDSAT de 30 m de résolution utilisées pour l'étude de validation

Tableau 3.2. Localisation des tuiles LANDSAT utilisées pour la validation de l'application de l'algorithme SNOWMAP- 250 m

Tuile 1	Date	Localisation	
		Path	Row
1	29-05-2005	19	19
2	26-11-2001	19	22
	13-05-2005		
	18-04-2006		
3	28-05-2008	15	24
	12-05-2009		
4	26-05-2005	14	24
5	25-05-2004	12	24
6	19-11-2006	16	22
7	19-11-2009	8	24
8	26-11-2006	17	25
9	23-04-2007	13	25
10	06-05-2009	10	26
11	12-05-2009	10	27

Les capteurs installés à bord des satellites mesurent le rayonnement réfléchi aussi bien par la terre que par l'atmosphère. Même en ciel clair, le signal radiométrique dépend de la réflectance de la surface terrestre et des effets atmosphériques durant les deux trajets du rayonnement réfléchi (de la surface vers le capteur) et émis (du soleil vers la terre). Les gaz et les aérosols, les deux constituants majeurs de l'atmosphère, interviennent par les deux processus d'absorption et de diffusion dans ses effets atmosphériques. De plus, lors de son trajet vers la surface terrestre, le rayonnement solaire est perturbé et n'éclaire pas toutes les cibles sous un même angle (Claude Kergomard, 2000). Au cours des dernières années, plusieurs études ont été développées dans le but d'améliorer la qualité des images satellitaires obtenues. Ces études se sont orientées dans l'amélioration des techniques de correction et dans la conception des capteurs. Pour les capteurs, l'objectif des travaux est de minimiser les sources de bruit (Leroy, 1990) et d'augmenter la résolution spatiale (des images LANDSAT MSS ayant 79 m à 10 m pour les images SPOT panchromatiques) et spectrale en utilisant les septro-imageurs comme AVRIS (Goetz *et al.*, 1985). D'une façon générale, la correction atmosphérique est toujours accompagnée d'un étalonnage de la réflectance qui tient compte des propriétés physiques des cibles (Claude Kergomard, 2000).

Les images LANDSAT téléchargées du site <http://glovis.usgs.gov/> sont déjà corrigées géométriquement. Elles ont subi par conséquent une correction atmosphérique qui vise à atténuer les effets atmosphériques (angle d'élévation du soleil, distance terre-soleil, calibration des capteurs et de la géométrie de visée, etc.).

Pour les images LANDSAT plusieurs techniques de correction atmosphérique ont été développées (Du *et al.*, 2001, 2002). Celle utilisée pour ce projet est la technique ATCOR 2 du logiciel PCI de GEOMATICA (http://www.pcigeomatics.com/pdf/Atmospheric_Correction.pdf), qui a pour avantage de se référer juste aux données disponibles dans les fichiers du téléchargement de l'image (fichier MLT.txt). Ces données sont les angles zénith (90-élévation du soleil en degré) et azimuth et les caractéristiques du milieu (mi-latitude-été, été subarctique, sec, été, tropical et US standard ou rural, urbain, désert et maritime). Pour vérifier sa performance, une cible (l'eau dans ce projet) dont l'intervalle de réflectance est connu a été choisie dans le but de suivre la réflectance avant et après la correction.

3.2.2 Produit MODIS du couvert nival (MOD10A1)

Une couverture neigeuse journalière est offerte par le *National Snow and Ice Center* (NSIDC). Il s'agit de produit MOD10A1 à 500 m de résolution spatiale qui cartographie la neige dans un quadrillage de 1200*1200 km. L'algorithme qui le génère a été amélioré de façon continue depuis son développement en 2000. Il s'agit de l'algorithme SNOWMAP présenté à la partie 2.2.2. Pour une validation de la cartographie de neige avec des images MODIS désagrégées à 250 m en milieu ouvert et en milieu fermé, le produit MOD10A1 du couvert neigeux journalier a été choisi afin d'évaluer la nouvelle application.

Un nouveau codage a été adopté pour ce produit. En fait, les nouvelles sorties (ou code) deviennent neige, non-neige et pas de données au lieu des 13 classes présentées par le codage original (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Correspondance des codes MODIS-250 m et MOD10A1 (National Snow and Ice Data, 2014).

Codage algorithme SNOWMAP-MODIS 250m	Codage MOD10A1
0-non neige	25-Non neige 37- Lacs 39-Océans
1-neige	100-Glace sur un lac 200-Neige
2-nuage	50-Nuages
3-Pas de données	0-Données manquantes 1-Pas de décision 11-Nuit 254-Détecteur saturé 255-Remplissage

3.2.3 Images MODIS désagrégées à 250 m

Les images MODIS désagrégées à 250 m ont été produites à partir des fichiers MODIS originaux de niveau 1 (level1B) de la collection 5 : a) MOD02QKM : données de 250 m de résolution, b) MOD02HKM : données de 500 m de résolution, c) MOD03 : données de référence géographique, données de 1 km de résolution. Ces données sont disponibles sur le portail de *Distributed Active Archive Center de la NASA* (NASA DAAC) : <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. Les images du début d'après-midi ont été privilégiées. En fait, pendant cette période, les images sont moins sensibles aux effets topographiques (Voigt *et al.*, 1999). Il est préférable aussi de

sélectionner des images MODIS avec une couverture nuageuse minimale afin de diminuer les erreurs de discrimination entre la neige et les nuages. Ces images sélectionnées sont l'objet des travaux d'évaluation de l'algorithme SNOWMAP appliqué sur l'Est du Canada à l'aide des images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m).

À part les deux premières bandes MODIS qui ont une résolution spatiale de 250 m. Les bandes 3 à 7 ont une résolution spatiale de 500 m (Tableau 3.4).

Tableau 3.4. Bandes MODIS désignées pour l'étude du sol (Yi Luo *et al.*, 2008).

Domaine d'utilisation	Bande (résolution du pixel)	Longueur d'onde (nm)	Domaine spectral de la bande
Limites terre/neige/aérosols	B1 (250 m)	620-670	VIS (rouge)
	B2 (250 m)	841-876	PIR
	B3 (500 m)	459-479	VIS (bleu)
Propriétés neiges/terre/aérosols	B4 (500 m)	545-565	VIS (vert)
	B5 (500 m)	1230-1250	PIR
	B6 (500 m)	1628-1652	IRCL
	B7 (500 m)	2105-2155	IRCL

Où :

VIS : La partie visible du spectre électromagnétique,

NIR : La partie proche infrarouge,

IRCL : La partie infrarouge à courtes longueurs d'ondes.

La résolution 500 m des canaux MODIS a été réduite à 250 m tel que décrit par Trishchenko *et al.* (2006). Ils ont par la suite été projetés en projection conique conforme de Lambert (CCL) selon la procédure développée par Khlopenkov *et al.* (2006). Les paramètres de la projection sont détaillés dans le Tableau 3.5 ci-dessous.

Tableau 3.5. Caractéristiques de projection du produit MODIS de niveau 3 (Trishchenko *et al.*, 2006).

Projection	Conique conforme de Lambert
1 ^{er} parallèle de référence	49
2 ^{eme} parallèle de référence	77
Longitude du méridien central	-95
Latitude de l'origine de la projection	0
Datum	NAD83
Ellipsoïde	GRS1980

Comme il est décrit par Trishchenko *et al.* (2006), le traitement des données MODIS suit les étapes ci-dessous :

Étape 1 : Transposition des données des canaux MODIS/Terra B3, B4, B5, B6, B7 de 500 m de résolution en une imagerie à résolution de 250 m par une régression adaptative et une normalisation radiométrique telles que décrites par Trishchenko *et al.* (2006), ce qui rend la résolution des canaux B3 à B7 conforme à celle de 250 m des canaux B1 et B2;

Étape 2 : Reprojection de tous les canaux B1 à B7 maintenant disponibles à une résolution spatiale de 250 m selon la projection conique conforme de Lambert par la méthode de recherche de gradients concourants mise au point par Khlopenkov *et al.* (2006);

Étape 3 : Application de l'algorithme d'identification de scènes pour produire : a) un masque des indices de ciel dégagé, de couverture nuageuse et d'ombres de nuages et b) une image composite de l'Est du Canada sous ciel dégagé.

En fait, à partir des deux premières bandes, une extraction des informations spectrales générales a été appliquée. Par la suite, à partir de l'allure générale des cibles et des données primaires de couverture du sol, une corrélation est établie entre le contenu des bandes spectrales 1 et 2 du produit MOD02QKM (250 m) d'une part et les cinq bandes spectrales MODIS à 500 m d'autre part (Trishchenko *et al.*, 2008). En se basant sur cette corrélation, les bandes 3, 4, 5, 6 et 7 ayant une résolution de 500 m ont été désagrégées à 250 m (Trishchenko *et al.*, 2006). Une méthode similaire a été appliquée pour créer par exemple les données MODIS de niveau 1 MOD02 (Guenther *et al.*, 1998, Xiong *et al.*, 2002). Les paramètres de régression ont été déterminés en se basant sur l'occupation de sol et les caractéristiques spectrales des cibles (végétation, désert, neige, eau et nuages) à partir du produit MOD02HKM (500 m). Enfin, les images intermédiaires à 250 m sont normalisées avec celles de 500 m afin de préserver les propriétés radiométriques des données originales. Le modèle de régression non-linéaire appliqué pour les cinq bandes MODIS 500 m (3, 4, 5, 6 et 7) est représenté par l'équation suivante :

$$B_{i(3-7)} = a_{0,i} + (a_{1,i}B_1 + a_{2,i}B_2)(1 + a_{3,i}NDVI + a_{4,i}NDVI^2) \quad \text{Équation 7}$$

Où :

$$NDVI = (B_2 + B_1)/(B_2 - B_1),$$

B_i : La réflectance observée pour la bande i ,

$a_{0,i}$, $a_{1,i}$, $a_{3,i}$ et $a_{4,i}$: Les coefficients de corrélation adoptés (Trishchenko *et al.*, 2006).

La procédure de désagrégation utilisée pour ce projet inclut un raffinement de la résolution accompagné d'une correction géométrique et atmosphérique (Figure 3.5).

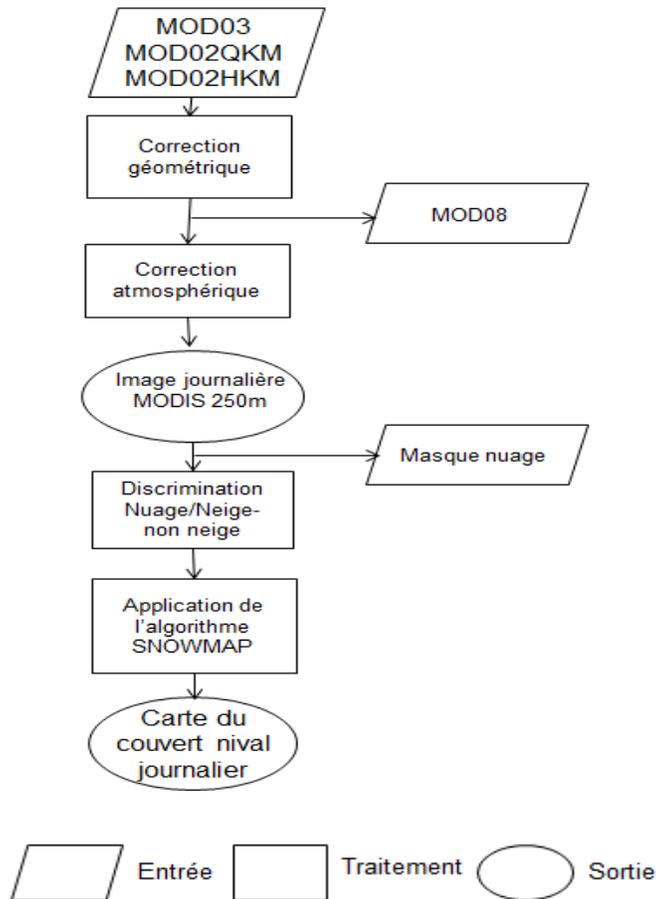


Figure 3.5. Vue d'ensemble des traitements réalisés pour la production des cartes du couvert nival à 250 m

Une validation de la procédure de désagrégation a été faite par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) avec des images LANDSAT à haute résolution. Les résultats montrent que la désagrégation ne change pas les propriétés radiométriques de l'image MODIS mais raffine seulement sa résolution spatiale (Trishchenko *et al.*, 2006).

3.2.4 Produit MODIS de nuages

Étant donné que l'algorithme SNOWMAP n'est pas conçu pour faire la détection des nuages, il est nécessaire d'avoir accès à un masque de nuages obtenu d'une autre source. Dans la plupart des cas, pour le capteur MODIS, c'est le produit MOD35 qui a été utilisé (Ackerman *et al.*, 1998). Ce produit a 1 km de résolution spatiale et donc un échantillonnage à 250 m sera obligatoire lors de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m. Il est disponible à une fréquence journalière sous une projection sinusoïdale répartie sur des tuiles de 10°*10° (lat/long) (Wolfe *et al.*, 1998).

Pour ce projet, le masque de nuages développé par le Centre Canadien de Télédétection est utilisé (Trishchenko *et al.*, 2008). Il s'agit d'un produit à 250 m de résolution spatiale. Il résulte de la désagrégation des quatre bandes optiques B₁, B₂, B₃ et B₆ du capteur MODIS selon des approches aussi bien spectrales que géométriques, ce qui s'adapte mieux aux caractéristiques spectrales des images MODIS désagrégées aussi à 250 m utilisées pour ce projet. En fait, le produit MOD35 du capteur MODIS a illustré des problèmes de distorsion lors de la projection en conique conforme de Lambert. Toutefois, il est à noter que le produit MOD35 couramment utilisé surestime le couvert nuageux (Ackerman *et al.*, 1998). De plus, une comparaison entre le produit standard MOD35 et le nouveau masque développé par le CCT a montré des avantages de ce nouveau masque par rapport à l'ancien (Yi Luo *et al.*, 2008). En fait, l'ancien produit ne détecte que les nuages clairs et épais alors que le nouveau détecte non seulement la présence des nuages mais aussi leurs ombres perturbant dans plusieurs cas l'information spectrale capté par le satellite.

3.2.5 Masque de nuages du capteur LANDSAT

Pour les images LANDSAT, le masque de nuages est obtenu par l'application de la correction atmosphérique ATCOR 2 du logiciel PCI (version 2013). Cette correction tient compte non seulement de la réflectance des cibles mais aussi des caractéristiques climatiques (milieu aride, semi-aride, tropicale, etc.) et géographique. De plus, lors du téléchargement des images LANDSAT, seulement celles ayant une couverture nuageuse inférieure à 10% ont été retenues, ce qui réduit le nombre d'images disponibles pour l'analyse.

3.3 Validation des cartes de neige de 250m et du produit MODIS, MOD10A1 du couvert nival

La validation de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m a été réalisée avec les images LANDSAT de 30 m de résolution ainsi que du produit MOD10A1 du couvert neigeux de 500 m. En fait, une grille de 250 m de résolution pour la première validation et de 500 m pour la deuxième a été construite. Chaque élément de la grille reçoit un identifiant qui lui est unique. Par la suite, ce "raster" est converti en polygone formé de n pixels (de 250 m ou de 500 m de résolution) par la fonction « Raster to Poly » de PCI Geomatica (version 2013). Par exemple, pour chaque pixel MODIS de 250 m, il y a n pixels LANDSAT ($n \pm 69$ pixels) classés comme neige, non neige, nuage ou pas de données. Ces grilles construites sont aussi appliquées sur les cartes d'occupation du sol du Centre Canadien de Télédétection (CCT) développées de l'année 2000 à l'année 2011. En fait, les images LANDSAT sont classifiées

selon leurs occupations de sol en milieu ouvert, de transition ou fermé dans le but de mieux évaluer la performance de l'algorithme SNOWMAP en fonction de l'occupation de sol. Le principe de la technique adoptée est expliqué par la figure 3.6.

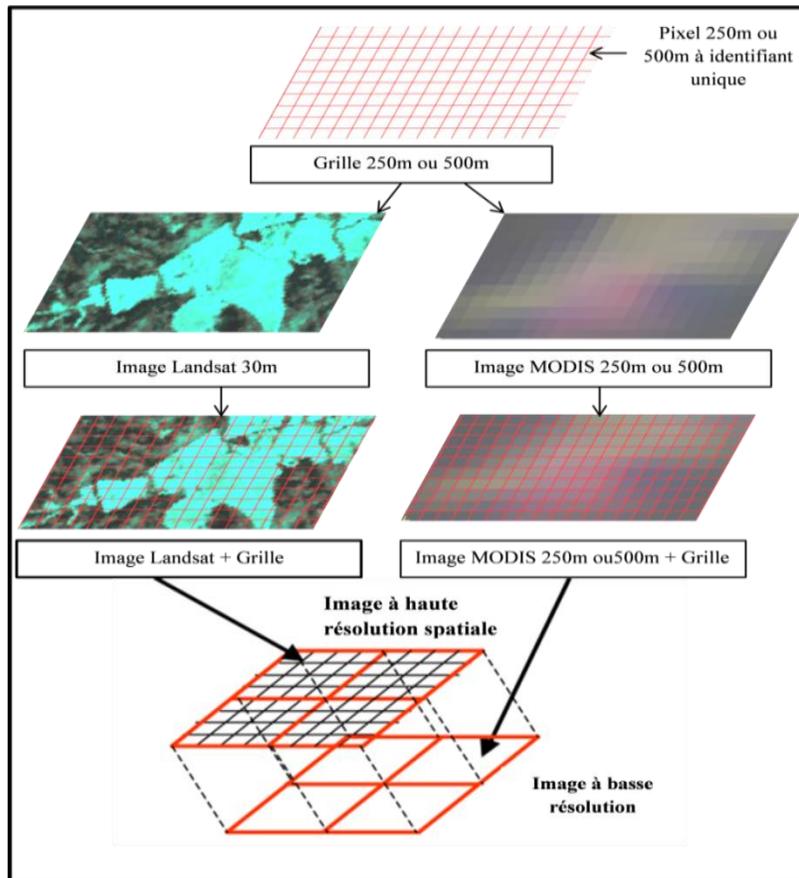


Figure 3.6. Schéma d'extraction des informations de classification à partir des images LANDSAT et MODIS.

Afin d'évaluer la performance de l'algorithme SNOWMAP appliqué sur des images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m) à l'Est du Canada par rapport au produit MOD10A1 du couvert nival, des matrices d'erreur ou de performance ont été utilisées. Il s'agit d'un tableau à double entrée : en lignes les résultats par rapport aux zones de références : les classes LANDSAT dans la présente étude et en colonnes les classes de test : classes MODIS soient les classes MOD10A1. Les sorties sont définies par quatre paramètres qui sont : l'erreur de commission, l'erreur d'omission, le taux de succès et l'indice Kappa (Tableau 3.6). Le taux de succès présente le rapport entre les pixels correctement classés d'une catégorie i donnée par rapport au nombre total de pixels de la même catégorie.

Selon le volume 3 du Précis de télédétection (Régis et Claude., 2001), les erreurs de commission et d'omission sont définies de la façon suivante :

- L'erreur de commission : le classificateur affecte un pixel dans une classe autre que celle à laquelle il appartient;
- L'erreur d'omission : le classificateur n'a pas su affecter à une classe connue des pixels pourtant issus des classes de test; ils sont donc considérés non classés et ils sont donc renvoyés directement vers l'autre classe.

Tableau 3.6. Exemple d'une matrice de confusion MODIS/LANDSAT.

		MODIS				
		Neige	Non neige	Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
LANDSAT	Neige	a	b	n1	b/n1	a/n1
	Non neige	c	d	n2	c/n2	d/n2
	Total	n3	n4	N	****	****
	Erreur de commission (%)	c/n3	b/n4	****	****	****
	Taux de succès (%)	a/n3	d/n4	****	****	****
	Succès global (%)	****	****	****	****	(a + d)/N
	Indice Kappa	****	****	****	****	$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c}$

Où :

a : Pixels de la classe neige correctement classés,

b : Pixels LANDSAT classés comme neige mais affectés de manière erronée à la classe non neige selon les données issues du capteur MODIS,

c : Pixels LANDSAT classés comme non neige mais affectés de manière erronée à la classe neige selon les données issues du capteur MODIS,

d : Pixels de la classe non neige correctement classés,

n1 : Total des pixels LANDSAT classés comme neige,

n2 : Total des pixels LANDSAT classés comme non neige,

n3 : Total des pixels MODIS classés comme neige,

n4 : Total des pixels MODIS classés comme non neige,

N : Total des pixels échantillonnés, toute classe confondue,

*** : Pas de données.

L'indice Kappa (k) est l'indice le plus connu pour l'évaluation d'une classification dirigée indépendamment de l'échantillonnage. Ces valeurs varient entre 0 et 1. Pour 0, il s'agit d'une classification qui n'apporte aucun gain par rapport à la classification aléatoire alors que 1 signifie le cas d'une classification parfaite. La formule de l'indice Kappa est la suivante (Stehman *et al.*, 1998, Jensen, 2005) :

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad \text{Équation 8}$$

Où :

$$P_c = \frac{n_1 * n_3 + n_2 * n_4}{N^2} \text{ et } P_0 = \frac{a+d}{N} , \quad \text{Équations 9 et 10}$$

P_c : Proportion d'accord observée,

P_0 : Proportion d'accord aléatoire.

4. Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m) à l'Est du Canada (Québec et les provinces Maritimes). La section 4.1 présente quelques exemples des cartes de neige obtenues pour les saisons printanière et automnale. Par la suite, la section 4.2 présente les résultats obtenus lors de la nouvelle application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m dans des occupations de sol différentes (milieu ouvert, zone de transition et milieu fermé), à l'automne et au printemps. Enfin, pour répondre aux objectifs définis pour ce projet, une comparaison entre la performance et la précision de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur le produit MOD10A1 et sur les images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m) est présentée dans la partie 4.3.

4.1 Cartes de neige

L'algorithme SNOWMAP est un algorithme binaire qui détecte la présence ou l'absence de la neige après l'utilisation d'un masque de nuages déjà obtenu par une autre source. Pour ce projet, l'algorithme développé par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) est utilisé pour développer le masque de nuages (Yi Luo *et al.*, 2008).

L'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m (SNOWMAP-250 m) à l'Est du Canada s'intéresse aux deux périodes d'établissement (saison automnale) et de fonte (saison printanière) du couvert nival. Les cartes présentées dans les figures 4.1 et 4.2 illustrent le suivi de l'étendue spatiale de la neige durant l'année 2006. Pour le printemps, les dates de 20, 28 avril et 1^{er} mai sont choisies alors que pour l'automne, il s'agit de 14, 30 octobre et 26 décembre. Ces figures présentent les images MODIS brutes désagrégées à 250 m de résolution et les résultats de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m. Les images brutes sont présentées avec les bandes 1 (rouge : 620-670 nm), 2 (proche infrarouge : 841-876 nm) et 3 (bleu : 459-479 nm). L'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m détecte deux classes. Il s'agit de la neige (en blanc) et de la non-neige (en vert). Pour ces figures, le masque de nuages est coloré en jaune. On constate que les nuages occupent une grande superficie des cartes pendant la saison automnale (figure 4.2).

Visuellement, l'algorithme SNOWMAP arrive à bien identifier la présence ou l'absence du couvert nival. En fait, l'eau (lacs et rivières) présentée en bleu très foncé dans l'image brute MODIS désagrégée à 250 m est classifiée comme non neige de même que les zones végétales et urbaines colorées en vert dans l'image brute. Ces résultats ne donnent pas une idée très précise sur les erreurs de classification observées surtout dans les zones de transition (milieu fermé vers milieu ouvert ou zone de hautes altitudes vers terres basses). Selon l'étude de Doutréleau (2011), les erreurs possibles lors de l'application de l'algorithme SNOWMAP se répartissent en deux catégories :

- 1) Classification des nuages comme neige,
- 2) Classification de neige comme non neige (et vice-versa),

La fausse classification entre neige et non neige est due au fait que la décision de la classification d'un pixel donné est liée à son degré de saturation en neige (c'est-à-dire la proportion de neige que contient un pixel échantillonné) ainsi que son occupation du sol. Selon la littérature, en ce qui concerne l'algorithme SNOWMAP, trois composantes interviennent lors de la classification binaire neige - non neige:

- 1) La réflectance des bandes 4 et 2 MODIS représentant respectivement la bande verte et la bande proche infrarouge du spectre électromagnétique,
- 2) L'indice normalisé de végétation : le NDVI,
- 3) L'indice normalisé de neige : le NDSI.

Dans les forêts, la végétation intercepte une grande partie du rayonnement électromagnétique émis par les capteurs satellitaires. Donc la majeure partie du rayonnement réfléchi provient de la végétation et non pas du sol (Hall *et al.*, 2001, Shimamura *et al.*, 2006). Bien que SNOWMAP combine les deux indices normalisés de neige et de végétation, les erreurs de classification restent élevées. Ces aspects sont expliqués plus en détails par des calculs statistiques appliqués lors de l'étude de validation avec des images LANDSAT de haute résolution présentée dans la partie 4.2.

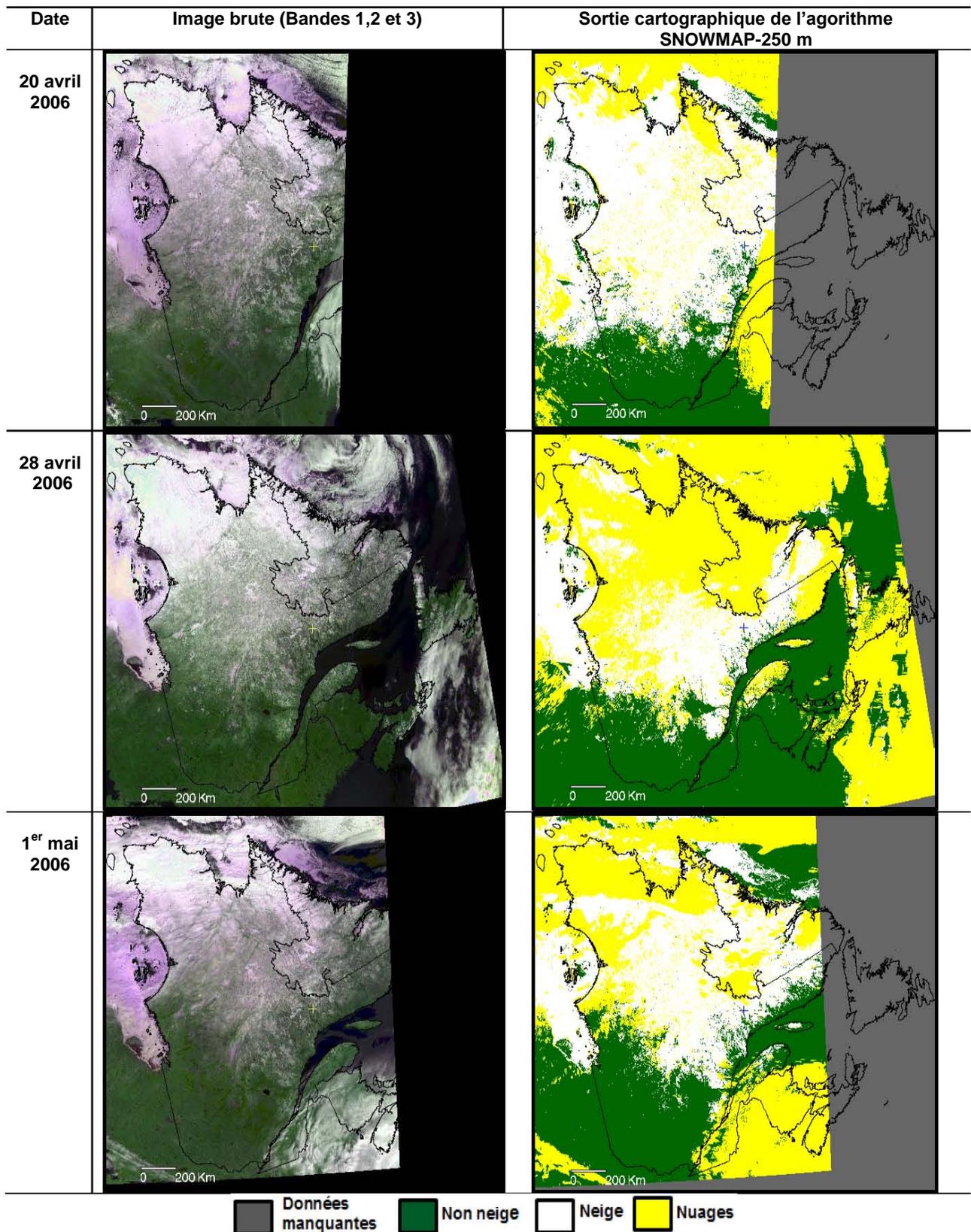


Figure 4.1. Cartes de neige du printemps 2006 issues de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m

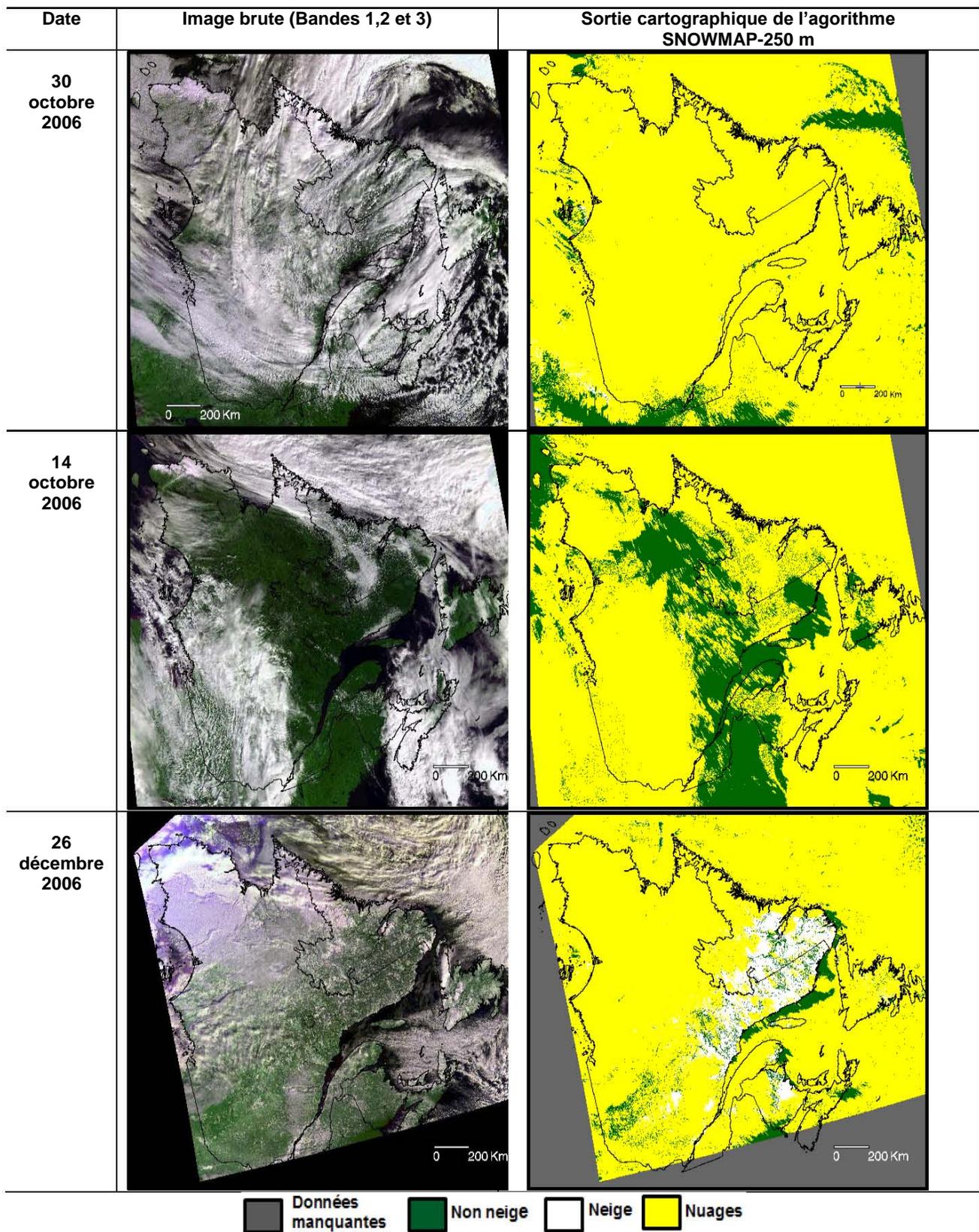


Figure 4.2. Cartes de neige de l'automne 2006 issues de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m

4.2 Évaluation de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m à l'Est du Canada

Lors de la validation de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m à l'Est du Canada, 11 tuiles LANDSAT ayant 30 m de résolution ont été utilisées (partie 3.2.1). Comme il est expliqué dans la partie 3.3 de méthodologie, des grilles de 250 m de résolution ont été construites. Ces grilles ont été appliquées sur des cartes d'occupation du sol de 250 m de résolution développées par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) de l'année 2000 à l'année 2011 (Yi Luo *et al.*, 2008). Chaque pixel de la grille ayant un identifiant unique est classifié en 25 occupations du sol (voir annexe 2). Un calcul statistique a été développé de telle façon que chaque image MODIS est répartie en un nombre déterminé de classes d'occupation du sol. Ainsi, selon les caractéristiques des classes dominantes, les tuiles LANDSAT ont été attribuées à l'une des trois catégories: milieu ouvert, de transition ou fermé.

Le tableau 4.1 présente les résultats de la classification des 11 tuiles LANDSAT. Plus d'informations sur la localisation des tuiles et leurs caractéristiques d'occupation du sol sont présentés dans la partie 3.2.1 de la méthodologie et en annexe II.

Tableau 4.1 : Résultats de l'étude de l'occupation du sol des 11 tuiles LANDSAT

# Tuile	Localisation		Occupation du sol		
	Path	Row	Milieu ouvert	Milieu de transition	Milieu fermé
1	19	19	X		
2	19	22	X		
3	15	24		X	
4	14	24			X
5	12	24			X
6	16	22	X		
7	8	24			X
8	17	25			X
9	13	25			X
10	10	26			X
11	10	27			X

L'étude de la performance de la nouvelle application de l'algorithme SNOWMAP-250 m s'applique à deux échelles :

- temporelle qui compare les deux saisons (printemps et automne) et pour lesquelles les caractéristiques du couvert nival (rugosité de la surface, état de fonte, humidité, structure : tailles des grains, épaisseur, types des impuretés, etc.) ne sont pas les mêmes.
- spatiale qui compare trois occupations du sol différentes en fonction de leur degré d'ouverture: un milieu ouvert (tuile 1), une zone de transition au centre (tuile 3) et un milieu fermé (tuile 10). La même saison (printemps) a été choisie pour les 3 tuiles LANDSAT pour s'intéresser juste à l'influence de l'occupation du sol.

Ces tuiles présentent des exemples des résultats obtenus qui aident le mieux à expliquer la sensibilité du couvert nival aux saisons printanière et hivernale et en milieu ouvert, de transition ou fermé. Les résultats pour le reste des tuiles sont présentés en annexe III.

Plusieurs problèmes ont été rencontrés lors de l'étude de validation. En fait, pendant la saison automnale, plusieurs pixels MODIS sont recouverts de nuages. Et étant donné que les images LANDSAT ont un intervalle de survol de 16 jours, trouver une image LANDSAT qui couvre une partie non nuageuse de l'image MODIS présente un véritable défi pour cette étude de validation. Ces contraintes ont contribué à réduire le nombre d'images LANDSAT retenues. De plus, les dates d'acquisition diffèrent entre les deux capteurs LANDSAT et MODIS, ce qui peut présenter une source de discordance entre les deux images. En fait, due aux différentes heures d'acquisition des deux capteurs, le masque de nuage peut couvrir une grande partie de l'image MODIS comparativement à l'image LANDSAT. Et donc, la validation entre les deux images ne sera effectuée que sur partie des deux images, ce qui néglige les erreurs de classification qui peuvent être observées en remplaçant la zone nuageuse par une image claire qui serait prise pendant la même journée.

Comparaison entre les milieux ouverts, de transition et fermés

Pour étudier la sensibilité de l'algorithme SNOWMAP à la densité de végétation, une comparaison entre trois sites de validation pendant la saison de printemps, en milieu ouvert, de transition et fermé est choisie. Les résultats de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur l'image MODIS désagrégée à 250 m et sur l'image LANDSAT de 30 m de résolution spatiale prise le 06 mai 2008 sont représentés comme exemple dans la figure 4.3.

Un rappel de la localisation géographique des trois tuiles LANDSAT est donné au tableau 4.2.

Tableau 4.2. Localisation des trois tuiles LANDSAT utilisées pour la validation milieu ouvert, de transition et fermé

# Tuile	Date	Localisation		Degré de couverture du sol (milieu ouvert- de transition-milieu fermé)
		Path	Row	
1	29 mai 2005	19	19	Milieu ouvert
3	28 mai 2008	15	24	Milieu de transition
10	06 mai 2009	10	26	Milieu fermé

Visuellement, la décision prise par l'algorithme SNOWMAP diffère pour plusieurs pixels entre l'image MODIS désagrégée à 250 m et l'image LANDSAT. En fait, dans plusieurs cas, l'algorithme SNOWMAP classe le pixel LANDSAT comme neige alors qu'il détecte de la non neige dans le pixel MODIS (Figure 4.3). Cette fausse classification est due au fait que grâce à la haute résolution des images LANDSAT, les informations spectrales recueillies sont plus détaillées et donc la distinction entre les deux classes (neige et non neige) est plus facile. Par ailleurs, les résultats illustrent aussi que l'algorithme binaire SNOWMAP identifie plus de neige que ce qu'il existe en réalité (Figure 4.3). Ce qui a été déjà démontré par des études antérieures (Hall *et al.*, 2001).

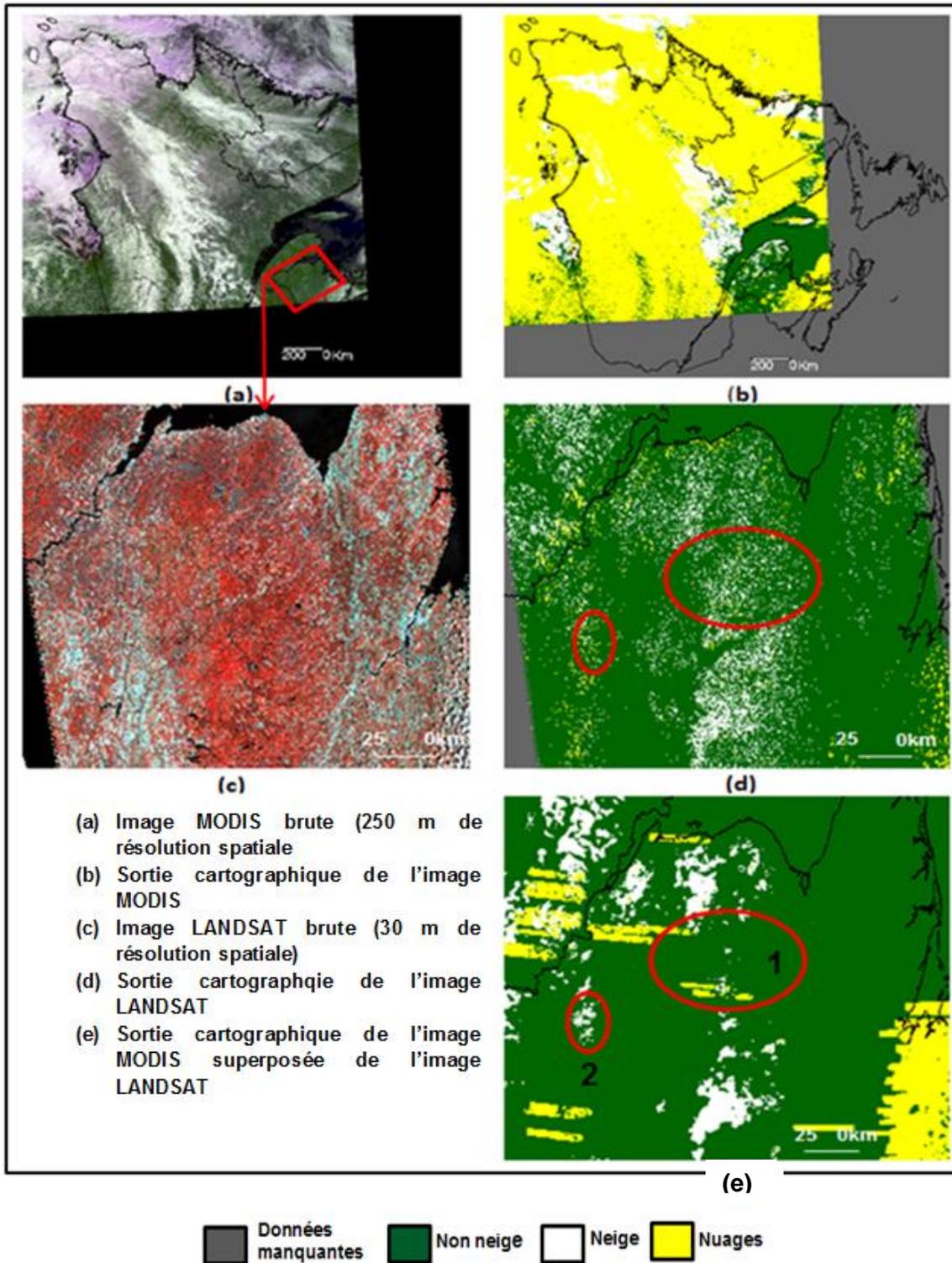


Figure 4.3. Applications de l'algorithme SNOWMAP sur l'image MODIS désagrégée à 250 m et LANDSAT prises le 06 mai 2008 : 1 et 2 représentent respectivement une souestimation et une surestimation du couvert nival.

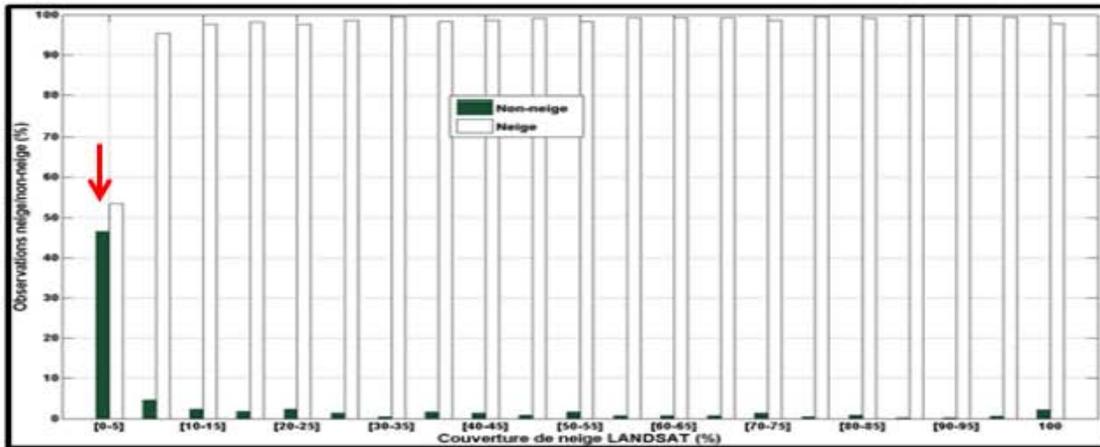
Selon la littérature, l'algorithme SNOWMAP classe un pixel comme neige lorsque sa saturation en neige est de l'ordre de 50% à l'exception des forêts ayant un seuil plus élevé (Hall *et al.*, 2001). Dans la présente étude, étant donné que l'information issue de l'application de l'algorithme SNOWMAP est discrète (binaire soit 0 ou 1) pour les images MODIS désagrégées à 250 m alors qu'elle est continue (0-100%) pour les images LANDSAT, ce seuil de 50% est mis en considération lors des travaux de validation. En fait, si la saturation en neige du pixel LANDSAT est supérieure à ce seuil, il est classifié comme neige sinon c'est de la non neige. L'objectif est de vérifier si ce seuil présenté déjà en littérature convient avec les caractéristiques particulières de l'Est du Canada.

Pour déterminer le seuil à partir duquel l'algorithme SNOWMAP classe un pixel comme neige dans notre zone d'étude, les grilles de 250 m de résolution déjà développées ont été utilisées. Une comparaison des résultats de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur les images MODIS 250 m et sur les images LANDSAT 30 m dans chaque pixel au début et sur l'ensemble des pixels par la suite a été suivie. Les résultats sont présentés sous forme de graphes comparatifs LANDSAT-MODIS (Figure 4.4 et Figure 4.5). En abscisse : la couverture de neige en pourcentage pour les pixels LANDSAT (contenus dans un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en ordonnée le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m. Le reste des résultats est présenté en annexe III.

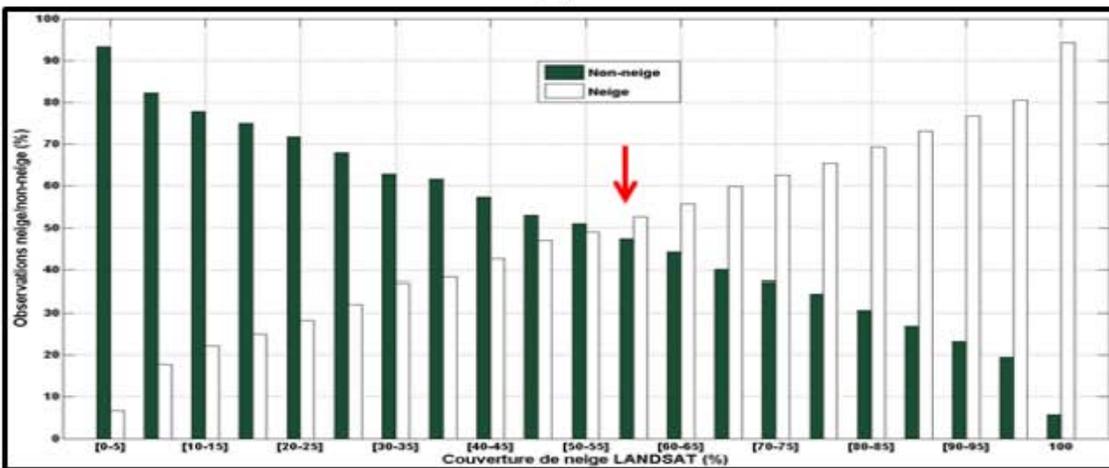
Selon les résultats des exemples retenus, l'allure générale des graphes montre une courbe ascendante qui relie le pourcentage des pixels classifiés comme neige dans l'image LANDSAT et celui des pixels MODIS appartenant à la même classe. Selon la figure 4.4, à partir d'une saturation bien définie de neige dans le pixel LANDSAT, l'algorithme SNOWMAP commence à détecter la présence de neige dans le pixel MODIS. Ce seuil est indiqué dans les graphes avec une flèche rouge. Cette saturation est sensible à la couverture végétale. En fait, en milieu ouvert, l'algorithme SNOWMAP détecte la neige à une saturation inférieure à 50% (seuil mentionné en littérature) : 5% pour le 29 mai 2005 (tuile 1). Pour la zone de transition, ce seuil augmente légèrement. Cette augmentation peut être expliquée par les erreurs d'omission commises dans les zones qui séparent la neige sous la dense végétation et la non neige sur les sols nus. Il est légèrement supérieur à 50% (entre 55% et 60%) pour la tuile 3 du 28 mai 2008. Par contre, dans la zone forestière, les difficultés de détection du couvert nival s'accroissent. Le seuil est de l'ordre de 95% pour la tuile 10 représentant un exemple de zone forestière. Ce dernier seuil présente le cas extrême pour les tuiles étudiées en milieux forestiers pour cette étude. Ce comportement de l'algorithme SNOWMAP a été confirmé en littérature (Hall *et al.*, 2001) lors de la cartographie de

la neige dans la partie visible du spectre électromagnétique en milieux ouverts, de transition ainsi qu'en milieux fermés.

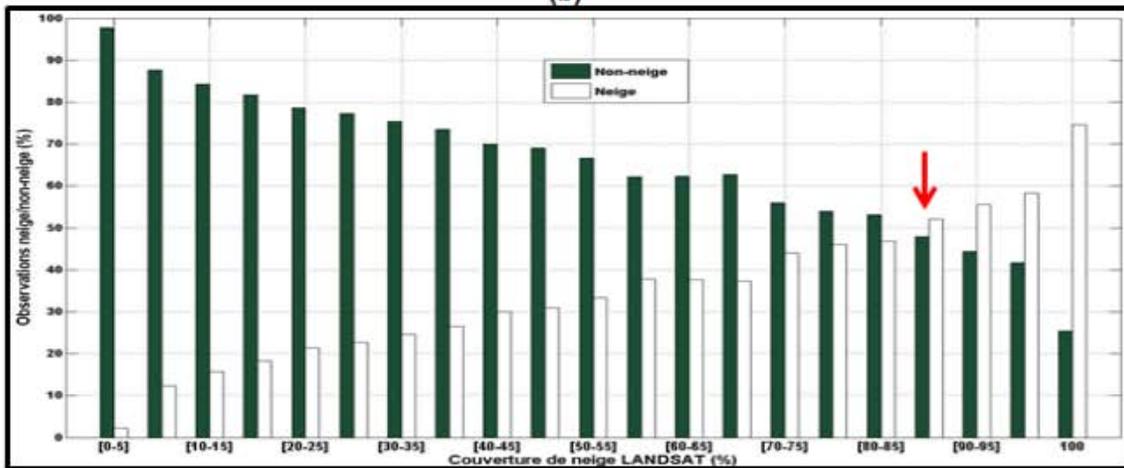
En effet, la détection de la neige dépend non seulement des caractéristiques physicochimiques et granulométriques du couvert nival mais aussi de son occupation du sol (Shimamura *et al.*, 2006). Dans un milieu fermé, la densité végétale peut atteindre 80% dans les forêts de conifères. Dans ce cas, le rayonnement électromagnétique sera intercepté par les cimes des arbres qui masquent la majeure partie du sol enneigé. Le signal capté par les satellites provient, dans sa majeure partie, de la végétation et non pas de la neige. Ce phénomène est moins observé dans les zones de transition et dans les forêts éparées où les arbres ayant une hauteur moyenne de 3 m sont suffisamment espacés et la densité de végétation est inférieure à 10% (Roberge, 2013). Ce comportement de l'algorithme a inspiré Notarnicola *et al.* (2013) et Shimamura *et al.* (2006) à développer un algorithme de détection de la neige sensible à l'occupation du sol et traitant les milieux ouverts et fermés différemment en se basant sur des tests et des seuils particuliers. La validation de l'algorithme de Notarnicola *et al.* (2013) avec des images LANDSAT ETM et ETM+ a montré une précision globale qui atteint 93,6% en dehors des zones forestières. La validation avec les produits MOD10A1 et MYD10A1 a indiqué un accord de l'ordre de 85,4% dans la plupart des zones à l'exception des milieux fermés. Par ailleurs, dans l'étude de Hall *et al.* (2001), l'erreur de classification est passée de moins de 1% pour un milieu ouvert à 10 fois plus en forêts.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.4. Statistiques de la validation LANDSAT de l'algorithme SNOWMAP-250 m.

Les images LANDSAT ont été prises en milieu:

a) ouvert (tuile 1) b) de transition (tuile 3) et c) fermé (tuile 10)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalant à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en ordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m

Comparaison entre l'automne et le printemps

Afin de suivre le couvert nival indépendamment de l'occupation du sol, la tuile 1 LANDSAT située en milieu ouvert a été utilisée. Deux dates ont été choisies. Il s'agit du 26 novembre 2001 et du 13 mai 2005.

Les résultats de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m montre qu'il est possible de détecter la neige à partir d'une saturation en neige entre 5% et 10% en automne pour le 26 novembre 2001 par rapport à 50% et 55% au printemps pour le 13 mai 2005. En fait, à l'état mouillé, la neige absorbe la majeure partie de l'énergie reçue du capteur optique et la dévie. Juste une faible quantité lui est renvoyée. Dans ces conditions, l'image apparaît plus sombre. Ce qui explique pourquoi il est plus difficile à détecter le couvert nival en période de fonte printanière. Le cas contraire est observé pour la neige sèche, souvent plus claire. Dans ce cas, la grande quantité de l'énergie sera réfléchiée par les cristaux et les lentilles de glace. Au printemps, le couvert nival est soumis aux processus de métamorphisme et de murissement, ce qui donne à la neige un aspect plus dense et plus humide. Au début de l'hiver, il est plus frais, blanc et moins compact. Ces aspects ont été confirmés par l'explication théorique de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la neige sous l'état humide ou sec. Dans ce cadre, l'étude de Poon *et al.* (2006) comparant la surface du couvert nival avec le produit MOD10A1 montre un désaccord de 75% pendant la période de fonte (printemps). De plus, Poon *et al.* (2001) ont illustré que la réflectivité de la neige dans la partie visible du spectre électromagnétique est très sensible aux contaminants beaucoup plus présents pendant la période de fonte.

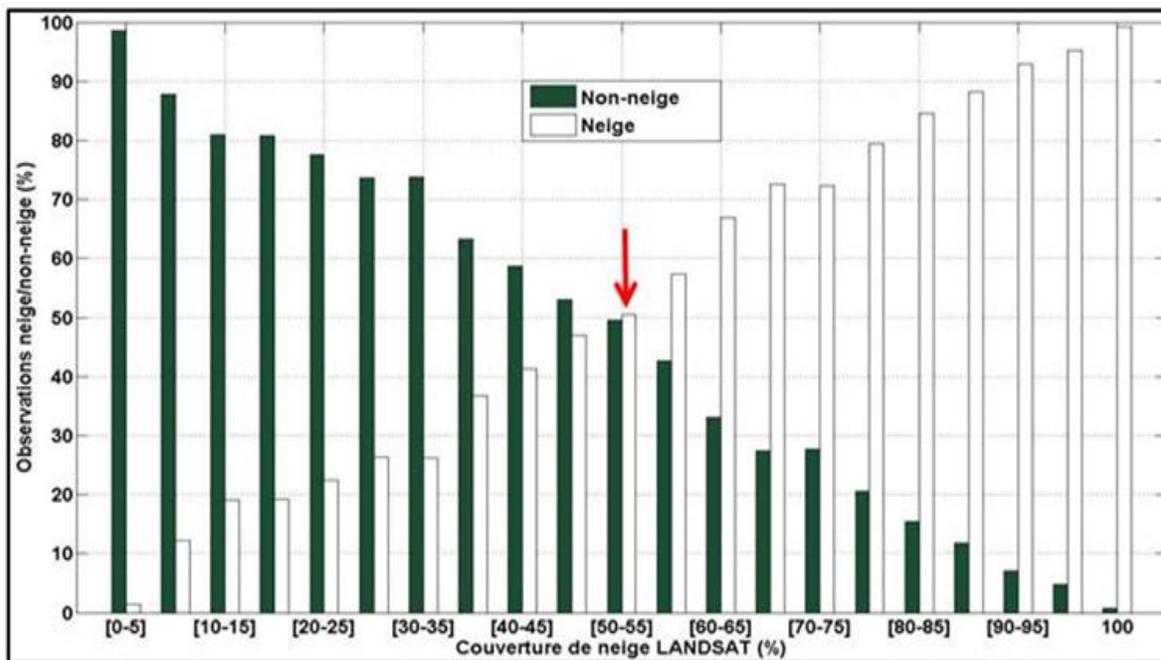
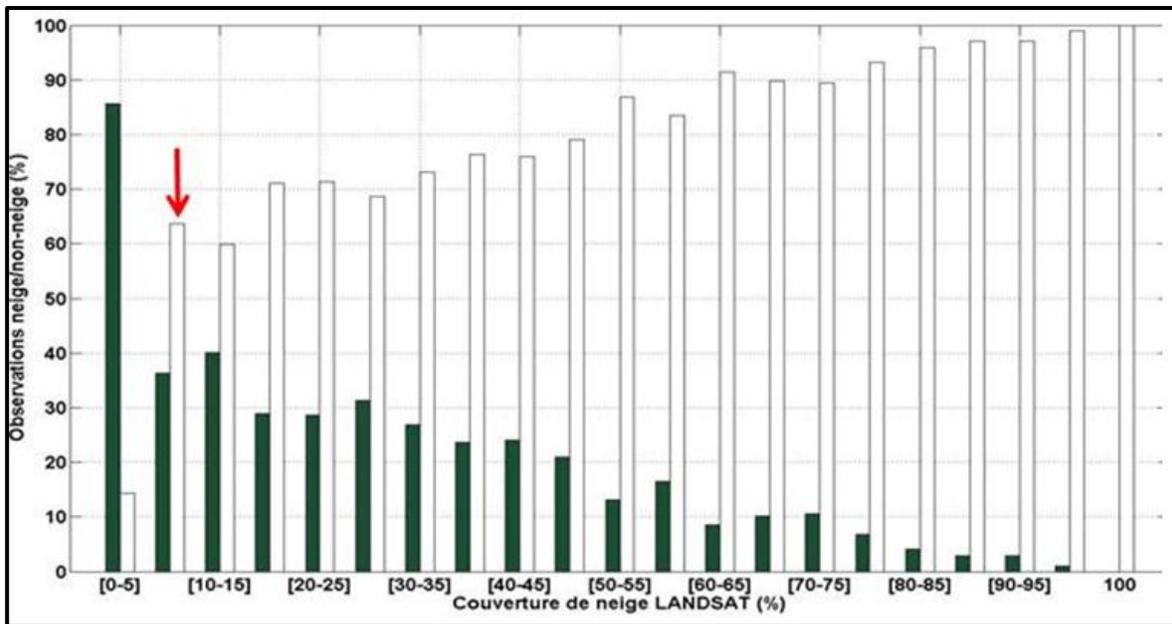


Figure 4.5. Statistiques de la validation LANDSAT de l'algorithme SNOWMAP0-250 m.

Les images LANDSAT ont été prises en milieu ouvert (Tuile 2) :

a) le 26 novembre 2001 et b) le 13 mai 2005

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalant à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en ordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m

Le tableau 4.3 présente les seuils de saturation en neige à partir duquel l’algorithme SNOWMAP-250 m détecte plus de neige que de la non neige pour les 11 tuiles LANDSAT retenues.

Tableau 4.3. Résultats de la validation LANDSAT de l’application de l’algorithme SNOWMAP-250 m en milieu ouvert, de transition et fermé

Degré de couverture du sol (milieu ouvert- de transition-Milieu fermé)	Tuile	Date	Seuil de détection de la neige
Milieu ouvert	6	19-11-2006	[0%-5%]
	1	29-05-2005	[0%-5%]
	2	26-11-2001	[5%-10%]
	2	18-04-2006	[30%-35%]
	2	13-05-2005	[50%-55%]
Milieu de transition	3	12-05-2009	[55%-60%]
	3	28-05-2008	[55%-60%]
Milieu fermé	5	25-05-2004	[60%-65%]
	4	26-05-2005	[65%-70%]
	9	23-04-2007	[75%-80%]
	7	13-05-2004	[80%-85%]
	10	06-05-2008	[85%-90%]
	11	12-05-2009	[85%-90%]
	8	26-11-2006	[95%-100%]
	7	19-11-2009	[95%-100%]

Une séparation des résultats selon l’occupation du sol en milieu ouvert de transition ou fermé, confirme les aspects observés dans les cas traités au paravent (Figure 4.4, Figure 4.5). En fait, pour les tuiles appartenant à un milieu ouvert, le seuil de saturation maximale est de l’ordre de 55% et il atteint même 5 % pour les tuiles 6 et 1. Pour la zone de transition, il est entre 55% et 60% (tuile 3). Alors que pour le milieu fermé caractérisé par une végétation assez dense (forêts denses de Québec), l’algorithme SNOWMAP-250 m trouve des grandes difficultés pour classer un pixel comme neige malgré que son saturation en neige peut atteindre 95% dans certains cas (tuiles 8 et 7).

Les graphes des tuiles non mentionnés dans cette partie sont présentés en annexe III.

Pour résumer, la détection de la neige dans un pixel MODIS de 250 m de résolution spatiale présente un grand défi pour les zones forestières. En fait, une saturation de 50 % en neige ne suffit pas toujours pour classer un pixel comme neige. Cet aspect a été confirmé en littérature (Hall *et al.*, 2001, Shimamura *et al.*, 2006, Notarnicola *et al.*, 2013).

Essayant maintenant de s'intéresser juste aux zones forestières (tuiles 4, 5, 7, 8, 9,10 et 11) présentant un seuil moyen de 85%. L'objectif est d'appliquer le seuil trouvé lors de la validation LANDSAT de l'algorithme SNOWMAP-250 m (Tableau 4.3) et non pas celui généralement appliqué (50%). Dans ce cas, le pixel LANDSAT sera classé comme neige à partir du seuil calculé dans chaque tuile. Des nouvelles matrices de confusion ont donc été développées. Le tableau 4.4. présente un résumé des résultats obtenus. Les matrices de confusion au complet seront en annexe IV.

Tableau 4.4. Résultats de la validation LANDSAT de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m en milieu fermé en utilisant les seuils observés dans chaque tuile

Tuile #	Date	seuil		Succès globale		Indice Kappa	
		Déterminé dans la littérature	Observé pour la tuile	Calculé pour le seuil de la littérature	Calculé pour la tuile	Calculé pour le seuil de la littérature	Calculé pour la tuile
5	25-05-2004	50%	65%	83%	83%	0,4	0,4
4	26-05-2005	50%	65%	84%	83%	0,4	0,4
9	23-04-2007	50%	75%	74%	75%	0,5	0,5
7	13-05-2004	50%	80%	94%	89%	0,2	0,2
10	06-05-2008	50%	85%	93%	94%	0,3	0,2
11	12-05-2009	50%	85%	97%	99%	0,1	0,3
8	26-11-2006	50%	95%	93%	94%	0,3	0,2
7	19-11-2009	50%	95%	90%	92%	0,1	0,1

Selon les résultats obtenus, l'utilisation des nouveaux seuils n'arrive pas réellement à améliorer le succès global de l'algorithme SNOWMAP-250 m (Tableau 4.4). En fait, il a diminué de 94% à 89% pour la tuile 7 de 13 mai 2004 et de 84% à 83% pour la tuile 4 de 26 mai 2005. De même, l'indice d'évaluation Kappa ne montre pas une grande variation lors de l'application des nouveaux seuils. En se référant à l'évaluation de l'indice Kappa faite par Régis et Claude (2001), la classification demeure médiocre ($0,2 \leq K < 0,4$) pour les tuiles 4, 5, 7 (de 13 mai 2004), 9 et 10,

elle a passé de médiocre au mauvais ($0 \leq K < 0,2$) pour la tuile 11 alors qu'elle demeure mauvaise pour la tuile 7 de 19 novembre 2009.

En réalité, la détermination du seuil à partir duquel l'algorithme SNOWMAP-250 m est capable de détecter le couvert nival avec succès n'est pas évidente. En fait, plusieurs paramètres spatiaux (structure de la neige, ouverture du milieu, pente et latitude, etc.) et temporels (saison, conditions climatiques pendant la journée de prise d'image : vent, température, précipitations solides et liquides, etc.) se combinent pour influencer quotidiennement le couvert nival et donc la réflectance calculée au niveau de chaque pixel de l'image MODIS désagrégée à 250 m. Par conséquent, la décision prise par l'algorithme SNOWMAP-250 m tient compte de l'ensemble de ces paramètres de même que le succès global. De plus, les seuils ont été déterminés en se basant sur des images MODIS journalières et donc les calculs tiennent compte juste des conditions climatiques de cette journée en particulier. En fait, pour la tuile 7 par exemple, le seuil calculé varie en fonction de la date. Il est entre 80% et 85% pour le 13 mai 2004 et entre 95% et 100% pour le 19 novembre 2009.

La solution serait d'adapter l'algorithme SNOWMAP-250 m lui-même aux caractéristiques de l'occupation du sol de l'Est du Canada. Vu que dans les zones ouvertes et de transition l'algorithme SNOWMAP-250 m arrive à bien détecter la présence de la neige à partir d'une saturation en neige inférieur à 60% (Tableau 4.3), l'ajustement va s'intéresser aux seuls paramètres des deux équations utilisées par SNOWMAP pour classifier un pixel donné dans les zones forestières. Ces deux équations sont les suivantes :

$$NDSI = (-4,78 * NDVI^2) + (4,9 * NDVI) - 0,198$$

$$NDSI = (-0,5 * NDVI) + 0,3$$

Les nouveaux paramètres doivent tenir compte non seulement de l'occupation du sol, mais aussi des conditions climatiques journalières.

Par ailleurs, comme il est proposé par Notarnicola *et al.* (2013), l'ajout des tests supplémentaires qui traitent chaque milieu forestier individuellement (forêts de conifères, forêts boréales, forêts mixtes, etc.) pourra minimiser les erreurs de fausse classification observées en milieu fermé. L'objectif est de développer une nouvelle version de l'algorithme SNOWMAP à seuils adaptatifs aux conditions d'occupation du sol.

4.3 Comparaison des résultats de validation de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 et de son application sur des images MODIS désagrégées à 250 m

Le produit MODIS du couvert nival, MOD10A1, est issu de l'application de l'algorithme SNOWMAP préalablement défini dans la partie 3.2.4 sur des images MODIS de 500 m de résolution.

Afin de mieux évaluer la performance de l'application de l'algorithme SNOWMAP-250 m, une comparaison entre deux validations LANDSAT a été utilisée. La première était avec le produit MOD10A1 issu de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des données MODIS de 500 m de résolution. La deuxième est avec son application sur des images MODIS désagrégées à 250 m. Des calculs statistiques ont été effectués. Il s'agit des matrices d'erreur, comparant les images LANDSAT et l'algorithme SNOWMAP du produit MOD10A1 d'une part et son application sur des images MODIS désagrégées à 250m d'autre part. Les images LANDSAT ont été utilisées comme des résultats d'observation grâce à leur résolution fine (30 m) alors que celles issues du capteur MODIS ont été considérées comme des mesures. Les résultats sont présentés en détails dans les annexes V et VI et ils sont récapitulés au tableau 4.5.

Tableau 4.5. Récapitulatif des matrices de confusion de l'algorithme SNOWMAP appliqué sur le produit MODIS MOD10A1 vis-à-vis à son application sur des images MODIS désagrégées à 250 m

Tuile #	Date	Validation MOD10A1 (500m) / LANDSAT (30 m)		Validation MODIS (250) /LANDSAT (30 m)	
		Succès globale (%)	Indice Kappa	Succès globale (%)	Indice Kappa
2	18-04-2006	67%	0,2	85%	0,6
2	13-05-2005	84%	0,5	96%	0,9
3	12-05-2009	86%	0,1	90%	0,5
5	25-05-2004	87%	0,3	83%	0,4
9	23-04-2007	86%	0,4	74%	0,5
10	06-05-2008	92%	0,2	93%	0,3
11	12-05-2009	65%	0,1	97%	0,1
8	26-11-2006	88%	0,1	93%	0,3

Pour les dates qui restent, les tuiles LANDSAT se situent dans la partie où le produit MOD10A1 de MODIS ne présente pas de données. Par conséquent, ces dates ne seront pas incluses au tableau récapitulatif 4.5.

Selon le tableau 4.5, les résultats de cartographie de la neige ont relevé une meilleure performance lors de l'application de l'algorithme binaire sur des images MODIS désagrégées à 250 m. En fait, généralement l'indice Kappa ainsi que le succès global ont augmenté lors de l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m par rapport aux résultats de la validation LANDSAT de produit MODIS du couvert nival : MOD10A1. Seule la tuile 11 (12 mai 2009) a présenté une amélioration juste du succès global (de 65% à 97%) et non pas de l'indice Kappa qui demeure constant pour les deux validations (0,1). En fait, c'est l'indice Kappa qui évalue le mieux la cartographie de la neige en tenant compte des erreurs aussi bien d'omission que de commission et non pas seulement des pixels bien classés par rapport au nombre total de pixel (Régis et Claude, 2001). Par conséquent, le succès global ne reflète pas toujours la qualité d'une classification.

Par conséquent, un nouveau produit du couvert nival à 250 m de résolution spatiale est maintenant disponible pour l'Est du Canada. Ce produit a une résolution plus fine que le produit MODIS du couvert nival (250 m au lieu de 500 m) offert par le *National Snow and Ice Center* (NSIDC) et présente aussi une précision globale plus intéressante.

5. Conclusion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'apport des images MODIS désagrégées à 250 m de résolution spatiale pour la cartographie de l'étendue du couvert nival à l'aide de l'algorithme SNOWMAP dans l'Est du Canada. Par conséquent, il a été question d'évaluer la performance de la nouvelle application de l'algorithme pour cette zone. En d'autres termes, l'algorithme performe-t-il mieux que le produit MODIS, MOD10A1 du couvert nival? L'algorithme donne-t-il une meilleure précision pour une occupation de sol en particulier (milieu ouvert, milieu de transition et milieu fermé) ou pour une saison particulière (saison hivernale ou printanière)?

L'étude s'intéresse aux périodes de formation (1er octobre au 31 décembre) et de fonte de la neige (16 mars au 31 mai). Grâce à la fréquence journalière des images MODIS, l'application de l'algorithme SNOWMAP a permis de produire plus de 4745 cartes du couvert nival. Cet algorithme a été appliqué sur des images MODIS désagrégées à 250 m de résolution développées au cours de ce projet. La procédure de désagrégation suivie est celle développée en 2006 par le Centre Canadien de Télédétection (CCT). Cette procédure s'adapte aux conditions climatiques, topographiques et d'occupation de sol du territoire étudié. Les images retenues offrent une cartographie quotidienne de l'étendue spatiale du couvert nival sur une grande partie de l'Est du Canada (le Québec et les provinces Maritimes). Sur ces cartes, deux classes sont définies : neige et non neige.

Afin de voir ce qu'apporte cette nouvelle application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS désagrégées à 250 m, une comparaison avec le produit MODIS journalier du couvert nival de 500 m de résolution, MOD10A1 a été réalisée. Cette comparaison est basée sur une validation Landsat de 30 m de résolution. Un nombre limité d'images sera toutefois utilisé utile pour l'étude de validation. Les images initialisées seront disponible pour de futures études de suivi du couvert nival. Utilisant les images un suivi spatial et temporel de l'évolution du couvert nival à l'Est du Canada est possible durant les périodes d'établissement et de fonte printanière du couvert nival de 2000 à 2013.

Les résultats obtenus montrent une meilleure précision de la nouvelle application par rapport au produit MOD10A1 disponible. D'une façon générale l'algorithme de détection de la neige effectue une bonne classification si la saturation en neige au niveau d'un pixel est inférieure à 60% pour les milieux ouverts et de transition et supérieure à 65% dans les forêts. Toutefois, dans les zones forestières de conifères, la réflectance de la neige est perturbée par la végétation et l'algorithme éprouve des difficultés lors de la détection de la neige. Ceci concorde avec les études

antérieures utilisant le capteur MODIS ou AVHRR, GOES, VEGETATION, etc. L' algorithme étudié démontre aussi que pendant la période de fonte printanière, la capacité de détection de l'algorithme SNOWMAP diminue. En fait pendant cette période, l'eau contenue dans les particules de neige augmente, ce qui entraîne une diminution de la réflectance et du NDVI. De plus, dans plusieurs cas, lors du passage du capteur MODIS, une grande partie du territoire est recouvert de nuages, ce qui présente un grand défi lors de la détermination du jour probable de fonte ou de son établissement en se basant sur les cartes du couvert nival.

Les produits de cartographie obtenus pour l'Est du Canada seront utiles pour améliorer la précision et la performance des études climatologiques et hydrologiques antérieures. En climatologie, les stimulations du modèle régional canadien du climat (MRCC) sur la période 2000 à 2014 pourront être validées suite aux résultats de cartographie obtenus. De plus, des organisations, telle que Nature-Québec, utilisent les informations concernant le couvert nival pour délimiter les espèces menacés telle que le carcajou (*Gulo gulo*) (www.naturequebec.org).

Bien que le présent projet de cartographie de la neige présente de meilleurs résultats meilleurs que le produit MODIS disponible, MOD10A1, il n'en demeure pas moins que certains aspects pourraient être abordés dans des travaux futurs. En fait des données additionnelles tels que le masque d'eau, la classification de couverture du sol et le modèle numérique d'altitude peuvent être introduites dans l'algorithme afin de minimiser les erreurs de fausse classification. L'utilisation de masque d'eau comme entrée dans l'algorithme SNOWMAP au même titre que masque de nuage pourrait réduire les erreurs dues à la confusion entre la glace et la neige. De plus, les résultats de validation Landsat de la cartographie ont montré que l'algorithme SNOWMAP est sensible à l'occupation du sol (milieu ouvert, de transition ou fermé) et qu'il présente une erreur d'omission plus élevée dans les zones forestières. Une connaissance de la couverture végétale pourrait permettre d'inclure des seuils décisifs supplémentaires plus sensibles à l'occupation, ce qui améliorerait la précision de cartographie nécessaire dans les bassins prioritaires. Par ailleurs, l'utilisation d'un MNA est utile pour corriger radiométriquement les effets liés à la topographie dans le but d'améliorer les résultats de classification indépendamment de l'altitude et de la pente. D'autres adaptations pourraient être utiles comme les procédures de fusion de capteurs (AVHRR, Landsat, SSM/I, IMS, GOES-SSM/I, etc.) utilisées précédemment dans certaines études.

6. Références bibliographiques

- Ackerman S, Frey R, Strabala K, Liu Y, Gumley L, Baum B & Menzel P (2010) Discriminating Clear-Sky from Cloud With MODIS. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35), (Madison, WI: *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin*) Version 6.1, p 1–120.
- Ackerman SA, Strabala KI, Menzel PWP, Frey RA, Moeller CC & Gumley LE (1998) Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research* 103(24):32141–32157.
- Akyürek Z & Sorman AÜ (2002) Monitoring snow-covered areas using NOAA-AVHRR data in the eastern part of Turkey. *Hydrological Sciences* 47:243–252.
- Amlien J (2008) Remote Sensing of Snow with Passive Microwave Radiometers. *A Review of Current Algorithms*, Report No. 1019 (Oslo: Norsk Regnesentral).
- Armstrong RL & Brodzik MJ (2001) Recent Northern Hemisphere snow extent: a comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors. *Geophysical Research Letters* 28 (19):3673–3676.
- Ault TW, Czajkowski KP, Benko T, Coss J, Struble J & Spongberg A (2006) Validation of the MODIS snow product and cloud mask using student and NWS cooperative station observations in the Lower Great Lakes Region. *Remote Sensing of Environment* 105: 341–353.
- Bariou RD, Lecanu & Henaff F (1985) Dossier de télédétection: réponse spectrale des végétaux. Rennes: Université de Rennes, vol. 2, p 71.
- Bernier PY (1987) Microwave remote sensing of snowpack properties: potential and limitations. *Nordic Hydrology* 18(1):1-20.
- Bitner D, Carroll T, Cline D & Romanov P (2002) An assessment of the differences between three satellite snow cover mapping techniques. *Hydrological Processes* 16(18):3723-3733.
- Bonn, F et G. Rochon (1993). Précis de télédétection: Principes et méthodes. Vol. 1. Sainte Foy, Presse de l'Université du Québec/AUPELF, p 485.
- Bourdelles B & Fily M (1993) Snow grain-size determination from Landsat imagery over Adélie, Antarctica. *Annals of Glaciology* 17:86–92.

- Brown R & Armstrong RL (2008) Snow-cover data: measurement, products, sources. *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*, Armstrong RL & Brun E (Edit.) Cambridge University Press, Cambridge, UK. p 181-216.
- Brown RD (2000) Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915–97. *Journal of Climate* 13:2339–2355.
- Brubaker KL, Pinker RT & Deviatova E (2005) Evaluation and comparison of MODIS and IMS snow-cover estimates for the continental United States using station data. *Journal of Hydrometeorology* 6:1002–1017.
- Bussi eres N, De S eve D & Walker AE (2002) Evaluation of MODIS snow cover products over Canadian regions. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (GARSS 2002)*. (Toronto, Canada), p 2302-2304.
- Cavalieri DJ, Markus T & Comiso JC (2014) AMSR-E/Aqua Daily L3 12.5 km Brightness Temperature, Sea Ice Concentration, & Snow Depth Polar Grids. Version 3. [indicate subset used]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. http://dx.doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_SI12.003.
- Caya D & Laprise R (1999) A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review* 127(2-3):341-362.
- Chang ACT, Foster J & Hall DK (1990). Effect of Vegetation Cover on Microwave Snow Water Equivalent Estimates. *International Symposium of Remote Sensing and Water Resources*. Enschede, Pays-Bas, Ao t, p.137-145.
- Chang ATC, Foster J & Hall DK (1987) NIMBUS-7 SMMR derived global snow cover parameters. *Annals of Glaciology* 9:39-44.
- Chokmani K, Bernier M, Paquet LM, Dever K, Gauthier Y & Royer A (2006a) Snow mapping over Eastern Canada for climate change studies purpose using historical NOAA-AVHRR and SSM/I data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006)*. (Denver, USA), p 747-750.
- Chokmani K, Bernier M, P aquet L-M, Go ta K, Royer A, Comtois-Boutet F, Turcotte M, Zhang Y, Forcier L-C & Massalabi A (2009) D veloppement d'algorithmes pour le suivi par satellite de la couverture de neige au sol   l' chelle du bassin versant (rapport R1103). (Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre et Environnement, Qu bec, Canada).

- Chokmani K, Bernier M & Slivitzky M (2006b) 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.
- Claude Kergomard « Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Actes des Journées de Télédétection en Sciences humaines, document 181, mis en ligne le 05 mai 2000, consulté le 28 mai 2014. URL : <http://cybergeo.revues.org/1679> ; DOI : 10.4000/cybergeo.1679.
- Clifford D (2010) Global estimates of snow water equivalent from passive microwave instruments: history, challenges and future developments. *International Journal of Remote Sensing* 31(14):3707–3726.
- Crane RG & Anderson MR (1984) Satellite discrimination of snow/cloud surfaces. *International Journal of Remote Sensing* (5) 213–223.
- Derksen C (2008) The contribution of AMSR-E 18.7 and 10.7 GHz measurements to improved boreal forest snow water equivalent retrievals. *Remote Sensing of Environment* 112: 2701–2710.
- Derksen C, Walker A & Goodison B (2005) Evaluation of passive microwave snow water retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada. *Remote Sensing of Environment* 96(3-4):315-327.
- Derksen C, Walker A & Godison B (2003) A comparison of 18 winter seasons of in situ and passive microwave-derived snow water equivalent estimates in Western Canada. *Remote Sensing of Environment* 88(3):271-282.
- De Sève D, Évora ND & Tapsoba D (2007) Comparaison of three algorithms for estimating Snow Water Equivalent (SWE) over the La Grande River watershed using SSM/I data in the context of Hydro-Quebec's hydraulic power management. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*. (Barellone, Spain), p 4257-4260.
- De Sève D, Bernier M, Fortin JP & Walker AE (2001) Estimation de l'équivalent en eau de la neige dans un milieu de taïga à l'aide des données SSM/I. *Télédétection* 2(1):13-28.
- Dietz AJ, Kuenzer C, Gessner U & Dech S (2012) Remote sensing of snow - a review of available methods. *International Journal of Remote Sensing* 33(13):4094-4134.

- Doutreleau V (2011) Cartographie par télédétection optique MODIS des couverts neigeux en montagne: réalisation et analyse topographique (Asie centrale, Alpes). Mémoire d'ingénieur INSA, LTHE. (Grenoble), p 61.
- Dozier J (1989) Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment* 28:9-22.
- Drusch M, Vasiljevic D & Viterbo P (2004) ECMWF's global snow analysis: assessment and revision based on satellite observations. *Journal of Applied Meteorology* 43:1282–1294.
- Du Y, Cihlar J, Beaubien J & Latifovic R (2001) Radiometric normalization, compositing, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 39.p 623–634.
- Du Y, Tiellet PM & Cihlar J (2002) Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, Vol 82. p 123–134.
- Dyer JL (2008) Snow depth and streamflow relationships in large North American watersheds. *Journal of Geophysical Research* 113, D18113.
- Evora ND, Tapsoba D & De Sève D (2008) Combining artificial neural network models, geostatistics, and passive microwave data for snow water equivalent retrieval and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(7):1925-1939.
- Foster J, Chang ATC, Hall DK & Rango A (1991) Derivation of snow water equivalent in boreal forests using microwave radiometry. *Arctic*, 44, p. 147–152.
- Foster J, Hall D, Chang A, Rango A, Wergin W & Erbe E (1999) Effects of snow crystal shape on the scattering of passive microwave radiation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37:1165–1168.
- Foster J, Liston G, Koster R, Essery R, Behr H, Dumenil L, Versegny D, Thompson S, Pollard D, Cohen J (1996) Snow cover and snow mass intercomparison of general circulation models and remotely sensed datasets. *Journal of Climate* 9: 409–426.
- Frei A, Brown R, Miller JA & Robinson D.A (2005) Snow mass over North America: observations and results from the second phase of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-2). *Journal of Hydrometeorology* 6(5):681–695.
- Frei A & Lee S (2010) A comparison of optical-band based snow extent products during spring over North America. *Remote Sensing of Environment* 114:1940–1948.

- Frei A, Robinson DA & Hughes MG (1999) North American snow extent: 1900–1994. *International Journal of Climatology* 19:1517–1534.
- Gao Y, Xie H, Lu N, Yao T & Liang T (2010) Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements. *Journal of Hydrology* 385(1-4):23-35.
- Goetz AFH, Vane G, Solomon J & Rock BN (1985) Imaging Spectrometry for Earth. *Remote Sensing Science* 228:1147-1153.
- Goodison BE (1989) Determination of areal snow water equivalent on the Canadian prairies using passive microwave satellite data. *12th Canadian Symposium on Remote Sensing* (Vancouver, Canada), vol. 13. p 1243 – 1246).
- Goodison BE & Walker AE (1995) Canadian development and use of snow cover information from passive microwave satellite data, in: Choudhury B, Kerr Y, Njoku E & Pampaloni P. (Édit.) *Passive Microwave Remote Sensing of Land–Atmosphere Interactions*. (Utrecht, Netherlands), p 245–262.
- Graybeal D & Leathers D (2006) Snowmelt-related flood risk in Appalachia: first estimates from a historical snow climatology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45:178–193.
- Grody NC & Basist AN (1996) Global identification of snow cover using SSM/I measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(1):237-249.
- Guenther B, Godden GD, Xiong X, Knight EJ, Qiu SY & Montgomery H (1998) Prelaunch algorithm and data format for the Level 1B calibration products for the EOS AM-1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 36:1142–1151.
- Hallikainen MT (1984) Retrieval of Snow Water Equivalent from Nimbus-7 SSMR-Data: Effect of Land Cover Categories and Weather Conditions. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol.OE-9, no5, pp,372-376.
- Hallikainen MT & Jolma PA (1986) Retrieval of Water Equivalent of Snow Cover in Finland by Satellite Microwave Radiometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 24(6):855-862. Doi:10.1109/TGRS. 1986.289700.
- Hall DK, Foster JL, Salomonson VV, Klein AG & Chien JYL (2001) Development of a Technique to Assess Snow-Cover Mapping Errors from Space.(Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)) *Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(2): 432-438.

- Hall DK & Martinec J (1985) *Remote Sensing of Ice and Snow* (New York: Chapman & Hall).
- Hall, D.K, Montesano PM, Foster J.L., Riggs, G.A., Kelly, R.E.J. & Czajkowski K (2007) Preliminary evaluation of the AFWA-NASA blended snow-cover product over the Lower Great Lakes region. In *64th Eastern Snow Conference*, 28 May–1 June 2007, St. Johns, Newfoundland, Canada, pp. 1–6.
- Hall, DK, Riggs GA, & Salomonson VV (1995) Development of methods for mapping global snow-cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54:127-140.
- Hall DK & Riggs GA (2007) Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes* 21(12):1534-1547.
- Hall DK, Riggs G A, Foster J & Kumar SV (2010) Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product. *Remote Sensing of Environment* 114:496–503.
- Hall DK, Riggs GA & Salomonson W (1995) Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 54(2):127-140.
- Hall DK, Riggs GA & Salomonson VV (2001) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Ice-Mapping Algorithms. *NASA/Goddard Space Flight Center*. (Greenbelt), p45.
- Hall DK, Riggs GA, Salomonson W, DiGirolamo NE & Bayr KJ (2002) MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment* 83(1 -2):181 -194.
- Helfrich SR, McNamara D, Ramsay BH, Baldwin T & Kasheta T(2007) Enhancements to and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS). *Hydrological Processes* 21:1576–1586.
- Hyvärinen O, Eerola K, Siljamo N & Koskinen J (2009) Comparison of snow cover from satellite and numerical weather prediction models in the Northern Hemisphere and Northern Europe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48:1199–1216.
- Jensen JR (2007) *Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective*. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, Second edition. 526 p.
- Jensen JR (2005) *Introducing Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective* Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, Third edition. 526 p.

- Kelly RE, Chang AT, Tsang L & Foster JL (2003) A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(2):230-242.
- Key J, Collins J, Fowler C & Stone R (1997). High-latitude surface temperature estimates from thermal satellite data. *Remote Sensing of Environment* 61:302– 309.
- Key JR, Collins JB, Fowler C & Stone RS (1997). High-latitude surface temperature estimates from thermal satellite data. *Remote Sensing of Environment* 61:302– 309.
- Khlopenkov KV, Trishchenko A, Y Luo (2006) A novel method for reprojection of MODIS level 1B images based on concurrent gradient search. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 6365, art. n° 636506. 9 p.
- King M, Tsay SC, Platnick SE, Wang M & Liou KN (1997), *Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius and Thermodynamic Phase*, MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBDMOD-05 MOD06 – Cloud Product (Washington, DC: NASA), p 1–83
- Klein AG & Barnett AC (2003) Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year. *Remote Sensing of Environment* 86(2):162-176.
- Klein AG & Barnett AC (2003) Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year. *Remote Sensing of Environment* 86(2):162-176.
- Klein AG, Hall DK & Nolin AW (2000) Development of a prototype snow albedo algorithm for the NASA MODIS instrument. In *57th Eastern Snow Conference*, 17–19 May 2000, Syracuse, NY, USA, p 143–158.
- Klein AG, Hall D.K & Riggs GA (1998b) Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. *Hydrological Processes*, Vol. 12, pp. 1723-1744.
- König M, Winther J & Isaksson E (2001) Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics* 39:1–27.
- Kristi R, Paul R & Gabrielle JM (2012) Evaluation of the MODIS snow cover fraction product. *Hydrological Processes* 28:980-998.

- Künzi F & Staelin HH (1975) Measurements of Snow Cover Land with the Nimbus-5 Microwave Spectrometer. *Proceeding of International Symposium of Remote Sensing and Environment*, Ann Arbor, États-Unis, 6-10 octobre 1975, pp. 383-386.
- Künzi F, Patil S & Rott H (1982) Snow Cover Parameters Retrieved from Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol GE-20, No 4, pp 452-467.
- Leathers DJ, Kluck DR & Kroczyński S (1998) The severe flooding event of January 1996 across north central Pennsylvania. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(5):785–797.
- Lemke P, Ren J, Alley RB, Allison I, Carrasco J, Flato G, Fujii Y, Kaser G, Mote P, Thomas RH & Zang T (2007). Observations: changes in Snow, ice and frozen ground. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis KB, Averyt M, Tignor & HL Miller (Eds.) (Cambridge and New York: Cambridge University Press), p 337-384.
- Leroy M (1990) Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. École d'Été en Télédétection Spatiale : Aspects physiques et Modélisation, août 1988, CEPADUES Ed, (France) :311-363.
- Liang T, Zhang X, Xie H, Wu C, Feng Q, Huang X & Chen Q (2008) Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements. *Remote Sensing of Environment* 112(10):3750-3761.
- Li P (2001) Response of Xinjiang snow cover to climate change. *Acta Meteorologica Sinica* 59: 491–497 (in Chinese).
- Lucas RM & Harrison AR (1990) Snow observation by satellite: a review. *Remote Sensing Reviews* 4: 285–348.
- MacKay MD, Bartlett PA, Chan E, Derksen C, Guo S & Leighton H (2006) On the simulation of regional scale sublimation over boreal and agricultural landscapes in a climate model. *Atmosphere-Ocean* 44 (3):289–304.
- Massom RA (Ed.) (1991) *Satellite Remote Sensing of Polar Regions: Applications, Limitations and Data Availability* (Boca Raton, FL: Lewis Publishers).

- Matson M, Roepewski CF & Varnadore MS (1986) An Atlas of Satellite-Derived Northern Hemisphere Snow Cover Frequency. *National Weather Service*. (Washington, DC), p75.
- Maurer EP, Rhoads JD, Dubayah RO & Lettenmaier DP (2003) Evaluation of the snow covered area data product from MODIS. *Hydrological Processes* 17:59–71.
- Miller SD & Lee TF (2005) Satellite-based imagery techniques for day time cloud/snow delineation from MODIS. *Journal of Applied Meteorology* 44, p 987–997.
- Niu GY & Yang ZL (2007) An observation-based formulation of snow cover fraction and its elevation over large North American river basins. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112. DOI:10.1029/2007/JD008674.
- Nghiem SV & Tsai W (2001) Global snow cover monitoring with Spaceborne Kuband scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 2118–2134.
- NOAA (2007) NOAA KML User's Guide <http://ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc3docs/klm/index.htm>
- Nolin AW & Dozier J (2000) A hyperspectral method for remotely sensing the grain size of snow. *Remote Sensing of Environment* 74 (2):207–216.
- Notarnicola C, Duguay M, Moelg N, Schellenberger T, Tetzlaff A, Monsorno R, Costa A, Steurer C & Zebisch M (2013) Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution, part 1: Algorithm description. *Remote Sensing* 5:110–126.
- Pepe M, Brivio PA, Rampini A, Rotanodari F & Boschetti M (2005) Snow cover monitoring in Alpine regions using ENVISAT optical data. *International Journal of Remote Sensing* 26: 4661–4667.
- Poon SKM & Valeo C (2006) Investigation of the MODIS snow mapping algorithm during snowmelt in the northern boreal forest of Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32:254-267.
- Qin D, Liu S & Li P (2006) Snow cover distribution, variability, and response to climate change in Western China. *Journal of Climate* 19: 1820–1833.
- Ramsay BH (2000) Prospects for the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) (*Eastern Snow Conference 2000*). (New York, USA).
- Ramsay BH (1998) The interactive multisensor snow and ice mapping system. *Hydrological Processes* 12:1537–1546.

- Régis C & Claude C (2001) Précis de Télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection. Vol 3, pp 339-340.
- Riggs GA, DiGirolamo N & Hall DK Comparison of MODIS Snow Cover Maps at 0.05- and 0.25-Degree Resolutions. In *62nd Eastern Snow Conference*, 2005, Waterloo, Canada, pp. 21-27.
- Roesch A, Gilgen H & Ohmura A (1999) A Assessment of GCM simulated snow albedo using direct observations. *Climate Dynamics* 15(6):405.
- Roberge S (2013) Développement d'un algorithme satellitaire évolutifs pour le suivi de l'étendu spatiale du couvert nival au Québec-Labrador et son adaptation à l'estimation d'ensemble (R1395, Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement, Québec, Canada).
- Robinson DA, Dewey KF & Heim RRJ (1993) Global snow cover monitoring: an update. *Bulletin of the American Meteorological Society* 74 (9):1689–1696.
- Robinson DA & Frei A (2000) Seasonal variability of Northern Hemisphere snow extent using visible satellite data. *Professional Geographer* 52 (2):307–315.
- Robinson DA, Tarpley JD & Ramsay BH (1999) Transition from NOAA weekly to daily hemispheric snow charts. *10th Symposium on Global Change Studies* (Dallas, TX), *American Meteorological Society*.
- Romanov P, Gutman G & Csiszar I (2000) Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data. *Journal of Applied Meteorology* 39(11):1866-1880.
- Rosenthal W & Dozier J (1996) Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resources Research* 32(1):115-130.
- Rott H (1987) Remote sensing of snow. In *Proceedings of the Vancouver Symposium*, August 1987, IAHS Publication 166:279–290.
- Rott H & Nagler T (1994), Capabilities of the ERS-1 SAR for snow and glacier monitoring in Alpine areas. In *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium – Space at the Service of Our Environment*, 11–14 October 1993, Hamburg, Germany, ESA SP 361(Paris: European Space Agency), p 965–970.

- Royer A, Goita K, Kohn J & De Sève D (2010) Monitoring Dry, Wet, and No-Snow Conditions from Microwave Satellite Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 7(4):760-674.
- Salomonson VV & Appel I (2003) Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89: 351-360.
- Salomonson VV & Appel I (2006) Development of the aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(7):1747-1756
- Serreze MC, Clark MP, Armstrong RL, McGinnis DA & Pulwarty RS (1999) Characteristics of the western United States snowpack from snowpack telemetry (SNOTEL) data. *Water Resources Research* 35:2145–2160. DOI: 10.1029/1999WR900090.
- Shimamura Y, Izumi T & Matsuyama H (2006) Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing* 27(21):4867–4884.
- 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(6):1089-1104.
- Singer FS & Popham PW (1963) Non-meteorological observations from weather satellites. *Astronautics and Aerospace Engineering* 1(3):89-92.
- Solberg R, Koren H & Amlien J (2006) *A Review of Optical Snow Cover Algorithms*, Norwegian Computing Centre Note SAMBA/40/06 (Norway: Norsk Regnesentral).
- Stehman SV & Czaplewski RL (1998) Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64: 331-334.
- Stroeve JC, Box JE, Haran T (2006) Evaluation of the MODIS (MOD10A1) daily snow albedo product over the Greenland ice sheet. *Remote Sensing of Environment*, 105 (2):155–171
- Strozzi T, Teatini P & Tosi L (2009) TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. *Remote Sensing of Environment* 113: 2682–2688.
- Tait AB, Barton JS & Hall DK (2001) A prototype MODIS-SSM/I snow-mapping algorithm. *International Journal of Remote Sensing* 22(17):3275-3284.

- Todhunter PE (2001) A hydroclimatological analysis of the Red River of the North snowmelt flood catastrophe of 1997. *Journal of the American Water Resources Association* 37(5):1263–1278.
- Trishchenko AP, Khlopenkov KV, Ungureanu C, Latifovic R, Luo Y & Park WM (2008) Mapping of surface albedo over Mackenzie River basin from satellite observations. In *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies: The Mackenzie GEWEX Experience Volume I* (pp. 327–341).
- Trishchenko AP, Luo Y & Khlopenkov KV (2006) A method for downscaling MODIS land channels to 250 m spatial resolution using adaptive regression and normalization. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Vol.6366 art. no. 636607. 8pp.
- Tucker CJ (1986) Maximum normalized difference vegetation index images for sub-Saharan Africa for 1983-1985. *International Remote Sensing* 7:1383-1384.
- Tucker CJ (1979) Red and photographic infrared linear combinations. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150.
- Ulaby FT & Styles WE (1980) The Active and Passive Microwave Response to Parameters 1. Wetness, *Journal of Geophysical Research*, vol85, no.c2,pp 1-456.
- Voigt S, Koch M & Baumgartner MF (1999) A multichannel threshold technique for NOAA AVHRR data to monitor the extent of snow cover in the Swiss Alps. *Interactions between the Cryosphere, Climate and Greenhouse Gases*, Tranter M, Armstrong R, Brun E, Jones G, Sharp M & Williams M (Edit.) *International Association of Hydrological Sciences Publications*, Wallingford, UK, Vol 256. p 35-43.
- Vikhamar D & Solberg R (2002) Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 84(1):69-82.
- Wang L, Sharp M, Brown R, Derksen C & Rivard B (2005) Evaluating of spring snow covered area depletion in the Canadian Arctic from NOAA snow charts. *Remote Sensing of Environment* 95:453–463.
- Wang L, Derksen C & Brown R (2008a) Detection of pan-Arctic terrestrial snowmelt from QuickSCAT, 2000–2005. *Remote Sensing of Environment* 112:3794–3805.

- Wang X & Xie H (2009) New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua. *Journal of Hydrology* 371:192–200.
- Wolfe RE, Roy DP & Vermote E (1998) MODIS land data storage, gridding, and compositing methodology: level 2 grid. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4):1324–1338.
- Xiong X, Chiang K, Guenther B & Barnes WL (2002) MODIS reflective solar bands calibration algorithm and on-orbit performance. *Proceedings SPIE, Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III* Vol. 4891.
- Yang R, Friedl MA & Ni W (2001) Parameterization of shortwave radiation fluxes for non-uniform vegetation canopies in land surface models. *Journal of Geophysical Research* 106(13):14275–14286.
- Yi Luo, Alexander P & Konstantin V (2008) Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear sky composites at 250-meter spatial resolution for seven MODIS lands over Canada and North America. *Remote Sensing of Environment* 112:4167–4185.
- Zhou X, Xie H & Hendrickxa MHJ (2005) Statistical evaluation of remotely sensed snow-cover products with constraints from streamflow and SNOTEL measurements. *Remote Sensing of Environment* 94: 214–231.

ANNEXES

Annexe I

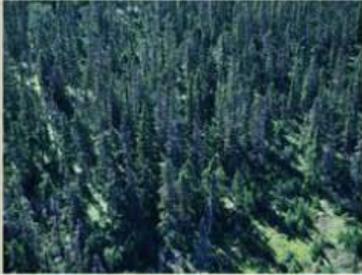
Usage principal	Bande	Bande passante ¹	Radiance spectrale ²	SNR requis ³
Frontières Terre / Nuage / Aérosols	1	620-670	21.8	128
	2	841-876	24.7	201
Propriétés Terrain / Cloud / Aérosols	3	459-479	35,3	243
	4	545-565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Couleur océan/ phytoplancton / biogéochimie	8	405-420	44,9	880
	9	438-448	41,9	838
	10	483-493	32,1	802
	11	526-536	27.9	754
	12	546-556	21,0	750
	13	662-672	9.5	910
	14	673-683	8.7	1087
	15	743-753	10.2	586
	16	862-877	6.2	516
Vapeur d'eau atmosphérique	17	890-920	10.0	167
	18	931-941	3.6	57
	19	915-965	15.0	250
<hr/>				
Usage principal	Bande	Bande passante ¹	Radiance Spectrale ²	NE [delta] Requis T(k) ⁴
Température Surface / nuage	20	3,660 à 3,840	0,45 (300K)	0,05
	21	3,929 à 3,989	2,38 (335K)	2.00
	22	3,929 à 3,989	0,67 (300K)	0,07
	23	4,020 à 4,080	0,79 (300K)	0,07
Température atmosphérique	24	4,433 à 4,498	0,17 (250K)	0,25
	25	4,482 à 4,549	0.59 (275K)	0,25
Cirrus (type de nuages) vapeur d'eau	26	1,360 à 1,390	6,00	150 (SNR)

	27	6,535 à 6,895	1.16 (240K)	0,25
	28	7,175 à 7,475	2.18 (250K)	0,25
Les propriétés des nuages	29	8,400 à 8,700	9,58 (300K)	0,05
Ozone	30	9,580 à 9,880	3,69 (250K)	0,25
Température Surface / nuages	31	10,780 à 11,280	9,55 (300K)	0,05
	32	11,770 à 12,270	8.94 (300K)	0,05
Nuages à haute altitude	33	13,185 à 13,485	4,52 (260K)	0,25
	34	13,485 à 13,785	3,76 (250K)	0,25
	35	13,785 à 14,085	3.11 (240K)	0,25
	36	14,085 à 14,385	2.08 (220K)	0,35

¹ bandes 1 à 19 sont en nm; bandes 20 à 36 sont en μm ² valeurs de luminance spectrale sont ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{um} \cdot \text{sr}$) ³ SNR = rapport signal-bruit ⁴ NE (Δ) T = bruit équivalent la différence de température

Note: objectif de rendement est de 30-40% de mieux que nécessaire

Annexe II

Canada 250m Land Cover Time Series 2000-2011 DESCRIPTIONS OF LAND COVER CLASSES	
TREE DOMINATED Land dominated by vegetation with a tree (woody plants with a height exceeding approximately 5 metres in most cases) crown density (percentage of the surface covered by projected tree crown perimeters) greater than 25%.	
	<p>Temperate or subpolar needle-leaved coniferous forest, high density (1)</p> <p>High density (> 60% cover) mature needle-leaved coniferous ($\geq 75\%$) forest. This class is found primarily in the southern boreal forest and in mountainous regions of western Canada.</p>
	<p>Temperate or subpolar needle-leaved coniferous forest, medium density (2)</p> <p>Medium density (40 – 60% cover) mature needle-leaved coniferous forest with variable understory composition. This class is found primarily in the central boreal region.</p>
	<p>Temperate or subpolar needle-leaved coniferous forest, low density (3)</p> <p>Low density (25 - 40% cover) mature needle-leaved coniferous forest with variable understory composition. This class is commonly located on wet, poor sites in the central boreal region and in the northern boreal forest.</p>
	<p>Cold deciduous broad-leaved forest, high density (4)</p> <p>High density ($\geq 60\%$ cover) mature deciduous broad-leaved (> 75%) forest. Concentrated occurrence of deciduous broad-leaved forest with high crown density.</p>

A.II.1.(1) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)

	<p>Cold deciduous broad-leaved forest, medium density (5)</p> <p>Medium density (< 60 % cover) mature deciduous broad-leaved forest.</p>
	<p>Cold deciduous broad-leaved forest, low to medium density, young regenerating (6)</p> <p>Low to medium density (25 – 60% cover) deciduous broad-leaved forest. In southern agriculture dominated ecosystems density tends to be low. Higher density occurs in regenerating areas from older disturbances.</p>
	<p>Mixed needle-leaved cold deciduous broad-leaved forest, high density (7)</p> <p>High density (> 60% cover) mixed forest, can be either needle-leaved or broad-leaved dominate.</p>
	<p>Mixed needle-leaved cold deciduous forest, medium density (8)</p> <p>Medium density (<60 cover) mature mixed forest, can be either needle-leaved or broad-leaved dominate. Often occurs as regenerating cover in older disturbances.</p>

A.II.1.(2) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)

	<p>Mixed needle-leaved cold deciduous forest, low to medium density, young regeneration (9)</p> <p>Low to medium density (25 – 60% cover) mixed needle-leaved and cold deciduous young tree canopy commonly occurring after disturbance.</p>
	<p>Shrubland (10)</p> <p>Dry to wet areas dominated by shrubs, commonly occurring as a successional stage post-disturbance.</p>
	<p>Annual Graminoid or Forb Vegetation</p> <p>Land containing agricultural cropland or a mixture of forest, shrubland, grassland or built-up areas.</p>
	<p>Grassland (11)</p> <p>Land with herbaceous (non-woody) vegetation cover with a tree or shrub cover < 10%. This class is restricted to the Prairie region of Canada.</p>
	<p>Herb-shrub, low vegetation cover (12)</p> <p>Herbaceous and low shrub density vegetation occurring on thin soils or after disturbance.</p>

A.II.1.(3) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250 m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)

	<p>Taiga, sparse conifer (13)</p> <p>Sparse, needle-leaved coniferous tree layer < 25% density, composed of spruce and tamarack with herbs, shrubs and mosses present in the understory. Found along the northern treeline.</p>
	<p>Shrub-herb-lichen cover (14)</p> <p>Mesic to dry tundra dominated graminoids, erect and prostrate dwarf shrubs < 50 cm. Also contains varying amounts of lichen and bare soil.</p>
	<p>Herb-shrub-lichen cover (15)</p> <p>Mesic, generally non-tussock tundra consisting of varying mixtures of graminoids, dwarf shrubs, moss and lichen. May also contain bare soil due to cryoturbation.</p>
	<p>Herb-shrub-lichen cover (16)</p> <p>Treeless barren land with shallow soils supporting lichen growth that occurs on the northern mainland and arctic islands and lichen bogs with sedges, sphagnum moss and low dwarf shrubs such as Labrador Tea and Crowberry.</p>

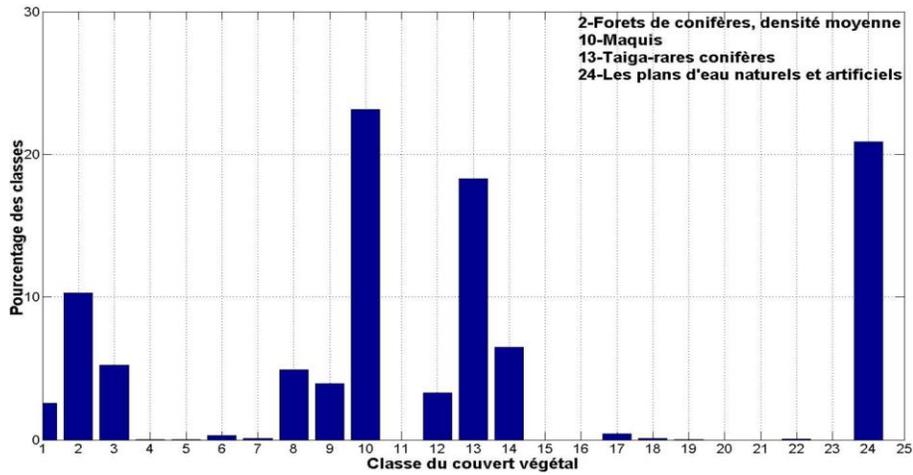
A.II.1.(4) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250 m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)

	<p>Wetland, shrub-herb (17)</p> <p>Vegetated areas where the water table intersects the land surface all or part of the year, including fens, swamps, marshes and shallow water. Confusion can occur with other low vegetation cover classes.</p>
	<p>Wetland, treed (18)</p> <p>Wet treed bogs with a low density (<40% cover), mature needle-leaved coniferous tree layer, composed of spruce and tamarack. Variable shrub-herb-lichen-moss present in the understory. Low density conifer (3) and Taiga (13) may also be considered wetlands in some regions.</p>
	<p>Cultivated and managed areas, high biomass (19)</p> <p>Farmland dominated by high-biomass broadleaved crops owing to the type of crop (e.g. corn), climate or developmental stage.</p>
	<p>Cultivated and managed areas, medium biomass (20)</p> <p>Farmland dominated by medium-biomass broadleaved crops owing to the type of crop (e.g. soybean), climate or developmental stage. May be confused with high or low biomass croplands.</p>

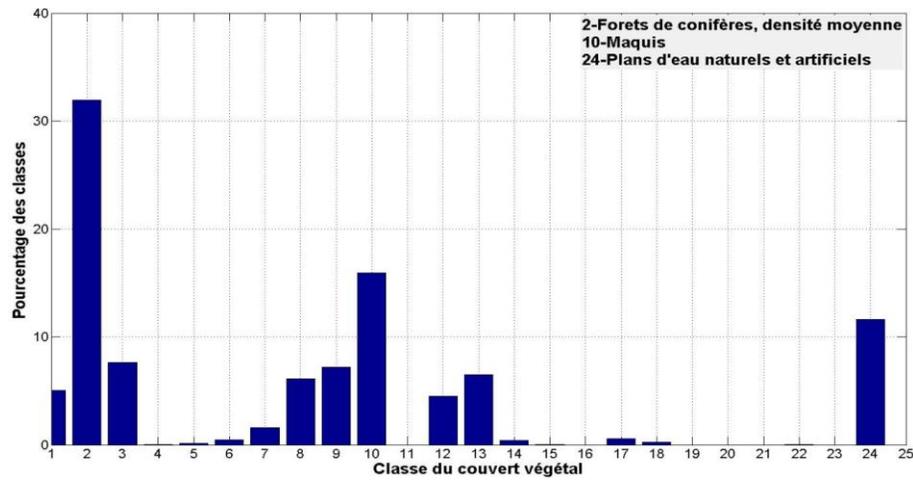
A.II.1.(5) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250 m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)

	<p>Cultivated and managed areas, low biomass (21)</p> <p>Farmland dominated by low-biomass broadleaved crops owing to the type of crop (e.g. alfalfa), climate or developmental stage.</p>
	<p>VEGETATION NOT DOMINANT</p> <p>Vegetation is scattered; total vegetation cover, excluding crustose lichens is generally less than 15%.</p>
	<p>Barren land (22)</p> <p>Barren lands dominated by rock outcrops and bare soil with generally < 10% vegetation cover. This class is particularly abundant at high altitudes and high latitudes. Most commonly confused with class 23 Urban and built-up.</p>
	<p>Urban and built-up (23)</p> <p>This is a land use category that is composed of a mixture of surface types, including green vegetation and bare ground-type materials such as concrete, asphalt and soil. Most commonly confused with class 22 Barren land.</p>
	<p>Water bodies natural and artificial (24)</p> <p>This class occurs where water occupies a significant percentage (generally > 50%) of the pixel area.</p>
	<p>Snow and ice (25)</p> <p>Land covered with permanent ice or snow.</p>

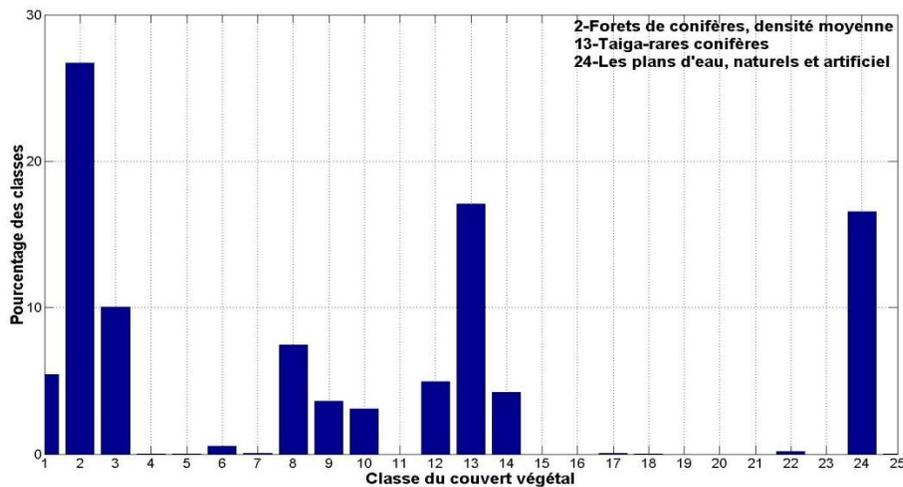
A.II.1.(6) Classes d'occupation du sol du Canada développées à partir des images MODIS de 250 m de résolution de l'année 2000 à 2011 (Centre Canadien de Télédétection, 2012)



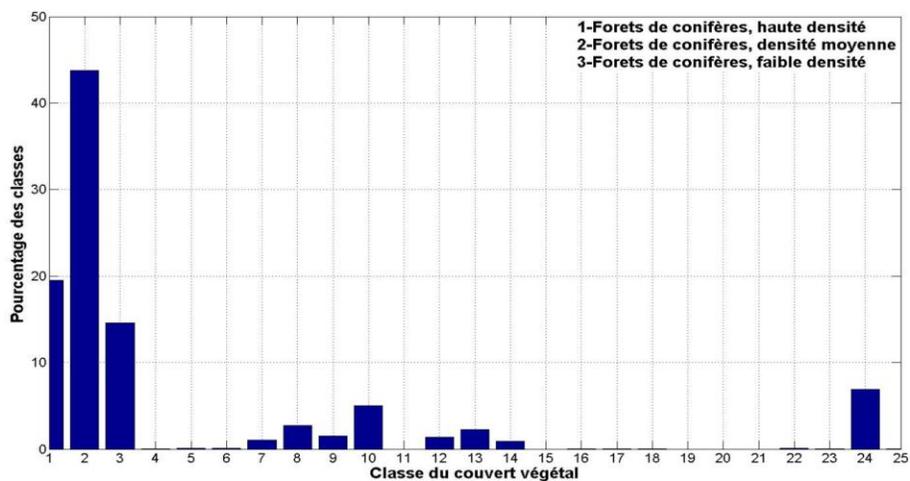
A.II.2. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 2 Landsat



A.II.3. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 3 LANDSAT



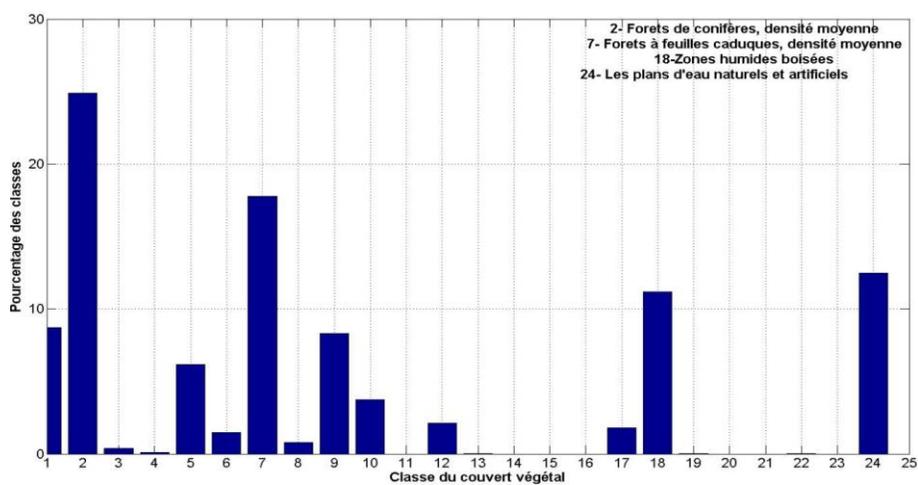
A.II.4. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 5 LANDSAT



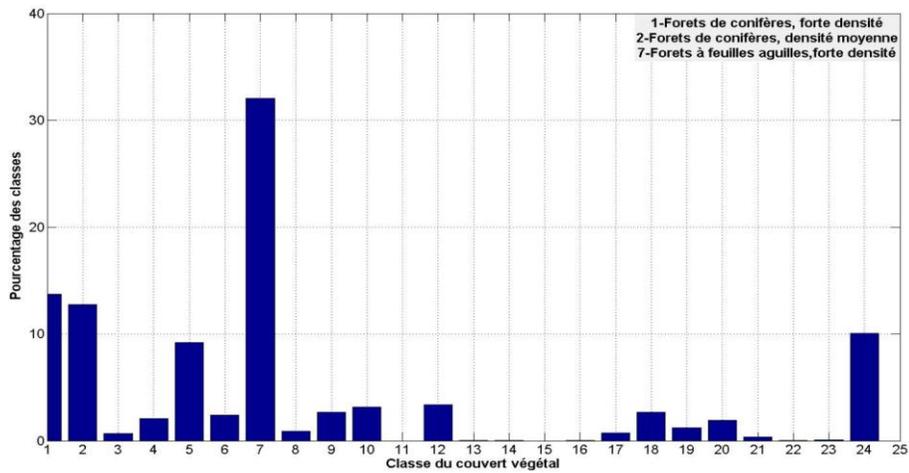
A.II.5. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 6 LANDSAT



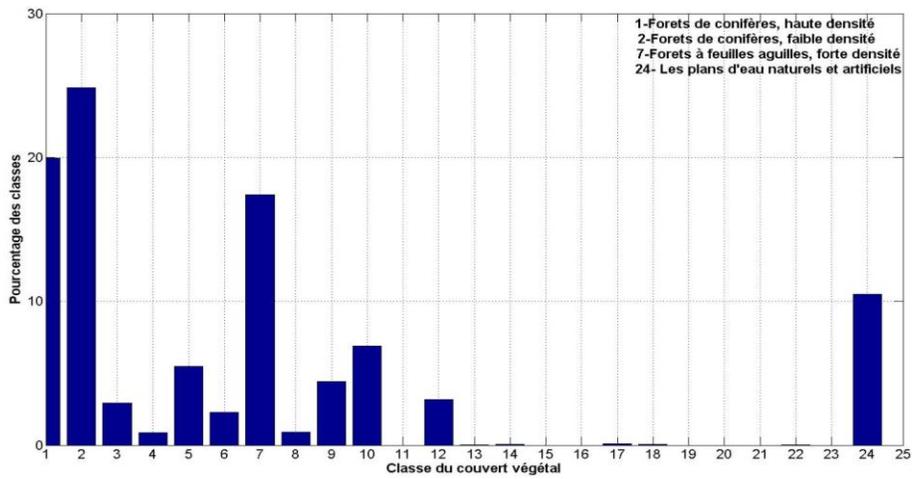
A.II.6. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 7 LANDSAT



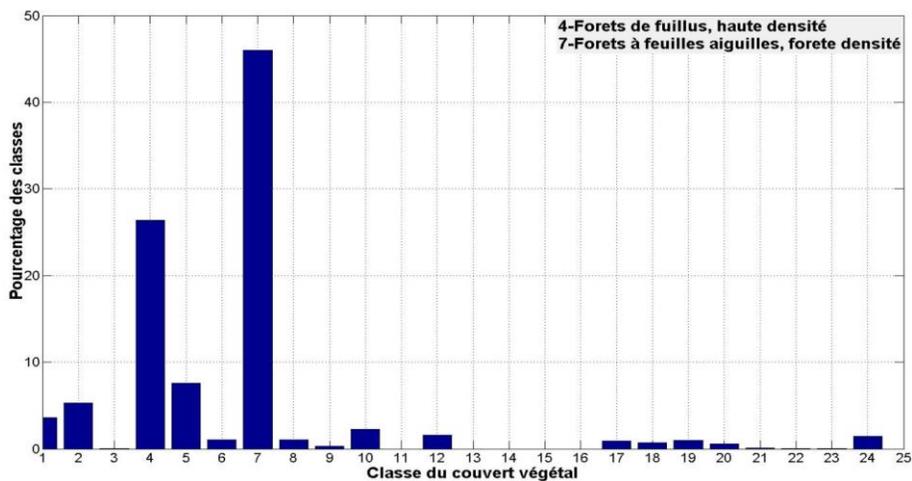
A.II.7. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 8 LANDSAT



A.II.8. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 9 LANDSAT



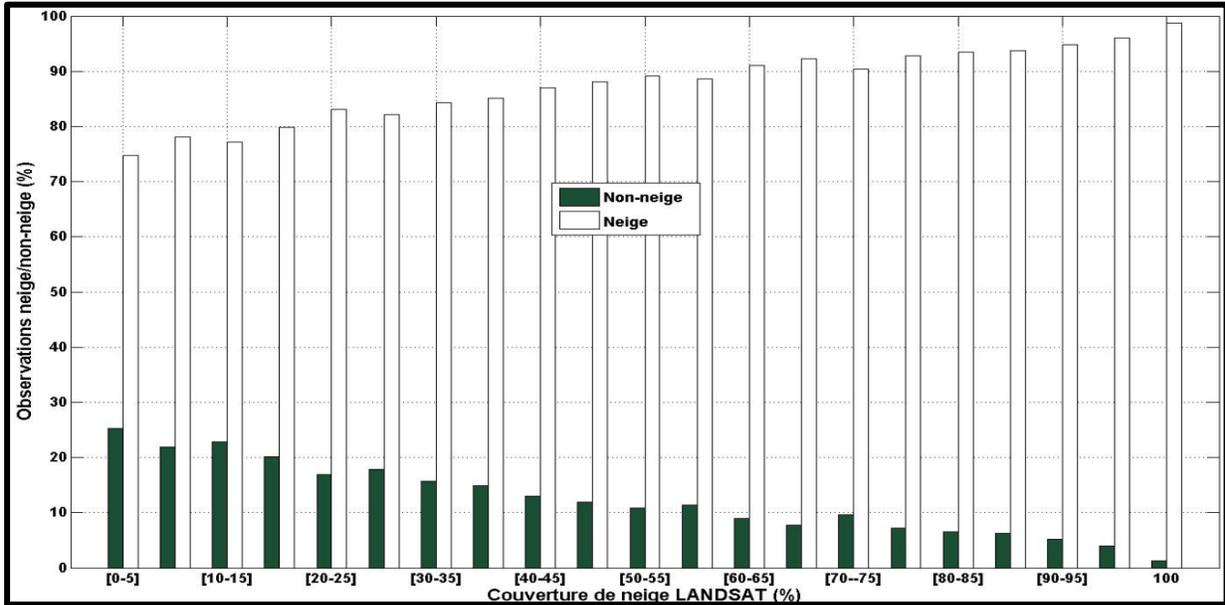
A.II.9. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 10 LANDSAT



A.II.10. Répartition de l'occupation du sol de la tuile 11 ANDSAT

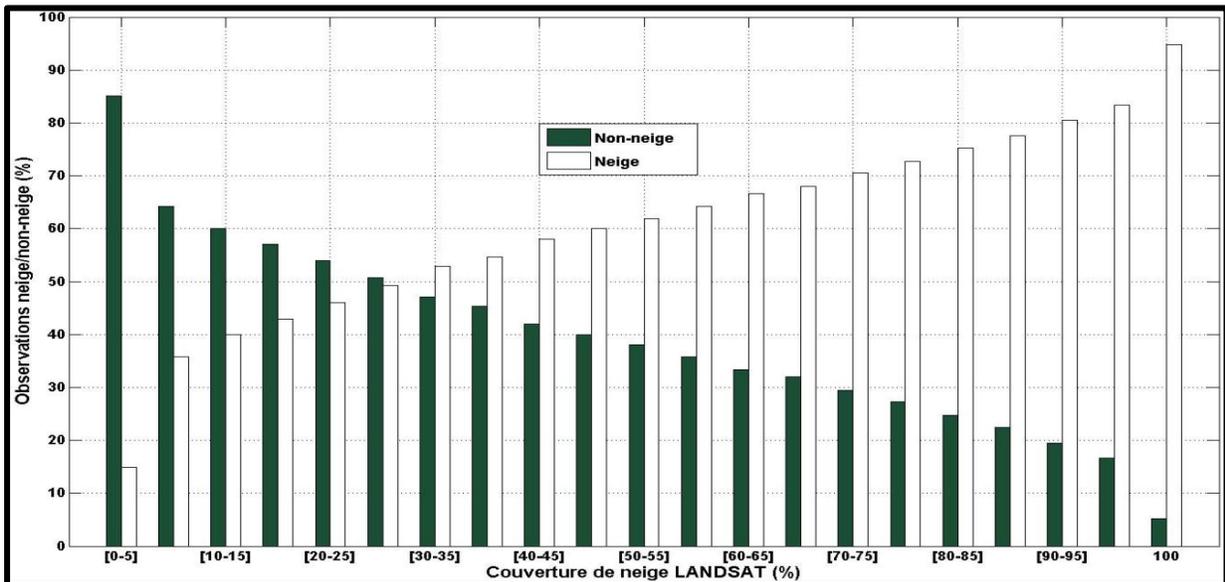
Annexe III :

1) Milieu ouvert



A.III.1. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250 m avec les images LANDSAT prises en milieu ouvert le 19 novembre 2006 (Tuile 06)

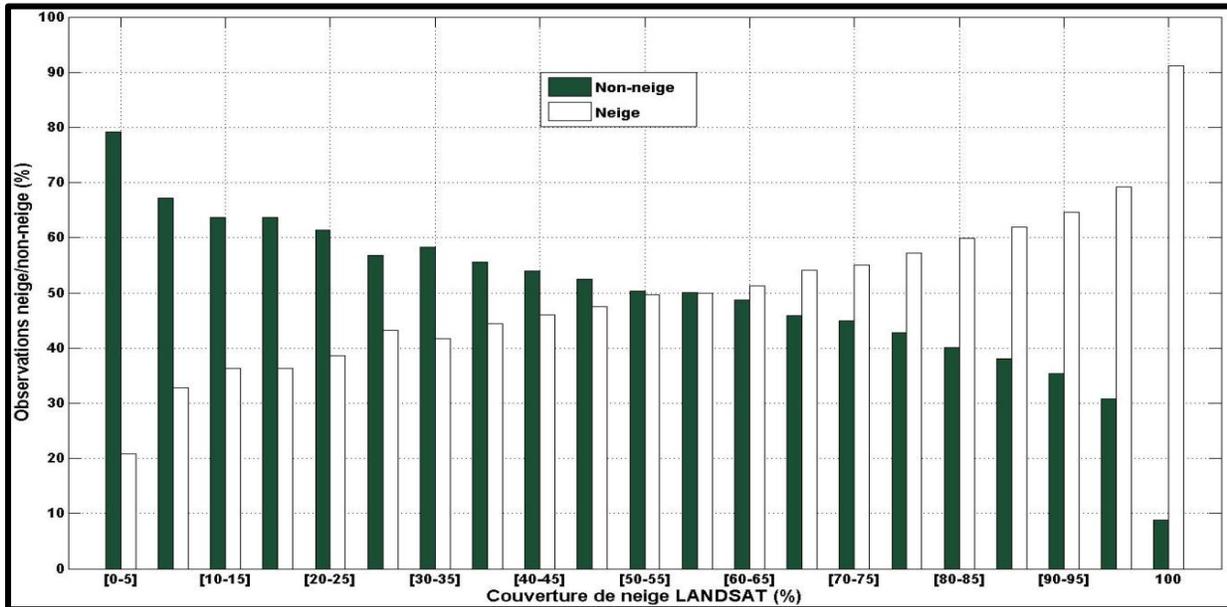
En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



A.III.2. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250 m avec les images LANDSAT prises en milieu ouvert le 18 avril 2006 (Tuile 02)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m

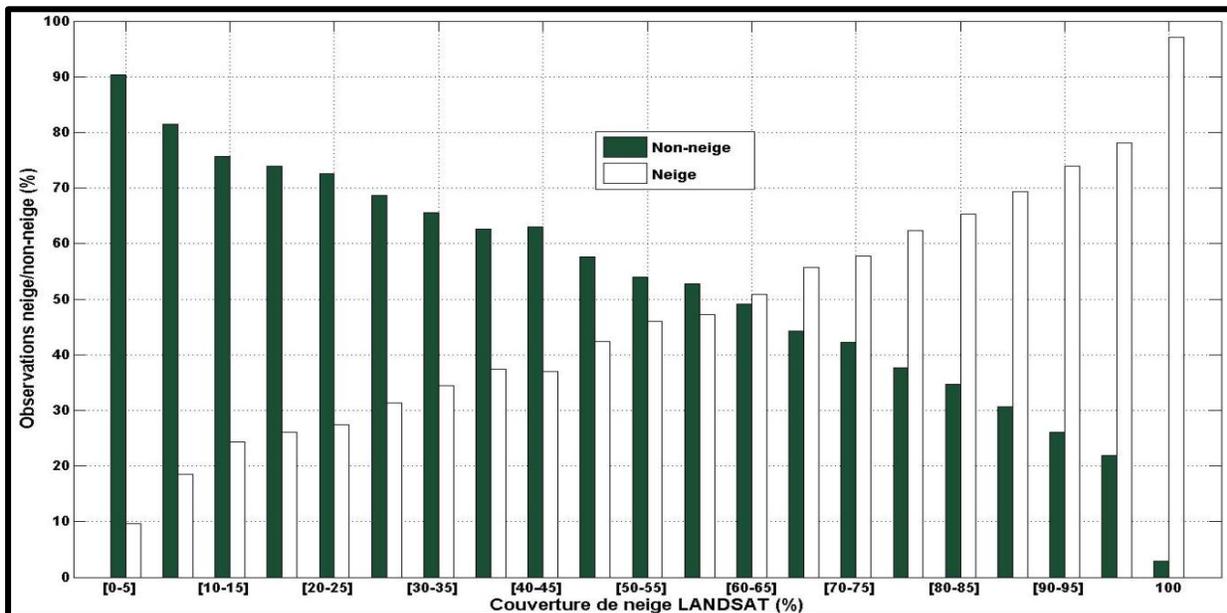
2) Milieu de transition



A.III.3. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250 m avec les images LANDSAT prises en milieu de transition le 12 mai 2009(Tuille 03)

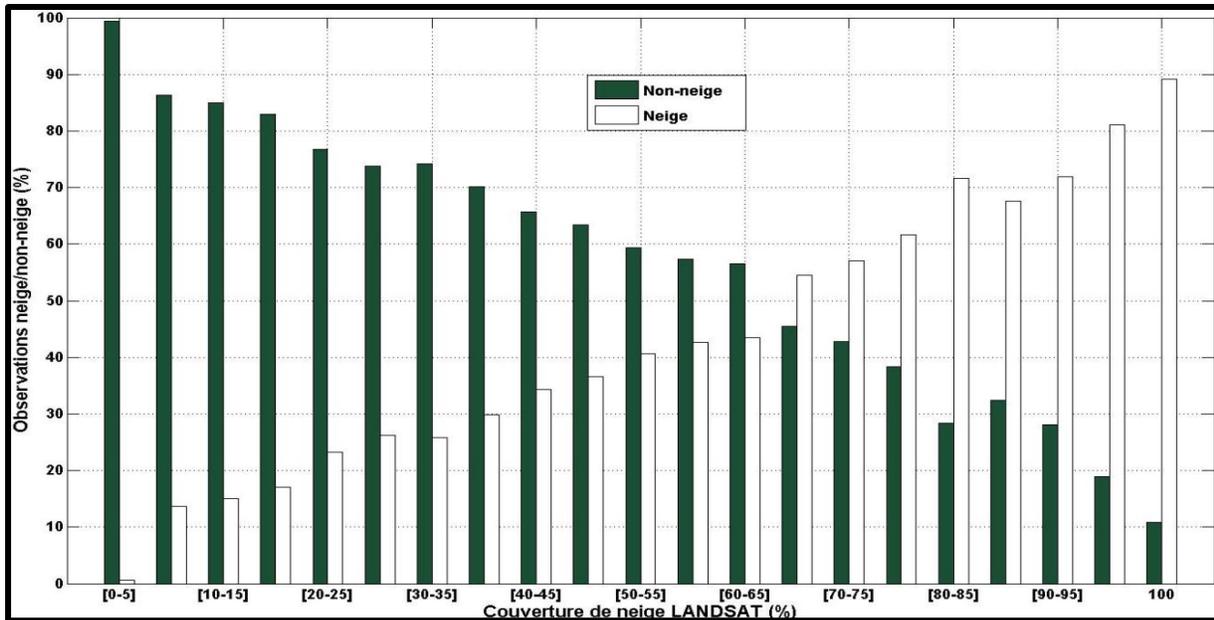
En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m

3) Milieu fermé



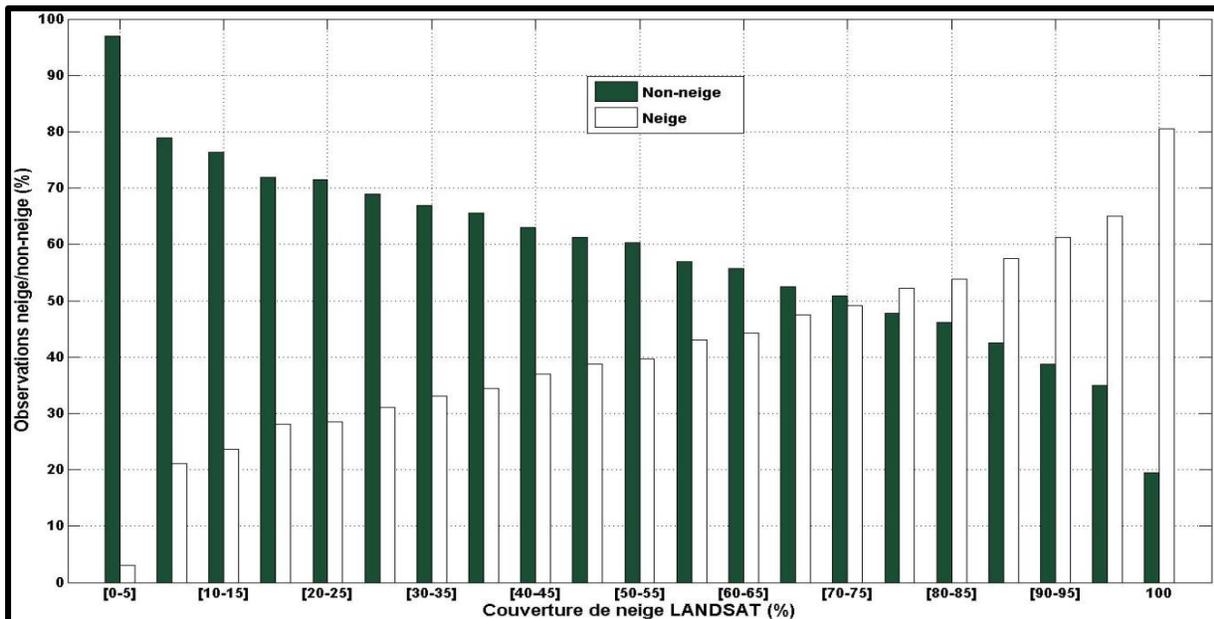
A.III.4. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 25 mai 2004 (Tuille 05)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



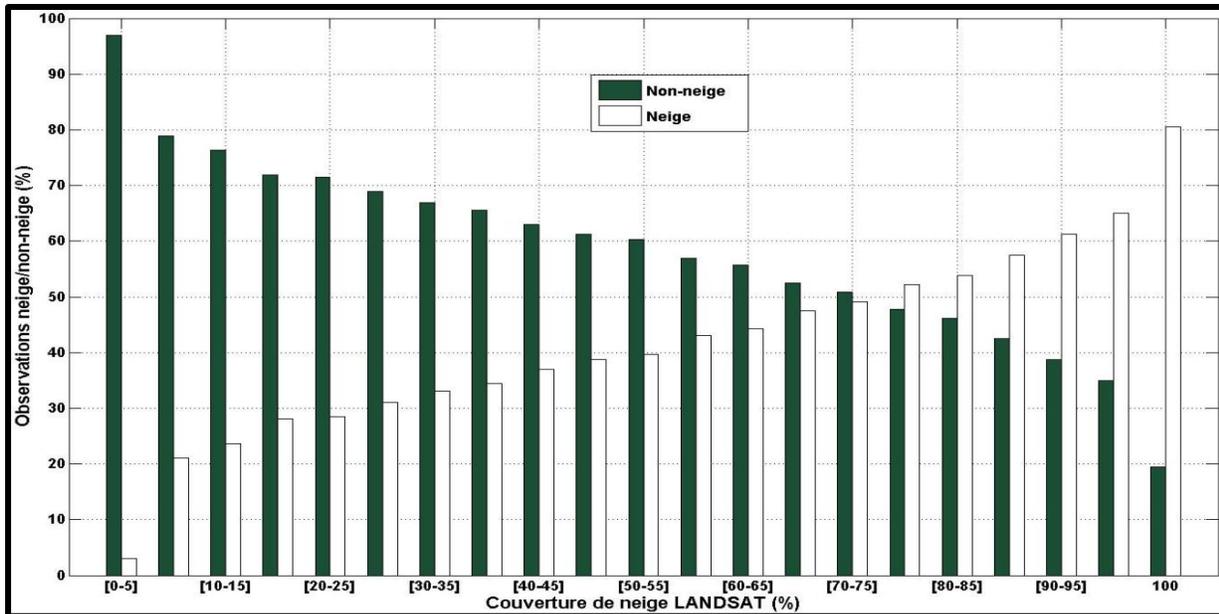
A.III.5. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 26 mai 2005 (Tuile 04)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



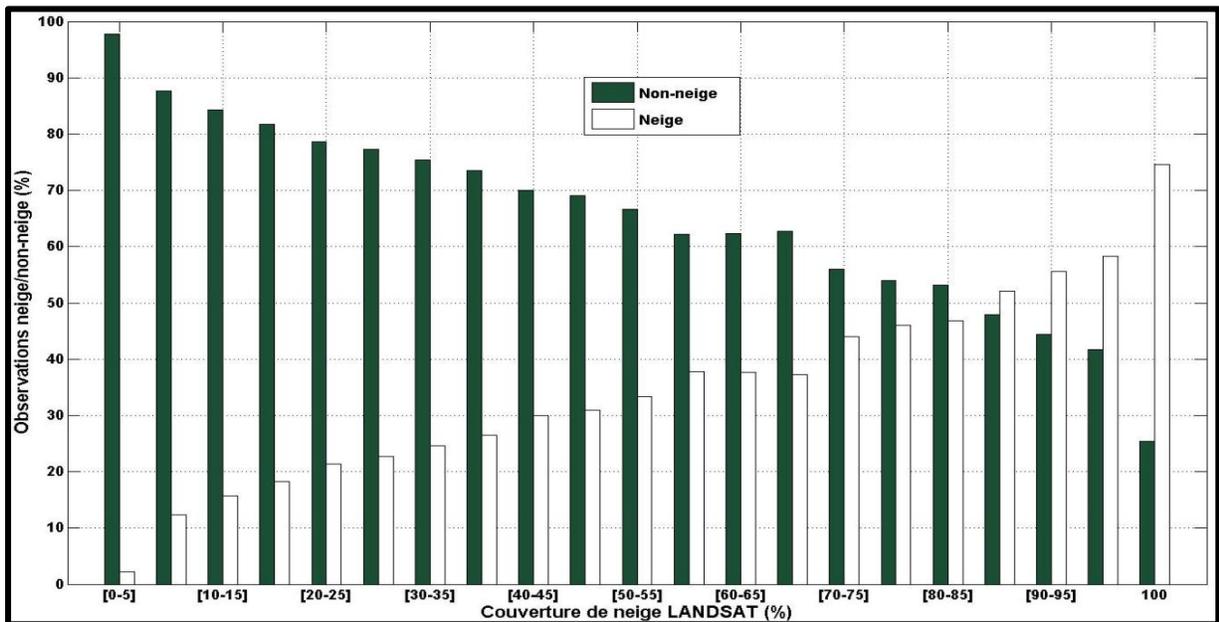
A.III.6. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 23 avril 2007 (Tuile 09)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



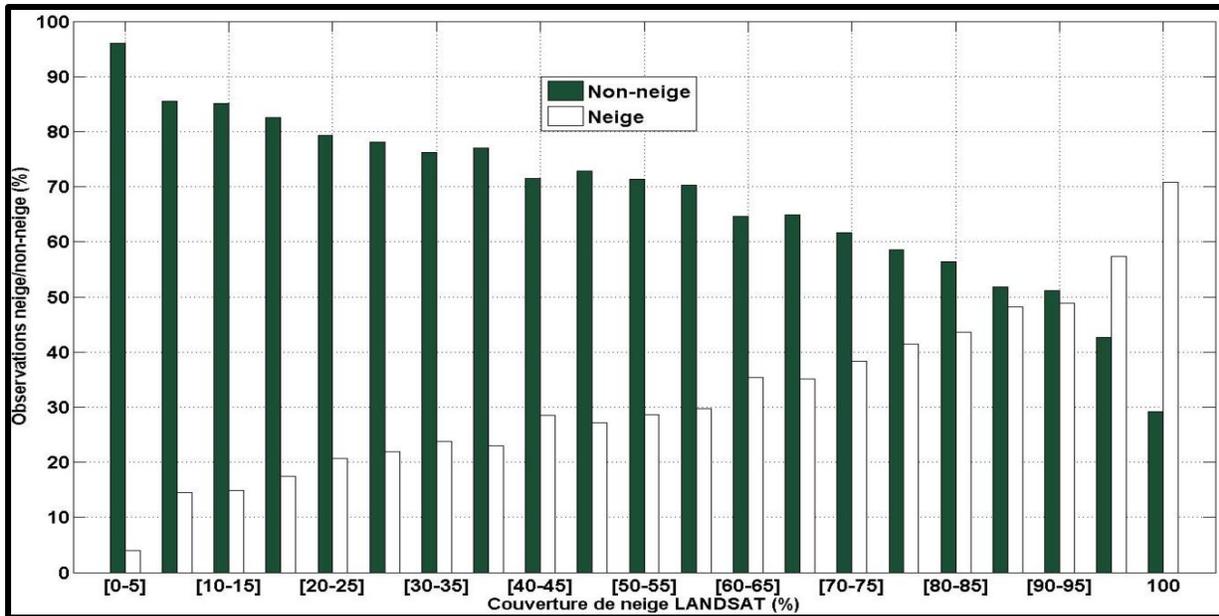
A.III.7. Statistiques de la validation de l’algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 13 mai 2004 (Tuile 07)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



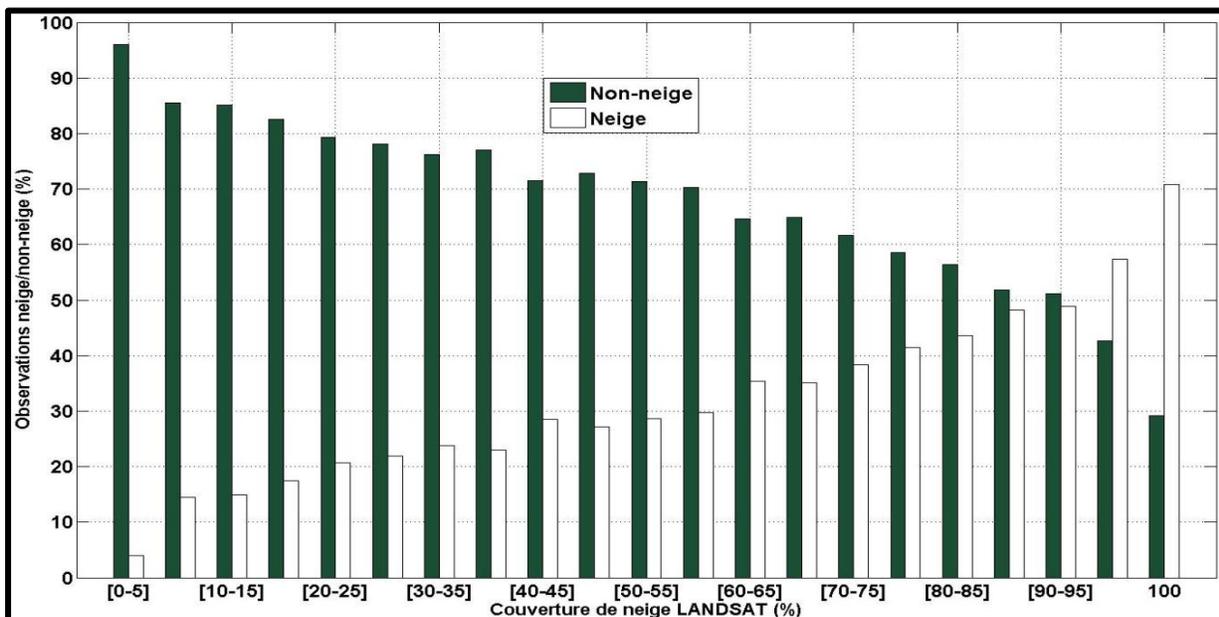
A.III.8. Statistiques de la validation de l’algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 12 mai 2009 (Tuile 03)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



A.III.9. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 26 novembre 2006 (Tuile 08)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m



A.III.10. Statistiques de la validation de l'algorithme SNOWMAP-images MODIS 250m avec les images LANDSAT prises en milieu fermé le 19 novembre 2009 (Tuile 07)

En abscisses : la couverture de neige en % pour les n pixels LANDSAT (équivalent à un pixel MODIS de 250 m de résolution) et en coordonnées le pourcentage de la neige et de la non-neige dans un pixel MODIS 250 m

Annexe IV

A.IV.1. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 25 mai 2004 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 65% (Tuile 5)

25-05-004		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
MODIS	Non neige	33004	16539	49543	33	67
	neige	47461	289090	336551	14	86
	Total	80465	305629	386094		
	Erreur de commission (%)	59	5			
	Taux de succès (%)	41	95			
		K=0,4			Taux de succès global 83%	

A.IV.2. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 26 mai 2005 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 65% (Tuile 4)

26-05-2005		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
MODIS	Non neige	29875	27750	57625	48	52
	neige	30503	258424	288927	11	89
	Total	60378	286174	346552		
	Erreur de commission (%)	50,5	10			
	Taux de succès (%)	49,5	90			
		K=0,4			Taux de succès global 83 %	

A.IV.3. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 23 avril 2007 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 75% (Tuile 9)

23-04-2007		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
MODIS	Non neige	64846	18988	83834	23	77
	neige	36493	100058	136551	27	73
	Total	101339	119046	220385		
	Erreur de commission (%)	36	16			
	Taux de succès (%)	64	84			
K=0,5				Taux de succès global 75 %		

A.IV.4. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 13 mai 2004 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 80% (Tuile 7)

13-05-2004		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
MODIS	Non neige	2451	16738	19189	87	13
	neige	2679	149408	152087	2	98
	Total	5130	166146	171276		
	Erreur de commission (%)	52	10			
	Taux de succès (%)	48	90			
K=0,2				Taux de succès global 89 %		

A.IV.5. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 06 mai 2008 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 85% (Tuile 10)

06-05-2008		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
MODIS	Non neige	322066	18853	340919	5,5	94,5
	neige	1834	2915	4749	39	61
	Total	323900	21768	345668		
	Erreur de commission (%)	1	87			
	Taux de succès (%)	99	13			
K=0,2				Taux de succès global 94%		

A.IV.6. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 12 mai 2009 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 85% (Tuile 11)

12-05-2009		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
MODIS	Non neige	444947	1164	446111	0	100
	neige	2687	665	3352	80	20
	Total	447634	1829	449463		
	Erreur de commission (%)	1	64			
	Taux de succès (%)	99	36			
K=0,3			Taux de succès global 99%			

A.IV.7. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 26 novembre 2006 lors de l'application d'un seuil de saturation en neige de 95% (Tuile 8)

26-11-2006		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
MODIS	Non neige	158437	10383	168820	6	94
	neige	567	1138	1705	33	67
	Total	159004	11521	170525		
	Erreur de commission (%)	0	90			
	Taux de succès (%)	100	10			
K=0,2			Taux de succès global 94%			

Annexe V

1) Milieu ouvert

A.V.1. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 19 novembre 2006 (Tuile 06)

19-11-2006		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	205884	1202	207086	0,6	99,4
	neige	119978	14923	134901	88,9	11,1
	Total	325862	16125	341987		
MODIS	Erreur de commission (%)	36,8	7,4			
	Taux de succès (%)	63,2	92,5			
		K=0,1		Taux de succès global 65%		

A.V.2. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 29 mai 2005 (Tuile 01)

29-05-2005		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	67418	14054	81472	17	83
	neige	32750	241825	274575	12	88
	Total	100168	255879	356047		
MODIS	Erreur de commission (%)	33	5,5			
	Taux de succès (%)	67	94,5			
		K=0,6		Taux de succès global 87%		

A.V.3. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 26 novembre 2001 (Tuile 02)

26-11-2001		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	1405	3213	4618	70	30
	neige	158	10039	10197	1,5	98,5
	Total	1563	13252	14815		
MODIS	Erreur de commission (%)	10	24			
	Taux de succès (%)	90	76			
		K=0,3		Taux de succès global 77%		

A.V.4. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 18 avril 2006 (Tuile 02)

18-04-2006		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	208915	3712	212627	2	98
	neige	38802	40195	78997	49	51
	Total	247717	43907	291624		
MODIS	Erreur de commission (%)	16	8.5			
	Taux de succès (%)	84	91.5			
		K=0,6		Taux de succès global 85%		

A.V.5. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 13 mai 2005 (Tuile 02)

13-05-2005		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	64431	2236	66667	3	97
	neige	1540	29285	30825	5	95
	Total	65971	31521	97492		
MODIS	Erreur de commission (%)	2	7			
	Taux de succès (%)	98	93			
		K=0,9		Taux de succès global 96%		

2) Milieu de transition

A.V.6. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 12 mai 2009 (Tuile 03)

* 12-05-2009		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	305188	2804	307992	1	99
	neige	853	1780	2633	32	68
	Total	306041	4584			
MODIS	Erreur de commission (%)	0	61			
	Taux de succès (%)	100	39			
		K=0,5		Taux de succès global 90%		

A.V.7. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 28 mai 2008 (Tuile 03)

28-05-2008		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	52985	9060	62045	15	85
	neige	48354	109986	158340	30,5	69,5
	Total	101339	119046	346552		
MODIS	Erreur de commission (%)	48	8			
	Taux de succès (%)	52	92			
				K=0,5	Taux de succès global 74%	

3) Milieu fermé

A.V.8. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 25 mai 2004 (Tuile 5)

25-05-2004		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	27667	12099	39766	30	70
	neige	52798	293530	346328	15	85
	Total	80465	305629	386094		
MODIS	Erreur de commission (%)					
	Taux de succès (%)					
				K=0,4	Taux de succès global 83%	

A.V.9. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 26 mai 2005 (Tuile 4)

26-05-2005		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	24403	18270	42673	43	57
	neige	35975	267904	303879	12	88
	Total	60378	286174			
MODIS	Erreur de commission (%)	60	6			
	Taux de succès (%)	40	94			
				K=0,4	Taux de succès global 84 %	

A.V.10. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 23 avril 2007 (Tuile 9)

23-04-2007		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	52985	9060	62045	15	85
	neige	48354	109986	158340	30	70
	Total	101339	119046	220385		
MODIS	Erreur de commission (%)	48	8			
	Taux de succès (%)	52	92			
K=0,5				Taux de succès global 74 %		

A.V.11. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 13 mai 2004 (Tuile 7)

13-05-2004		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	1500	7105	8605	83	17
	neige	3630	159041	162671	2	98
	Total	5130	166146	171276		
MODIS	Erreur de commission (%)	71	4			
	Taux de succès (%)	29	96			
K=0,2				Taux de succès global 94 %		

A.V.12. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 06 mai 2008 (Tuile 10)

06-05-2008		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	315727	14688	330415	4	96
	neige	8173	7080	15253	54	46
	Total	323900	21768	345668		
MODIS	Erreur de commission (%)	2,5	67,5			
	Taux de succès (%)	97,5	32,5			
K=0,3				Taux de succès global 93%		

A.V.13. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 12 mai 2009 (Tuile 11)

12-05-2009		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	436698	879	437577	0	100
	neige	10936	950	11886	92	8
	Total	447634	1829	449463		
MODIS	Erreur de commission (%)	2	48			
	Taux de succès (%)	98	52			
K=0,1				Taux de succès global 97 %		

A.V.14. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 26 novembre 2006 (Tuile 08)

26-11-2006		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	155389	8524	163913	5	95
	neige	3615	2997	6612	55	45
	Total	15900	11521	170525		
MODIS	Erreur de commission (%)	2	74			
	Taux de succès (%)	98	26			
K=0,3				Taux de succès global 93%		

A.V.15. Matrice d'erreur de la classification SNOWMAP-250 m pour le 12-11-2009 (Tuile 07)

12-11-2009		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	3339	1163	4502	25,8	74,2
	neige	34337	308394	342731	10	89,9
	Total	37676	309557	347233		
MODIS	Erreur de Commission (%)	91	0			
	Taux de succès (%)	9	100			
K=0,1				Taux de succès global 90 %		

Annexe VI

1) Milieu ouvert

A.VI.1.Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 18 avril 2006 (tuile 02)

18-04-2006		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	8842	31149	39991	78	22
	neige	4500	62976	67476	7	93
	Total	13342	94125	107467		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	34	33			
	Taux de succès (%)	66	67			
K=0,2				Taux de succès global 67%		

A.VI.2.Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 13 mai 2005 (tuile 02)

13-05-2005		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	69659	6489	76148	8,5	91,5
	neige	10134	15856	25990	39	61
	Total	79793	22345	102138		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	13	29			
	Taux de succès (%)	87	71			
K=0,5				Taux de succès global 84%		

2) Milieu de transition

A.VI.3. Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 12 mai 2009 (tuile 03)

12-05-2009		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	178	2104	2282	92	8
	neige	120	13994	14114	1	99
	Total	298	16098	16396		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	40	13			
	Taux de succès (%)	60	87			
K=0,1				Taux de succès global 86 %		

3) Milieu fermé

A.VI.4. Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 25 mai 2004 (tuile 05)

25-05-2004		LANDSAT			Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige	Total		
	Non neige	3942	3667	7609	48	62
	neige	5665	56424	62089	9	91
	Total	9607	60091	69698		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	59	6			
	Taux de succès (%)	41	95			
K=0,3				Taux de succès global 87%		

A.VI.5.Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 23 avril 2007 (tuile 09)

23-04-2007		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
	Non neige	3942	3667	7609	48	52
	neige	5665	56424	62089	9	81
	Total	9607	60091	69698		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	59	6			
	Taux de succès (%)	41	95			
K=0,4				Taux de succès global 86%		

A.VI.6.Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 06 mai 2008 (tuile 10)

06-05-2008		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
	Non neige	78954	5766	84720	7	93
	neige	1592	1072	2664	60	40
	Total	80546	6838	87384		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	2	84			
	Taux de succès (%)	98	15			
K=0,2				Taux de succès global 92%		

A.VI.7. Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 12 mai 2009 (tuile 11)

12-05-2009		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
	Non neige	205884	1202	207086	1	99
	neige	119978	14923	134901	89	11
	Total	325862	16125	341987		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	37	7			
	Taux de succès (%)	63	93			
K=0,1				Taux de succès global 65%		

A.VI.8. Matrice d'erreur de la classification de l'algorithme SNOWMAP de produit MOD10A1 (500 m) élaboré le 26 novembre 2006 (tuile 08)

26-11-2006		LANDSAT		Total	Erreur d'omission (%)	Taux de succès (%)
		Non neige	neige			
	Non neige	58749	1982	61731	3	95
	neige	5612	1227	5839	96	4
	Total	64361	3209	67570		
MOD10A1 (500 m)	Erreur de commission (%)	8	62			
	Taux de succès (%)	92	38			
K=0,1				Taux de succès global 88%		