

**Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

Analyse de l'évolution conjointe de la neige et de l'écosystème de taïga au Nunavik dans un climat en réchauffement

Sébastien Rodrigue

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

Mai 2014

© Sébastien Rodrigue, 2014

Directeur de recherche : Alain Royer

Jury interne : Alexandre Langlois

Jury externe : Ross Brown

Résumé

Cette recherche présente l'analyse spatio-temporelle de l'évolution conjointe de l'augmentation de la présence arbustive et de la dynamique de la fonte de la neige au Nunavik, Québec, Canada. Cette zone est caractérisée par la complexité de l'interaction de multiples changements simultanés de la température, de la couverture de la neige ainsi que de la pousse végétative.

La première partie de ce travail consiste à faire l'analyse de l'évolution temporelle de ces multiples changements. Cette analyse a nécessité la mise en place d'une importante base de données climatiques, satellitaires et de couverture de sol à plusieurs échelles, sur une période allant jusqu'à 60 ans, soit de 1950 à 2012. La deuxième partie du travail consiste à faire l'analyse spatiale à haute résolution de l'influence de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans la première partie montrent clairement un changement climatique significatif sur la région étudiée, découpée en 3 bandes de latitude correspondant à la toundra, la taïga ouverte et à la taïga forestière, respectivement du Nord au Sud. Ce changement de climat correspond à un réchauffement marqué, entre 0.75°C et 1.57°C par décennie entre les zones 1 (toundra) et 3 (taïga forestière) respectivement. On peut noter que la hauteur de neige maximale annuelle a diminué dans les trois zones alors que les précipitations hivernales ont augmenté en zone 1 et 3 sur les 45 dernières années. Les résultats montrent une nette augmentation de la végétation arbustive dans les zones 2 et 3 (LAI plus élevé de 100% dans la zone 3 par rapport à la zone 1). L'impact de la végétation a été analysé à partir de la durée de fonte relative entre le début de la fonte et la disparition de la neige. Il apparaît clairement que la végétation active la fonte précocement, allongeant ainsi significativement la durée de fonte (+600%). Cependant, l'impact de la végétation ne retarde pas la date de fin du couvert nival qui est de plus en plus précoce pour les zones 2 et 3.

L'analyse spatiale à haute résolution montre que la présence arbustive entraîne une date de fin de neige plus précoce par rapport au sol nu.

Cette étude démontre clairement que la croissance de la végétation qui résulte du réchauffement climatique impacte la dynamique du couvert nival, aussi affectée par ce réchauffement. Une étude approfondie des processus en causes avec des mesures in situ appuyées par leur modélisation permettrait de mieux comprendre ces phénomènes.

Mots-Clés: Couvert nival, Changements climatique, Nunavik, couvert arbustif

Abstract

This study presents a spatial-temporal analysis of the joint evolution of the increase of shrubiness and the dynamics of snowmelt in Nunavik, Quebec, Canada. This zone is characterized by the complexity of the interaction of multiple changes of temperature, snow cover and vegetation growth.

The first part of this study analyzes the temporal evolution of these changes. The analysis required the use of a large database on climate, satellite data and ground cover at multiple scales over a period of up to 60 years, from 1950 to 2012. The second part of the study consists of a spatial high-resolution analysis of the influence of the fraction of shrub cover on snowmelt. The analysis and interpretation of the results clearly show a significant climate change over the study area, divided into three latitudinal transects corresponding to tundra, open taiga and forested taiga. A significant warming of 0.75 ° C and 1.57 ° C per decade was experienced between zones 1 (tundra) and 3 (forested taiga) respectively. The maximum annual snow depth on the ground decreased over the 3 zones studied while winter precipitations increased in zones 1 and 3 over the last 45 years. The results show a significant increase in shrub vegetation in zones 2 and 3. The impact of the vegetation on snow was analyzed with melt duration (from melt onset to complete melt). It appears clearly that the vegetation triggers the melting process earlier and significantly extends the melt duration (+600%). However, the impact of vegetation does not delay the date of the snow cover disappearance.

The high-resolution spatial analysis showed that shrubs cause an earlier snow cover disappearance date than bare soil.

This study clearly demonstrates that vegetation growth resulting from global warming impacts the snow cover dynamics, which are also affected by global warming. A thorough study of the processes with in-situ measurements supported by models would help gaining a better comprehension of these phenomena.

Keywords: Snow cover, Climate Change, Nunavik, Shrub cover

Table des matières

Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	ix
Liste des annexes	x
Glossaire.....	xi
Remerciements.....	xii
1. Introduction	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectif général.....	8
1.3 Hypothèse(s)	8
2. Zone d'étude	8
3. Bases de données utilisées	10
3.1 Présentation des données utilisées	10
3.2 Données sur la végétation.....	12
3.2.1 Photographies aériennes.....	12
3.2.2 Landsat TM, ETM+	12
3.2.3 Cartes de couverture du sol	12
3.2.4 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500 m SIN Grid V005 (MOD13A1)	13
3.2.5 Indice foliaire dérivé AVHRR et de SPOT VGT	14
3.2.6 Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series.....	14
3.3 Données météorologiques.....	15
3.3.1 Températures de l'air	15
3.3.2 Hauteur de la neige	16
3.3.3 Précipitations.....	17
3.4 Données satellites sur la neige au sol	18
3.4.1 Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover & Sea Ice Extent, Version 4 (NHSCSIE).....	18
3.4.2 MODIS.....	19
3.4.3 Données micro-ondes passives SMMR et SSM/I.....	20

3.4.4 Données micro-ondes actives QuikSCAT	21
4. Méthodologie.....	22
4.1 Organigramme méthodologique.....	22
4.2 Localisation et sélections des zones à analyser	23
4.3 Méthode d'analyse de la végétation.....	27
4.3.1 . Changement du NDVI	27
4.3.2 Changement du LAI	27
4.3.3 Calcul de la date du début de la fonte	27
4.3.4 Calcul du début de la fonte continue de la neige.....	28
4.3.5 Calcul de la fin de la fonte de la neige.....	29
4.4 Méthode d'analyse des changements climatiques.....	29
4.4.1 Températures de l'air	29
4.4.2 Hauteur maximum de la neige (Hmax)	30
4.4.3 Précipitations.....	31
4.5 Changements compositionnels de la couverture du sol.....	32
4.5.1 Acquisition des images	33
4.5.2 Prétraitement des images	33
4.5.3 Calcul des indices spectraux.....	34
4.5.4 Dérivation des tendances des indices spectraux	34
4.5.5 Classification des images à haute résolution	35
4.5.6 Dérivation des fractions de changement de couverture du sol.....	38
4.6 Comparaison de la date de la fonte de la neige et de la fraction du couvert	38
4.7 Comparaison du NDSI et du % de végétation	39
5. Résultats.....	41
5.1 Analyse de l'évolution des données météorologiques.....	41
5.1.1 Température de l'air.....	41
5.1.2 Hauteur de la neige	42
5.1.3 Précipitation	42
5.1.4 Précipitation vs Hmax.....	43

5.2 Analyse de l'évolution de la végétation	45
5.2.1 NDVI.....	45
5.2.2 LAI	45
5.3 Analyse de l'évolution de la fonte de la neige	46
5.3.1 Premier épisode de la fonte de la neige.....	46
5.3.2 Début de la fonte continue de la neige	47
5.3.3 Fin de la fonte de la neige	48
5.3.4 Différence entre le début et la fin de la fonte.....	51
5.3.5 Différence entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue	52
5.3.6 Résumé des tendances.....	53
5.4 Analyse spatiale à haute résolution	54
5.4.1 Évolution du couvert végétal.....	54
5.4.2 Comparaison de la date de la fonte de la neige et du couvert végétal	58
5.5 Analyse spatiale haute résolution : NDSI et fraction du couvert.....	66
6. Discussion et conclusion	72
7. Références	75

Liste des figures

Fig. 1.1 Anomalies de la température printanière de l'air pour la moyenne de 2005 à 2009	1
Fig. 1.2 Taux d'évolution du NDVI maximum moyen au Nunavik. (Scène Landsat 20/19).....	2
Fig. 1.3 Comparaison des couvertures du sol de 1985 et 2005.....	3
Fig. 1.4 Tendances de la durée annuelle de l'étendue du couvert nival pour la période 1972 à 2008 à partir de données NOAA hebdomadaires traitées à l'Université Rutgers.....	4
Fig. 1.5 Diagramme de la rétroaction couplant les processus climatiques de l'Arctique.	5
Fig. 1.6 Évolution de l'albédo pour un site de toundra (TUP) (rond gris) et un site arbustif (TTS) (triangle noir) (tiré de Marsh et al, 2010).	6
Fig. 1.7 Évolution de l'équivalent en eau de la neige (EEN) et de la couverture de neige pour un site de toundra (TUP) (rond rouge) et un site arbustif (TTS) (triangle bleu).	7
Fig. 2.1 Comparaison entre la limite des arbres au Nunavik proposé de Payette, (1983) et de la limite des arbres fait à partir de la carte de la couverture des sols de Latifovic et al, (2005).....	9
Fig. 3.1 Image brute du Canada de la carte de la couverture des sols de 2005 en 31 classes.....	13
Fig. 3.2 Image brute de Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series (2008).	15
Fig. 3.3 Image brute CANGRID (125 x 95) des précipitations cumulées du mois de janvier 2012.	18
Fig. 3.4 Image brute NHSCSIE représentant la période du 15 mai au 21 mai 2006.	19
Fig. 3.5 Image brute SSMI acquise le 28 mars 2008 en passage ascendant à la fréquence 19 GHz en polarisation horizontale.....	21
Fig. 3.6 Image brute QuikSCAT du 21 mai 2009.....	21
Fig. 4.1 Organigramme méthodologique.....	22
Fig. 4.2 Tendances du NDVI pour la période de 1985 à 2006.....	24
Fig. 4.3 NDVI correspondant au maximum phénologique de l'été 2012.	24
Fig. 4.4 Couverture du sol au Nunavik dérivé de la couverture du sol de 2005.....	25
Fig. 4.5 Représentation des zones sélectionnées pour représenter la toundra, la taïga, ainsi que la taïga forestière.....	26
Fig. 4.6 Température de brillance de jour (a), de nuit (b), ainsi que le DAV (c) obtenue à partir de SSMI.	28
Fig. 4.7 Répartition spatiale des stations météorologiques utilisées pour chacune des zones considérées.....	30
Fig. 4.8 Représentation spatiale des stations utilisées pour chaque zone ainsi que la disponibilité des données.	31

Fig. 4.9 Organigramme méthodologique de l'analyse des changements de la couverture du sol.	32
Fig. 4.10 Nombre d'images Landsat par pixel avant la correction atmosphérique.	33
Fig. 4.11 Nombre d'images Landsat par pixel après la correction atmosphérique.	34
Fig. 4.12 Exemples d'images à haute résolution utilisées.	36
Fig. 4.13 Représentation des trois cadrans utilisés pour l'analyse du pourcentage du couvert végétal et de la date de la fonte de la neige.	39
Fig. 4.14 Représentation des deux images Landsat sélectionnées pour l'étude de la couverture de neige.	40
Fig. 5.1 Température moyenne de l'air durant la période de fonte (1967-2012).	42
Fig. 5.2 Hauteur annuelle maximale de la neige (1967-2012).	42
Fig. 5.3 Précipitations (Novembre-Mars) pour la période de 1951 à 2012 sur les 3 zones.	43
Fig. 5.4 Précipitations vs Hmax pour les 3 zones considérées.	44
Fig. 5.5 Tendances du NDVI (1985-2012).	45
Fig. 5.6 LAI moyen annuel (Juillet-Août) (1981-2012).	46
Fig. 5.7 Premiers épisodes de fonte (1979-2012).	47
Fig. 5.8 Début de la fonte continue (1979-2012).	48
Fig. 5.9 Date de fin de la fonte annuelle (1967-2012).	49
Fig. 5.10 Comparaison du premier épisode de fonte, du début de la fonte continue et de la fin de la fonte de la neige sur la période de 1979 à 2012.	50
Fig. 5.11 Relation entre la durée de fonte (Nombre de jours entre le début de la fonte et la fin de la couverture de neige) et la hauteur de neige maximum à la fin de l'hiver dans les 3 stations météorologiques.	51
Fig. 5.12 Différences entre le premier épisode de fonte et la date de fin de fonte sur les trois zones.	52
Fig. 5.13 Différences entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue sur les trois zones.	53
Fig. 5.14 Tendances du NDVI (Δ NDVI/an) dérivée d'image Landsat (période de 1984 à 2011).	55
Fig. 5.15 Différence du couvert arbustif (1984-2011) (en % de la fraction du couvert).	56
Fig. 5.16 Différence du couvert de la végétation basse (1984-2011).	57
Fig. 5.17 Différence du couvert du sol nu (1984-2011).	58
Fig. 5.18 Représentation des 3 cadrans choisis afin de faire l'analyse des changements des Fc et de la date de fonte de la neige.	59
Fig. 5.19 Représentation de la Fc arbustive de l'été 2011 pour les 3 cadrans.	59

Fig. 5.20 Représentation de la Fc végétation basse de l'été 2011 pour les 3 cadrans.	60
Fig. 5.21 Représentation de la FC de sol nu de l'été 2011 pour les 3 cadrans.	60
Fig. 5.22 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2006 pour les 3 cadrans choisis.	61
Fig. 5.23 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2009 pour les 3 cadrans choisis.	61
Fig. 5.24 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2011 pour les 3 cadrans choisis.	62
Fig. 5.25 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert sur la fonte de la neige en 2006 pour le cadran 2.	63
Fig. 5.26 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige en 2006 pour les trois zones.	64
Fig. 5.27 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige de 2000 à 2011 sur la zone 2.	65
Fig. 5.28 Représentation géographique des deux images Landsat utilisées pour calculer le NDSI.	67
Fig. 5.29 Comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2004.	68
Fig. 5.30 Comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2005.	69
Fig. 5.31 Comparaison entre le NDSI la Fc arbustive pour l'année 2004 et 2005.	71

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Données sur la végétation	10
Tableau 3.2 Données sur la neige	11
Tableau 3.3 Données climatologiques	12
Tableau 3.4 Inventaire des stations du Nunavik situées au nord du 52ème parallèle possédant un minimum de 5 années d'enregistrement consécutif de la température de l'air horaire.	16
Tableau 3.5 Inventaire des stations du Nunavik situées au nord du 52ème parallèle possédant un minimum de 2 années d'enregistrement consécutif de la hauteur de la neige quotidienne.	17
Tableau 4.1 Coefficients proposés pour calculer les indices de végétation normalisée, de brillance, de verdure, et d'humidité (Huang et al, 2002)	34
Tableau 4.2 Matrice de confusion.....	37
Tableau 4.3 Matrice de précision sur 200 sites de référence.	37
Tableau 5.1 Tendances des indices et paramètres analysés.....	54
Tableau 5.2 Comparaison de la température moyenne durant la période de fonte, des précipitations neigeuses enregistrées pendant l'hiver, du Hmax enregistré pendant l'hiver, ainsi que l'effet de la Fc arbustive sur la date de fonte de la neige pour la période de 2000 à 2011.	66

Liste des annexes

Annexe 1: Inventaire des images Landsat utilisées	81
Annexe 2: Calcul du début de la fonte continue de la neige à partir de QuikSCAT	84
Annexe 3: Correspondance entre les valeurs prédites par les modèles d'arbre de régression et les valeurs réelles provenant de la classification.....	86
Annexe 4: Fraction du couvert & date de fonte dérivée de MOD10a1	88
Annexe 5: Précipitation neigeuses (1951-2012).....	90
Annexe 6: Effet de la F_c sur la fonte de la neige	91
Annexe 7: Effet de la température, du H_{max} et des précipitations sur l'amplitude de l'effet de la F_c abustive sur la fonte de la neige.....	105

Glossaire

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

C3EG: Centre sur les Changements Climatiques et Environnementaux à l'Échelle du Globe

CCT: Centre Canadien de Télédétection

CMC: Canadian Meteorological Centre

DCN: Durée du couvert nival

DMSP: Defense Meteorological Satellite Program

EASE-Grid: Equal Area Scalable Earth - Grid

EC: Environnement Canada

EEN : Équivalent en Eau de la Neige

Fc: Fraction du Couvert

GOES: Geosynchronous Operational Environment Satellites

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDSI: Normalized Snow Index

NDVI: Normalized Vegetation Index

NSIDC: National Snow & Uce Data Center

MRNC: Ministère des Ressources Naturelle du Canada

RHN: Réseau Hydro National

SMMR: Scanning Multichannel Microwave Radiometer

SMM/I: Special Sensor Microwave/Imager

SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre

Tb: Température de brillance

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Dr Alain Royer, pour son support, ses conseils et ses remarques constructives.

J'aimerais aussi remercier les chercheurs Dr Robert Fraser et Dr Ian Olthof du Centre Canadien de Télédétection qui m'ont assisté avec la classification de la fraction du couvert végétal dans le cadre d'un stage de recherche effectuée à Ottawa au cours de l'été 2012.

Je voudrais également remercier Dr Jean-Marie Dubois et Dr Léo Provencher pour m'avoir aidé avec la classification stéréoscopique d'images aériennes à haute résolution spatiale.

Je voudrais souligner le support financier du CARTEL et celui du Centre sur les Changements Climatiques et Environnementaux à l'Échelle du Globe (C3EG) qui m'a permis de faire un stage au Centre Canadien de Télédétection (CCT). Ce projet a été financé par le CRSNG Canada.

Je souhaite remercier Environnement Canada (EC) pour l'accès aux données de stations d'observation, obtenues à partir des Archives climatologiques nationales, qui sont exploitées et gérées par EC.

Finalement, je remercie la patience et le soutien de ma conjointe, Karine Plouffe, qui m'a accompagné tout au long de ma recherche.

1. Introduction

Dans le contexte du réchauffement climatique dans les hautes latitudes nord, les paramètres de la neige subissent des modifications et la végétation augmente considérablement. Ces deux effets impliquent des rétroactions importantes sur le climat.

1.1 Problématique

Les dernières décennies sont caractérisées par un réchauffement du climat marqué. Les régions situées dans les hautes latitudes ont connu le plus grand et le plus rapide réchauffement climatique dans l'hémisphère nord au cours des 30 dernières années (Brown et al, 2010). Les étés 2005, 2007, 2010 et 2011 sont les plus chauds des 600 dernières années (Tingley et al, 2013). Le Nunavik ne fait pas exception au réchauffement. La moyenne de la température printanière de 2005 à 2009 a été de 1 à 2°C plus élevée que celle de 1951 à 2000 (Fig. 1.1).

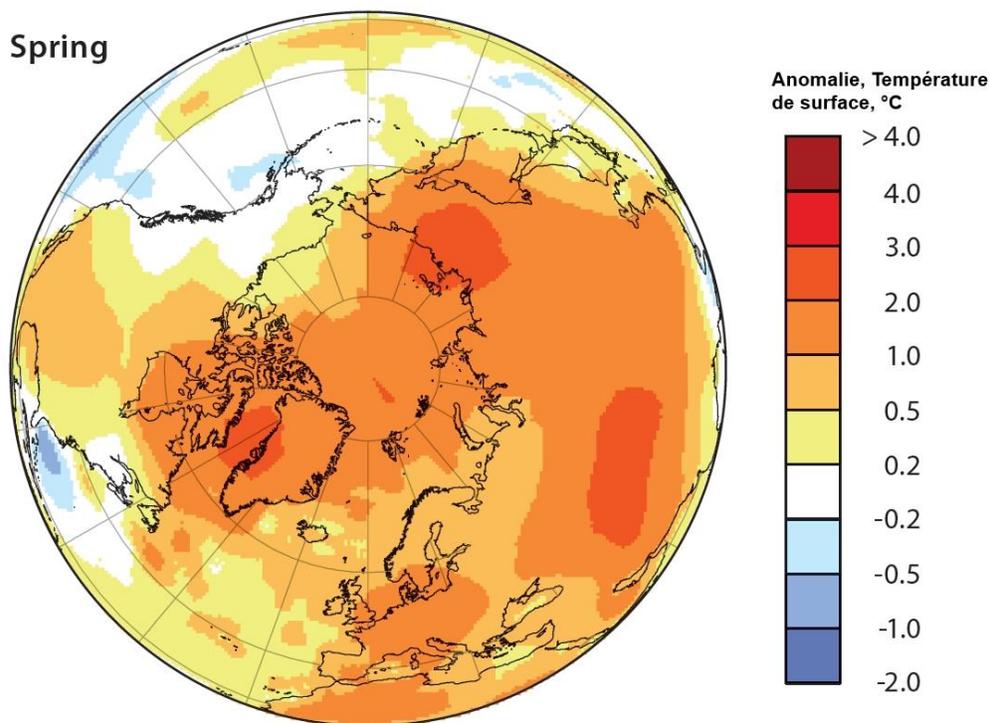


Fig. 1.1 Anomalies de la température printanière de l'air pour la moyenne de 2005 à 2009 (en relation à la moyenne de 1951 à 2000). Source: NASA Goddard Institute for Space Studies (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp>).

Les modèles climatiques globaux suggèrent que l'Arctique va continuer de se réchauffer plus rapidement que les régions plus au sud par un effet d'amplification due aux rétro-actions positives, principalement de la fonte de glace de mer (ACIA, 2005; IPCC 2007; Serreze et al, 2009; AMAP, 2011). La fonte hâtive de la neige au printemps et l'augmentation de la croissance de la végétation sont deux conséquences importantes dues au réchauffement climatique dans les hautes latitudes Nord.

Plusieurs articles récents ont montré que la croissance de la végétation était stimulée par le réchauffement climatique des 30 dernières années dans les hautes latitudes Nord (Chaplin et al, 2005; Goetz et al, 2005, McManus, 2012). La végétation arbustive semble se développer dans la zone de transition entre la toundra et la zone de taïga. Certaines études récentes prédisent que le biome qui répondra le plus rapidement au réchauffement climatique dans l'Arctique est la transition entre l'arbuste dressé et l'arbuste nain (Epstein et al, 2004, Myers-Smith et al, 2011). Plusieurs études ont démontré qu'il y a une augmentation de l'indice de la végétation normalisé (NDVI) dans la zone de transition taïga-toundra. Par exemple, Pouliot et al, 2009 a démontré qu'il y avait une augmentation d'environ 40% du NDVI sur une partie de la zone de transition au Nunavik sur la période de 1984 à 2006 (Fig. 1.2).

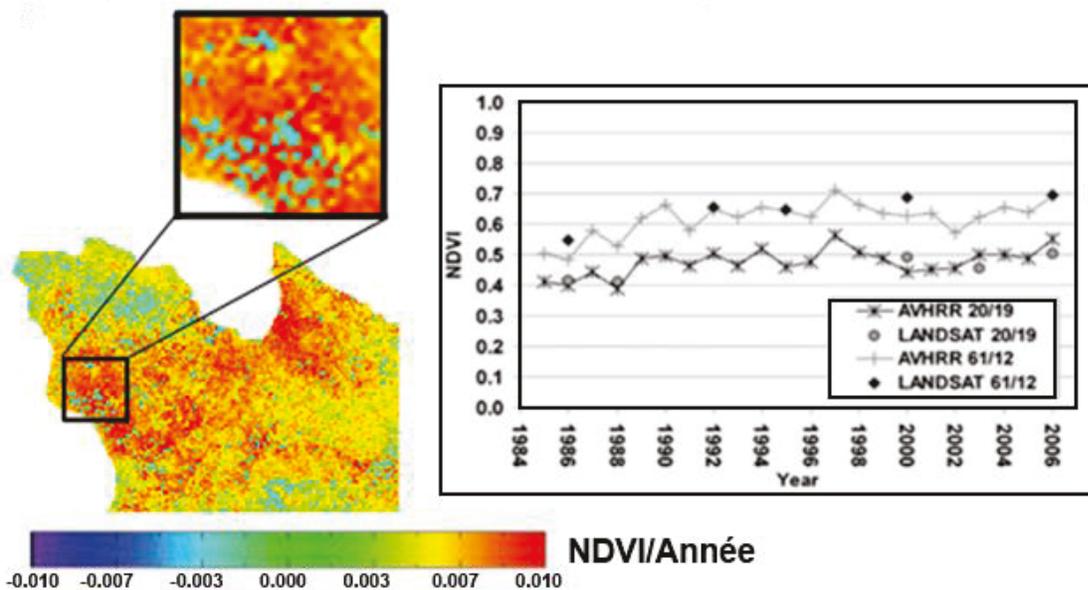


Fig. 1.2 Taux d'évolution du NDVI maximum moyen au Nunavik. (Scène Landsat 20/19) (58.71° N, 76.27° W) (figure de gauche). Évolution du NDVI maximum moyen au Nunavik (Scène Landsat 20/19 et 61/12) (figure de droite). Tiré de Pouliot et al, (2009).

L'augmentation du NDVI démontre qu'il y a un verdissement au nord du Québec, mais les changements de la constitution de la végétation au bord de la ligne de transition sont mal compris. En effet, des études axées sur le nord-ouest Canadian ont démontré que l'augmentation de la végétation arbustive est accompagnée d'autres changements tels que le remplacement des surfaces de sol nues par des herbes, un déclin de la croissance des conifères au sud de la zone de transition, ainsi qu'une augmentation du recrutement et de croissance des conifères dans le nord de la zone de transition (Olthof et Pouliot, 2009). Des cartes de la couverture des sols ont été faites pour les années 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005 à l'aide d'images satellitaires AVHRR (Latifovic et Pouliot, 2005), mais elles ne montrent presque aucune différence dans la constitution du couvert végétal au Nunavik de 1985 et 2005 (Fig. 1.3).

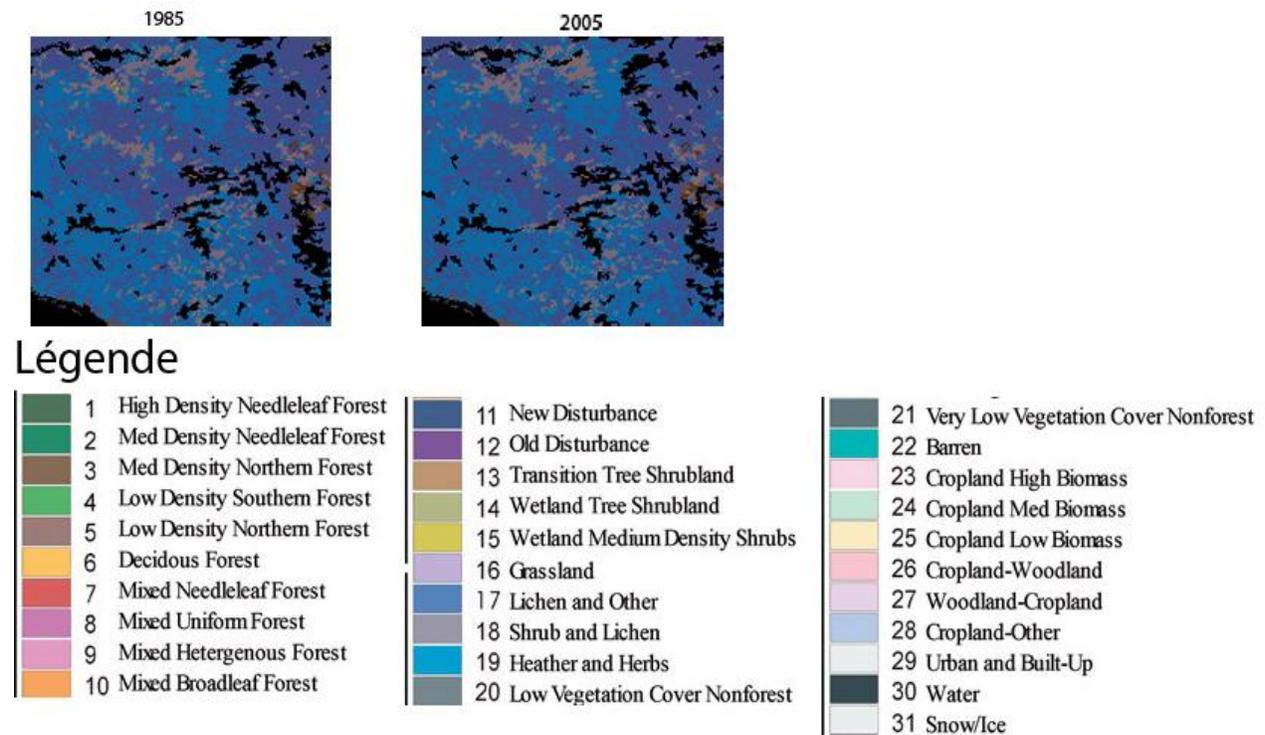


Fig. 1.3 Comparaison des couvertures du sol de 1985 et 2005 (produit Landcover) pour la zone correspondant à la scène Landsat 19/20 (tiré de Latifovic & Pouliot, 2005).

Le couvert nival se caractérise par sa durée (DCN), son étendue (ECN), sa hauteur (HCN), et son équivalent en eau (EEN). L'ECN mensuel de l'hémisphère nord est fortement inversement proportionnel à la température de l'air. En particulier la période Avril-Juin affiche une relation très forte entre ces 2 paramètres (Derksen, 2012). Il a été démontré que la date de la fonte de la neige dans la zone de transition toundra-taïga au Nunavik est devancée d'environ 2 à 4 jours par décennie depuis 1972 (Fig. 1.4) (Brown et al, 2007, 2010).

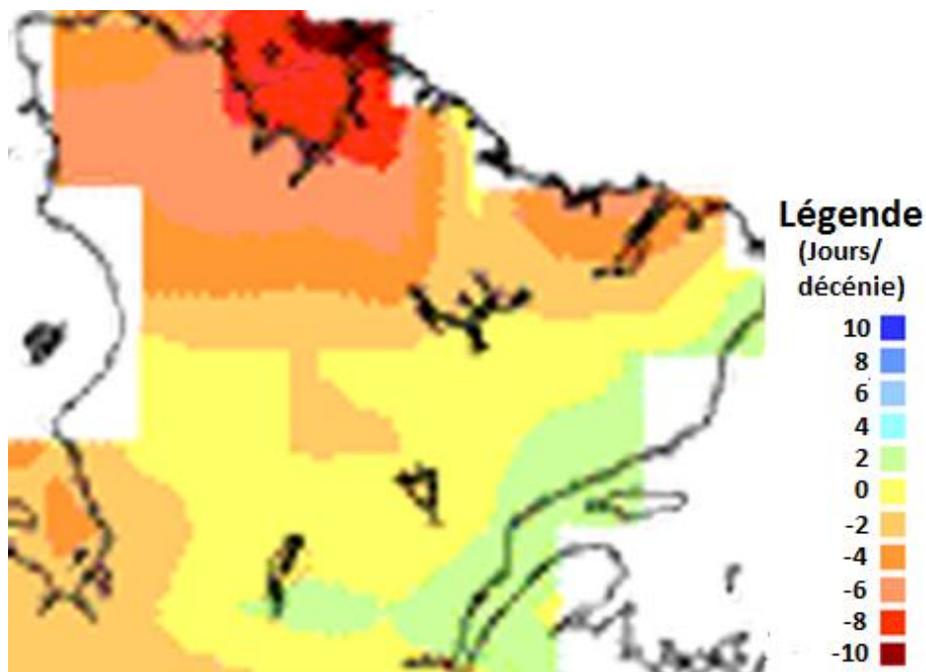


Fig. 1.4 Tendence de la durée annuelle de l'étendue du couvert nival pour la période 1972 à 2008 à partir de données NOAA hebdomadaires traitées à l'Université Rutgers (Brown et al, 2010).

Les prédictions anticipent une diminution de l'ECN en fonction du réchauffement climatique (Brown et al, 2007). Les modèles climatiques globaux prédisent une augmentation de EEN de 15% d'ici 2050 sur la majorité de l'arctique et une diminution de 10-20% de la DCN (Callaghan et al, 2011).

Le couvert nival est un élément important dans la modélisation de la circulation atmosphérique, du bilan hydrique ainsi que des changements climatiques. Il joue un rôle important par son influence sur le bilan radiatif du système océan-terre-atmosphère (Chaplin et al, 2005) (Fig. 1.5). La neige est caractérisée par un fort albédo, une forte émissivité thermique, une faible conductivité de la chaleur, une grande chaleur latente de fusion et une faible rugosité. La combinaison d'un fort albédo et d'une forte émissivité entraîne une diminution de la température de surface du sol (Callaghan et al, 2011). Par sa faible conductivité thermique, la neige est un excellent isolant entre l'atmosphère et la surface du sol. Sa forte émissivité thermique entraîne un refroidissement de la surface de la neige. Sa grande chaleur latente de fusion retarde la fonte de la neige lorsque la

température de l'air est élevée (Zhang, 2005). C'est un réservoir hydrique important qui libère son contenu en eau rapidement lors de la période de fonte et influence grandement le bilan énergétique régional de la région arctique (Déry, 2007). Les propriétés isolantes de la neige permettent de découpler la température de la canopée de la végétation basse et celle du sol de la température de l'air ambiante ainsi que ses fluctuations rapides (Kausrud et al, 2008).

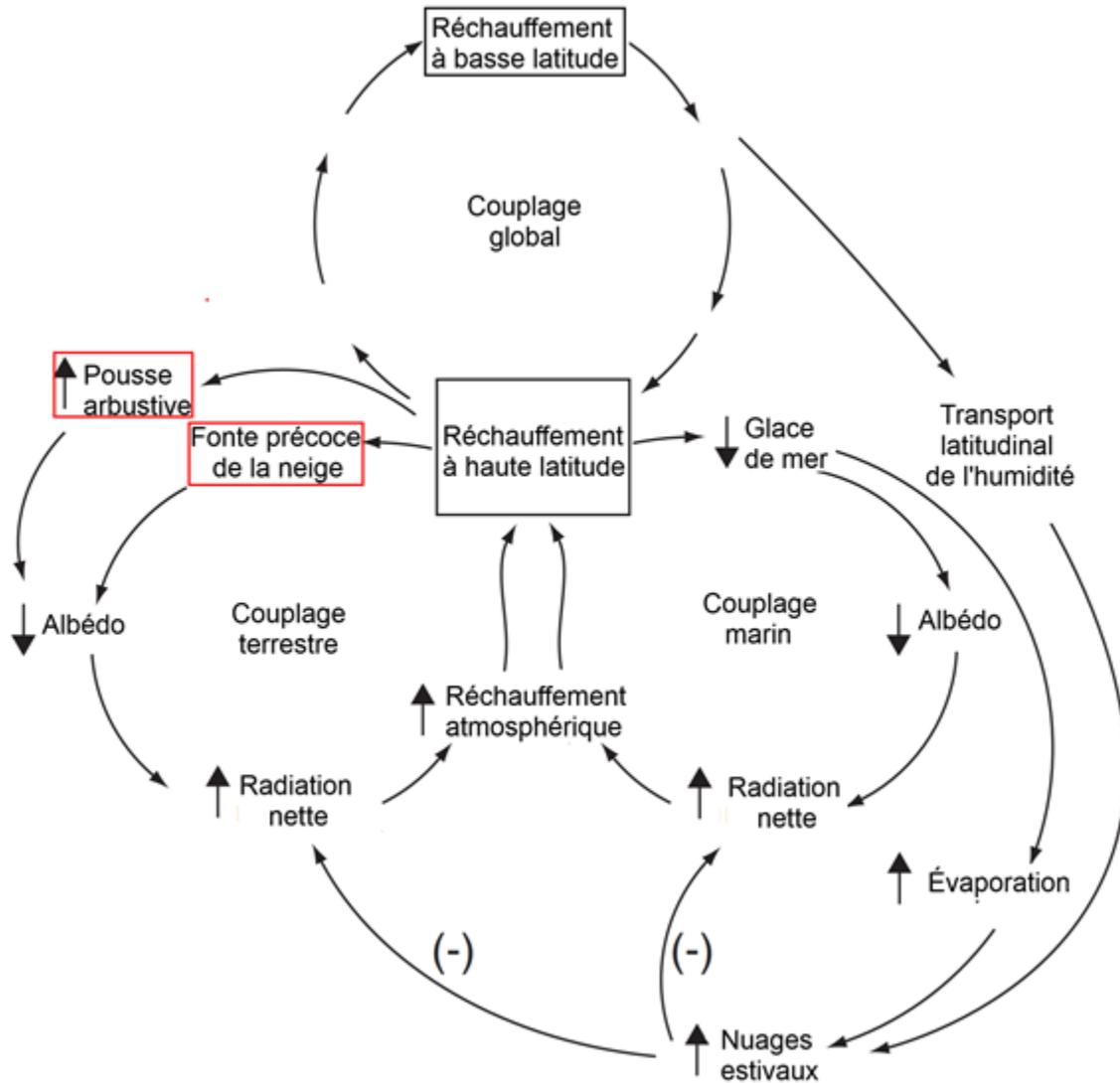


Fig. 1.5 Diagramme de la rétroaction couplant les processus climatiques de l'Arctique. Les flèches reliant les processus indiquent une rétroaction positive à l'exception des cas contraires indiqués par un symbole de négation (-). Ce diagramme est tiré de Chaplin et al, (2005).

Une bonne compréhension de l'interaction entre la neige et la végétation est nécessaire pour la modélisation climatique. En considération de la grande sensibilité du climat aux rétroactions de la végétation sur la neige (Cook et al, 2008), l'analyse de l'interaction végétation-neige est nécessaire pour une modélisation du climat futur (Fig. 1.5). Plusieurs articles traitent des conséquences de

l'augmentation de la pousse de la végétation et de la fonte hâtive de la neige de façon ponctuelle. D'autres recherches étudient la fonte de la neige en lien avec le réchauffement climatique sans tenir compte des changements de végétation. Ainsi, l'interaction entre la fonte hâtive de la neige au printemps et l'augmentation de la croissance de la végétation est peu documentée. Peu d'études ont tenté de déterminer si le changement d'écosystème dans la zone de transition taïga/toundra dans les hautes latitudes Nord avait un impact important sur la neige. Des recherches ont démontré qu'un changement d'occupation du sol nu à une occupation d'arbuste-toundra mène à une couverture de neige plus profonde (Sturm et al, 2001; Liston et al, 2002; Essery et Pomeroy, 2004). En effet, les arbustes augmentent la capacité de rétention de la neige de la toundra en réduisant la vitesse du vent près du sol (« trapping effect ») (Sturm et al, 2001). L'augmentation de quantité de neige qui en résulterait retarderait la date de fin de la fonte de la neige. Par contre, certaines recherches récentes démontrent que la fonte de la neige sous les arbustes est accélérée et que la fin de la fonte de la neige serait alors plus précoce (Marsh et al, 2010). L'hiver, les arbustes se plient sous la neige, mais une fois les branches exposées au soleil au printemps, elles peuvent avoir une température jusqu'à 20 degrés plus élevés que la neige environnante. En redistribuant l'énergie sous forme de radiation à longue longueur d'onde et de chaleur sensible, le débit de la fonte de la neige accélère (Pomeroy et al, 2006; Strack et al, 2007). De plus, lorsque la neige fond et devient humide, son albédo diminue et l'augmentation de son absorption accélère davantage la fonte de la neige.

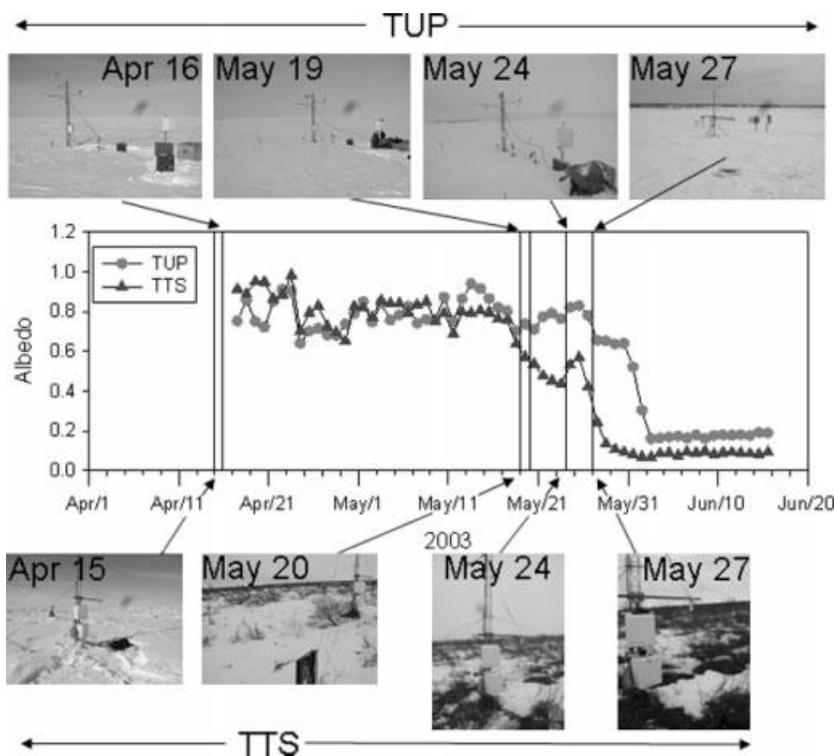


Fig. 1.6 Évolution de l'albédo pour un site de toundra (TUP) (rond gris) et un site arbustif (TTS) (triangle noir) (tiré de Marsh et al, 2010).

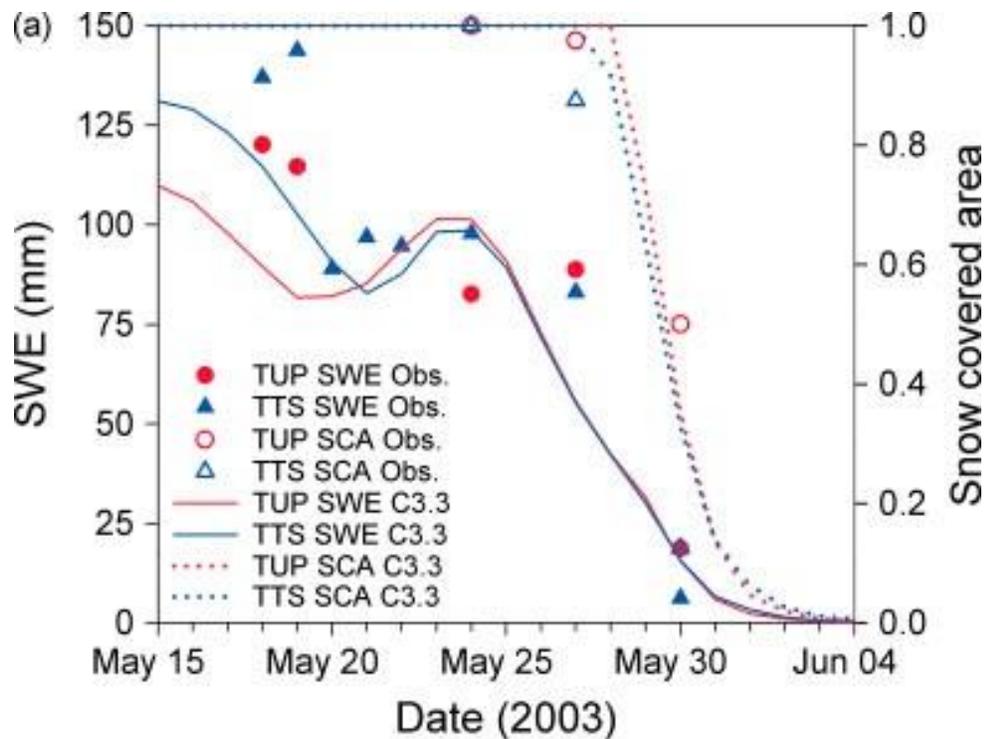


Fig. 1.7 Évolution de l'équivalent en eau de la neige (EEN) et de la couverture de neige pour un site de toundra (TUP) (rond rouge) et un site arbustif (TTS) (triangle bleu). Note : les courbes correspondent à des simulations avec le schéma de surface du modèle climatique canadien CLASS (tiré de Marsh et al, 2010).

Il apparaît que le EEN du site arbustif (environ 130 mm) est plus élevé que celui de la toundra (120 mm) d'environ 10% avant le début de la fonte et que la fin de la fonte pour TTS est survenue avant celle de la toundra (Fig. 1.7). Cependant, il faut noter que le début de fonte et la date de fin de la fonte sont tout de même très similaires pour les deux sites et qu'il est difficile de tirer une conclusion claire sur l'interaction arbuste-neige à partir de cette figure.

L'interaction arbuste-neige se caractérise généralement par trois types: les arbustes de grande taille qui sont exposés par-dessus la neige, les arbustes de taille moyenne qui se plient sous la neige, et les arbustes de courte taille qui sont complètement enfuis sous la neige. Les arbustes de grande taille qui sont exposés par-dessus la neige accélèrent la fonte de la neige dès le début des températures de l'air au-dessus de 0°. Ce type d'interactions est celui qui accélère le plus la fonte de la neige. Les arbustes de grande ou moyenne taille qui se plient sous la neige ressortent à la surface durant la fonte de la neige. Ce type d'interactions prend plus de temps à accélérer la fonte de la neige que les arbustes de grande taille qui sont exposés par-dessus la neige. Les arbustes de courte taille qui sont complètement enfuis sous la neige accélèrent la fonte qu'au moment où la hauteur de la neige est inférieure à la hauteur de ce dernier. Ce type d'interaction est celui qui accélère le moins la fonte de la neige, car l'exposition de l'arbuste arrive souvent près de la fin de la fonte de la neige (Pomeroy, 2006).

1.2 Objectif général

L'objectif de ce projet de recherche est de caractériser l'évolution conjointe de la végétation et de la neige dans la zone de transition taïga/toundra au Nunavik dans un contexte de réchauffement climatique sur les 30-40 dernières années par télédétection satellite. L'objectif principal est composé de 2 sous-objectifs.

Le premier consiste à dresser un portrait global des changements environnementaux au Nunavik. Pour ce faire, il faudra caractériser l'évolution de la température printanière, de la dynamique de la neige (hauteur maximale, la durée de fonte et la date de fin de la fonte), et de la végétation sur la période d'analyse.

Le deuxième sous-objectif consiste à caractériser les changements de la présence et de la constitution de la végétation sur la zone de transition au Nunavik et d'analyser l'impact des interactions neige-végétation.

1.3 Hypothèse(s)

L'hypothèse à démontrer est que l'évolution de la végétation modifie la dynamique de la fonte du couvert nival dans la zone de transition taïga/toundra. En particulier, ce travail cherche à confirmer ou à infirmer que, malgré l'augmentation de neige au sol qui résulte de l'effet de trappage de la neige par les arbustes, ceux-ci accélèrent le processus de fonte et donc génèrent une date de fin de neige plus hâtive au sol, par rapport aux zones voisines de toundra.

2. Zone d'étude

La zone de transition étudiée, qui est aussi appelée taïga, correspond à la zone située entre la forêt boréale ouverte et la toundra. Cette zone est principalement constituée d'arbustes dressés, de touffes d'herbes, de lichen, et de prairie gazonneuse (Olthof et Latifovic, 2009). La hauteur des canopées de l'écosystème arbustes- toundra varie d'environ 30 cm à 3 m et est constitué d'arbustes à feuilles caduques. Ces arbustes sont des aulnes nains, des saules ou des bouleaux (Pomeroy et al, 2006).

La zone de transition est un endroit difficile à définir et à identifier précisément. Selon l'étude de Payette (1983), la limite des arbres se situe entre 57.50°N et 58.90°N de latitude. Selon la carte de couverture de sol canadien (Latifovic et al, 2005), la zone de transition entre la forêt de faible densité et du lichen se situe entre 56.60°N et 58.90°N de latitude (Fig. 2.1). On décrit dans la section méthodologie comment on a défini cette zone de transition.

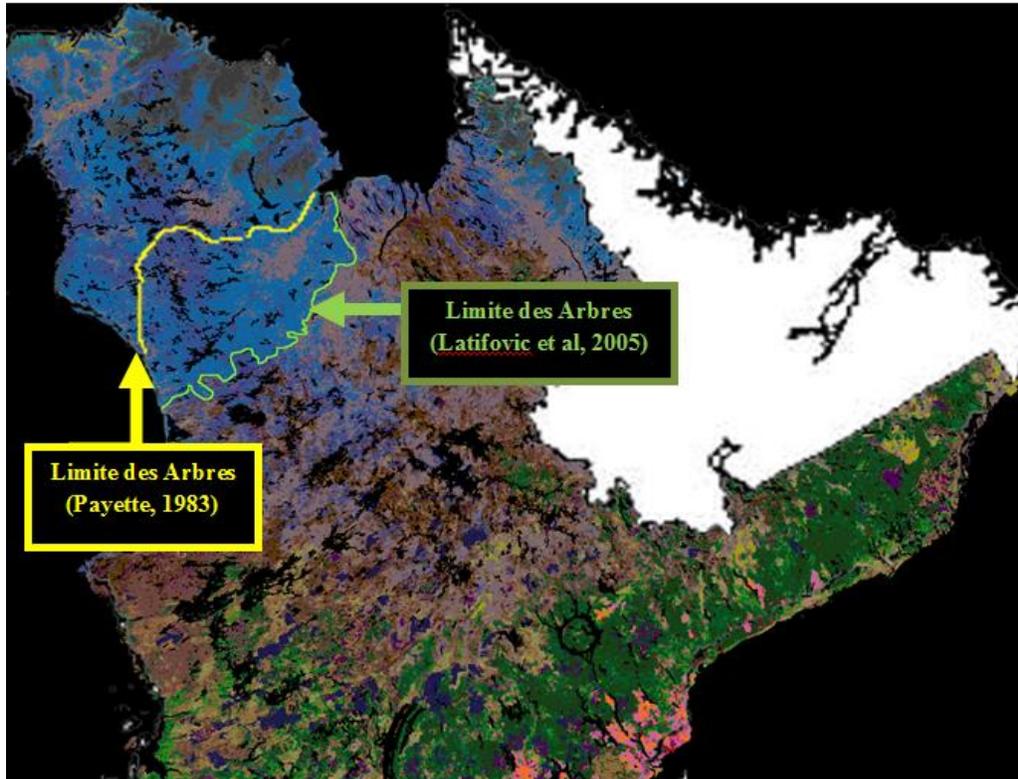


Fig. 2.1 Comparaison entre la limite des arbres au Nunavik proposé de Payette, (1983) et de la limite des arbres fait à partir de la carte de la couverture des sols de Latifovic et al, (2005). La carte de la couverture des sols (Latifovic et al, 2005) est utilisée comme carte de base pour cette image.

3. Bases de données utilisées

3.1 Présentation des données utilisées

Cette section introduit et décrit les données utilisées dans le cadre du projet de maîtrise.

Données sur la végétation				
Type d'image	Couverture temporelle	Échelle / Résolution spatiale	Info	Source
Photographies aériennes	Été 2010	30 cm	Photographies aériennes	Géomatèque
Landsat Tm, and ETM+	1984-2011	30 m	Image satellitaire	USGS (U.S. Geological Survey)
Land cover	1985, 1990, 1995, 2000 et 2005	1 km	Couverture du sol	CCRS (Centre de Télédétection Canadien)
10-day Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series	1985-2010	1 km	Indice de végétation NDVI	CCRS (Centre de Télédétection Canadien)
MODIS (Vegetation Indices 16-Day L3 Global)	2000-2012	500 m	Indice de végétation NDVI	NASA (National Aeronautics and Space Administration)
AVHRR LAI	1981-2000	1 km	Indice foliaire	VITO (Flemish institute for technological research)
SPOT VGT LAI (10-day composite images)	2000-2012	1 km	Indice foliaire	VITO (Flemish institute for technological research)

Tableau 3.1 Données sur la végétation

Données sur la neige				
Type d'image	Couverture temporelle	Échelle / Résolution spatiale	Info	Source
Northern Hemisphere Grid Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent Version 4	1966-2010	25 km 4 km	Données sur la couverture de neige	NSIDC (National Snow and Ice Data Center)
MODIS Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid	2000-2012	500 m	Données sur la couverture de neige	NASA (National Aeronautics and Space Administration)
QuikSCAT	2000-2009	5 km	Signal de rétrodiffusion dérivé d'un capteur de micro-ondes actives	Physical-Oceanography Distributed Active Archive Center
Températures de brillance journalière EASE-grid dérivées de Nimbus-7 SMMR Pathfinder	1978-1987	25 km	Températures de brillance dérivées d'un capteur de micro-ondes passives	NSIDC (National Snow and Ice Data Center)
Températures de brillance journalières EASE-grid dérivées de DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder, version 2	1987-2012	25 km	Températures de brillance dérivées de capteurs de micro-ondes passives	NSIDC (National Snow and Ice Data Center)
Hauteur maximale de la neige (Hmax)	1954-2013	Par station	Hauteur de la neige enregistrée aux stations	Environnement Canada
Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data	1998-2012	24 km	Hauteur de la neige interpolée de données enregistrées aux stations	NSIDC (National Snow and Ice Data Center)

Tableau 3.2 Données sur la neige

Données climatologiques				
Type d'image	Couverture temporelle	Échelle / Résolution spatiale	Info	Source
Température de l'air	1954-2012	Par station	Température de l'air enregistré aux stations	Environnement Canada
Précipitations CANGRID, V2	1951-2012	50 km	Précipitations interpolées à partir de données aux stations	Environnement Canada (Mékis & Vincent, 2006)

Tableau 3.3 Données climatologiques

3.2 Données sur la végétation

3.2.1 Photographies aériennes

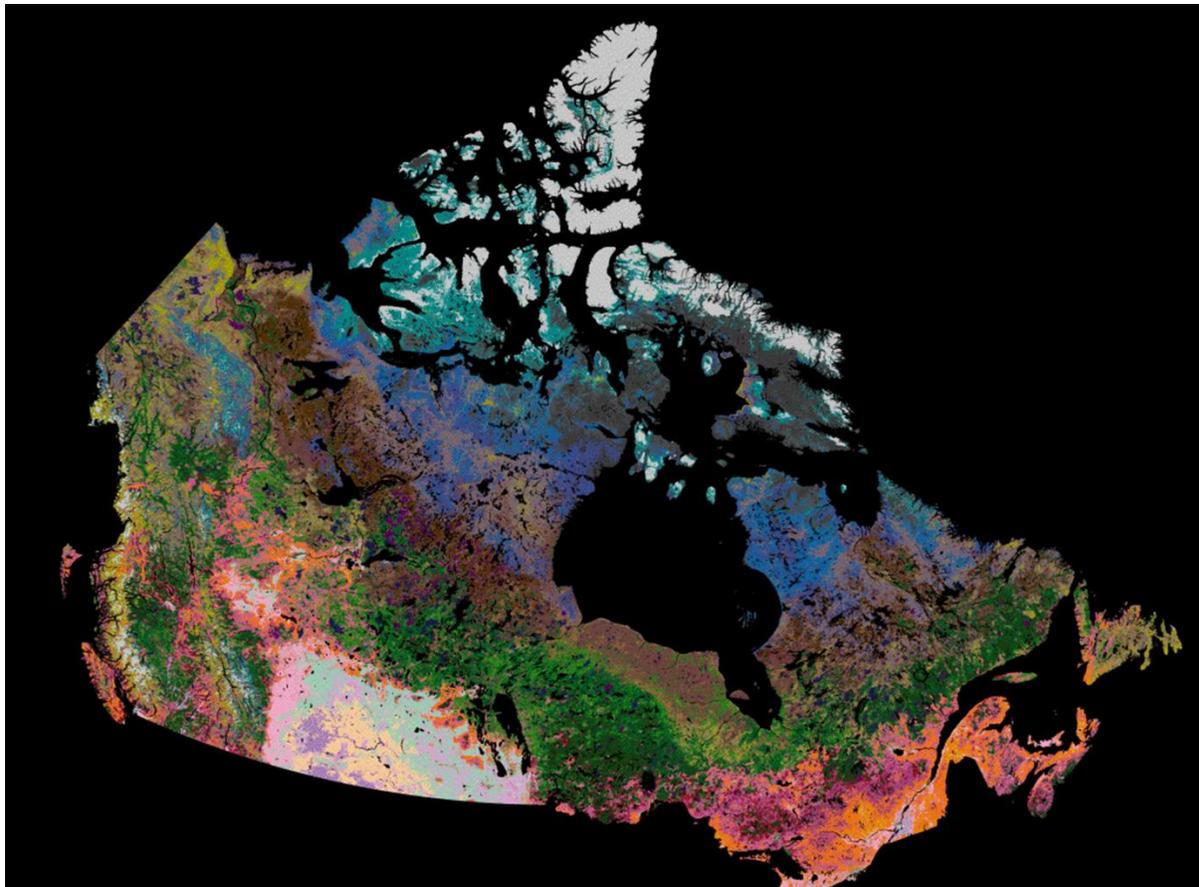
Des photographies aériennes représentant les types de couverts végétaux caractérisant la zone de transition au Nunavik ont été utilisées. Ces images ont été acquises au mois de juin 2010 et ont une résolution spatiale de 30 cm. Le pourcentage de nuage est inférieur à 10 % et un masque a été appliqué sur les parties affectées par ces derniers.

3.2.2 Landsat TM, ETM+

Un total de 157 images Landsat TM et ETM+ ont été acquises sur un territoire d'environ 200 000 km² dans les environs de la zone de transition au Nunavik. Ces images couvrent la période de 1984 à 2011 et ont une résolution spatiale de 30 mètres (voir Annexe 1 pour la répartition spatio-temporelle des images). La majorité des études sur le changement de la végétation dans les hautes latitudes nord sont basées sur des produits à résolution grossière telle que celle des images AVHRR (1 km) (Pouliot et al, 2008). Or, ces données offrent seulement la possibilité de faire une analyse régionale. Cependant, la résolution spatiale de 30 m offerte par les capteurs Landsat permet d'effectuer l'analyse des changements de la végétation à une échelle locale (Olthof et al, 2008).

3.2.3 Cartes de couverture du sol

Un total de 5 cartes de couverture du sol représentant respectivement les années 1985, 1990, 1995, 2000, et 2005 a été utilisé. Ces cartes dérivées des données AVHRR, couvrant la superficie du Canada, ont une résolution spatiale de 1 km, et comprennent 31 classes. Elles ont été produites par le Centre Canadien de Télédétection et le Ministère des Ressources Naturelles du Canada (Latifovic et al, 2005).



Légende

1 High Density Needleleaf Forest	11 New Disturbance	21 Very Low Vegetation Cover Nonforest
2 Med Density Needleleaf Forest	12 Old Disturbance	22 Barren
3 Med Density Northern Forest	13 Transition Tree Shrubland	23 Cropland High Biomass
4 Low Density Southern Forest	14 Wetland Tree Shrubland	24 Cropland Med Biomass
5 Low Density Northern Forest	15 Wetland Medium Density Shrubs	25 Cropland Low Biomass
6 Deciduous Forest	16 Grassland	26 Cropland-Woodland
7 Mixed Needleleaf Forest	17 Lichen and Other	27 Woodland-Cropland
8 Mixed Uniform Forest	18 Shrub and Lichen	28 Cropland-Other
9 Mixed Heterogenous Forest	19 Heather and Herbs	29 Urban and Built-Up
10 Mixed Broadleaf Forest	20 Low Vegetation Cover Nonforest	30 Water
		31 Snow/Ice

Fig. 3.1 Image brute du Canada de la carte de la couverture des sols de 2005 en 31 classes (Latifovic et al, 2005).

3.2.4 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500 m SIN Grid V005 (MOD13A1)

Cet ensemble de données dérivé de MODIS TERRA, constitue une série temporelle de composés de 16 jours représentant l'indice NDVI sur la période de 2000 à 2012. La résolution spatiale est de 500 m et les données sont projetées selon une projection sinusoidale. Étant corrélé à la photosynthèse globale du couvert végétal, le NDVI permet d'observer le taux de couverture de

végétation (Myneni et al, 1995). Le NDVI est le ratio normalisé de la bande proche infrarouge et de la bande rouge (équation 1).

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{PIR}-\text{Rouge})}{(\text{PIR}+\text{Rouge})} \quad \text{Équation. 1}$$

Le fait que le NDVI soit un ratio permet d'atténuer de nombreuses formes de bruit telles que les différences d'éclairement, l'ombre des nuages, l'atténuation atmosphérique, ainsi que certaines variations topographiques. Le NDVI est une mesure de la végétation suffisamment stable pour permettre des comparaisons significatives des changements saisonniers et interannuels de la croissance et de l'activité de la végétation (Huete et al, 2002).

Les données peuvent être obtenue sur le site REVERB de la NASA au: http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle&keywords=MOD13A1.

3.2.5 Indice foliaire dérivé AVHRR et de SPOT VGT

Le produit LAI est dérivé d'une nouvelle base de données GEOV1 développée dans le cadre du service de cartographie du consortium Geoland-2/BioPar. Cet ensemble de données constitue une série temporelle de composés de 10 jours représentant l'indice foliaire sur la période de 1981 à 2012. La résolution spatiale est de 1 km. Les données de 1981 à 2000 sont dérivées du capteur AVHRR et celles de 2000 à 2012 sont dérivées du capteur SPOT VGT. Le LAI est estimé à partir d'un algorithme de calcul par réseau de neurones (Baret et al, 2013). Le paramètre de LAI serait plus sensible que le NDVI à la végétation arbustive au sol, entre les arbres (Camacho et al, 2012).

3.2.6 Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series

Cet ensemble de données constitue une série temporelle de composés de 10 jours représentant l'indice NDVI sur la période de 1985 à 2011 au Canada. La résolution spatiale du produit est de 1 km. Il provient du Centre Canadien de Télédétection et du Ministère des Ressources Naturelle du Canada (Latifovic et al, 2005b).

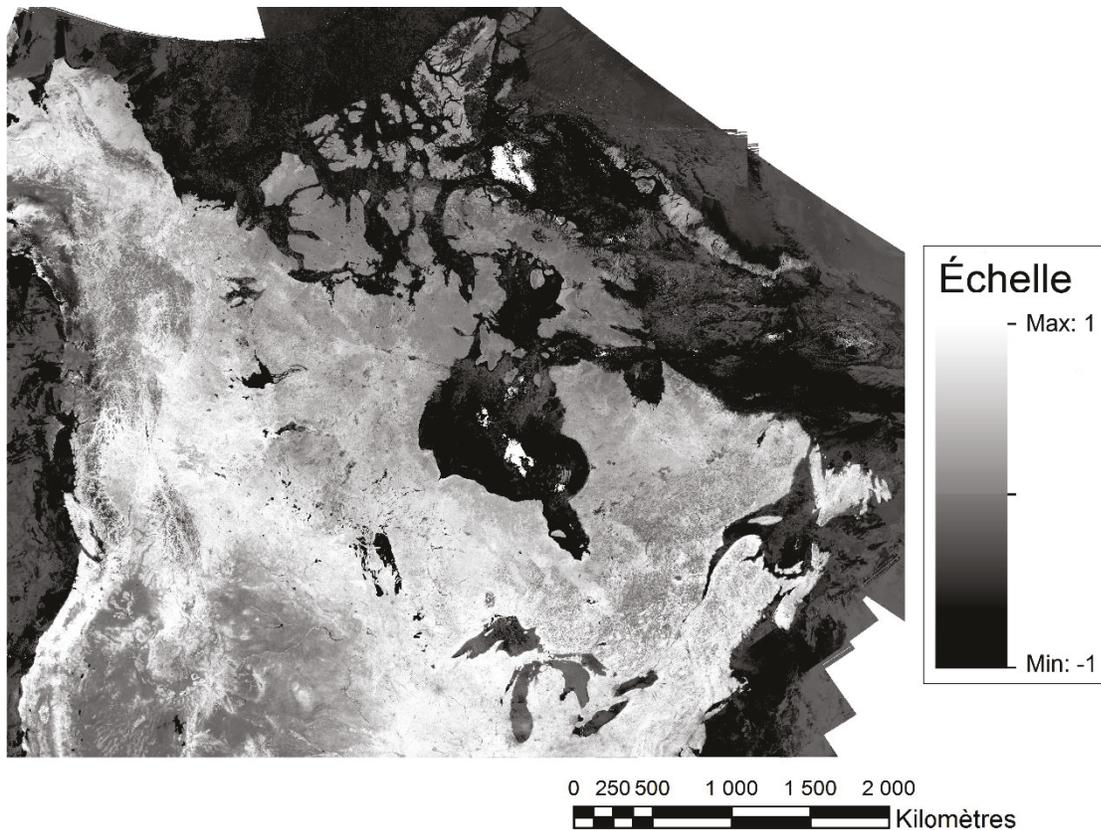


Fig. 3.2 Image brute de Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series (2008).

3.3 Données météorologiques

3.3.1 Températures de l'air

Les données observées journalières de la température de l'air proviennent d'Environnement Canada et ont été obtenues par le portail de téléchargement Données Accès Intégration (DAI). Le portail de téléchargement DAI est le fruit de la collaboration entre le Centre de recherche sur les changements climatiques et l'environnement global (C3EG), la Division de recherche sur l'adaptation et les répercussions (DRAR) d'Environnement Canada, le réseau de recherche sur la sécheresse (RRS), et du Consortium Ouranos (Québec). Le tableau 3.4 dresse l'inventaire des stations qui ont été considérées pour cette étude.

Nom de la station	Latitude (N)	Longitude (O)	Premier enregistrement	Dernier Enregistrement	Durée (année)
EASTMAIN A	52,2333	-78,5167	1992-10-01	2012-12-04	20
WEMINDJI A	53,0167	-78,8333	1992-10-03	2012-12-04	20
NITCHEQUON	53,2000	-70,9000	1953-01-01	1985-11-30	32
LA GRANDE III A	53,5667	-76,2000	1994-02-01	2012-12-04	18
LA GRANDE RIVIÈRE A	53,6333	-77,7000	1976-10-01	2012-11-08	36
LA GRANDE IV	53,7500	-73,6833	2005-10-10	2010-12-31	5
LA GRANDE IV A	53,7572	-73,6792	2005-04-01	2012-12-04	7
LA GRANDE IV A	53,7572	-73,6792	1985-12-05	2005-10-04	20
SCHEFFERVILLE A	54,8000	-66,8167	1953-01-01	2010-01-21	57
KUUJJUARAPIK A	55,2833	-77,7500	1957-02-01	2012-12-04	55
BORDER A	55,3333	-63,2167	1965-01-12	1979-07-31	14
BORDER (AUT)	55,3333	-63,2167	1979-08-30	1998-09-15	19
UMIUJQA A	56,5322	-76,5200	1993-01-18	2012-12-04	19
RIVIÈRE AUX FEUILLES	57,9094	-72,9758	2005-09-19	2012-12-04	7
KUUJJUAQ A	58,1000	-68,4167	1953-01-01	2012-12-04	59
INUKJUAQ A	58,4667	-78,0833	1992-10-28	2012-12-04	20
INUKJUAQ UA	58,4667	-78,0833	1953-01-01	1995-07-17	42
TASIUJQA A	58,6711	-69,9486	1993-06-01	2012-12-04	19
KANGIQSUALUJJUAQ A	58,7075	-65,9875	1992-11-16	2012-12-03	20
AUPALUK A	59,3028	-69,5997	1992-11-25	2012-12-04	20
KANGIRSUK A	60,0231	-70,0036	1992-10-21	2012-12-04	20
PUVIRNITUQ A	60,0500	-77,2833	1993-01-15	2012-12-04	19
AKULIVIK A	60,8167	-78,1500	1992-09-02	2012-12-04	20
QUAQTAQ A	61,0484	-69,6239	1989-04-01	2012-12-04	23
QUAQTAQ	61,0500	-69,6333	1971-11-27	1989-03-28	18
CAPE HOPES ADVANCE	61,0833	-69,5500	1953-01-01	1971-08-31	18
KANGIQSUJUAQ A	61,5908	-71,9319	1992-10-11	2012-12-03	20
SALLUIT A	62,1819	-75,6694	1992-10-07	2012-12-04	20
IVUJIVIK A	62,4156	-77,9253	1992-10-01	2012-12-02	20

Tableau 3.4 Inventaire des stations du Nunavik situées au nord du 52ème parallèle possédant un minimum de 5 années d'enregistrement consécutif de la température de l'air horaire.

3.3.2 Hauteur de la neige

3.3.2.1 Données observées

Les données observées journalières de la hauteur de la neige proviennent d'Environnement Canada et ont été obtenues par le portail de téléchargement DAI. Le tableau **Error! Reference source not found.** dresse l'inventaire des stations qui ont été considérées pour cette étude.

Nom de la station	Latitude	Longitude	Premier enregistrement	Dernier enregistrement	Durée (année)
NITCHEQUON	53,2	-70,9	1956	1985	29
LA GRANDE RIVIÈRE A	53,6333	-77,7	1977	2012	35
LA GRANDE IV A	53,7572	-73,6792	1986	2005	19
SCHEFFERVILLE A	54,8	-66,8167	1956	1993	37
KUUJJUARAPIK A	55,2833	-77,75	1956	2012	56
BORDER A	55,3333	-63,2167	1966	1979	13
RIVIÈRE AUX FEUILLES	57,9094	-72,9758	2007	2012	5
KUUJJUAQ A	58,1	-68,4167	1956	2012	56
INUKJUAQ UA	58,4667	-78,0833	1956	1994	38
QUAQTAQ	61,05	-69,6333	1972	1988	16
CAPE HOPES ADVANCE	61,0833	-69,55	1956	1971	15
PARC NATIONAL DES PINGUALUIT	61,3128	-73,6684	2010	2012	2

Tableau 3.5 Inventaire des stations du Nunavik situées au nord du 52ème parallèle possédant un minimum de 2 années d'enregistrement consécutif de la hauteur de la neige quotidienne.

3.3.2.2 Données CMC

Les données du Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data ont été utilisées. Ces données sont dérivées de sources multiples telles que des données d'observation synoptique, des rapports d'aviation météorologique, ainsi que des rapports d'aviation spéciaux. Elles comprennent les observations journalières de la hauteur de neige, les moyennes mensuelles de la hauteur de neige ainsi qu'une estimation mensuelle du EEN. Elles ont une résolution spatiale de 24 km et couvrent la période de 1998 à 2012. Les données sont disponibles en grille de dimension 706 x 706 dans le format ASCII séparé par tabulation (Brown, 2010). Seulement les observations journalières de la hauteur de neige ont été utilisées dans le présent travail.

3.3.3 Précipitations

Les données de précipitation CANGRID ont été utilisées. Ces données couvrent tout le Canada à une résolution spatiale de 50 km sur une projection stéréographique polaire (Seglenieks et Soulis, 2000). L'ensemble comprend les précipitations mensuelles totales dérivées des précipitations mensuelles de pluie et de neige. Ces données ont été calculées en additionnant les observations quotidiennes des pluviomètres, des règles à neige et des précipitations totales de chaque station pour chaque mois (Mekis et Vincent, 2011). Les données de précipitations proviennent des enregistrements quotidiens faits à partir des pluviomètres de 491 stations. Pour chaque type de pluviomètre, les valeurs ont été ajustées pour prendre en compte les valeurs sous-estimées dues au vent, l'évaporation et les pertes de mouillage (Devine et Mekis, 2008). Pour les précipitations de neige, la méthode par règle et par nivomètre Nipher coïncidentes a été appliquée pour corriger la densité des mesures par règle de neige (Mekis et Brown, 2010). Finalement, les traces de

précipitations ont été ajustées pour éviter la sous-estimation des précipitations totales (Mekis et Vincent, 2011).

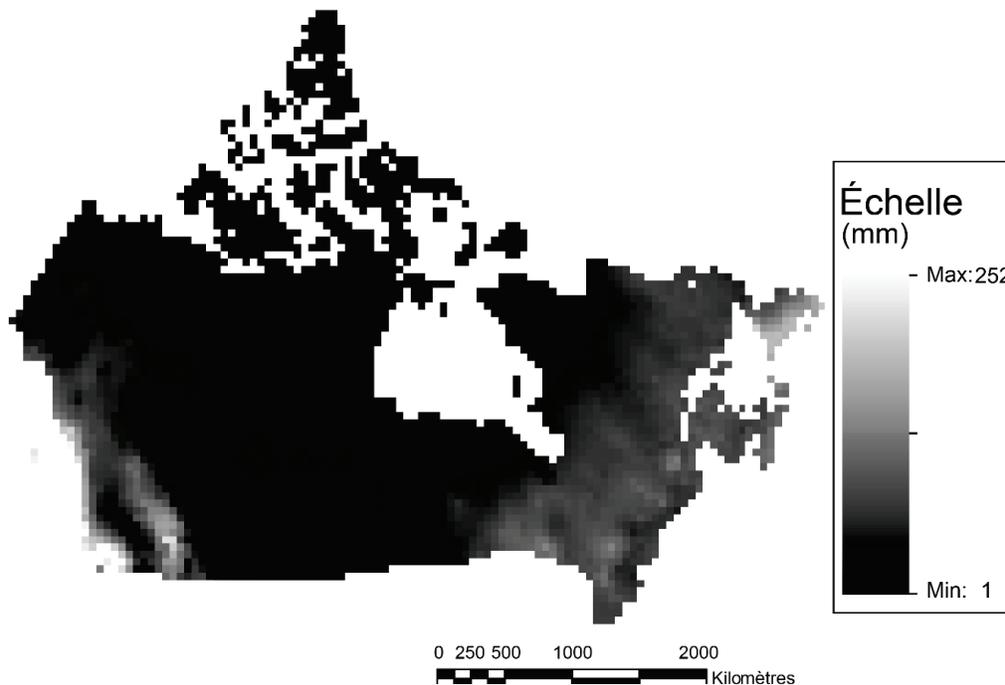


Fig. 3.3 Image brute CANGRID (125 x 95) des précipitations cumulées du mois de janvier 2012.

3.4 Données satellites sur la neige au sol

3.4.1 Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover & Sea Ice Extent, Version 4 (NHSCSIE)

Les données de couverture de neige et de l'étendue de la glace hebdomadaire de l'hémisphère nord (Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent, version 4) (NHSCSIE) ont été utilisées pour obtenir la date de la fin de la fonte de la neige pour chaque zone. Ces données sont projetées en EASE-grid2 avec une taille de pixel de 25 km mais sont dérivées de données avec une résolution spatiale de 190.5 km. La véritable résolution spatiale est donc de 190.5 km. L'ensemble de données couvre la période de 1967 à 2010 et est de forme binaire (neige/non-neige). Cet ensemble de données a été constitué à partir de plusieurs sources de données. Les données sur l'étendue du couvert de neige sont basées sur le produit NOAA/NCDC Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE) (Robinson, 2012) dérivé des capteurs AVHRR, GOES et autres capteurs ayant des bandes visibles. (Helfrich et al, 2007; Brodzik, 2013).

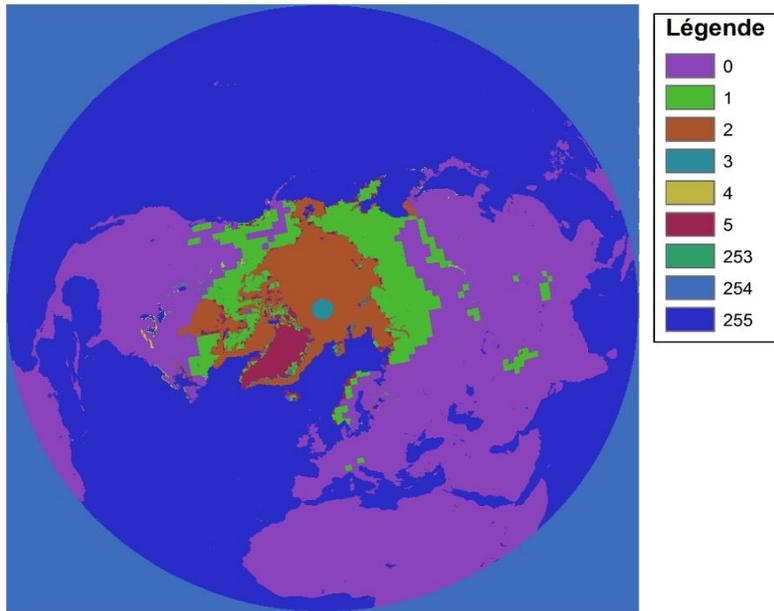


Fig. 3.4 Image brute NHSCSIE représentant la période du 15 mai au 21 mai 2006. 0 représente les pixels sans neige, 1 représente les pixels avec neige, 2 représente la glace de mer, 3, 4 et 5 sont des pixels utilisés pour le contrôle de la qualité, 253 représente les pixels non classés, 254 représente les pixels hors de l'hémisphère nord et 255 représente l'océan.

3.4.2 MODIS

MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V005 (MOD10a2)

Les données MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m Grid (mod10a2), Version 5 ont été utilisées afin de compléter les données. Ces données ont une résolution temporelle de 8 jours, une résolution spatiale de 500 m, et une étendue temporelle de 2000 à 2013. Les données peuvent être obtenues sur le site REVERB de la NASA au :

http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle&keywords=MOD10a2.

MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m SIN Grid V005 (MOD10a1)

Les données MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m Grid (mod10a1), Version 5 ont été également utilisées. Ces données ont une résolution temporelle de 1 jour, une résolution spatiale de 500 m, et une étendue temporelle de 2000 à 2013. Les données peuvent être obtenues sur le site REVERB de la NASA au :

http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle&keywords=MOD10a1.

3.4.3 Données micro-ondes passives SMMR et SSM/I

Les données micro-ondes passives sont dérivées de la température de brillance (T_b). Cette dernière correspond à la température apparente d'un corps « gris », i.e. qui n'absorbe pas la radiation à 100%. Sans considérer les effets atmosphériques (faibles dans ces fréquences), la température de brillance d'une longueur d'onde donnée est le produit de la température physique effective (T_p) et de l'émissivité (ϵ) de la surface.

$$T_b(\lambda) \approx \epsilon(\lambda) T_p \quad \text{Équation. 2}$$

Où λ = fréquence

Cette équation est appelée l'approximation de Rayleigh-Jean de la loi de Plank pour la partie micro-ondes du spectre électromagnétique. Deux capteurs à micro-ondes passives ont été utilisés dans cette étude.

SMMR

Des données sur la température de brillance dérivée du produit Nimbus-7 SMMR Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures ont été utilisées. Le capteur SMMR était transporté par le satellite Nimbus-7 Pathfinder sur la période de 1978 à 1987. Il est constitué de 5 fréquences en polarisation verticale et horizontale: 6.6, 10.7, 18.0 et 21, et 37 GHz. Ces données ont une résolution temporelle de 2 fois tous les 2 jours; correspondant au passage ascendant et descendant du capteur. Offrant ainsi une mesure aux 2 jours de la température de brillance pendant le jour et pendant la nuit. Le produit final est disponible en format EASE-grid à une résolution spatiale de 25 km sur le site FTP du NSIDC au:

ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0071_smmr_ease_grid_tbs/.

SSM/I

Les données de température de brillance quotidienne dérivée de DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder (DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures), Version 2, ont été utilisées. Le capteur SSMI est transporté sur les satellites du Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) F8, F10, F11, F12, F13, F15 et F17. Il est constitué de 7 canaux et 4 fréquences en polarisation verticale et horizontale: 19.35, 22.2, 37,0 et 85.5 GHz. Ces données ont une résolution temporelle de 2 fois par jour; correspondant au passage ascendant et descendant du capteur. Offrant ainsi une mesure quotidienne de la température de brillance pendant le jour et pendant la nuit. Le produit final est disponible en format EASE-grid à une résolution spatiale de 25 km (Fig. 3.5) pour la période de 1987 à 2012 sur le site FTP du NSIDC au :

ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0032_ease_grid_tbs/.

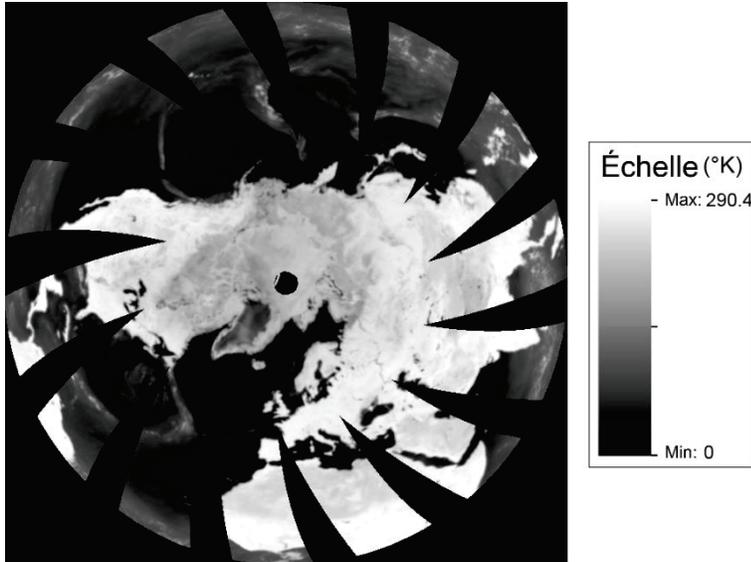


Fig. 3.5 Image brute SSMI acquise le 28 mars 2008 en passage ascendant à la fréquence 19 GHz en polarisation horizontale.

3.4.4 Données micro-ondes actives QuikSCAT

Le diffusomètre QuikSCAT est un capteur micro-ondes actives qui mesure la fraction d'énergie émise par l'antenne du satellite à une fréquence de 13.4 GHz qui est rétrodiffusée de la cible à l'antenne. Sa résolution spatiale est de 4.25 km et sa résolution temporelle est d'un jour. Les données sont disponibles à une résolution spatiale de 25 km sur le site FTP de la NASA:

ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/quikscat/L3/byu_scp/sigma0browse/lite/arctic

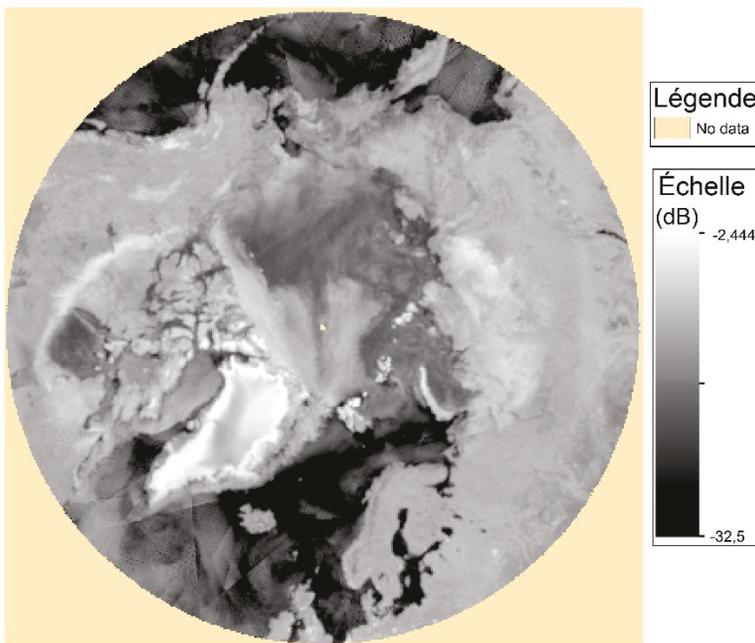


Fig. 3.6 Image brute QuikSCAT du 21 mai 2009.

4. Méthodologie

4.1 Organigramme méthodologique

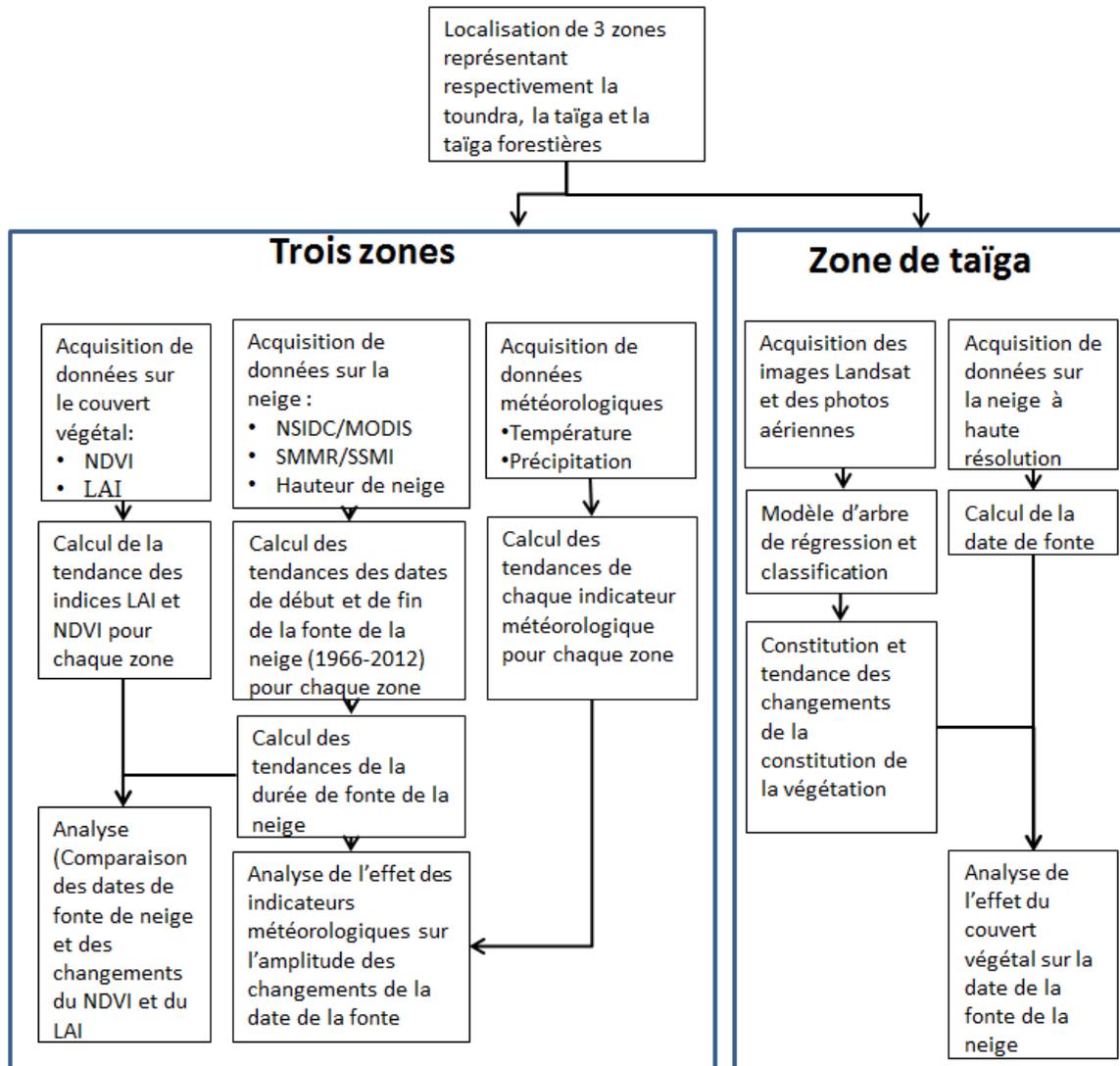


Fig. 4.1 Organigramme méthodologique.

L'approche méthodologique comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, on a défini 3 zones d'analyse : une au Nord en milieu de toundra, la zone de transition centrale, et une zone au sud de cette zone de transition. La première partie de l'étude a porté sur une analyse des variations temporelles moyennées sur les 3 zones considérées (Chapitres 4.3 à 4.5). Pour analyser les interactions entre la neige et la végétation dans les variations temporelles analysées, on a essayé de distinguer la part qui provenait du changement climatique (donc indépendant de ces interactions) de celle qui provenait de l'impact de l'accroissement de la couverture d'arbustes. La deuxième partie de l'étude a porté sur une analyse spatiale à haute résolution sur la zone de transition (zone centrale) (Chapitres 4.6 à 4.8). Cette partie a permis d'analyser localement l'impact de la couverture arbustive sur la fonte de la neige.

4.2 Localisation et sélections des zones à analyser

Trois zones respectivement représentatives de la toundra, de la taïga ainsi que de la taïga forestière ont été sélectionnées au Nunavik à l'aide de la tendance du NDVI de la période de 1985 à 2006 (Fig. 4.2), une image du NDVI au maximum phénologique de 2012 (Fig. 4.3), ainsi que la carte de la couverture du sol de 2005 tirée de Latifovic et al, (2005).

La tendance de l'augmentation du NDVI sur la période de 1985 à 2006 (Fig. 4.2) a été utilisée pour sélectionner trois zones représentant une évolution de la végétation différente. La zone 1, de toundra désertique, ne présente pas d'évolution du NDVI significative. La zone 2, de transition entre la toundra et la taïga, présente un taux d'augmentation du NDVI (« verdissement ») significatif. La zone 3 plus au sud, en zone de taïga arbustive présente un taux d'augmentation non significatif.

Une image du NDVI du maximum phénologique de l'été 2012 (Fig. 4.3) a été utilisée afin de déterminer les trois zones. Le NDVI de la zone 1 se situe entre ~ 0 et $0,5$. Le NDVI de la zone 2 se situe entre $\sim 0,5$ et $0,7$. Le NDVI de la zone 3 se situe entre $\sim 0,6$ et 1 .

La carte de la couverture du sol couvert au Nunavik (Fig. 4.4) a été utilisée pour déterminer les zones. La carte originale, contenant 31 classes, a été simplifiée afin de représenter seulement les grandes classes du Nunavik. La zone 1 est caractérisée par de l'herbe, du lichen, et de la végétation basse. La zone 2 est principalement caractérisée par les arbustes. Finalement, la zone 3 est principalement caractérisée par de la forêt ouverte (peu dense).

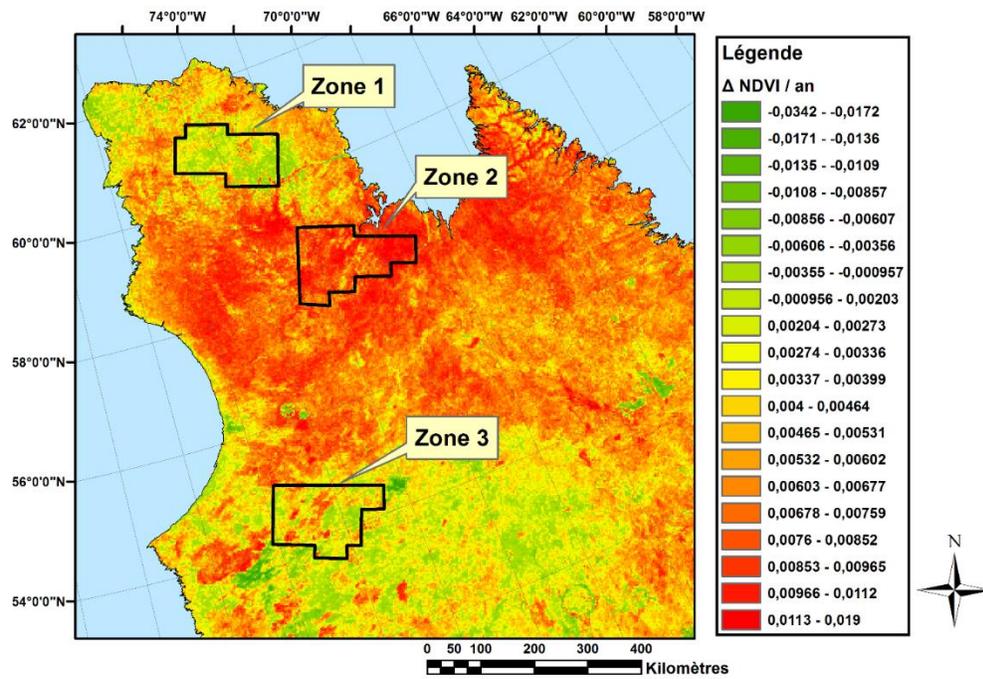


Fig. 4.2 Tendance du NDVI pour la période de 1985 à 2006. (Tirée de Pouliot, Latifovic et Olthof, 2009). La carte affiche une augmentation importante du NDVI au-delà du 56ème parallèle et au-dessous du 60ème.

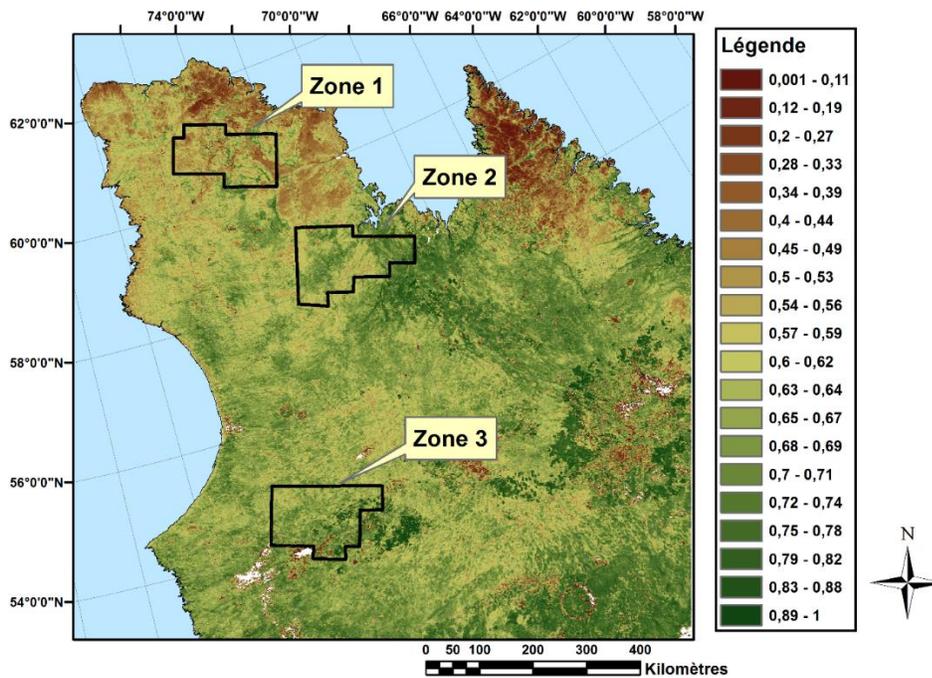


Fig. 4.3 NDVI correspondant au maximum phénologique de l'été 2012. Cette carte est dérivée du produit MODIS MOD13A1.

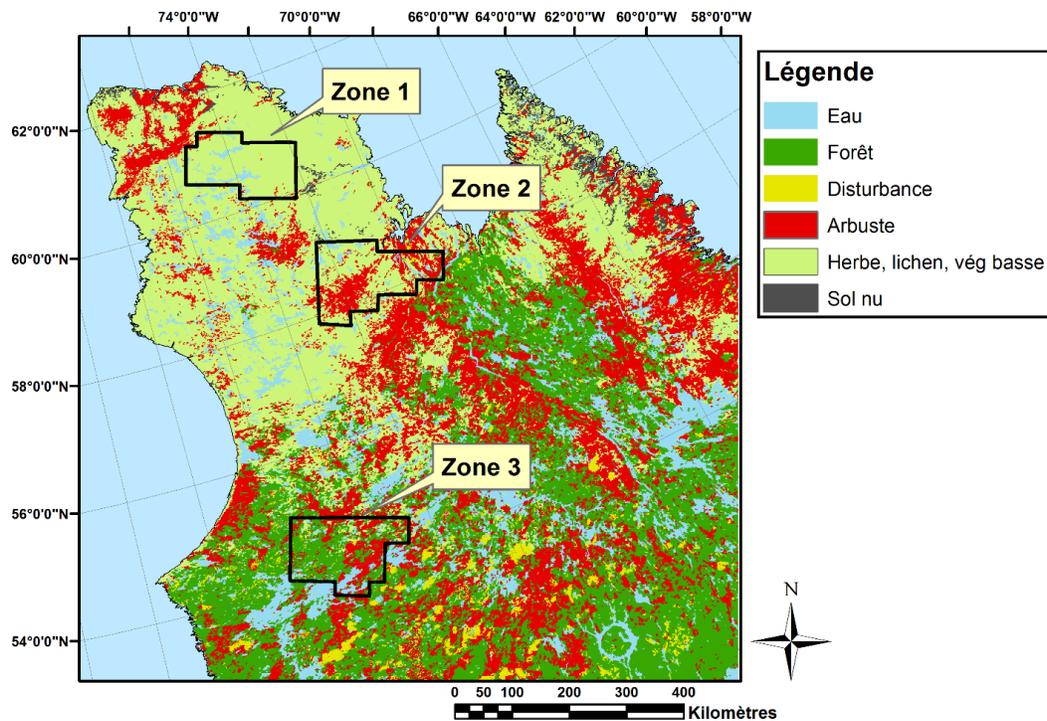


Fig. 4.4 Couverture du sol au Nunavik dérivée de la couverture du sol de 2005. Cette carte vulgarise les grandes classes retrouvées au Nunavik.

La figure. 4.5 montre les trois zones sélectionnées. La zone 1 est principalement caractérisée par la toundra. Sa superficie est de 18 916 km². La zone 2 est caractérisée par la taïga et représente une zone d'augmentation du couvert arbustif. Sa superficie est de 22 775 km². La zone 3 est caractérisée par la taïga forestière. Sa superficie est de 22 625 km²

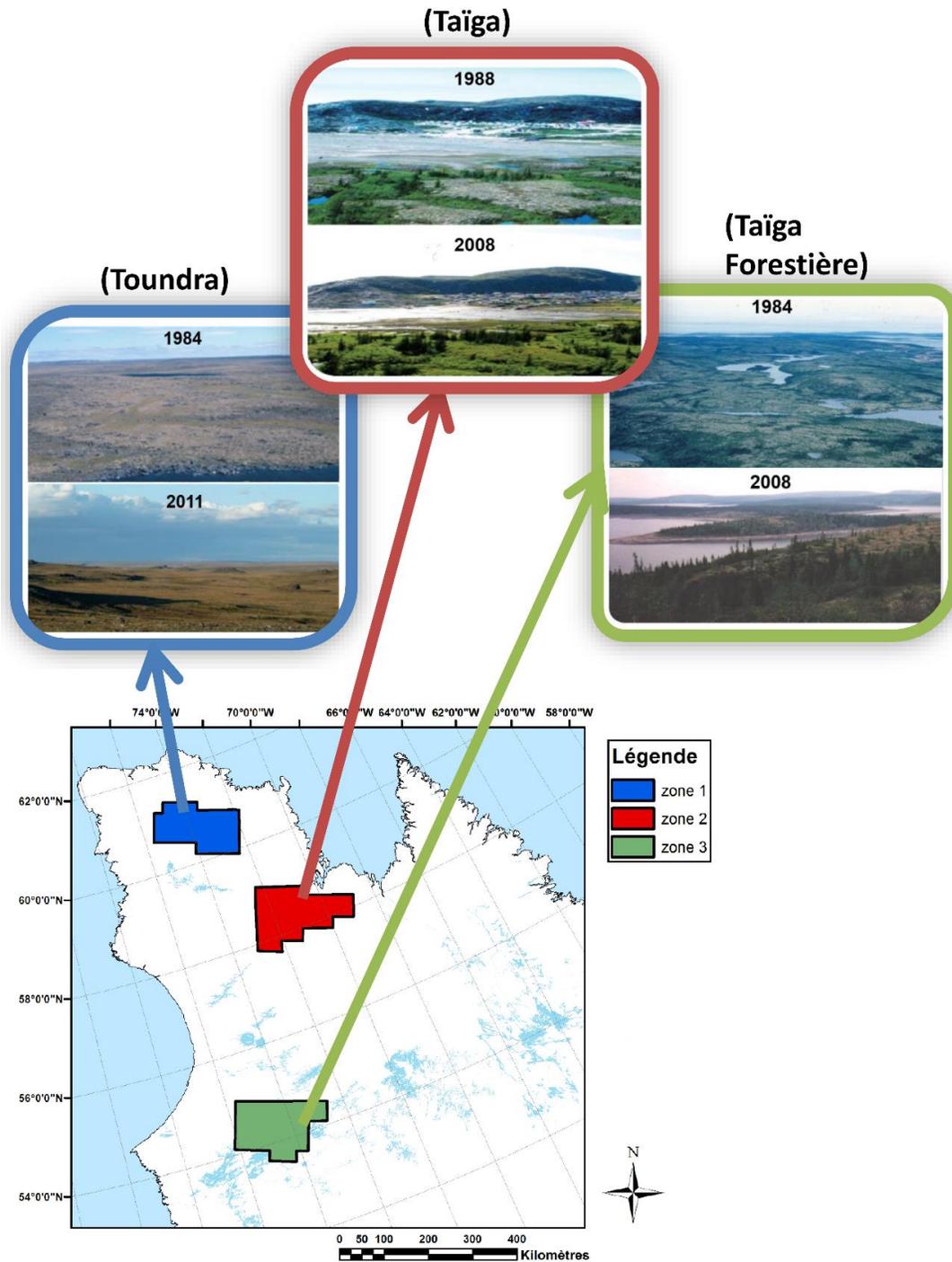


Fig. 4.5 Représentation des zones sélectionnées pour représenter la toundra, la taïga, ainsi que la taïga forestière. Les images de 1984 pour la zone 1 et 3 proviennent de Jean Beaubien du Service canadien des forêts (SCF). L'image de la zone 1 de 2011 provient du photographe Lester Kovac (2011) au : <http://www.panoramio.com/user/157273>. Les photos de la zone 2 sont tirées d'Arctic Net, 2010. L'image de la zone 3 de 2008 provient du photographe ve2bog et est disponible au : <http://www.panoramio.com/photo/2008248>.

4.3 Méthode d'analyse de la végétation

4.3.1. Changement du NDVI

La date du maximum de l'indice NDVI annuel a été obtenue à partir des produits Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series créés au Centre Canadien de Télédétection et MODIS Végétation Indices 16-Day L3 Global 1 km. Ces dates représentent la date annuelle à laquelle le NDVI moyen du Nunavik est le plus élevé. La tendance du NDVI maximal annuel a été calculée sur l'ensemble du Nunavik sur la période de 1985 à 2012.

4.3.2 Changement du LAI

La tendance de l'indice foliaire a été calculée pour les 3 zones. Le produit d'indice foliaire (LAI) est dérivé d'une nouvelle base de données GEOV1 développée à une résolution spatiale de 1 km et temporelle de 10 jours dans le cadre du service de cartographie du consortium Geoland-2/BioPar. Le LAI est estimé à partir d'un algorithme de calcul par réseau de neurones (Baret et al, 2013).

L'indice foliaire est défini comme la moitié du total de la surface totale foliaire des feuilles par unité de surface horizontale (voir Baret et al, 2013).

$$\text{LAI} = \frac{\text{Surface foliaire}/2}{\text{Unité horizontale}} \quad \text{Équation. 3}$$

4.3.3 Calcul de la date du début de la fonte

Les données dérivées de la bande K en polarisation horizontale des capteurs de micro-ondes passives SMMR et SSMI ont été utilisées afin d'obtenir la date du début de la fonte. La bande K correspond à une fréquence de 18 GHz pour le capteur SMMR et de 19.35 GHz pour le capteur SSMI.

La méthode pour identifier la fonte de la neige utilise deux seuils. Le premier est un seuil sur la température de brillance pendant le jour et le deuxième est un seuil sur la différence entre la température de brillance pendant le jour et celle pendant la nuit: méthode de seuillage DAV (Diurnal Amplitude variation, voir Tedesco, 2007). Les changements prononcés de la température de brillance (T_b) sont explicables par un changement de l'absorption de la surface au moment de la fonte. L'apparition de particules d'eau liquide crée une augmentation soudaine de la partie imaginaire de la constante diélectrique de la neige et entraîne une augmentation soudaine de son émissivité (la neige devient comme un corps noir, très faible profondeur de pénétration). Il s'en suit une augmentation de la température de brillance mesurée. Conséquemment, si la neige est humide pendant le jour, la température de brillance sera significativement plus élevée pendant le jour que pendant la nuit si l'eau liquide dans la neige regèle (neige sèche) (Tedesco, 2007). Cette méthode permet donc d'identifier le début de la période de fonte.

La date du début de la fonte de la neige correspond à la première journée à laquelle la méthode de seuillage DAV (Tedesco, 2007) a indiqué qu'il y avait une fonte pendant le jour et un regel pendant

la nuit. Afin de considérer les dates où les températures sont demeurées chaudes pendant la nuit, les dates où la température de jour et celle de nuit étaient supérieures au seuil de jour ont été classées comme jour de fonte également.

Les seuils de jour et de DAV ont été fixés à 245° K et 20° K respectivement à partir de la littérature (Ramage et al, 2002; Tedesco, 2007), d'une validation avec des données QuikSCAT (voir Annexe 2) et de comparaison avec les températures enregistrées aux stations. En considération que le DAV est optimisé pour la détection de la fonte de la neige dans un contexte de couverture complète de neige, la méthode n'a pas été capable d'identifier la date du début de la fonte pour certaines années. Dans ce cas, la date de la fonte a été déterminée de façon manuelle à partir du Tb de jour, Tb de nuit, et le Tb DAV.

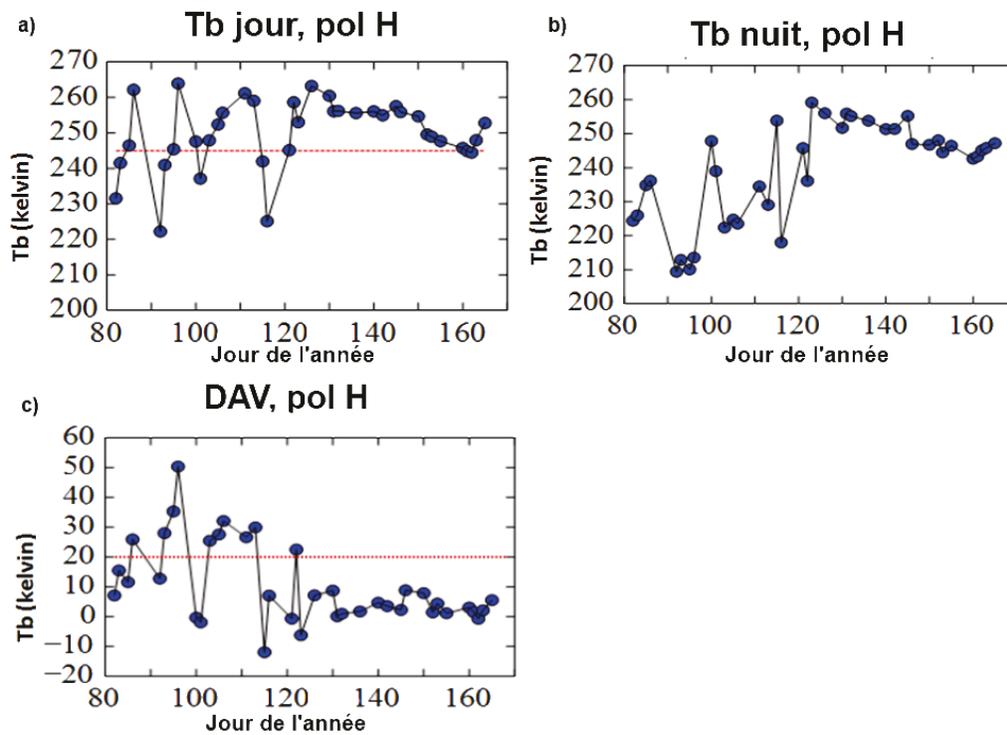


Fig. 4.6 Température de brillance de jour (a), de nuit (b), ainsi que le DAV (c) obtenue à partir de SSMI. La ligne pointillée rouge représente le seuil choisi. Soit à 245° K pour le jour et 20° K pour le DAV.

4.3.4 Calcul du début de la fonte continue de la neige

La date du début de la fonte continue de la neige correspond à la dernière journée à laquelle la méthode de seuillage DAV (Tedesco, 2007) a indiqué qu'il y avait une fonte pendant le jour et un regel pendant la nuit. Tout comme pour la détection du début de la fonte de la neige, les seuils de jour et de DAV ont été fixés à 245° K et 20° K.

4.3.5 Calcul de la fin de la fonte de la neige

Les données Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent, Version 4 ont été utilisées pour obtenir la fin de la fonte de la neige pour chaque zone. Ces données sont hebdomadaires. La date de la fonte de la neige de chaque zone a été identifiée en tant que la première date à laquelle le pixel n'a pas de neige pour deux dates consécutives. La moyenne de ces dates a été ensuite calculée pour chaque zone.

Du fait que les données Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent se rendent seulement jusqu'en 2010, les données MODIS/Terra Snow Cover 8-day L3 Global 500 m Grid, Version 4 ont été utilisées pour calculer la date de la fin de la fonte de la neige pour les années 2011 et 2012. La date de la fonte de la neige de chaque année a été identifiée comme la première date à laquelle le pixel n'a pas de neige pour 2 dates consécutives (correspondant à une période de 20 et 16 jours respectivement pour le produit EASE-Grid et MODIS).

Afin d'ajuster la date de la fonte de la neige obtenue par MODIS au reste de la série et de s'assurer de leur cohérence, une régression linéaire a été faite à partir des dates de fonte des années 2000 à 2010 obtenues par les deux ensembles de données.

4.4 Méthode d'analyse des changements climatiques

4.4.1 Températures de l'air

Les données observées journalières de la température de l'air provenant d'Environnement Canada ont été utilisées. La température moyenne de l'air correspondant à la période de fonte de la neige pour les trois zones a été calculée.

Le début de la fonte a été identifié à partir de SSMI/SMMR et la fin de la fonte à partir de NHSCSIE. La moyenne des dates du début et de fin de la fonte a été calculée pour chaque zone. Les périodes de calcul de la température moyenne ont été fixées à 50 jours, débutant 25 jours avant et en terminant 25 jours après la moyenne. Le choix d'une période de 50 jours fait en sorte que la période sur laquelle la température moyenne est calculée est plus longue que la plupart des périodes de fonte de la neige (correspondant à 37,57 jours pour les trois zones sur la période de 1979 à 2012), mais permet de couvrir les périodes de fonte sans utiliser de période adaptative.

Les moyennes de température calculées couvrent ainsi les périodes avant, pendant et après la fonte de la neige, et ce, pour toutes les années. Les périodes attribuées à chaque zone sont les suivantes:

Zone 1: début: 150, fin: 200

Zone 2: début: 140, fin: 190

Zone 3: début: 120, fin: 170

La figure 4.7 montre une carte des stations météorologiques utilisées. Afin de maximiser le nombre de stations à proximité des zones et d'optimiser la continuité des séries, les enregistrements horaires

effectués entre 10h00 et 14h00 ont été utilisés pour calculer la série. Cette méthode a permis d'obtenir une moyenne de température calculée sur des heures constantes. Cette période de la journée a été utilisée, car elle représente la période où les enregistrements ont été pris pour les stations avec des données partielles utilisées dans cette étude. Pour chaque année, la moyenne de la température de l'air a été calculée pour chaque station. La moyenne de toutes les stations environnantes de chaque zone a été calculée pour représenter ces dernières

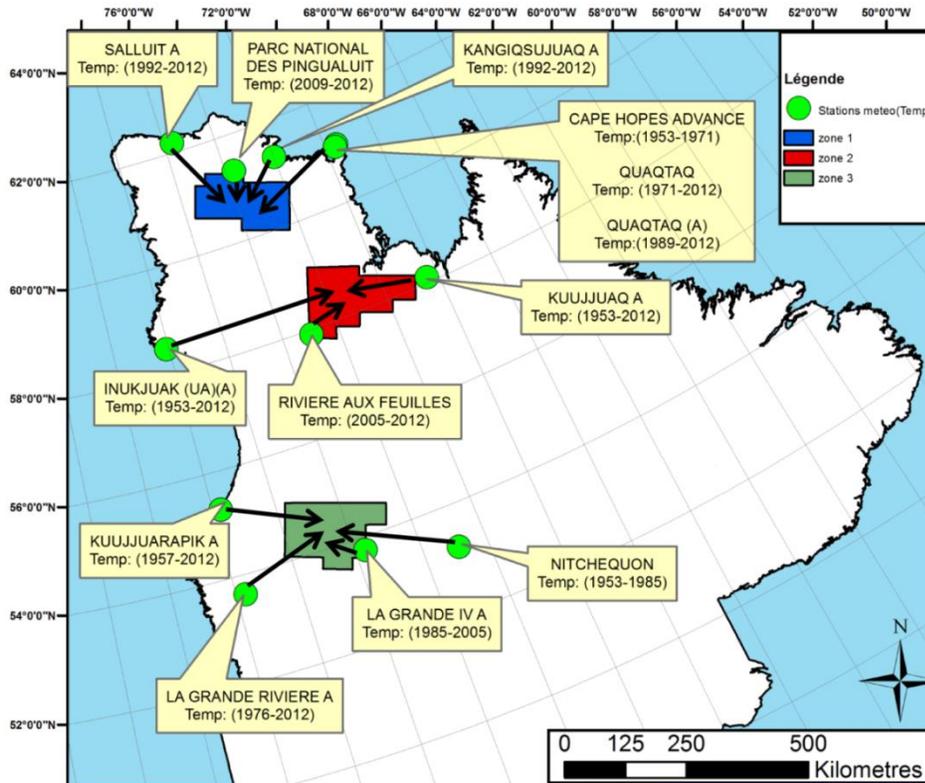


Fig. 4.7 Répartition spatiale des stations météorologiques utilisées pour chacune des zones considérées.

4.4.2 Hauteur maximum de la neige (Hmax)

Pour déterminer la hauteur maximale de la neige, les données observées journalières sur la hauteur de neige provenant d'Environnement Canada ainsi que des données du Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data ont été utilisées. Le maximum annuel de neige de chaque station située à l'intérieur ou à proximité des 3 zones (Fig. 4.8) a été obtenu pour chaque année. Chaque année correspond à une période débutant en novembre de l'année précédente jusqu'à juin de l'année en question. La moyenne des stations a été utilisée pour représenter la hauteur maximum de la neige de chaque zone.

Les données CMC correspondant à l'emplacement des stations météorologiques ont été utilisées pour obtenir la hauteur maximale de la neige des années où les données observées étaient manquantes. La tendance de la période de 1967 à 2012 a été calculée pour chaque zone.

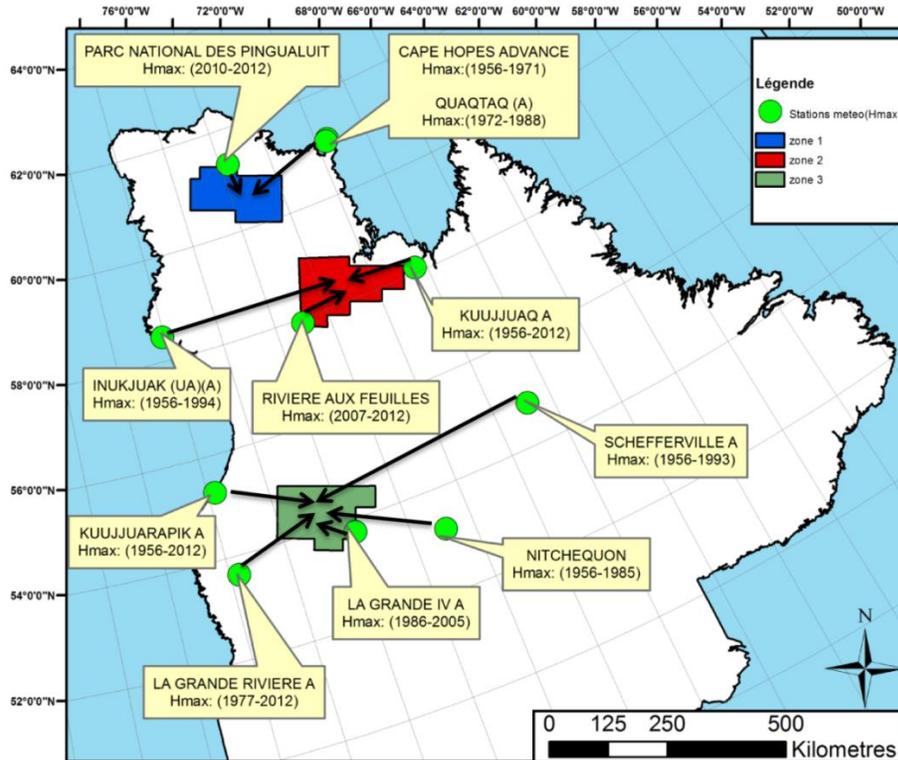


Fig. 4.8 Représentation spatiale des stations utilisées pour chaque zone ainsi que la disponibilité des données.

4.4.3 Précipitations

Des données de précipitation mensuelles CANGRID ont été utilisées pour obtenir les précipitations hivernales annuelles totales. Comme les données sont mensuelles, il est difficile de déterminer si les précipitations ont eu lieu sous la forme de neige ou de pluie à partir des données sur la température. Les précipitations neigeuses ont conséquemment été définies comme les précipitations ayant lieu pendant la période de 1er novembre 31 mars. Le choix de la date du début de l'hiver a été fait en considération la date médiane du début de la neige permanente au sol de la période 2000 à 2006 qui a été établit au 15 octobre-01 novembre pour le Nunavik par Brown, (2010b) alors que la date de fin de l'hiver a été déterminer à partir de la moyenne de la date du début de la fonte de la neige calculée à la section 4.4.1. Il faut noter que même si les données sont mensuelles, l'utilisation de données sur la température de l'air pourrait être efficace pour déterminer les dates du début et de la fin de l'hiver de façon adaptative et ajouter de la précision à l'analyse des précipitations.

Les données de précipitation mensuelles pour chaque point de grille à l'intérieur de chaque zone ont été moyennées afin de donner une valeur moyenne par zone. Ces moyennes ont été cumulées afin d'obtenir les précipitations hivernales annuelles totales. La tendance de la période de 1967 à 2012 a été calculée pour chaque zone.

4.5 Changements compositionnels de la couverture du sol

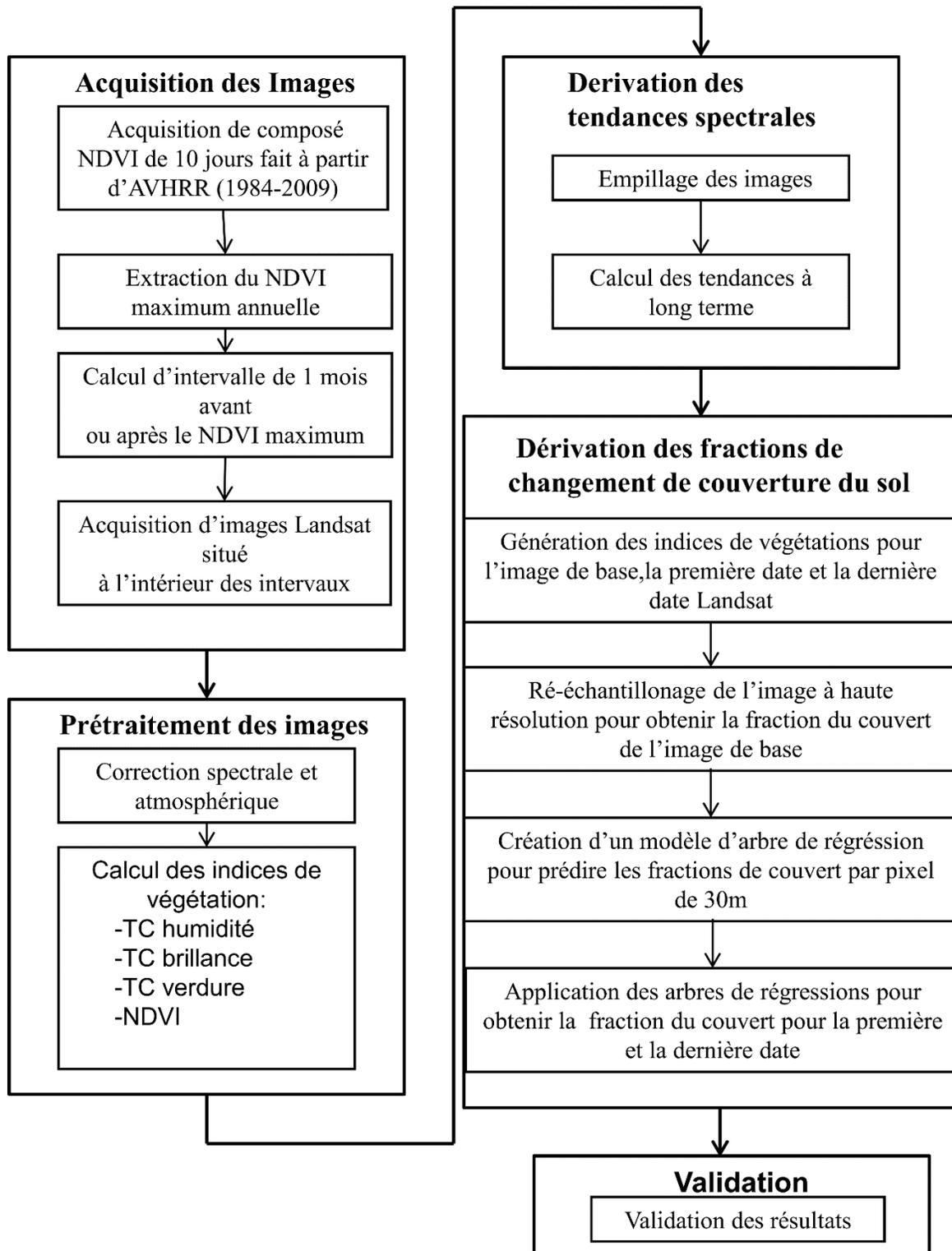


Fig. 4.9 Organigramme méthodologique de l'analyse des changements de la couverture du sol.

Cette étape a servi à caractériser la constitution de la végétation dans de la zone de transition au Nunavik. Pour ce faire, la méthodologie développée par Olthof I. and D. Pouliot, (2009) a été utilisée. Une carte des changements de la couverture végétale de 1984 à 2011 a été créée. La composition ainsi que les changements de la végétation ont été examinés à l'aide d'images satellitaires Landsat sur une durée de 27 ans, soit de 1984 à 2011. Un total de 157 images couvrant 11 scènes Landsat, soit une superficie d'environ 200 000 km² (Fig. 4.10) a été utilisé.

4.5.1 Acquisition des images

Afin de pouvoir comparer les images Landsat indépendamment des variations phénologiques saisonnières, le produit Canada 10-day AVHRR NDVI Time Series a été utilisé pour identifier la période de NDVI maximum annuel. Cette mesure correspond aux trois semaines consécutives moyennées possédant le plus haut NDVI pour chaque année. Des images Landsat situées à l'intérieur de la période du NDVI maximum annuel ont été sélectionnées. Les numéros d'identification des scènes Landsat sont les suivantes: 15/19, 16/19, 17/19, 18/19, 19/19, 20/19, 15/20, 16/20, 17/20, 18/20, 19/20. Leur répartition spatiale est montrée à la figure 4.10.

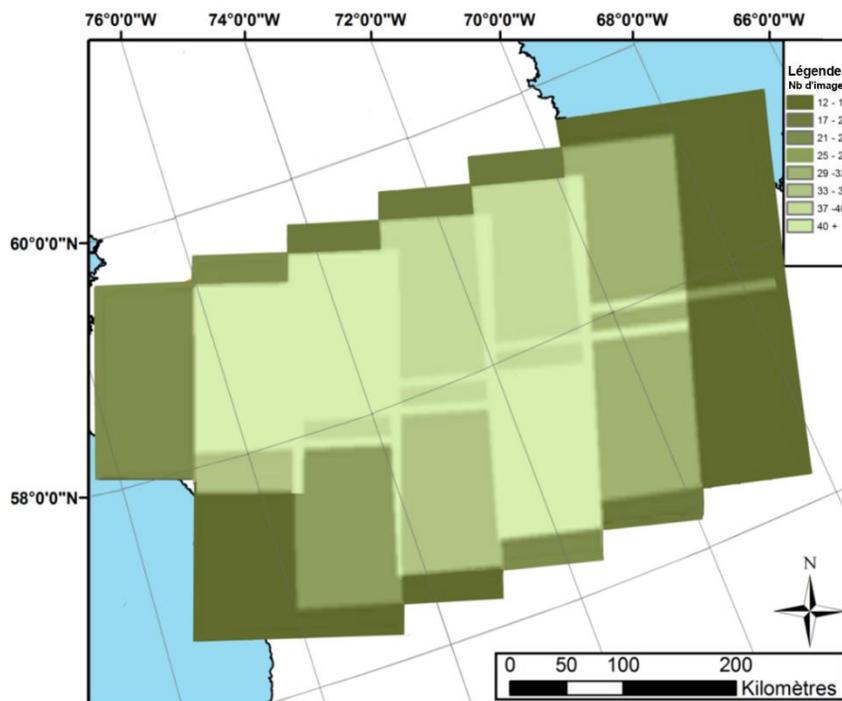


Fig. 4.10 Nombre d'images Landsat par pixel avant la correction atmosphérique.

4.5.2 Prétraitement des images

Pour chaque image, la réflectance au sommet de l'atmosphère a été calculée. Un masque a été appliqué sur les nuages et les zones d'ombres de nuages. La correction atmosphérique a été effectuée en deux temps. Une technique semi-automatisée du nom de Fmask algorithm (Zhu et al, 2012) a été effectuée sur les images de réflectance au sommet de l'atmosphère et une correction

atmosphérique faite de façon visuelle à partir d'un composé des bandes 3,4, et 5 a été appliquée sur les images corrigées.

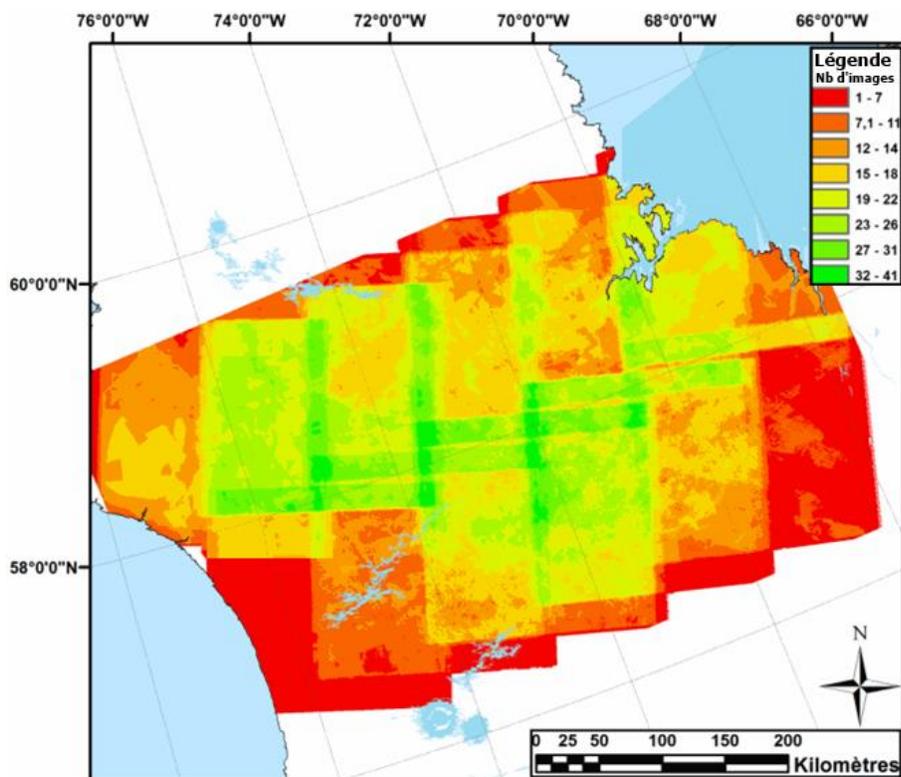


Fig. 4.11 Nombre d'images Landsat par pixel après la correction atmosphérique.

4.5.3 Calcul des indices spectraux

Les indices de végétation normalisés, de brillance, de verdure, et d'humidité ont été calculés pour chaque pixel par la somme des bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7 pondérée par des coefficients préétablis (Tableau 4.1).

Indices	Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 7
Brillance	0,3561	0,3972	0,3904	0,6966	0,2286	0,1596
Verdeur	-0,3344	-0,3544	-0,4556	0,6966	-0,0242	-0,263
Humidité	0,2626	0,2141	0,0926	0,0656	-0,7629	-0,5388

Tableau 4.1 Coefficients proposés pour calculer les indices de végétation normalisée, de brillance, de verdure, et d'humidité (Huang et al, 2002)

4.5.4 Dérivation des tendances des indices spectraux

Une base de données contenant les indices pour toutes les images Landsat a été créée afin de calculer les tendances à long terme pour chaque indice en utilisant la robuste technique de régression linéaire Theil-Sen (Kendall and Stuart, 1967) appliquée sur chaque pixel de chaque année. Cette technique calcule la tendance à partir de la médiane de tous les "pair-wise" possibles et est résistante à un maximum de 29% des valeurs aberrantes telles que les perturbations par

l'atmosphère (Fraser et al, 2012). La pente, la valeur p, et la valeur de l'ordonnée à l'origine (intercepte) ont été calculées pour chaque indice.

Pour chaque indice, la moyenne de toutes les images a été calculée afin de représenter la moyenne de chaque pixel pour la période de 1984-2011. La valeur des indices a été calculée pour la première date de la série, de la date d'acquisition des images à haute résolution, ainsi que de la dernière date de la série. Pour chaque indice, les pixels ayant une valeur p inférieure à 0.05 se sont fait attribuer la valeur correspondant à la moyenne de 1984-2011. Pour les pixels avec une valeur p supérieure à 0.05, la valeur des indices a été calculée avec l'équation de régression pour le nombre de jours entre la première image et celle à calculer. Par exemple, la première image correspond au jour 1, la date d'acquisition des images à haute résolution correspond au jour 9485 et la dernière image correspond au jour 9870. Voici un exemple du calcul (on note « intercepte » l'ordonnée à l'origine de la droite de tendance):

Indice du premier jour = intercepte + pente

Indice du jour de l'acquisition d'image à haute résolution = pente * 9485 + intercepte

Indice du dernier jour = pente * 9870 + intercepte

4.5.5 Classification des images à haute résolution

Neuf images aériennes d'une résolution de 30 cm ont été sélectionnées pour effectuer une classification du couvert végétal de référence à haute résolution. Ces images ont été prises à la même date, soit le 15 juin 2010 et n'ont pas de couverture nuageuse (Fig. 4.12).

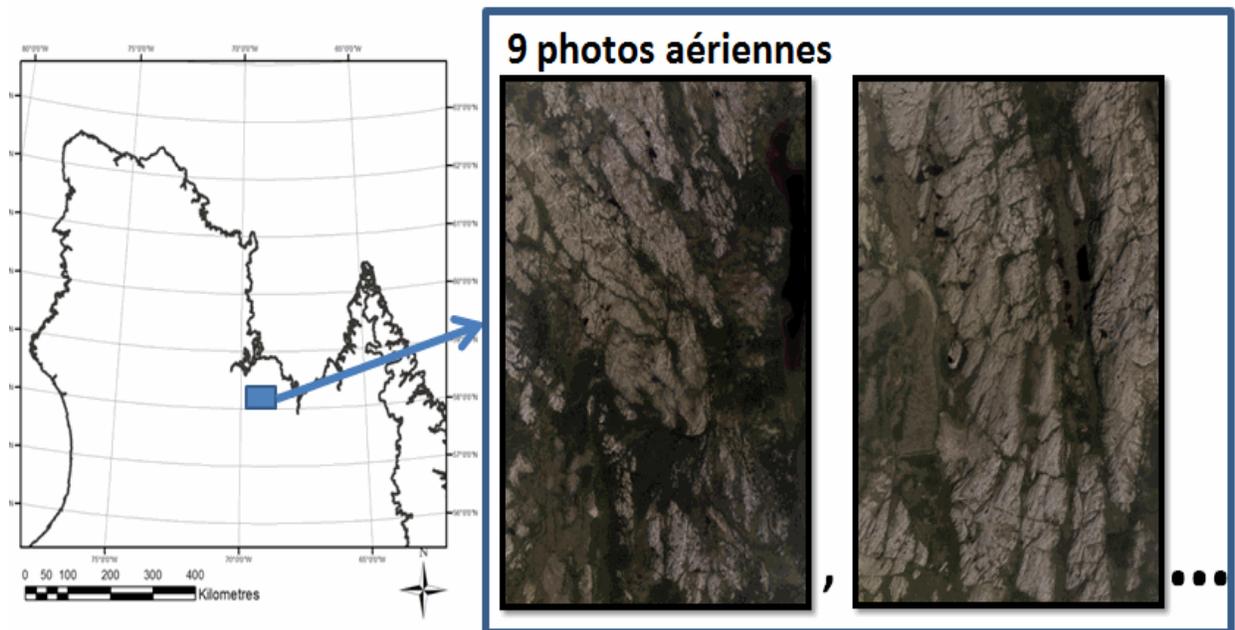


Fig. 4.12 Exemples d'images à haute résolution utilisées.

Le chevauchement des images a permis de faire une analyse stéréographique à l'aide du logiciel SUMMIT Evolution (<http://www.datem.com/products/software/summit-evolution/>) afin d'identifier les classes.

Seulement la partie centrale représentant environ 30% des images a été utilisée pour la classification. Un total de 50 sites d'entraînement par classe a été identifié pour les classes suivantes: végétation basse, arbuste, arbres (forêt), eau, et sol nu. La végétation basse inclut l'herbe, les plantes ne produisant pas d'ombre (inférieures à 30 cm). En considération que la zone d'étude ne comprend pas beaucoup de forêt et que la forêt n'offre pas une bonne séparabilité spectrale avec les arbustes, la classe arbuste comprend les arbres. L'eau représente toutes les étendues d'eau. Afin de diminuer la confusion entre les classes, le lichen a été joint à la classe sol nu et les milieux humides ont été joints à la classe végétation basse. Quatre classes ont donc été retenues, soit: arbuste (comprenant les arbustes et les arbres), sol nu (comprenant le sol nu et le lichen), végétation basse (comprenant la végétation basse, et les milieux humides) et l'eau.

Les arbustes représentent les arbustes ayant une structure caractérisée par une hauteur de 30 cm à 3m (estimée visuellement par photo-interprétation) qui produisent de l'ombre.

Des tests de séparabilité des signatures spectrales ont été conduits à différentes échelles afin de déterminer la taille optimale des pixels à utiliser pour la classification. Les images à une résolution initiale de 30 cm ainsi que celles ré-échantillonnées à une résolution de 3 m ont été utilisées pour la classification.

Un total de 200 sites de références situées hors des sites d'entraînement a été utilisé afin de déterminer une méthode de classification optimale (entre maximum de vraisemblance, parallélépipède et distance minimale). Seulement la méthode utilisée est présentée dans ce travail. Même si ces classes offrent une bonne variabilité spectrale, aucune méthode de classification n'a réussi à bien discriminer le lichen du sol nu et les milieux humides de la végétation basse.

Une classification dirigée de type "maximum de vraisemblance avec l'utilisation de classes NULL" a été faite en utilisant les sites d'entraînements identifiés précédemment. Avec cette méthode de classification, la classe la plus probable est attribuée au pixel seulement s'il est à l'intérieur d'un seuil établi à partir de la distribution normale de la classe. Sinon, la valeur NULL est attribuée au pixel.

		Valeurs de référence				Total
		Arbuste	Eau	Sol nu	Vég. basse	
Valeurs prédites	Classe					
	Arbuste	36	0	0	10	46
	Eau	0	34	0	0	34
	Sol nu	6	0	48	12	66
	Vég. basse	12	0	2	40	54
Total	54	34	50	62	200	

Tableau 4.2 Matrice de confusion

Précision globale: 79,00%

Intervalle de confiance (95%): (70,52% - 87,49%)

Coefficient Kappa global: 0,72

Variance Kappa globale : 0,003%

Classe	Précision du producteur	Intervalle de confiance (95%)	Précision de l'utilisateur	Intervalle de confiance (95%)	Coefficient Kappa
Arbuste	66,67%	(47,03% - 86,30%)	78,26%	(59,23% - 97,29%)	0,7
Eau	100,00%	(97,06% - 102,94%)	100,00%	(97,06% - 102,94%)	1
Sol nu	96,00%	(86,32% - 105,68%)	72,73%	(56,02% - 89,44%)	0,64
Vég basse	64,52%	(46,06% - 82,97%)	74,07%	(55,69% - 92,46%)	0,62

Tableau 4.3 Matrice de précision sur 200 sites de référence. La précision du producteur correspond à la probabilité que la valeur prédite par la classification soit la même que la valeur de référence (permet de voir les erreurs de commissions). La précision de l'utilisateur correspond à la probabilité que la valeur de référence soit la même que celle prédite par la classification (permet de voir les erreurs d'omissions).

4.5.6 Dérivation des fractions de changement de couverture du sol

La classification à une résolution spatiale de 3 m a été utilisée pour créer une image du pourcentage du couvert à une résolution de 90 m. Les indices de végétation normalisés, de brillance, de verdeur, et d'humidité ont été dégradés à 90 m également.

Des modèles d'arbre de régression établissant des règles à partir de la relation entre les indices de verdeur, de brillance et d'humidité et la composition fractionnaire du couvert obtenu par la classification des images à hautes résolutions ont été construits à partir du programme Cubist Classifier (disponible au <http://www.rulequest.com/download.html>) (voir Annexe 3 pour la correspondance entre les valeurs prédites par les modèles d'arbre de régression et les valeurs réelles provenant de la classification).

Ainsi, des cartes de la fraction du couvert correspondant à la date d'acquisition des images aériennes (2010) ont été produites pour chaque classe pour la grandeur de la zone couverte par les images Landsat, soit d'environ 200 000 km².

La tendance des indices précédemment calculée a été utilisée pour produire des cartes de la fraction du couvert de végétation basse, d'arbustes, de sol nu et de l'eau pour les années 1984 et 2011. Pour chaque type de couvert, la fraction de 1984 a été soustraite à la fraction de 2011 afin d'obtenir les changements de la fraction du couvert pour la période de 1984 à 2011.

4.6 Comparaison de la date de la fonte de la neige et de la fraction du couvert

Les cartes de fractions du couvert générées dans la section précédente ont été utilisées afin de les comparer avec la date de fonte obtenue avec le produit MODIS MOD10a2, qui a une résolution temporelle de 8 jours, une résolution spatiale de 500 m et une étendue temporelle de 2000 à 2012. Afin de diminuer le biais que des changements importants de latitude pourraient générer, et de représenter les endroits avec une forte présence arbustive, trois cadrans ont été choisis (Fig.4.13) pour analyser l'effet de la fraction du couvert végétal sur la date de la fonte de la neige.

Dans la figure 4.13, le cadran 1 (en mauve) a une taille de 365 km (76°53'0W - 70°49'0W) par 45 km (58°45'0N - 59°10'0N) et une superficie de ~ 16 500 km²; le cadran 2 (en gris) a une taille de 365 km (76°53'0W - 70°49'0W) par 50 km (58°15'0N - 58°45'0N) et une superficie de ~ 18 250 km²; et le cadran 3 (en turquoise) a une taille de 340 km (76°28'0W-70°49'0W) par 52 km (57°47'0N - 58°15'0N) et superficie de ~ 17 780 km².

L'avantage du produit MOD10a2, composé de 8 jours, est qu'il est constitué presque totalement de pixels sans nuages et offre la possibilité d'obtenir assez de pixels pour offrir un échantillon représentatif sans avoir à faire une analyse sur une zone trop grande. En effet, une zone trop grande, constituée d'un gradient latitudinal important, peut insérer un biais dans la comparaison de la fraction du couvert végétal et les données sur la date de fonte. Cependant, le fait qu'il soit un composé de 8 jours réduit grandement la précision de l'identification de la date de fonte.

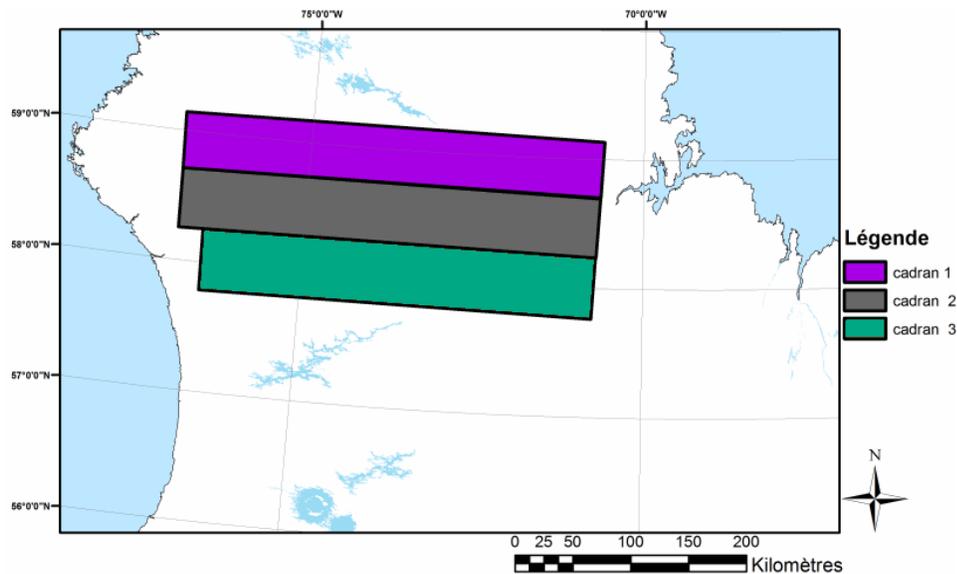


Fig. 4.13 Représentation des trois cadrans utilisés pour l'analyse du pourcentage du couvert végétal et de la date de la fonte de la neige.

Les images de fractions du couvert arbustif, de sol nu, et de végétation basse ont été traitées afin de pouvoir les analyser avec les produits MODIS. Le produit MODIS offre une résolution spatiale de 500 m alors que le pourcentage du couvert végétal offre une résolution spatiale de 90 m. Les pixels du pourcentage de classification ont donc été ré-échantillonnés à 500 m pour correspondre à ceux de la date de la fonte de la neige. Afin de diminuer le biais des étendues d'eau, le produit vectoriel Réseau Hydro National (RHN) a été utilisé pour enlever les pixels contaminés par l'eau. Le RHN décrit et modélise des éléments du système des eaux de surface intérieures du Canada. Le produit est disponible sur le portail Géobase à l'adresse suivante:

<http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/nhn/>.

Les dates de la fonte de la neige dérivées du produit MODIS MOD10a2 ont été utilisées et comparées avec le pourcentage du couvert afin de vérifier s'il existe un lien entre le couvert végétal et la date de la fonte de la neige. Pour les années 2006, 2009 et 2011, la moyenne de la date de fonte de la neige a été calculée pour chaque pourcentage de la couverture végétale (1 à 100). La moyenne de la température de la période du 20 mai au 9 juillet correspond à 10,27°C pour 2006, 7,42°C pour 2009 et 8,80°C et 2011. Le Hmax de 2006 est de 61cm, celui de 2009 est de 31 cm, et celui de 2011 est de 32cm. Seulement les fractions du couvert au-delà de 10% ont été utilisées et seulement les moyennes de pourcentage contenant un minimum de 500 pixels ont été conservées pour faire les régressions. L'analyse a également été effectuée à partir du produit journalier MOD10a1 afin de renforcer les résultats (voir Annexe 4).

4.7 Comparaison du NDSI et du % de végétation

Afin de pouvoir faire une analyse visuelle de la distribution de la neige pendant la période de la fonte de la neige, deux images sans nuage dérivées du capteur Landsat TM5 obtenues pendant la

période de fonte ont été utilisées pour obtenir le *normalized difference snow index* (NDSI). Les images originales, d'une résolution spatiale de 30 m, ont été dégradées à 90 m afin de correspondre à la classification de la fraction de la couverture végétale. La première image, située au 19ème passage de la 19ème rangé du système de référencement mondial (SRM), a été acquise le 11 juin 2004. La deuxième image, située au 18ème passage de la 19ème rangé du SRM, a été acquise le 22 mai 2004.

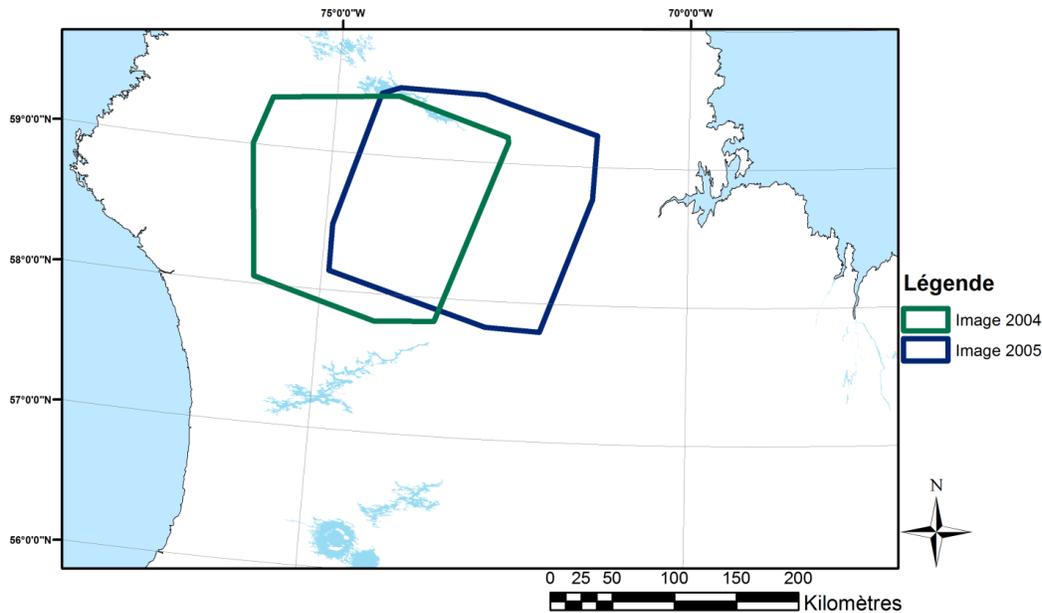


Fig. 4.14 Représentation des deux images Landsat sélectionnées pour l'étude de la couverture de neige.

Le NDSI a été calculé pour chaque image selon la relation (Hall, 1995) à partir des réflectances dans le rouge (R0.66 µm) et l'infrarouge moyen (R1.6 µm):

$$NDSI = \frac{R0.66 - R1.6}{R0.66 + R1.6} \quad \text{Équation. 4}$$

Le NDSI est basé sur le fait que la réflectance de la neige est plus élevée dans la bande rouge que dans la bande moyenne infrarouge. Comme la réflectance des nuages est élevée autant dans la bande infrarouge que rouge, le NDSI offre une bonne discrimination de la neige et des nuages (Hall, 1995).

La Fc arbustive a été calculé pour les deux années d'acquisition des images utilisées pour calculer le NDSI, soit 2004 et 2005. Des cartes de comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive ont été produites pour les deux années. Finalement, la moyenne des pixels de neige par Fc a été calculée pour les deux images.

5. Résultats

Les résultats sont divisés en deux parties: une analyse temporelle sur les trois zones sélectionnées, et une analyse spatiale à haute résolution. La première partie se subdivise en 3 sections (5.1 à 5.3): la première présente les résultats liés aux données météorologiques, la deuxième présente les résultats liés aux données sur la végétation et la troisième présente les résultats liés aux données sur la neige. La difficulté ici est de séparer l'effet direct du climat sur la neige (température et précipitation), de l'effet de la végétation sur la neige.

La significativité statistique de chaque tendance a été calculée à partir des coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2) obtenus à partir de la régression linéaire, ainsi que du nombre d'observations (N). Dans le cas des séries temporelles, le nombre d'observations correspond au nombre d'années. Ce nombre permet de déterminer le nombre de degrés de liberté de la relation (N - 2). Les valeurs de significativité obtenues sont ensuite comparées à des valeurs standards qui dépendent uniquement du nombre de degrés de liberté du système considéré. Cette analyse est exprimée via la probabilité (p). Une valeur de p inférieure à 0,05 indique une présomption forte contre l'hypothèse nulle et est considérée comme statistiquement significative, car il y a très peu de chance qu'elle soit due au hasard.

5.1 Analyse de l'évolution des données météorologiques

5.1.1 Température de l'air

La période de fonte obtenue pour chaque zone correspond à:

Zone 1: 30 mai au 19 juillet

Zone 2: 20 mai au 9 juillet

Zone 3: 30 avril au 19 juin

La température moyenne de l'air durant la période de fonte de 1967 à 2012 a augmenté significativement dans les trois zones sélectionnées (Fig. 5.1). La zone où la température de l'air a le plus augmenté est la zone 3 avec une augmentation de 0,138°C par année (p: 0), correspondant à une augmentation de 6.2°C (87 % par rapport à la moyenne¹) au cours des 45 dernières années. La zone 2 a connu une augmentation de 0,053°C par année (p: 0,004), soit une augmentation de 2,40°C (31 % par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années. Finalement, la zone 1 a connu une augmentation de 0,070°C par année (p: 0), soit une augmentation de 3,14°C (64 % par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années.

¹ Le pourcentage de changement par rapport à la moyenne correspond au pourcentage de changement de l'augmentation totale dérivée de la tendance (tendance(0,138) x nombre d'années(45)) (6.2°C dans le cas présent) par rapport à la moyenne des valeurs de la série (7.12°C dans le cas présent). Ainsi, l'augmentation de 6.2°C au cours des 45 dernières années correspond à 87% de la moyenne de la température sur cette période. Cette mesure permet donc de normaliser la tendance par rapport à la moyenne des données

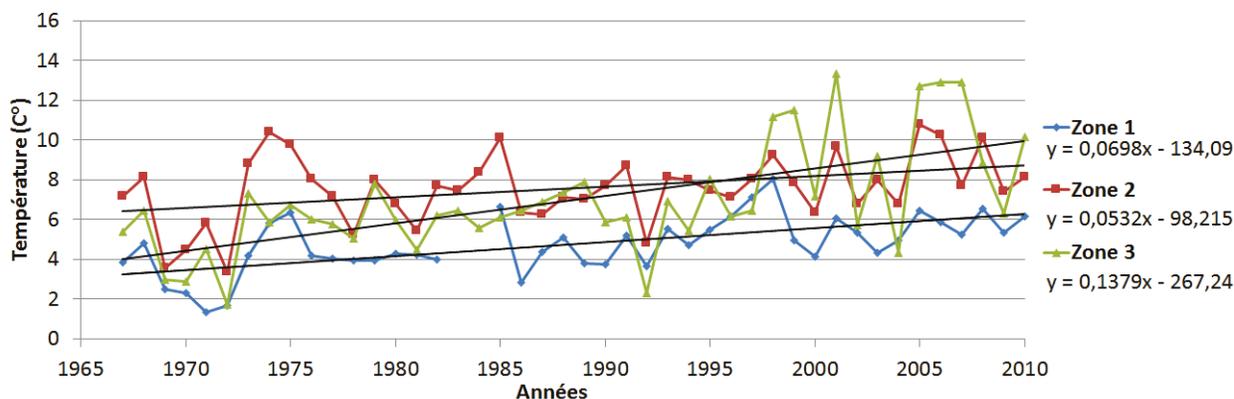


Fig. 5.1 Température moyenne de l'air durant la période de fonte (1967-2012). Les données proviennent de données d'enregistrement horaire de la température de l'air entre 10h00 et 14h00 aux stations météorologiques à proximité.

5.1.2 Hauteur de la neige

Le maximum de hauteur de la neige à la fin de l'hiver (avant la fonte) a diminué dans toutes les zones sur la période de 1967 à 2012 (Fig. 5.2), mais de façon plus significative dans la zone 3 avec une diminution de 1,22 cm par année (p: 0), ce qui correspond à une diminution totale de 54,83 cm (76 % par rapport à la moyenne) en 45 ans. La zone 2 a connu une diminution 0,84 cm par année (p: 0), soit une diminution de 37,59 cm (69 % par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années. Finalement, la zone 1 a connu une diminution de 2,09 cm par année (p: 0,003), soit une diminution de 48,85 cm (78 % par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années.

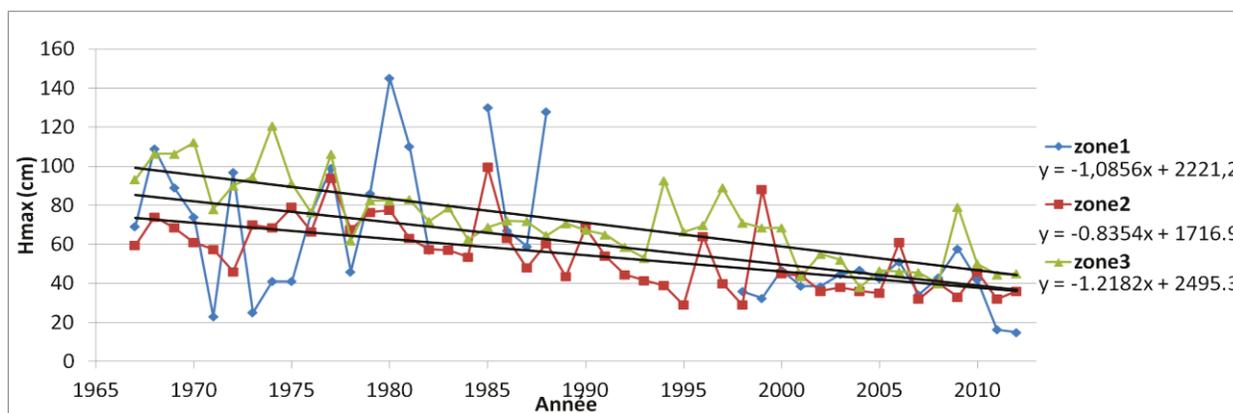


Fig. 5.2 Hauteur annuelle maximale de la neige (1967-2012). Le Hmax de la zone 1 pour la période 2000-2012 provient de CMC.

5.1.3 Précipitations

Les précipitations neigeuses ont augmenté dans les zones 1 et 3 et ont diminué dans la zone 2. Il faut noter qu'aucune des tendances n'est significative. La zone 1 a connu une augmentation de 0,4

mm par année (p: 0,28), soit une augmentation de 24,38 mm (12 % par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années. La zone 2 a connu une diminution de 0,02 mm par année (p: 0,96), soit une diminution de 1,2 mm (0,5% par rapport à la moyenne) au cours des 45 dernières années. Finalement, la zone 3 a connu une augmentation de 0,62 mm par année (p: 0,015), soit une augmentation de 37,86 mm (11 % par rapport à la moyenne) au cours 45 dernières années. On peut observer (Fig. 5.3) un changement de régime à partir des années 1980, passant d'une augmentation à une évolution nulle des précipitations neigeuses. Ce changement a été souligné par Brown, (2010). L'analyse des tendances sur la période de 1951 à 2012 illustre davantage ce changement de régime (voir Annexe 5).

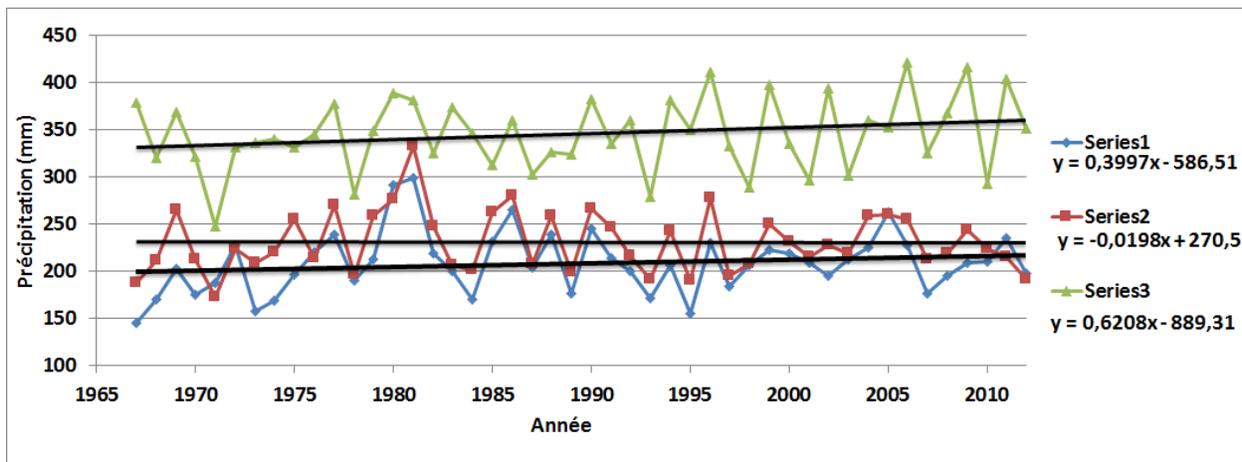
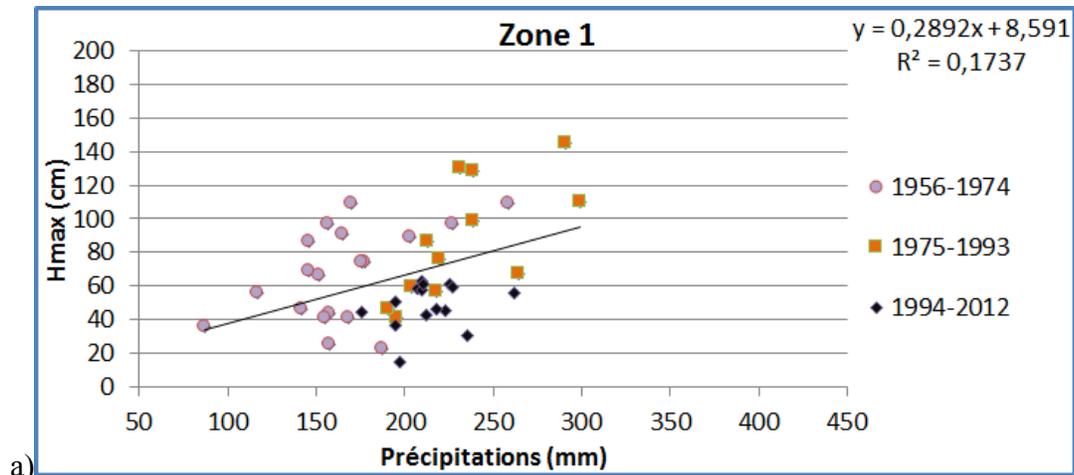


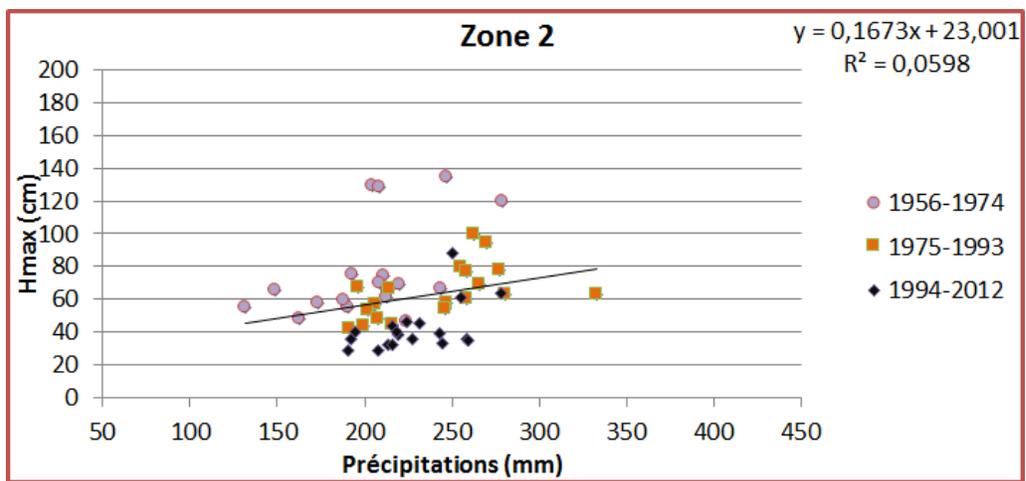
Fig. 5.3 Précipitations (Novembre-Mars) pour la période de 1967 à 2012 sur les 3 zones.

5.1.4 Précipitation vs Hmax

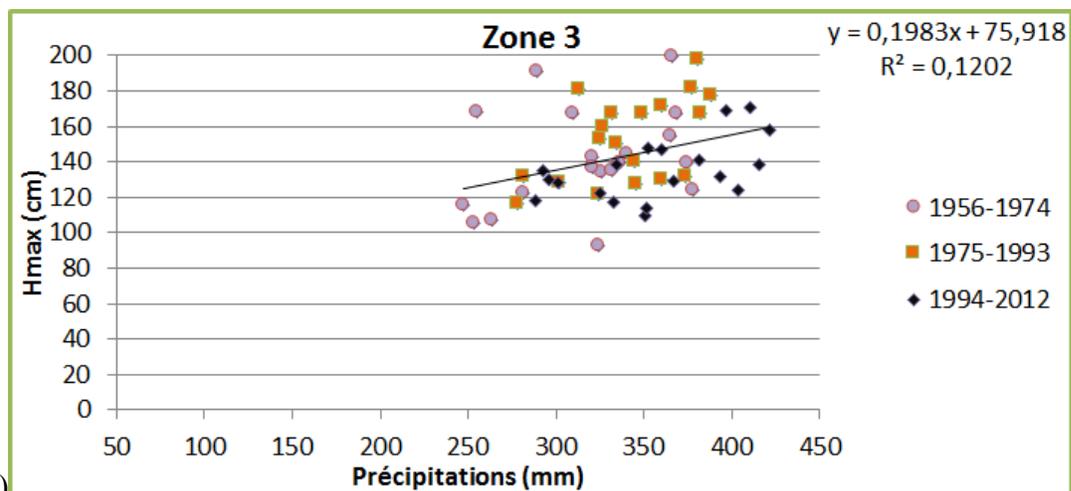
La corrélation entre les précipitations de neige cumulées sur la période hivernale et la hauteur de neige maximale en fin d'hiver (Hmax) (Fig. 5.4) est non-significative et n'est pas très forte en général, de 0.42, 0.24 et 0.35 pour la zone 1, la zone 2 et la zone 3 respectivement. Cela mettrait en évidence que les effets du métamorphisme et de la compaction de la neige au sol sur l'évolution du couvert de neige jouent un rôle important. Ces effets sont eux-mêmes liés au climat (température, vent...). Les épisodes de pluies hivernales, plus fréquentes dans les dernières décennies (SWIPA, 2011) et qui compactent la neige (diminution de Hmax), peuvent aussi être une cause de cette corrélation négative. Cet aspect ne peut être analysé ici, car nous travaillons avec des données mensuelles. La distinction entre les différentes périodes montre le changement de régime souligné auparavant. Dans la période 1994-2012, il n'y a pas de corrélation entre Hmax et les précipitations dans les zones 1 et 2.



a)



b)



c)

Fig. 5.4 Précipitations vs Hmax pour les 3 zones considérées.

5.2 Analyse de l'évolution de la végétation

5.2.1 NDVI

Le NDVI a augmenté significativement dans la zone 2 sur la période de 1985 à 2012 avec une augmentation de 0,0085 par année (p: 0,009), soit une augmentation de 0,23 (48 % par rapport à la moyenne) en 27 ans (Fig. 5.5). L'augmentation dans la zone 1 est plus faible, correspondant à 0,0057 par année (p: 0), soit 0,15 (47 % par rapport à la moyenne) en 27 ans. Finalement, l'augmentation de 0,0032 par année (p: 0,028) dans la zone 3 est la plus faible, mais tout de même statistiquement significative, correspondant à 0,03 (16 % par rapport à la moyenne) en 27 ans. L'augmentation la plus importante a eu lieu dans la zone caractérisée par une couverture arbustive.

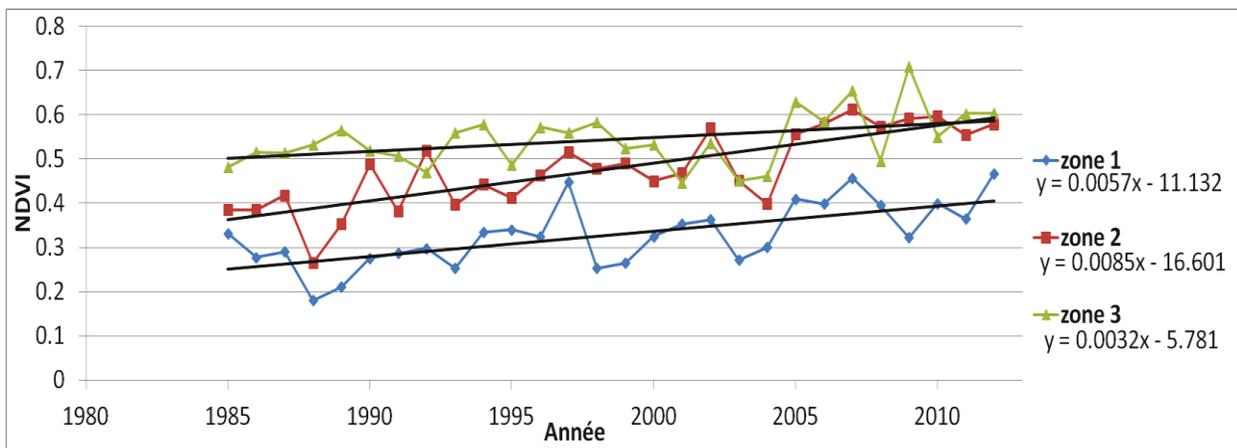


Fig. 5.5 Tendence du NDVI (1985-2012).

5.2.2 LAI

L'indice foliaire (LAI) indique qu'il y a eu une augmentation significative dans les zones 2 et 3 alors que la tendance est négligeable dans la zone 1 (Fig. 5.6). La zone 3 a connu une augmentation de 0,0177 par année (p: 0), soit une augmentation de 0,5487 (39 % par rapport à la moyenne) au cours des 31 dernières années. La zone 2 a connu une augmentation de 0,0204 par année (p: 0), soit une augmentation de 0,6324 (67 % par rapport à la moyenne) au cours des 31 dernières années. Finalement, la zone 1 a connu une augmentation de 0,0092 par année (p: 0), soit une augmentation de 0,2852 (110 % par rapport à la moyenne) au cours des 31 dernières années. Le LAI semblerait plus sensible à la croissance de la végétation en milieu forestier que le NDVI.

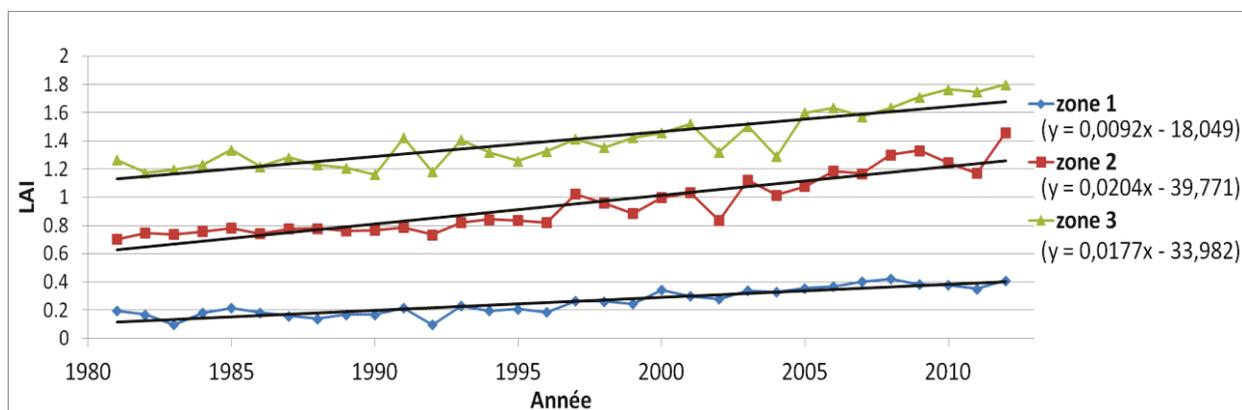


Fig. 5.6 LAI moyen annuel (Juillet-Août) (1981-2012). Le LAI est dérivé du produit AVHRR (1981 - 2000) et SPOT VGT (2001 - 2012) (Geoland consortium).

5.3 Analyse de l'évolution de la fonte de la neige

5.3.1 Premier épisode de la fonte de la neige

Le premier épisode de la fonte de la neige a été devancé dans les 3 zones au cours de la période de 1979 à 2012 (Fig. 5.7). Le devancement est statistiquement significatif pour les zones 2 et 3 et non-significatif pour la zone 1, du fait de la forte variabilité interannuelle. Dans la zone 3, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,458 jour par année (p: 0,005) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 15,90 jours en 33 ans. Dans la zone 2, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,529 jour par année (p: 0,014) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 17,46 jours en 33 ans. Dans la zone 1, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,353 jour par année (p: 0,174) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 11,65 jours en 33 ans. Il apparaît que l'évolution de ce paramètre est semblable dans les 3 zones. Mais, ces tendances sont aussi le résultat d'un effet climatique différent pour chaque zone, qui pourrait masquer l'effet de la végétation.

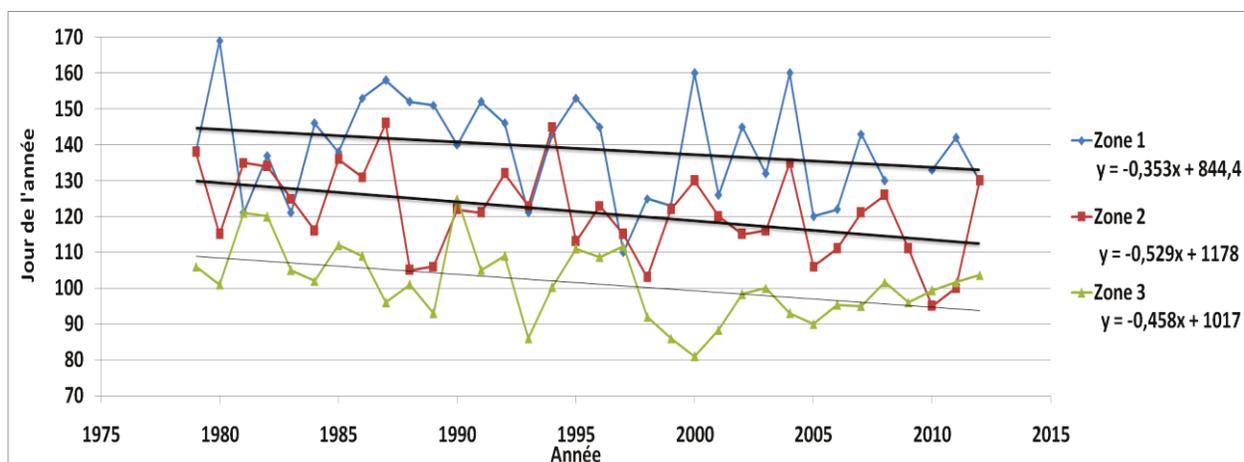


Fig. 5.7 Premiers épisodes de fonte (1979-2012). Les températures de brillance du capteur SMMR ont été utilisées pour la période de 1979 à 1987 et les températures de brillance du capteur SMM/I ont été utilisées pour la période de 1988 à 2012.

5.3.2 Début de la fonte continue de la neige

Le début de la fonte continue de la neige correspond à la dernière date à laquelle la neige fond pendant la journée et gel pendant la nuit. Cette date correspond donc à la date à laquelle la neige fonte de manière continue jusqu'à sa disparition.

Le début de la fonte continue de la neige a été devancé dans les 3 zones au cours de la période de 1979 à 2012 (Fig. 5.8). Il faut noter que le devancement n'est pas statistiquement significatif pour aucune des trois zones. Dans la zone 3, la date de la fonte continue de la neige a été devancée de 0,215 jour ($p: 0,176$) par année sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 7,1 jours en 33 ans. Dans la zone 2, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,152 jour par année ($p: 0,466$) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 5,02 jours en 33 ans. Dans la zone 1, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,208 jour par année ($p: 0,313$) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 6,86 jours en 33 ans.

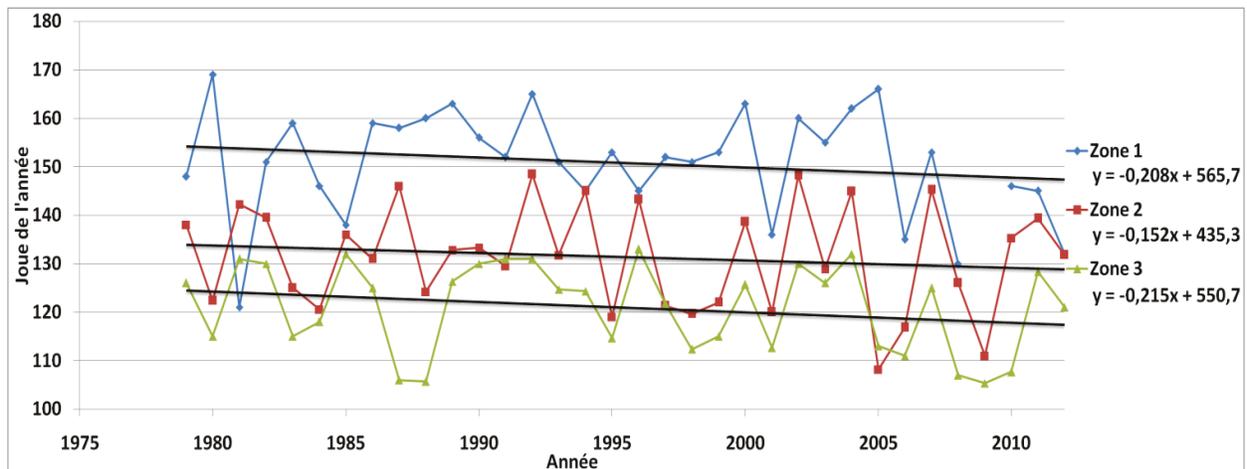


Fig. 5.8 Début de la fonte continue (1979-2012). Les températures de brillance du capteur SMMR ont été utilisées pour la période de 1979 à 1987 et les températures de brillance du capteur SMM/I ont été utilisées pour la période de 1988 à 2012.

5.3.3 Fin de la fonte de la neige

La date de la fin de la fonte de la neige a été devancée de façon significative dans les zones 1 et 2 alors qu'elle est n'a pas bougé dans la zone 3 (Fig. 5.9). Dans la zone 1, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,41 jour par année (p: 0) sur la période de 1967 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 18,45 jours en 45 ans. Dans la zone 2, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,498 jour par année (p: 0) sur la période de 1967 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 22,41 jours en 45 ans. Dans la zone 3, la date de la fonte de la neige a été devancée de 0,042 jour par année (p: 0,684) sur la période de 1967 à 2012, ce qui correspond à un devancement total de 1,84 jours en 45 ans. Il faut noter que le devancement observé dans la zone 3 n'est pas statistiquement significatif.

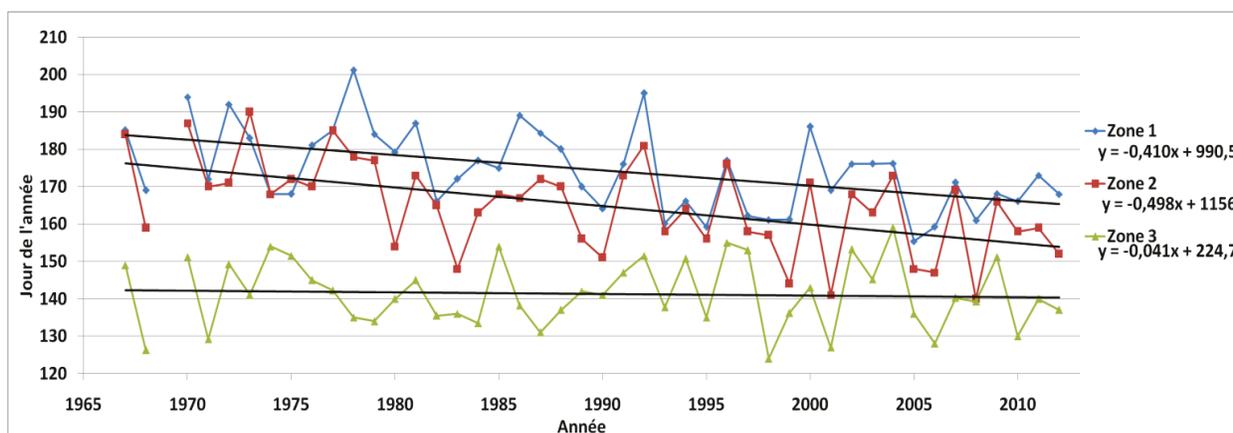


Fig. 5.9 Date de fin de la fonte annuelle (1967-2012). La période de 1967 à 2010 est dérivée du produit Northern Hemisphere Ease grid 2.0 Snow Cover and Sea Ice Extent product. Pour 2011 et 2012, le produit MODIS/Terra Snow Cover 8-day L3 Global 500 m Grid a été utilisé.

Il apparaît donc clairement que la disparition de la neige arrive plus vite en zone 2 (-22 jours) et en zone 1 (-18 jours), mais pas en zone 3 (pas de tendance significative). La différenciation entre l'effet de la végétation qui accélérerait la fonte (effet radiatif) et le réchauffement climatique qui accélère aussi la fonte n'est donc pas évidente ici. Dans la zone 3 de taïga forestière, il semble y avoir un processus qui contrebalance cet effet de fonte plus précoce observé dans les zones plus au Nord. Comme, la tendance au réchauffement climatique est du même ordre dans les 3 zones, voir plus élevée dans la zone 3 (Fig. 5.1), ce processus pourrait résulter d'un effet de la couverture végétale, plus arbustive en zone 3 qu'en zone 2. En effet, l'effet d'ombrage qui protège la neige du rayonnement solaire (et donc, diminue la fonte) pourrait ici contrebalancer l'augmentation de température observée.

Pour les 3 zones considérées, on compare ici les 3 paramètres de fontes dérivés :

- le premier épisode de fonte, soit la date où commence la fonte de la neige.
- le début de la fonte continue, après les premières oscillations de fonte/regel de la neige.
- la fin de la fonte de la neige, soit la date où la neige est disparue.

La figure 5.10 permet de comparer les tendances de ces 3 paramètres sur une même zone, qui ont été montrées séparément dans les figures précédentes. Il apparaît que les pentes (négatives en général dû au réchauffement climatique) ne sont pas toujours identiques (droites non parallèles), selon les zones. Cela laisse penser que ces zones génèrent une évolution spécifique différente de ces 3 paramètres. Ce point est analysé dans la section suivante, en considérant les différences relatives entre ces paramètres.

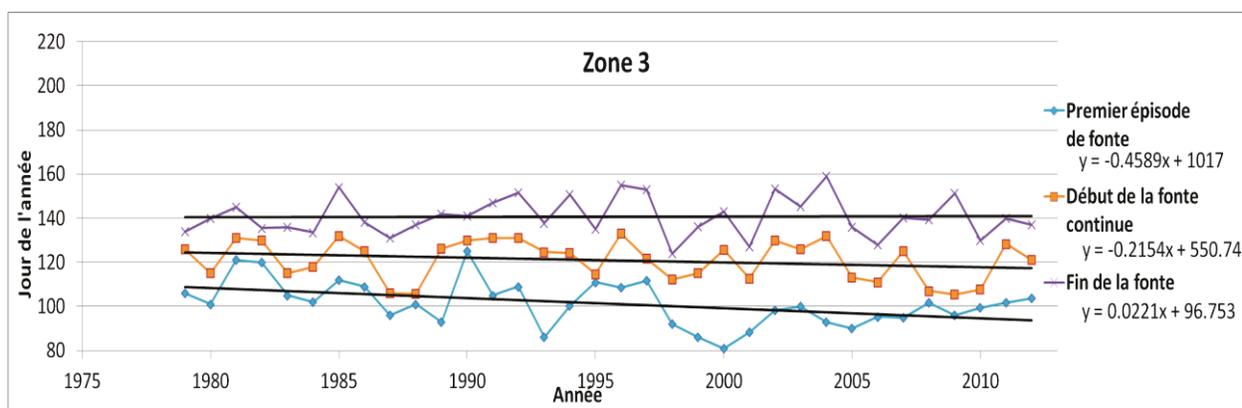
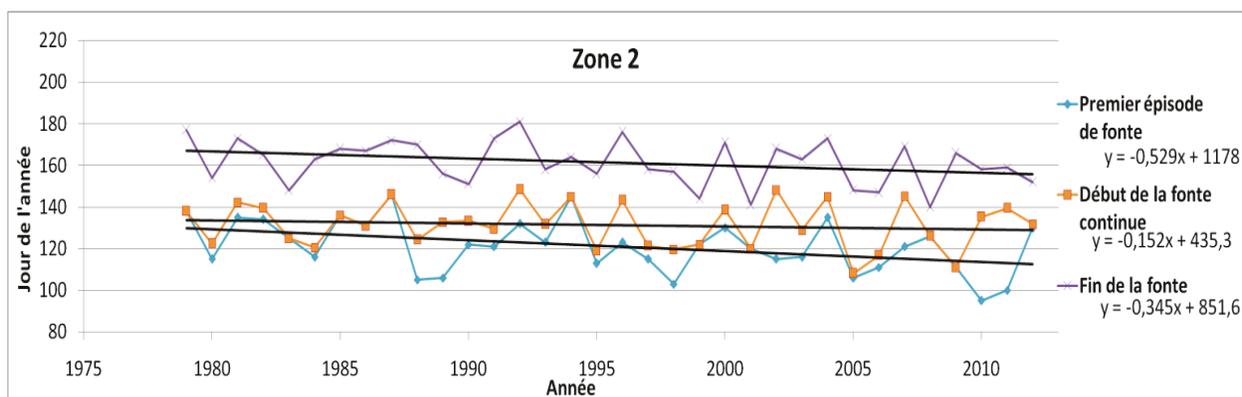
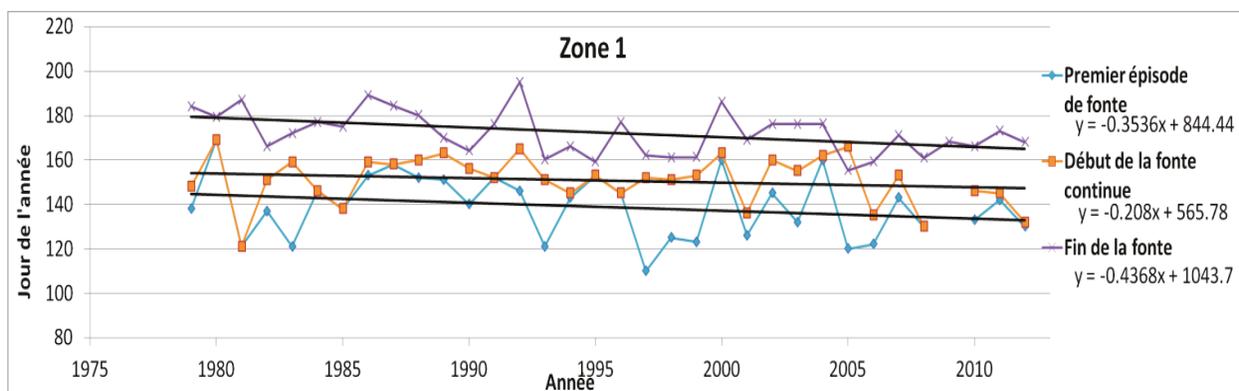


Fig. 5.10 Comparaison du premier épisode de fonte, du début de la fonte continue et de la fin de la fonte de la neige sur la période de 1979 à 2012.

Avant d'analyser l'effet de la végétation en comparant la durée de fonte (section suivante), on a regardé s'il pouvait y avoir un biais dû aux variations de hauteur de neige. La figure 5.11 montre qu'il n'y a pas de corrélation marquée entre la durée de fonte (Nombre de jours entre le début de la fonte et la fin de la couverture de neige) et la hauteur de neige maximum à la fin de l'hiver, à part pour quelques années extrêmes de forte précipitation (Hmax très élevée) où il est logique que la durée de fonte augmente du fait qu'il y ait plus de neige. Cela renforce l'idée que le paramètre de durée de fonte relative n'est pas (ou peu) affecté par les changements climatiques. Noter que

dans cette analyse, (durée de fonte vs Hmax), nous sommes en milieu ouvert en station météorologique, et il n'est donc pas question d'effet de la végétation.

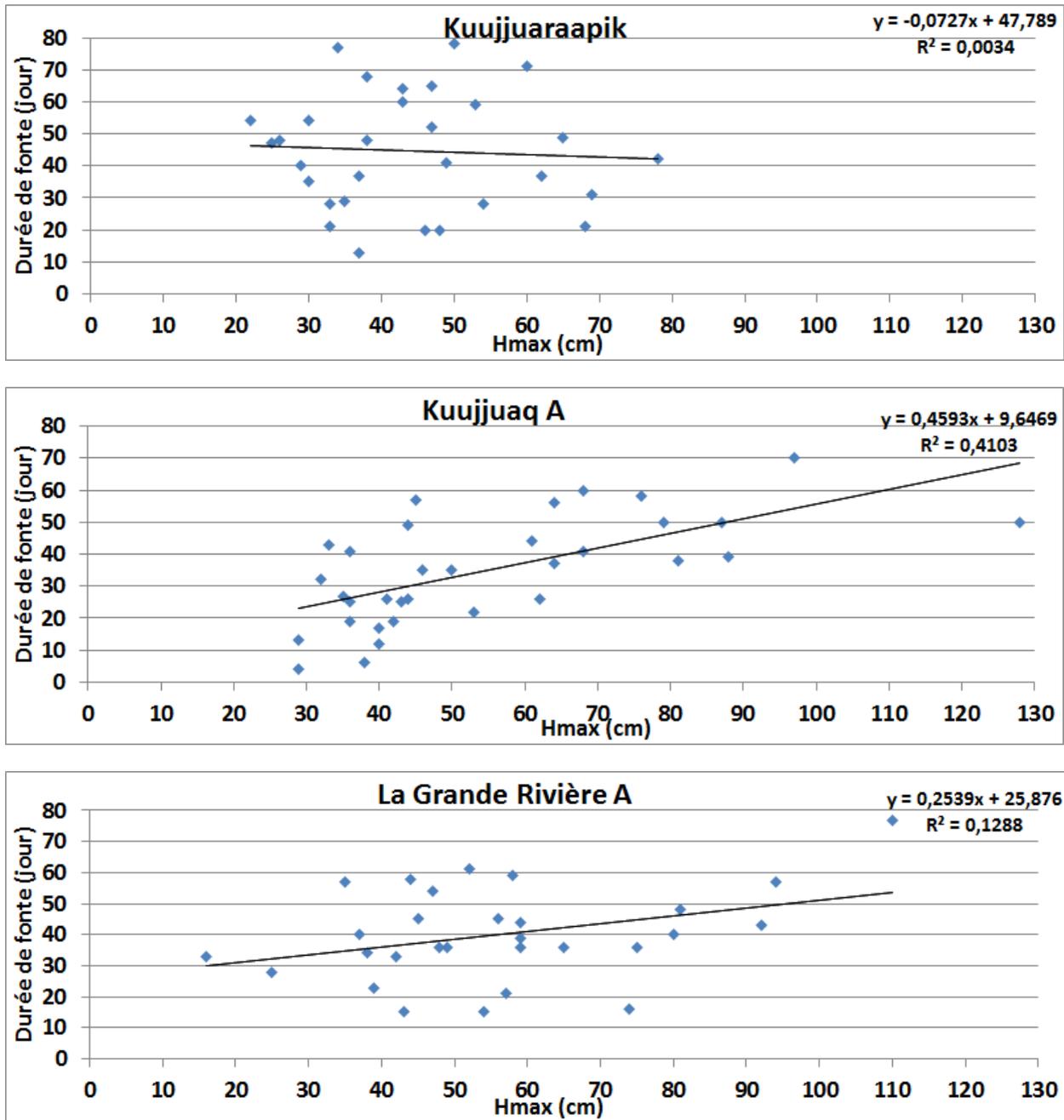


Fig. 5.11 Relation entre la durée de fonte (Nombre de jours entre le début de la fonte et la fin de la couverture de neige) et la hauteur de neige maximum à la fin de l'hiver dans les 3 stations météorologiques.

5.3.4 Différence entre le début et la fin de la fonte

On analyse dans cette section la différence entre le premier épisode de fonte et la date de fin de fonte de la neige, donc la durée totale de fonte. Ce paramètre relatif (différence entre 2 tendances)

est considéré indépendant de l'évolution du climat comme discuté dans la précédente section, et dépend donc spécifiquement de la zone considérée. Les résultats sont montrés dans la figure 5.12.

Dans la zone 3, la durée de la fonte de la neige a augmenté de 0,504 jour par année (p: 0,013) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une augmentation totale de 16,33 jours en 33 ans. Dans la zone 2, la durée de la fonte de la neige a augmenté de 0,183 jour par année (p: 0,534) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une augmentation totale de 6,04 jours en 33 ans. Dans la zone 1, la durée de la fonte de la neige a raccourci de 0,091 jour par année (p: 0,682) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une diminution totale de 3 jours en 33 ans. Il faut noter que le devancement est significatif seulement dans la zone 3.

Il apparaît donc que la végétation de la zone 3, et dans une moindre mesure celle de la zone 2, génère une augmentation de la fonte de la neige. Cette tendance n'est pas observée en zone 1 où il n'y a pas (ou peu) de changement de végétation. Cette augmentation de la durée de fonte pourrait résulter de l'effet de trappage de la neige par la végétation : s'il y a plus de neige, la fonte dure plus longtemps, et aussi de l'effet d'ombrage (effet radiatif des courtes longueurs d'onde) augmenté quand il y a plus de végétation arbustive. Ces 2 effets contrebalanceraient l'effet radiatif des grandes longueurs d'onde (IR) que provoque la végétation (effet de réchauffement de la neige par les branches).

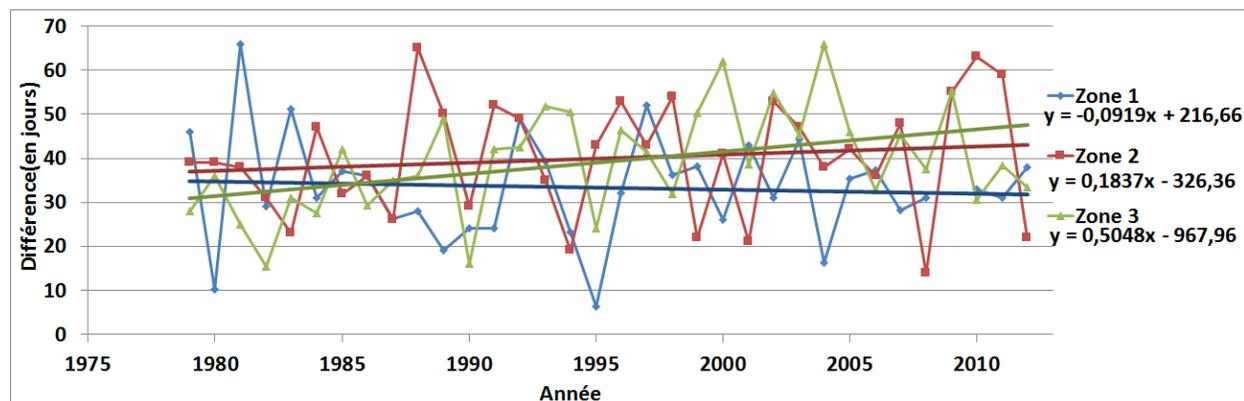


Fig. 5.12 Différences entre le premier épisode de fonte et la date de fin de fonte sur les trois zones.

5.3.5 Différence entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue

On analyse dans cette section la différence entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue. Ce paramètre représente la durée des oscillations gel/dégel avant la fonte continue de la neige. Tout comme la durée de la fonte, ce paramètre relatif (différence entre 2 tendances) est considéré indépendant de l'évolution du climat et dépend donc spécifiquement de la zone considérée. Il faut préciser que la tendance est statistiquement non-significative dans les trois zones.

Dans la zone 1, la durée des oscillations gel/dégel a diminué de 0,019 jour par année (p: 0,934) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une diminution totale de 0,63 jour en 33 ans. Dans la zone 2, la durée des oscillations gel/dégel a augmenté de 0,38 jour par année (p: 0,058) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une augmentation totale de 12 jours en 33 ans. Dans la zone 3, la durée des oscillations gel/dégel a augmenté de 0,24 jour par année (p: 0,197) sur la période de 1979 à 2012, ce qui correspond à une augmentation totale de 8 jours en 33 ans.

Il faut noter que la différence entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue a augmenté de façon beaucoup plus importante dans la zone 2 (123%) que dans les autres zones. Cette augmentation de la durée des oscillations gel/dégel pourrait être attribuée à l'augmentation de la présence arbustive de petite taille et de la végétation basse.

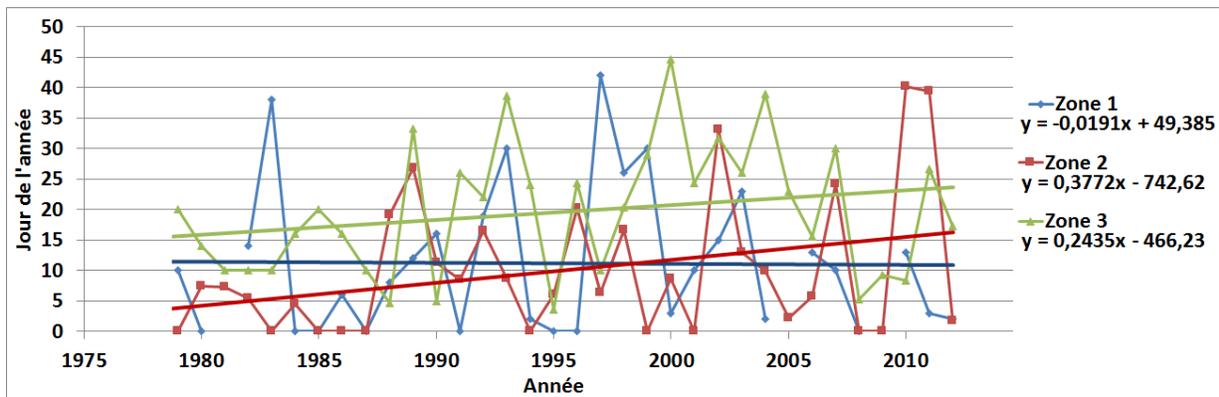


Fig. 5.13 Différences entre le premier épisode de fonte et le début de la fonte continue sur les trois zones

5.3.6 Résumé des tendances

Le tableau 5.1 résume les résultats obtenus pour les tendances (pentes de droites) de chacun des paramètres analysés pour chaque zone. Les tendances sont en générale similaires, mais avec des amplitudes différentes, pour tous les paramètres sauf pour la date de disparition de la neige et la durée de fonte de la neige.

Tendances (par année)				
Paramètre (période d'analyse)	Unité Δ	Zone 1	Zone 2	Zone 3
NDVI (1985-2012)	NDVI/an	0.006 p: 0	0.009 p: 0	0.003 p: 0,028
LAI (1981 -2012)	LAI/an	0.009 p: 0	0.02 p: 0	0.018 p: 0
Hmax annuelle (1967-2012)	cm/an	-1,085 p: 0,003	-0.835 p: 0	-1.218 p: 0
Temp air (1967-2012)	°C/an	0.070 p: 0	0.053 p: 0,004	0.137 p: 0
Précipitation (1967-2012)	mm/an	0,4 p: 0,28	-0,02 p: 0,956	0,621 p: 0,156
Premier épisode de fonte (1979-2012)	jour/an	-0.354 p: 0,174	-0.529 p: 0,014	-0.458 p: 0,005
Début de la fonte continue (1979-2012)	jour/an	-0.208 p: 0,313	-0.152 p: 0,466	-0.215 p: 0,176
Date de fin de la fonte de la neige (1967-2012)	jour/an	-0.41 p: 0	-0.498 p: 0	0.0421 p: 0,684
Différence entre le premier épisode de fonte et la date du début de la fonte continue (1979-2012)	jour/an	-0,019 p: 0,934	0,377 p: 0,058	0,243 p: 0,197
Durée de fonte Différence entre le premier épisode de fonte et la date de fin de la fonte de la neige (1979-2012)	jour/an	-0.091 p: 0,682	0.183 p: 0,434	0.505 p: 0,013

Tableau 5.1 Tendances des indices et paramètres analysés. Noter que la période de calcul de ces tendances peut varier un peu selon le paramètre.

5.4 Analyse spatiale à haute résolution

5.4.1 Évolution du couvert végétal

Cette section comprend les tendances du NDVI et de la fraction (F_c) des différentes classes de couverture du sol pour la période de 1984 à 2011. L'augmentation du NDVI correspond à la tendance moyenne (augmentation par année) et l'augmentation de F_c représente la différence entre la F_c de 2011 et celle de 1984. Il faut noter que la F_c correspond au pourcentage d'une classe en surface dans l'ensemble des classes. Par exemple, une augmentation de la F_c de 30% ne correspond pas à une augmentation relative de 30% de la F_c en question dans la durée, mais plutôt à une augmentation de 30% en surface de la F_c considérée sur la totalité du couvert.

$$\text{Différence } F_c = F_c(2011) - F_c(1984) \quad \text{Équation. 5}$$

Il faut également noter que les pixels situés en bordure de l'image peuvent être biaisés par un manque d'images utilisées pour la classification (Fig. 4.11).

La figure 5.14 affiche globalement une augmentation du NDVI similaire à celle démontrée par Pouliot et al, (2009) (Fig. 1.2). Cependant, l'avantage de cette carte originale est que sa résolution spatiale est de 90 m. Cette résolution expose davantage la variation locale de l'augmentation de la végétation. Il faut noter que le NDVI ne permet pas de faire la distinction entre la végétation basse et les arbustes. La carte montre une augmentation importante du NDVI principalement dans la partie nord-ouest de l'image. Il faut noter que les parties en vert peuvent être tout de même constituées de végétation, mais que l'augmentation sur la période de 1984 à 2011 n'a pas été importante.

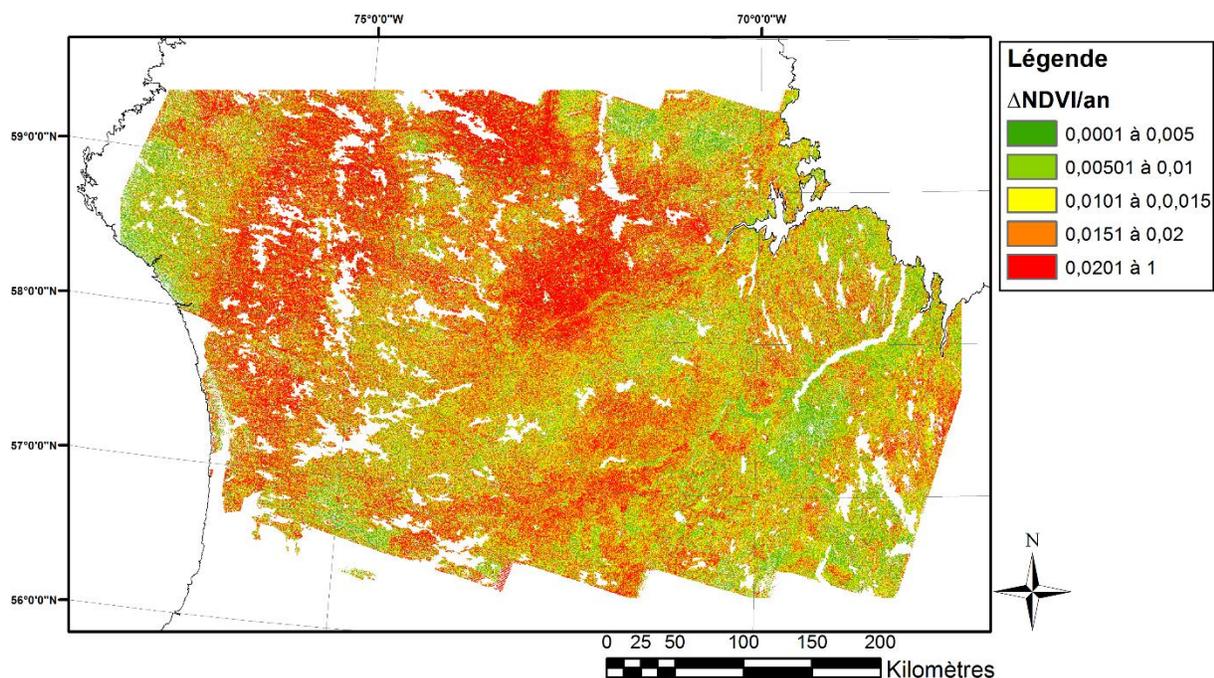


Fig. 5.14 Tendence du NDVI ($\Delta\text{NDVI}/\text{an}$) dérivée d'image Landsat (période de 1984 à 2011). Résolution spatiale de 90 m.

La figure 5.15 affiche l'augmentation de la Fc arbustive de 1984 à 2011. Certains endroits affichent une augmentation très prononcée allant de 35 à 50% de la couverture totale. Il est intéressant de noter que l'augmentation de la Fc arbustive (Fig. 5.15) n'a pas eu lieu sur tous les pixels caractérisés par l'augmentation du NDVI (Fig. 5.14). Cela signifie que les modèles d'arbre de régression sont parvenus à distinguer le couvert arbustif de la végétation basse parmi les pixels de végétation. L'image montre que l'augmentation des zones arbustives a principalement eu lieu au nord de la zone alors que certains endroits au sud ont connu une baisse. L'augmentation arbustive semble aussi principalement avoir eu lieu près des cours d'eau.

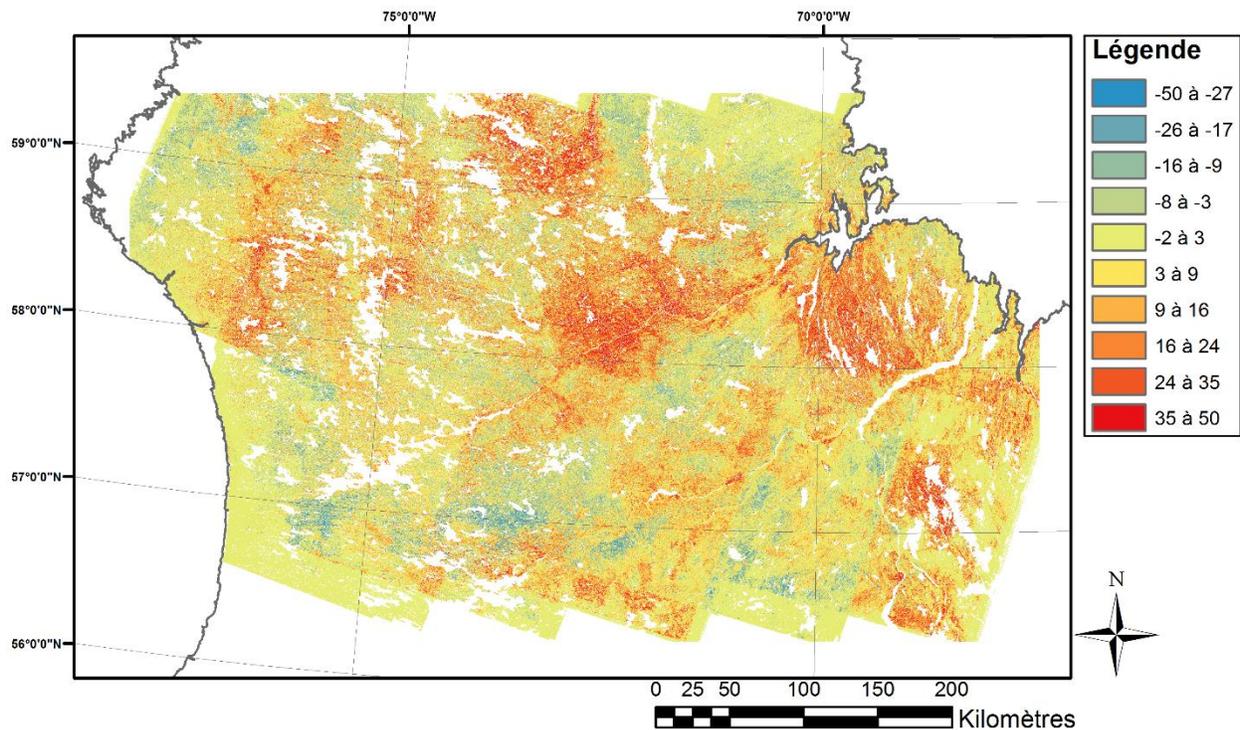


Fig. 5.15 Différence du couvert arbustif (1984-2011) (en % de la fraction du couvert). Résolution spatiale de 90 m.

La figure 5.16 affiche une augmentation considérable de la Fc de végétation basse presque généralisé sur toute la zone (au-delà de 10% de la Fc). L'augmentation semble être moins dépendante de la proximité des espaces d'eau que pour les arbustes (Fig. 5.15). Le fait que les endroits caractérisés par une forte augmentation arbustive soient aussi caractérisés par une forte augmentation de végétation basse peut indiquer qu'il y a eu une augmentation de la végétation basse à travers les arbustes ou que le modèle d'arbre de régression a eu de la difficulté à discriminer les deux classes. Une analyse temporelle faite à partir de la photo-interprétation d'image à haute résolution serait souhaitable afin de mieux comprendre ce phénomène.

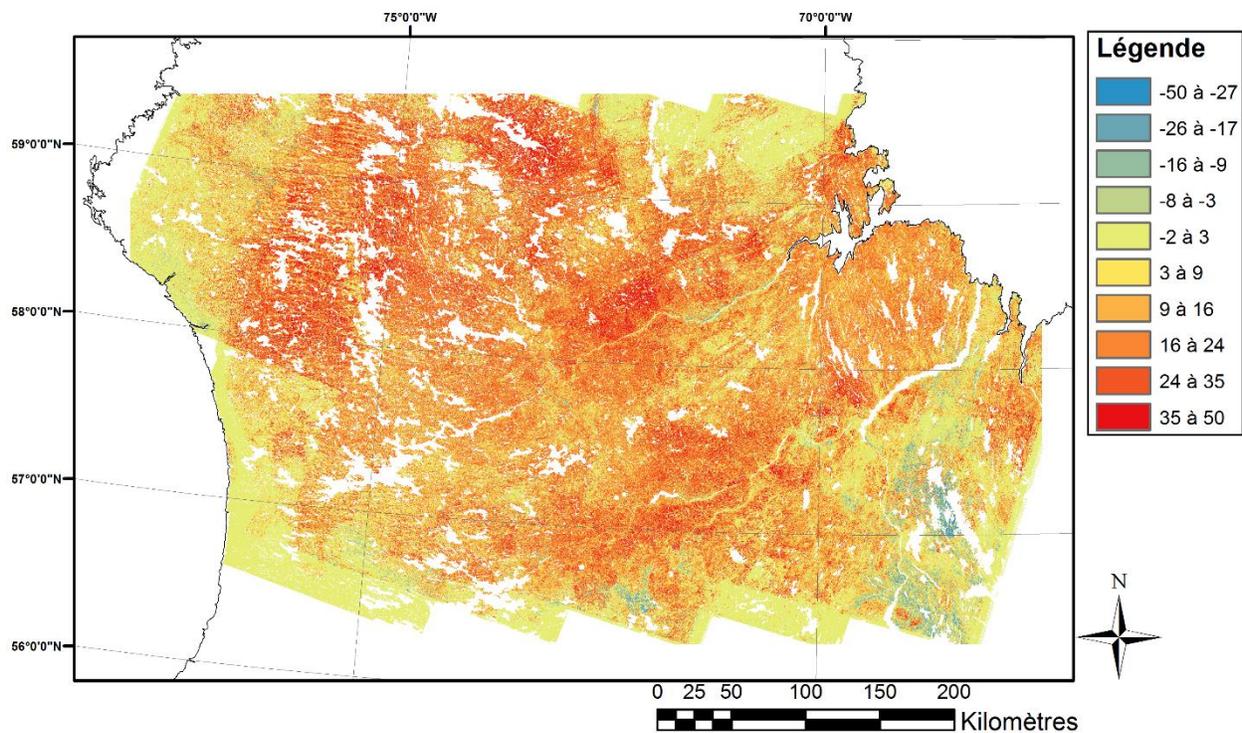


Fig. 5.16 Différence du couvert de la végétation basse (1984-2011) (en % de la fraction du couvert). Résolution spatiale de 90 m.

La figure 5.17 affiche une diminution généralisée de la Fc du sol nu pour la période de 1984 à 2011. Cette diminution semble s'être effectuée au profit de la végétation basse sur toute la zone et également au profit des arbustes dans la partie nord de la zone. Les sections ayant connu peu ou pas de baisse semblent être caractérisées par les sections déjà occupées par un couvert végétal en 1984.

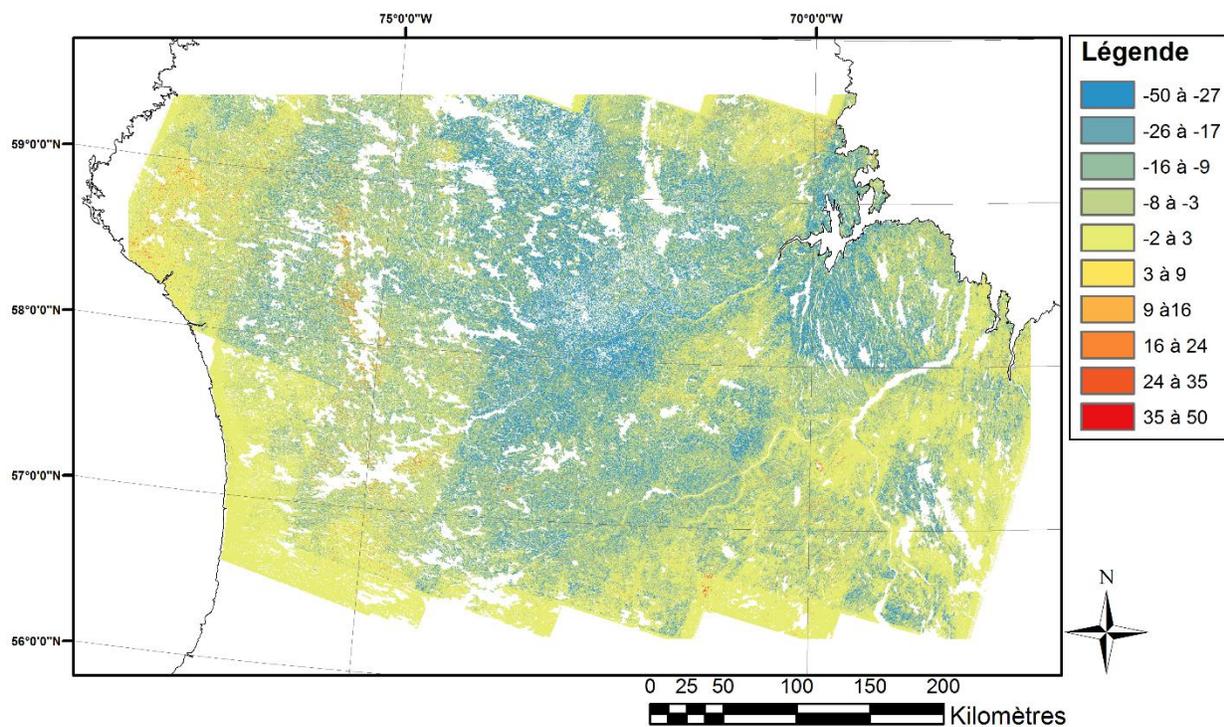


Fig. 5.17 Différence du couvert du sol nu (1984-2011) (en % de la fraction du couvert). Résolution spatiale de 90 m.

En résumé, la majorité de la zone d'étude est caractérisée par une substitution des sols nus par une couverture de végétation basse et une augmentation marquée des arbustes dans la partie nord de la zone. La diminution des arbustes dans la partie sud de la zone est dure à expliquer. Une explication possible est le fait que la classe arbustive comprend aussi les arbres et qu'un brunissement des arbres au sud de la zone de transition a été relevé par certaines études. Ce brunissement pourrait être dû au fait que la température optimale pour la croissance des arbres serait dépassée. (Olthof et Pouliot, 2009; Pisaric et al, 2007; Evans et al, 2006).

5.4.2 Comparaison de la date de la fonte de la neige et du couvert végétal

L'analyse a porté sur les 3 cadrans latitudinaux séparément (Fig. 5.18), de façon à s'affranchir de l'effet climatique (conditions météorologiques possiblement différentes). Les figures 5.19, 5.20 et 5.21 remontent la distribution des fractions de couverts arbustifs, de végétation basse et de sol nu respectivement pour ces 3 cadrans et pour l'année 2011.

Les figures 5.22, 5.23, 5.24 montrent la distribution spatiale de la date de fonte de la neige pour les années 2006, 2009 et 2011 respectivement pour les 3 cadrans choisis. Ces données ont été dérivées à partir des images MODIS MOD10A2 de la même année. Pour la comparaison date de fonte vs couverture du sol, on a agrégé la fraction de chaque classe à la même résolution spatiale que celle du produit MOD10A2 (500 m).

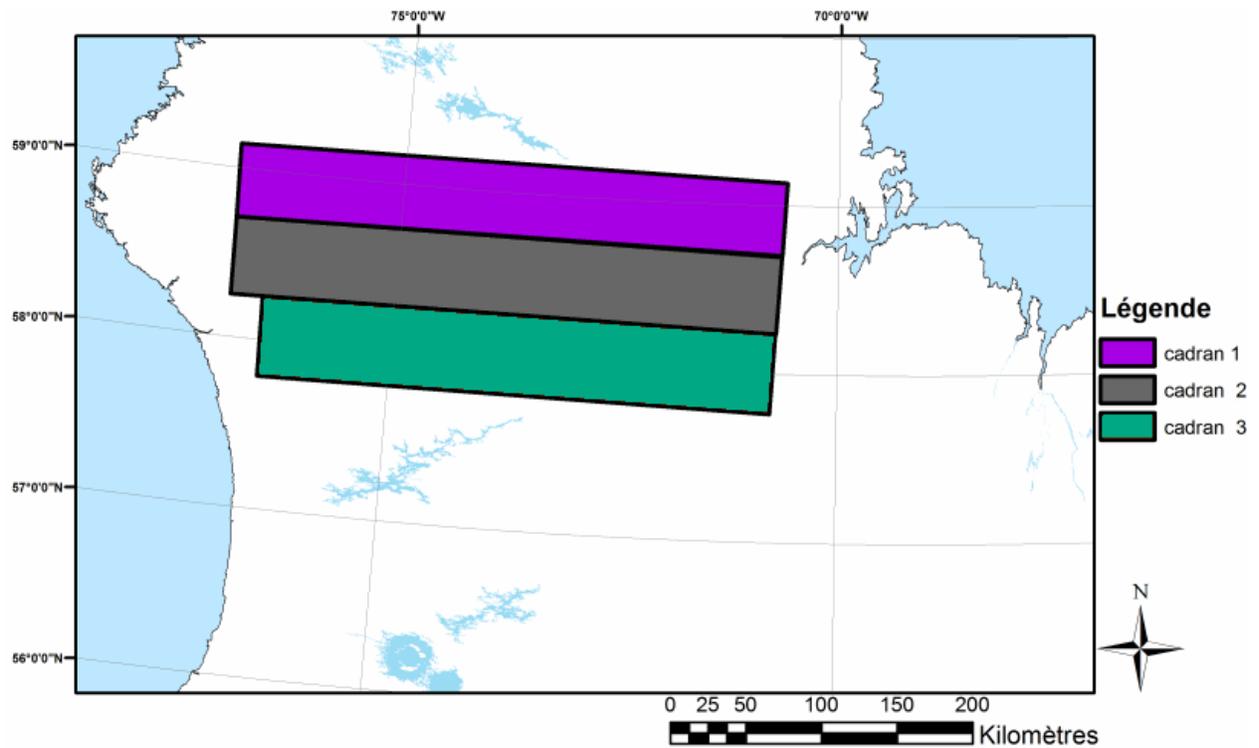


Fig. 5.18 Représentation des 3 cadrans choisis afin de faire l'analyse des changements des Fc et de la date de fonte de la neige.

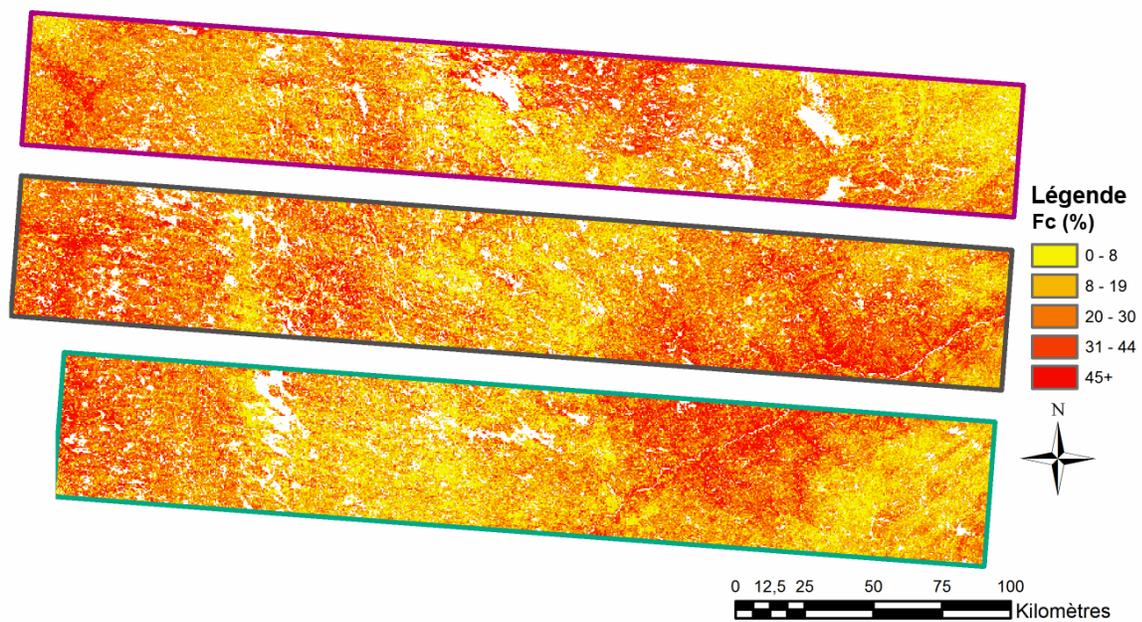


Fig. 5.19 Représentation de la Fc arbustive de l'été 2011 pour les 3 cadrans.

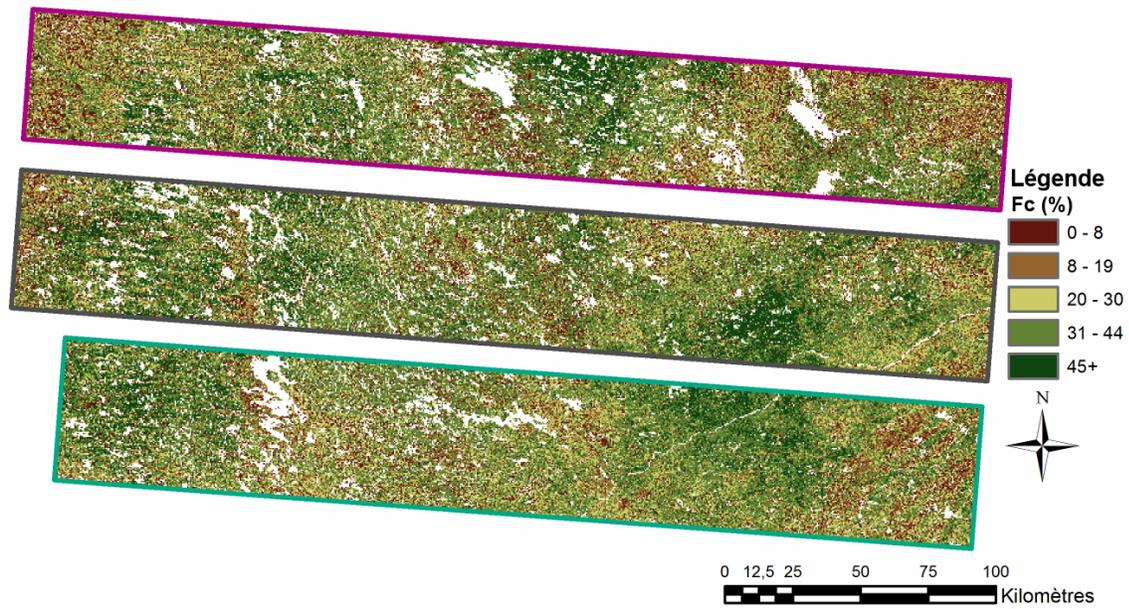


Fig. 5.20 Représentation de la Fc végétation basse de l'été 2011 pour les 3 cadrans.

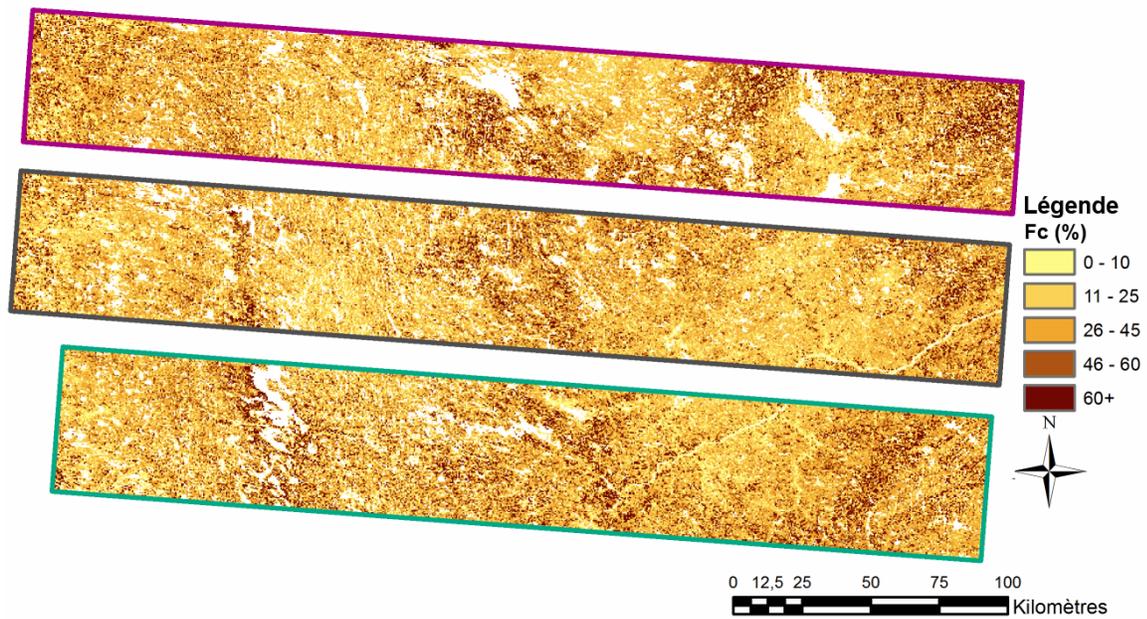


Fig. 5.21 Représentation de la FC de sol nu de l'été 2011 pour les 3 cadrans.

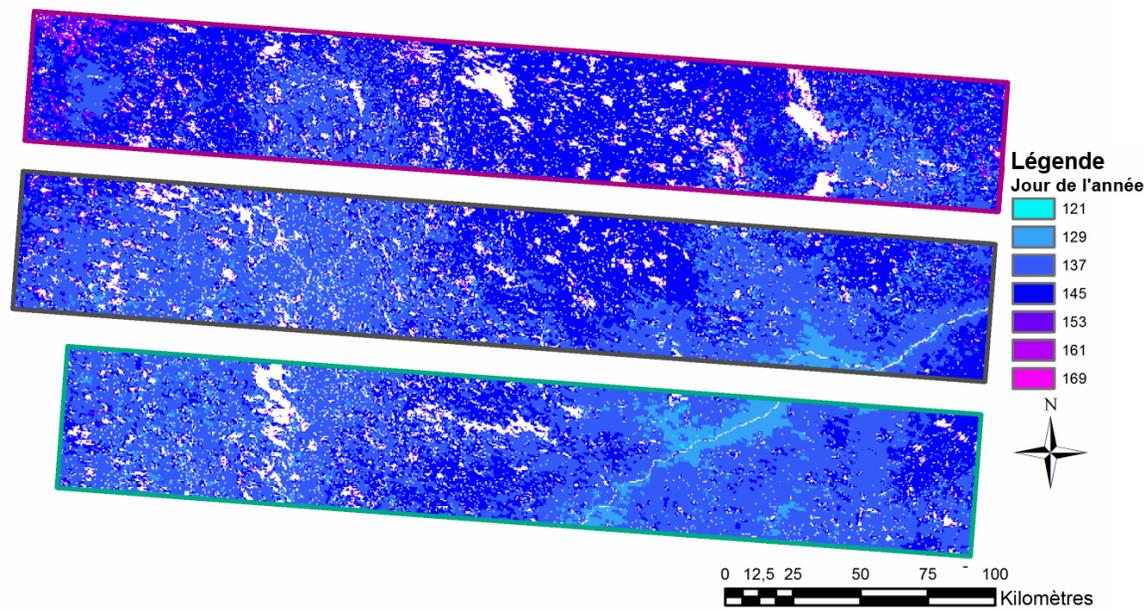


Fig. 5.22 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2006 pour les 3 cadrans choisis.

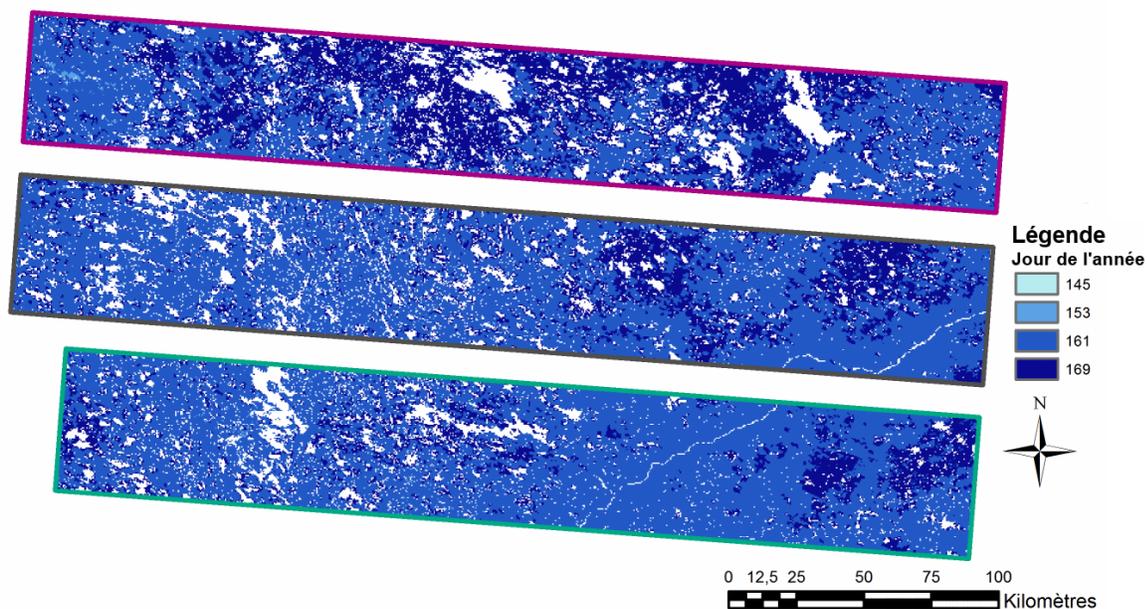


Fig. 5.23 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2009 pour les 3 cadrans choisis.

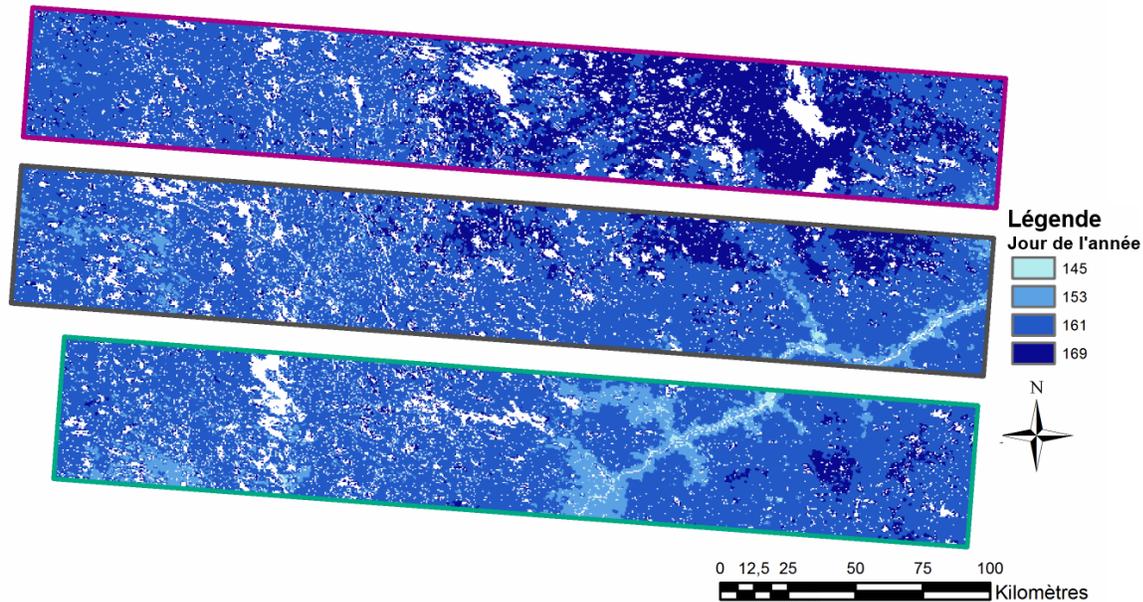


Fig. 5.24 Représentation de la date de fonte de la neige pour l'année 2011 pour les 3 cadrans choisis.

5.4.2.1 Fraction du couvert & Date de fonte dérivée de MOD10A2

La Fc arbustive, de végétation basse, et de sol nu de chaque pixel a été comparée à la date de fonte pour chaque année sur chaque zone. Les résultats jugés les plus pertinents sont affichés dans cette section et la totalité des résultats est disponible en Annexe 6.

La figure 5.25 montre que l'augmentation de la Fc arbustive et de végétation basse entraîne une date de fonte précoce de la neige alors que l'augmentation de la Fc de sol nu entraîne une date de fonte plus tardive. L'effet de la Fc arbustive, de -0.090 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc, est plus fort, que celui de la végétation basse avec -0.064 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc. Ces résultats montrent clairement que dans une même zone géographique (i.e. sous les mêmes conditions météorologiques), l'effet de la végétation modifie la dynamique du couvert nival, en accélérant la fonte de -3 jours au maximum. Cette relation est similaire dans les 3 zones (voir Annexe 6), mais avec des amplitudes différentes. Il faut également mentionner que le fait que le produit MODIS soit basé sur la réflectance de surface peut insérer un biais dans la détection de la date de la fonte de la neige en fonction de la couverture végétale car la présence de la canopée arbustive modifie aussi l'albédo du pixel

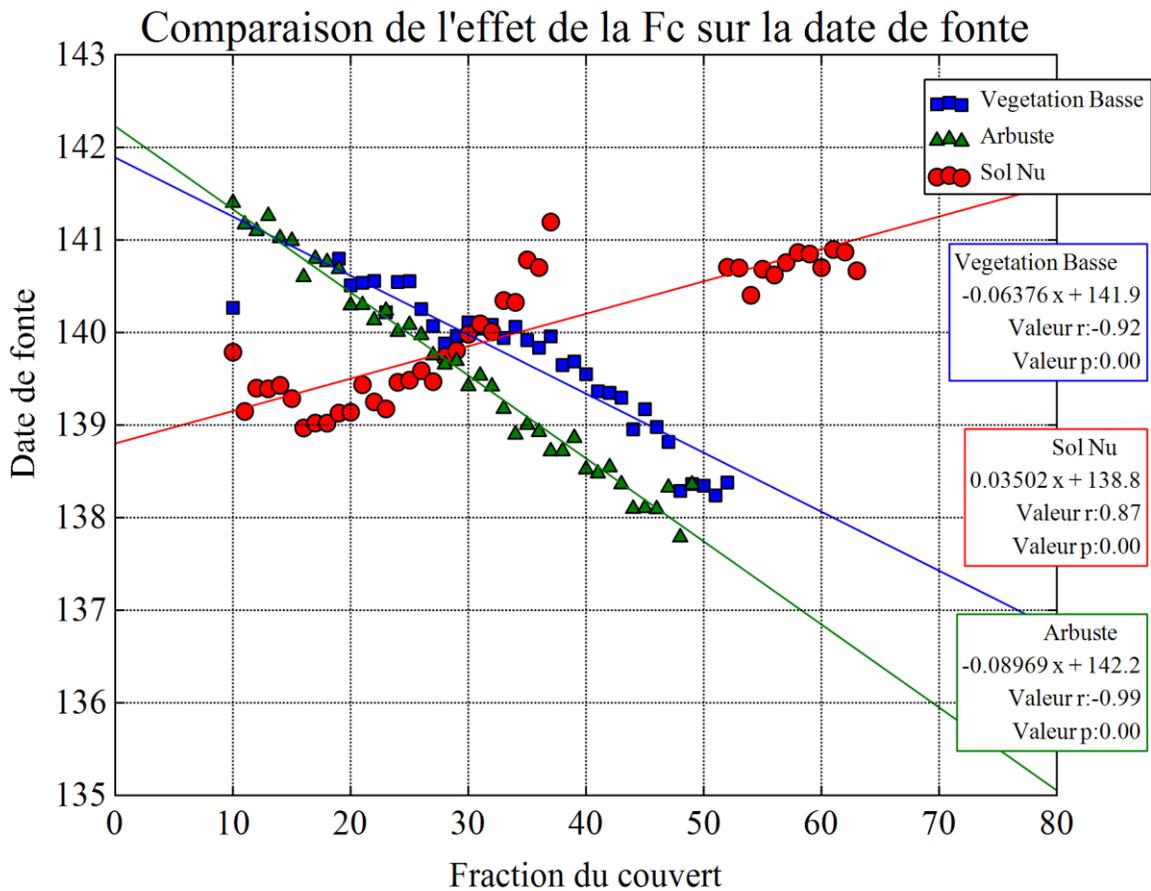


Fig. 5.25 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert sur la fonte de la neige en 2006 pour le cadran 2.

La figure 5.26 affiche une différence d'amplitude de l'effet de la Fc arbustive sur la date de fonte. Les cadrans 2 et 3 affichent une amplitude de l'effet de la Fc arbustive plus importante (~ -0.090 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc) que le cadran 1 (~ -0.033 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc). On retrouve le même ordre de grandeur des -3 jours de variation maximum pour la zone 3. Le cadran 1 plus au Nord peut possiblement avoir un couvert arbustif moins dense et haut que dans les zones plus au sud. L'effet météo (vent, régime des précipitations, température) peut aussi avoir un impact dans l'amplitude des variations observées.

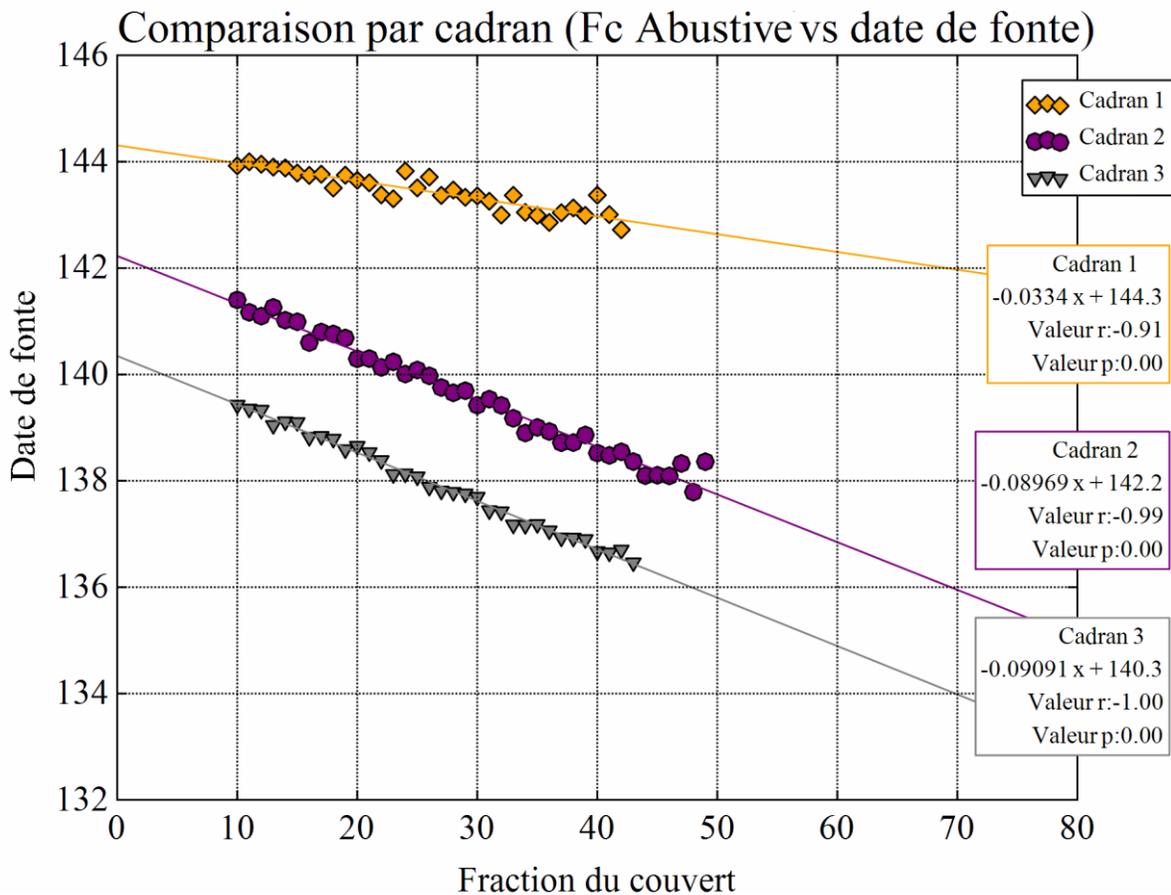


Fig. 5.26 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige en 2006 pour les trois zones.

La figure 5.27 affiche la comparaison des années 2000 à 2011 de l'amplitude de l'effet de la Fc arbustive sur la fonte de la neige pour la zone 2. Trois facteurs ont été analysés conjointement à l'effet de la Fc arbustive sur la fonte de la neige: la température en période de fonte, la hauteur de neige, et les précipitations (Tableau 5.2).

Les résultats montrent que la température est le principal facteur déterminant de la date de disparition de la neige indépendamment de la fraction du couvert arbustif. La figure 5.27 affiche clairement trois groupes de pentes correspondant aux années où la température pendant la période de fonte est plus froide (2004, 2007, 2009, 2011, et 2000), moyennes (2010 et 2003), et les plus chaudes (2001, 2005, 2006, et 2008).

Même s'il existe une variation de l'amplitude de l'effet de la végétation arbustive sur la date de fonte de la neige, l'effet d'accélération de la fonte de la neige reste présent chaque année. L'analyse de l'influence de la température, du Hmax et des précipitations sur l'amplitude de l'effet de la Fc arbustive sur la date de disparition de la neige n'a pas permis d'identifier de relation significative entre les paramètres (voir Annexe 7). Ces résultats montrent que, même sous des météorologies

différentes, l'effet de la végétation reste présent et significatif. La végétation accélère la disparition de la neige à la fin de la saison hivernale.

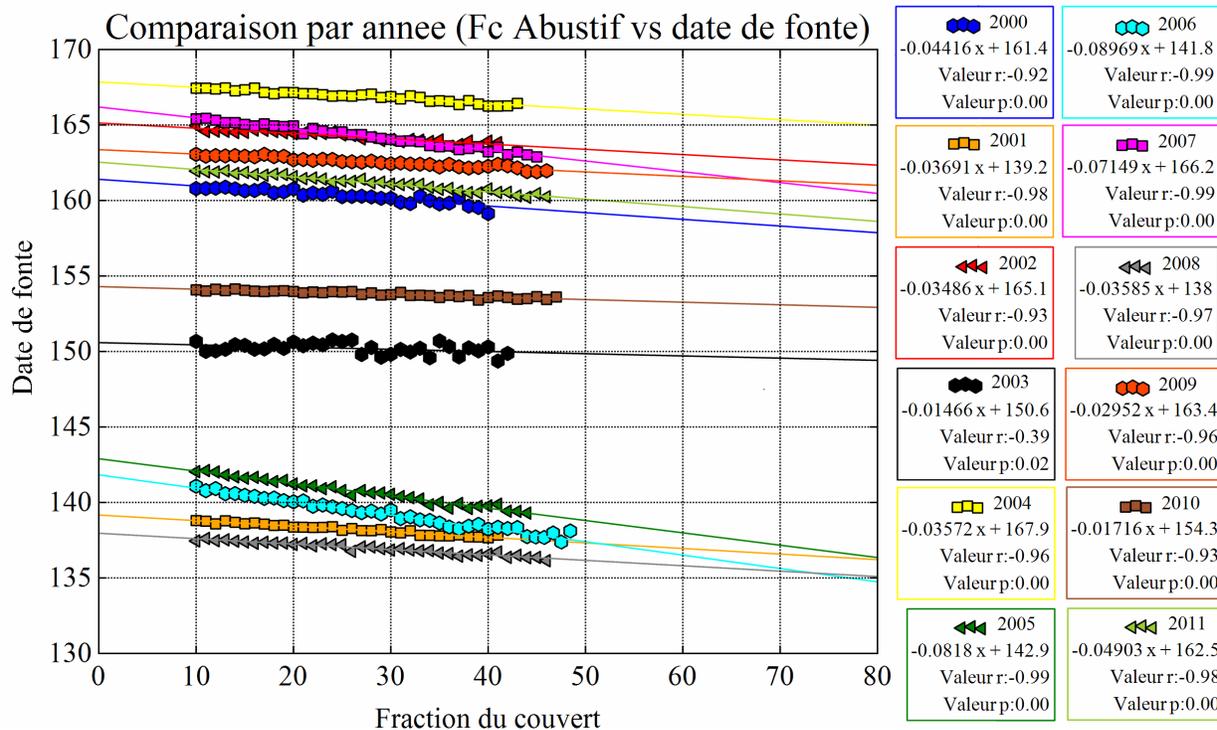


Fig. 5.27 Comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige de 2000 à 2011 sur la zone 2.

Année	Température moyenne pendant la période de fonte (°C)	Précipitation (mm)	Hmax (cm)	Effet de la Fc arbustive sur la date de fonte (en jour par augmentation de 1% du Fc)
2000	6.33	231.75	45	-0.044
2001	9.68	215.63	44	-0.037
2002	6.79	227.52	36	-0.035
2003	8.01	219.21	38	-0.015
2004	6.77	258.45	36	-0.036
2005	10.79	259.65	35	-0.082
2006	10.27	255.48	61	-0.089
2007	7.69	213.13	32	-0.071
2008	10.13	218.61	40	-0.036
2009	7.42	244.39	33	-0.030
2010	8.15	223.89	46	-0.017
2011	8.78	215.67	32	-0.049
Moyenne	8.40	231.95	39.83	-0.045

Tableau 5.2 Comparaison de la température moyenne durant la période de fonte, des précipitations neigeuses enregistrées pendant l'hiver, du Hmax enregistré pendant l'hiver, ainsi que l'effet de la Fc arbustive sur la date de fonte de la neige pour la période de 2000 à 2011.

5.5 Analyse spatiale à haute résolution : NDSI et fraction du couvert

On présente dans cette section une analyse de la distribution de la neige en fonction de la couverture végétale pour 2 années particulières (2004 et 2005) où l'on dispose de 2 belles images Landsat (sans nuages) au moment de la fonte. Il est clair qu'il faudrait faire cette analyse pour plusieurs années et plusieurs dates dans la période de fonte. Néanmoins, cette analyse permet, pour ces 2 cas et en complément à la précédente analyse, d'analyser s'il y a un décalage de la fraction de couverture de neige à cause du couvert végétal à un moment donné. La figure 5.28 montre la situation géographique et les pourtours de la zone qui a été analysée à une résolution de 90 m.

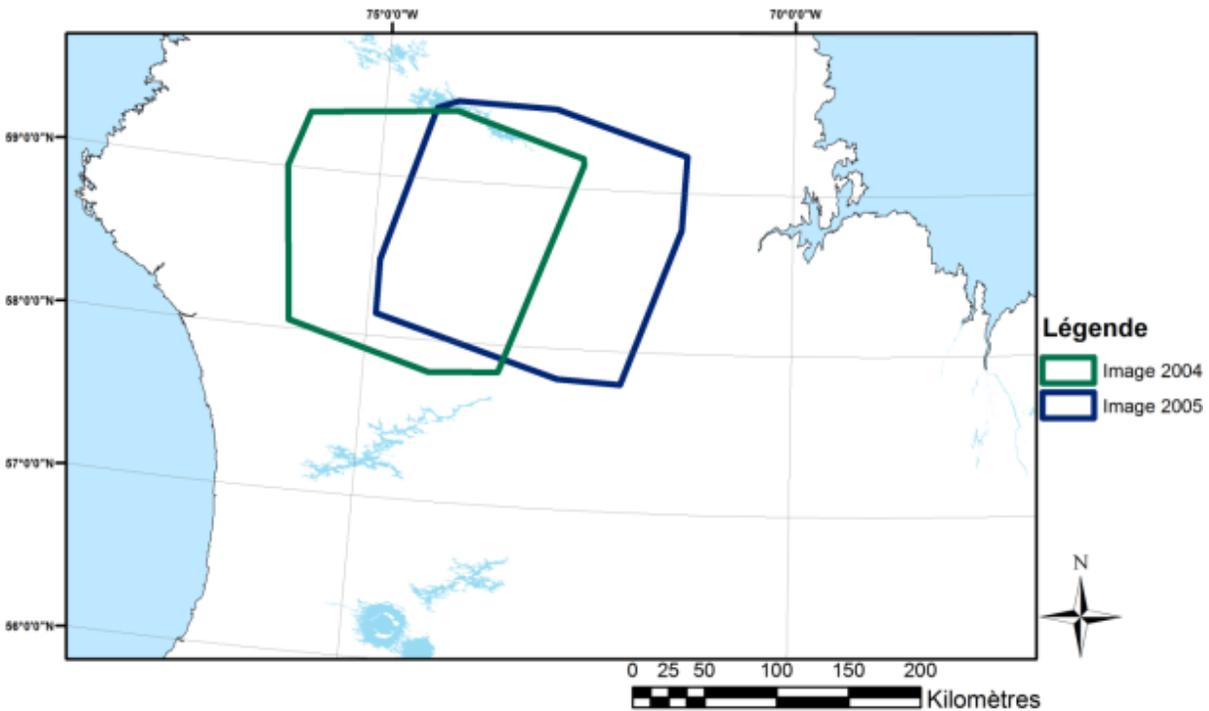


Fig. 5.28 Représentation géographique des deux images Landsat utilisées pour calculer le NDSI.

Les figures 5.29 et 5.30 représentent une comparaison visuelle entre la distribution spatiale de la couverture de neige donnée par le NDSI et la fraction (F_c) du couvert arbustif pour les années 2004 et 2005. Bien que le seuil du NDSI déterminant la présence de neige soit arbitraire, un seuil de 0.40 (Hall et al, 1995, 2001) a été utilisé dans cette étude. Les pixels bleus des deux images peuvent donc être interprétés en tant que pixel de neige et les pixels verts représentent les pixels sans neige. Il faut noter que l'utilisation d'un seuil de 0.40 n'est pas recommandée pour les zones de forêts denses car la canopée couvre la neige au sol et fait diminuer le NDSI (Hall and Riggs, 2007).

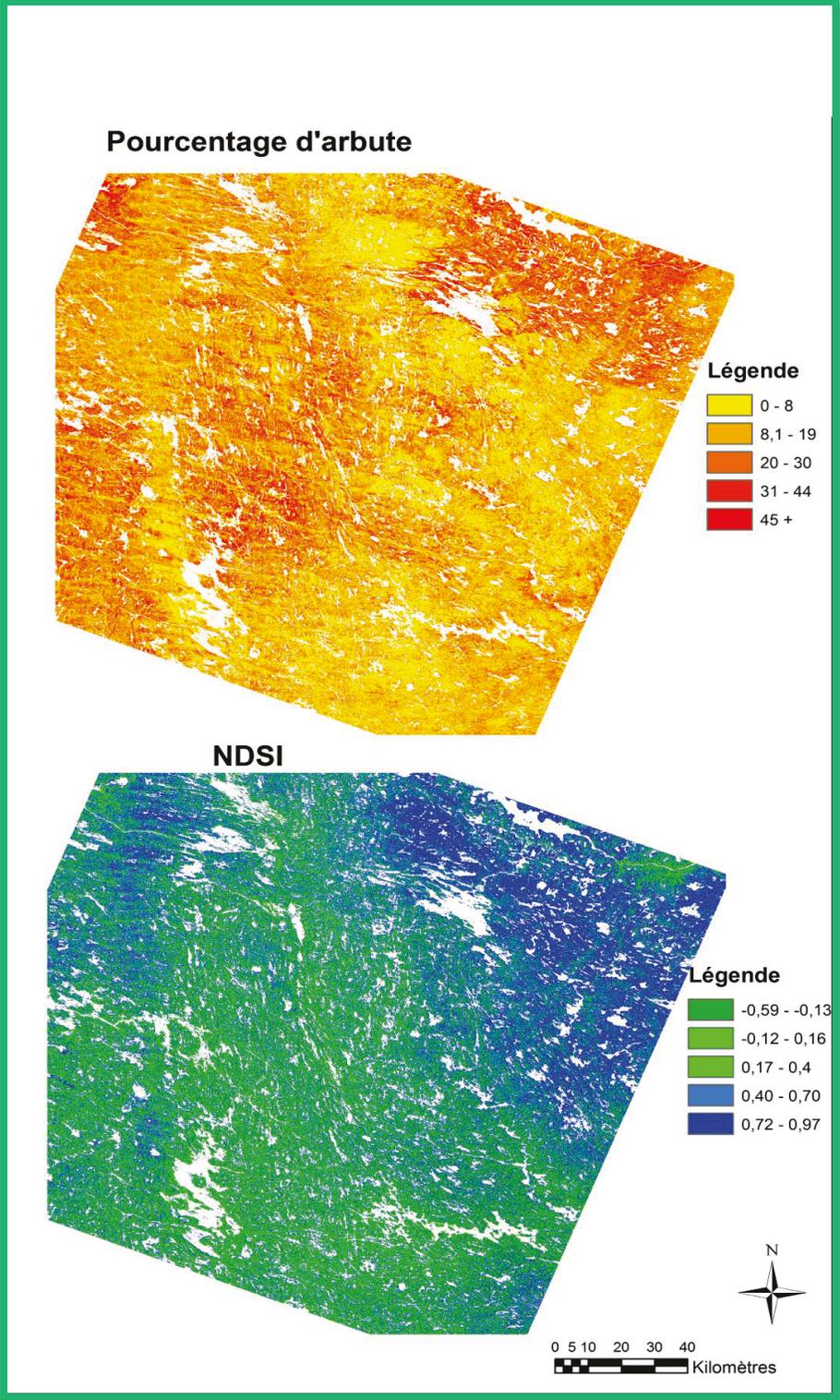


Fig. 5.29 Comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2004.

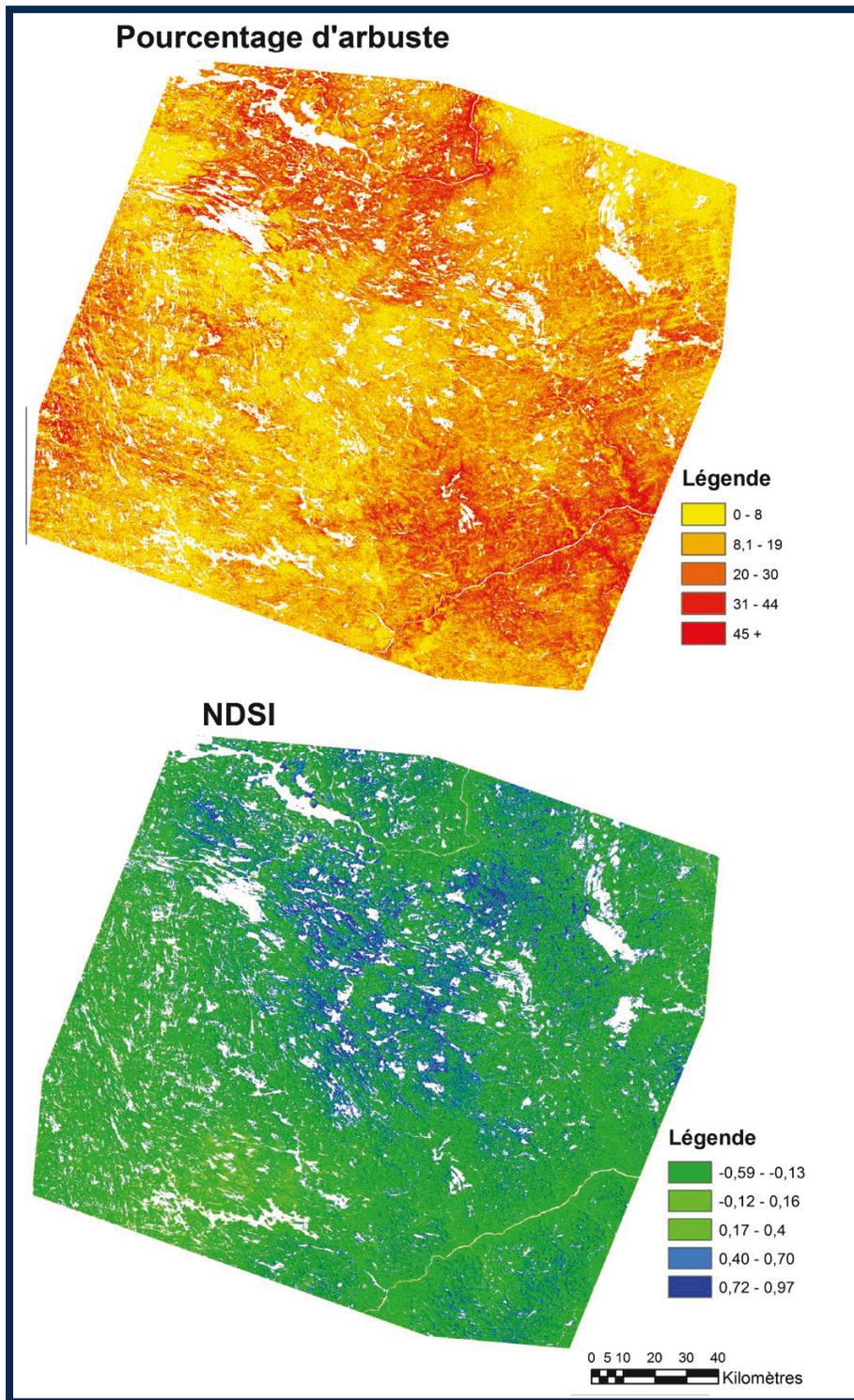


Fig. 5.30 Comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2005.

Tout d'abord, il est important de préciser que les Hmax de 2004 et 2005 sont semblables: 36 et 35 cm, mais que la température moyenne durant la période de fonte de 2004 (6.77°C) a été nettement plus froide que celle de 2005 (10.80°C).

La comparaison visuelle entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2004 (Fig. 5.29) semble afficher une corrélation négative entre les deux paramètres. Il est difficile de déterminer si la neige dans la partie nord est influencée par la présence arbustive ou si elle est simplement due au fait que la zone se trouve plus au nord avec une météorologie différente pour la période précédant la journée d'observation. Cependant, les endroits à forte couverture arbustive dans le reste de l'image semblent être caractérisés par une absence de neige.

La comparaison visuelle entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2005 (Fig. 5.30) semble également afficher une corrélation négative entre les deux paramètres. Les pixels bleus (forte neige) semblent principalement représenter les pixels à faible présence arbustive (en jaune).

La figure 5.31 représente la comparaison entre les pixels de neige (déterminée par un seuil de 0.40 du NDSI) et la Fc arbustive pour les années 2004 et 2005 respectivement (scatterplot par plage de valeur, avec le nombre de pixels en couleur pour chaque point). Cette figure indique qu'il y a une diminution de -0.33 % de pixel de neige par incrémentation d'un pour cent de la Fc arbustive en 2004. Ce qui démontre qu'il existe une relation entre ces deux paramètres. L'année 2005 est moins claire que 2004, car on observe une faible augmentation du pourcentage de pixel de neige par incrémentation d'un pour cent de la Fc arbustive à partir d'une Fc au-delà de 40%.

Cette analyse complémentaire bien que très partielle (2 dates seulement) confirme donc l'effet de la végétation : plus le couvert arbustif augmente, plus la neige fond vite (ici observé à partir de la couverture de neige qui diminue).

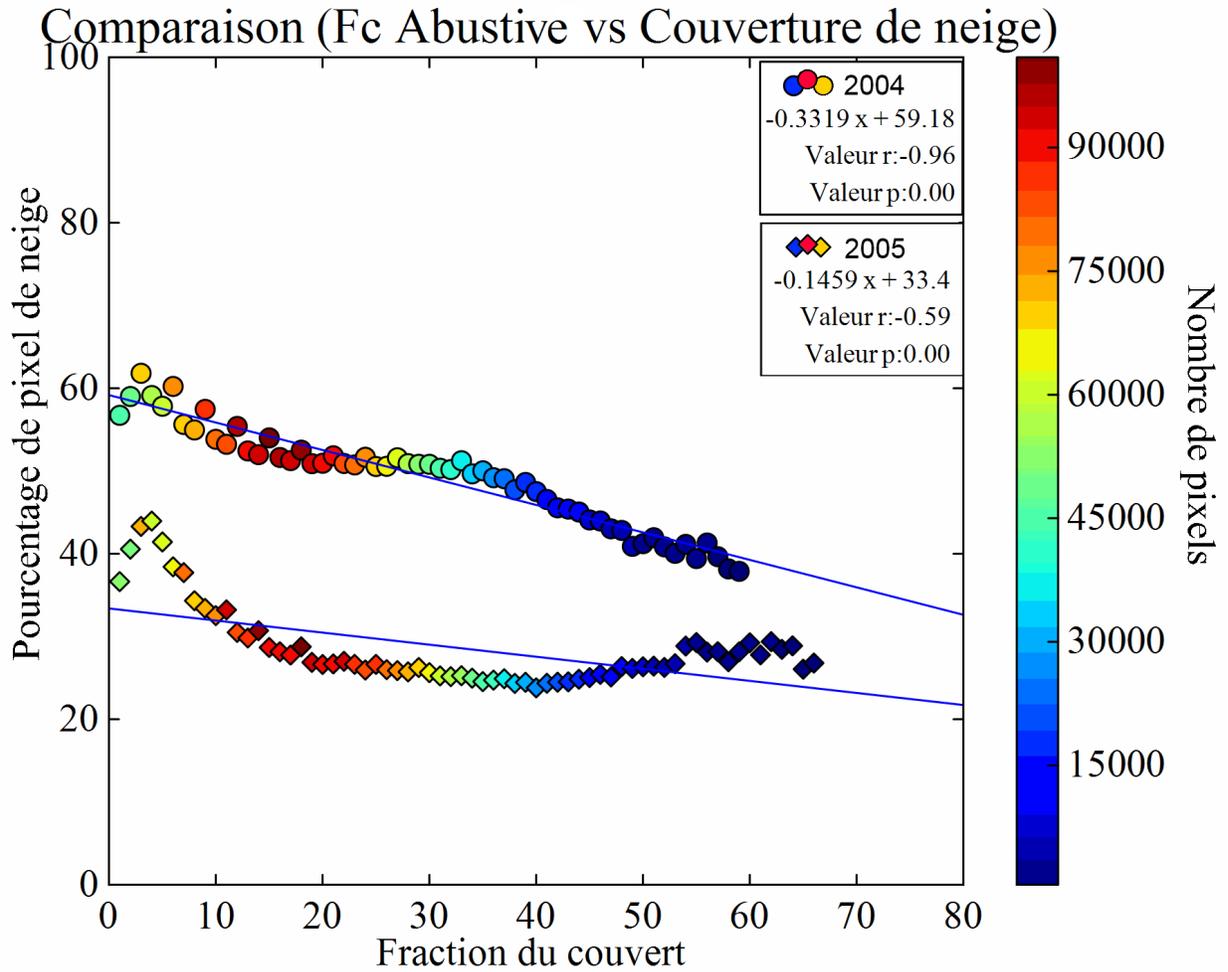


Fig. 5.31 Comparaison entre le NDSI et la Fc arbustive pour l'année 2004 et 2005. Chaque point représente la moyenne des pixels enneigés par Fc.

6. Discussion et conclusion

Les résultats obtenus au chapitre 5 démontrent la complexité de l'interaction des multiples changements simultanés de la température, de la couverture de la neige ainsi que de la pousse végétative au Nunavik. Dans cette étude, une importante quantité de données ont été analysées afin de comprendre l'effet de la pousse arbustive sur la fonte de la neige.

La première partie de l'étude a porté sur l'analyse temporelle de 3 zones représentant la toundra, la taïga, ainsi que la taïga forestière. La seconde partie a porté sur une analyse spatiale à haute résolution des variations de neige et de couverture du sol dans la zone 2 (taïga).

L'analyse et l'interprétation des résultats montrent clairement un changement climatique significatif sur les 3 zones étudiées. Ce changement de climat correspond à un réchauffement marqué, entre 0.75° et 1.57° par décennie entre les zones 1 (toundra) et 3 (taïga forestière) respectivement. Cette augmentation de température peut expliquer une partie des changements de la hauteur de neige (qui a diminué sur la même période) et de la date de la fonte de la neige, plus précoce, aussi bien pour le début de la fonte que pour la date de la disparition de la neige.

On peut noter que la hauteur de neige maximale annuelle a diminué dans les trois zones alors que les précipitations hivernales ont augmenté dans les zones 1 et 3 sur les 45 dernières années. Il faut souligner aussi que les données sur la hauteur de neige proviennent d'enregistrements aux stations météorologiques et qu'elles sont donc indépendantes de la végétation. La diminution de la hauteur de neige observée doit ainsi être attribuée à la variabilité météorologique. L'augmentation des précipitations dans les hautes latitudes nord est bien documentée (Vincent et al, 2012), mais la diminution de la hauteur maximale de la neige est peu étudiée. Des études ont relevé que la partie nord-américaine de l'Arctique subit une diminution de la hauteur de la neige alors que la partie eurasienne subit une augmentation de la hauteur de la neige (Callaghan et al, 2011b). Cette diminution de H_{max} observée au Nunavik pourrait être attribuée à l'augmentation de la température qui accélère le compactage et la métamorphose de la neige, aux précipitations liquides qui pourraient augmenter du fait de l'augmentation des températures (SWIPA, 2011), et enfin à la vitesse du vent qui balaie la neige (Li et al, 1997; Sturm et al, 2002a).

Parallèlement, les résultats montrent une nette augmentation de la végétation arbustive dans les zones 2 et 3 (LAI plus élevé de 100% dans la zone 3 par rapport à la zone 1). Il faut noter que le NDVI n'a pas permis de montrer clairement l'augmentation de la végétation dans la zone 3. Nous croyons que cette différence est due au fait que le LAI est plus sensible au changement de la végétation que le NDVI.

L'effet de la végétation sur la hauteur de neige ("effet de trappage") n'a pas pu être analysé dans la première partie, faute de données de hauteur de neige en zone arbustive. Aucune base de données utilisée dans cette étude ne permet d'observer la hauteur de la neige de façon spatiale. Des données EEN seraient très pertinentes pour les futures études.

L'impact de la végétation a été analysé à partir de la durée de fonte relative entre le début de la fonte et la disparition de la neige. Il apparaît clairement que la végétation active la fonte plus précocement, allongeant ainsi significativement la durée de fonte (+600%). L'hypothèse sur l'effet radiatif des arbustes sur la fonte semblerait donc confirmée. Cependant, l'impact ne retarde pas la date de fin du couvert nival qui est de plus en plus précoce à cause du réchauffement climatique.

Cette étude a fait l'analyse des changements de la composition de la végétation dans la zone 2 (taïga) seulement. Il serait pertinent d'approfondir notre compréhension de la constitution végétale de la zone 3 dans nos futurs travaux afin de mieux caractériser le type de changements impliqués par l'augmentation de la végétation dans cette zone. Pour ce faire, l'acquisition de données in situ et d'image aérienne ou satellitaire à haute résolution va être nécessaire. Une bonne compréhension de la constitution des changements végétaux dans la zone 2 et 3 aidera à mieux comprendre les différences au niveau de la fonte de la neige entre les deux zones.

La deuxième partie de cette étude a porté sur l'analyse spatiale de l'interaction de la fraction F_c de couvert arbustif, végétation basse et sol nu sur la fonte de la neige. Une classification détaillée sur des images à haute résolution spatiale a permis de cartographier ces différentes couvertures du sol avec précision.

Les résultats de l'analyse spatiale à haute résolution montrent que la présence arbustive entraîne une date de fin de neige plus précoce que le sol nu. En effet, les résultats montrent qu'il y a une corrélation négative entre la fraction du couvert arbustif et la date de la disparition de la neige et qu'il y a une corrélation positive entre la fraction du couvert de sol nu et la date de la fonte de la neige. Cette distinction démontre que les arbustes causent une date de disparition de la neige plus précoce que le sol nu et ce, indépendamment du réchauffement climatique.

Le fait que la méthode de différenciation des arbustes et de la végétation basse est simplement basée sur l'hypothèse que les arbustes sont plus haut que la végétation basse et que la différence d'ombre permet de distinguer spectralement ces deux classes a rendu la classification difficile. Il serait préférable d'utiliser une technique de modélisation de la réflectance de la canopée (Olthof et al, 2009). De plus, le fait d'utiliser des pixels re-échantillonnés à 500 m afin de correspondre à la taille des pixels de neige MODIS a fait en sorte que la classification du couvert était diluée. Il a été impossible d'observer l'effet des pourcentages plus élevés qu'environ 60%. Il faut également mentionner que le fait que le produit MODIS soit basé sur la réflectance de surface peut insérer un biais dans la détection de la date de la fonte de la neige en fonction de la couverture végétale car la présence de la canopée arbustive modifie aussi l'albédo du pixel. Une analyse à partir de date de fonte de la neige dérivée de QuikSCAT pourrait aider à valider les résultats obtenus. Par contre, la résolution de 4.25 km du capteur QuikSCAT engendrerait une dégradation de la résolution spatiale de la constitution végétale et empêcherait possiblement d'en faire l'analyse.

La comparaison entre l'indice de couverture de neige NDSI et la fraction du couvert arbustif indique qu'il y a une corrélation entre la présence d'arbuste et la présence de neige en période de fin de la fonte de la neige.

Les données offrant de bonnes résolutions spatiales et temporelles au Nunavik sont rares. Conséquemment, l'interpolation nécessaire à la création d'ensembles de données spatio-temporelles détaillées génère des biais dans cette région.

La résolution spatiale des données sur la neige est problématique, même avec les produits de neige MODIS, la résolution spatiale est de 500 m. Cette résolution force une dégradation des données de Fc et ne permet pas l'analyse à haute résolution. De plus, le fait que les données MODIS débutent seulement en 2002 n'offre pas la longévité nécessaire permettant d'effectuer une analyse temporelle.

Cette étude démontre clairement que la croissance de la végétation qui résulte du réchauffement climatique impacte la dynamique du couvert nival, aussi affectée par ce réchauffement. Une étude approfondie des processus en causes avec des mesures in situ appuyées par leur modélisation permettrait de mieux comprendre ces phénomènes.

7. Références

- ACIA. (2005) *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press: Cambridge; 1042.
- AMAP (2011) Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo.
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makmara, H., Pacholczyk, P., et al. (2013) GeoV1: LAI, FAPAR Essential Climate Variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137, 299-209
- Brodzik, M. and R. Armstrong. (2013) Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent. Version 4. 1967-2010, Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center
- Brown R., C. Derksen, and L. Wang. (2007) Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets. *Remote Sens. Environ.* 111, 367-381.
- Brown, R.D., and P.W. Mote. (2009) The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climate*, 22, 2124–2145.
- Brown R., C. Derksen and L. Wang. (2010a) A multi-dataset analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent, 1967-2008. *J. Geophys. Research (Atmospheres)* doi: 10.1029/2010JD013975
- Brown, R. D. (2010b) Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948–2005. *Hydrological Processes*, vol. 24, no. 14, pp. 1929–1954, 2010
- Brown, R. D. and B. Brasnett. (2010c) Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data. [1998-2012]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center.
- Callaghan, T.V., M. Johansson, R.D. Brown, P. Ya Groisman, N. Labba, V. Radionov, et al. (2011) Multiple effects of changes in Arctic snow cover. *Arctic cryosphere—Changes and impacts*, ed. T.V. Callaghan, M. Johansson, and T.D. Prowse. *Ambio* 40(S1). doi: 10.1007/s13280-011-0213-x.
- Callaghan, T., M. Johansson, R. Brown, P. Groisman, N. Labba, V. Radionov, R. Barry, O. Bulygina, R. Essery, D. Frolov, V. Golubev, T. Grenfell, M. Petrushina, V. Razuvaev, D. Robinson, P. Romanov, D. Shindell, A. Shmakin, S. Sokratov, S. Warren, and D. Yang, (2011b): The changing face of Arctic snow cover: A synthesis of observed and projected changes. *Ambio*, 40, no. S1, 17-31, doi: 10.1007/s13280-011-0212-y

Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Baret, F., Weiss, M., et al. (2013) GeoV1: LAI, FAPAR Essential Climate Variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*. 137, 310-329

Chapin, III F. S. , et al. (2005) Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming, *Science* 310, 657, doi: 10.1126/science.1117368

Cook B.I., G. B. Bonan, S. Levis and H. E. Epstein. (2008) Rapid vegetation responses and feedbacks amplify climate model response to snow cover changes, *Clim Dyn*,30:391–406, doi: 10.1007/s00382-007-0296-z.

Derksen, C. and R, Brown. (2012, Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL053387

Déry SJ, Brown RD. (2007) Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback. *Geophysical Research Letters*. 34:L22504. doi: 10.1029/2007GL031474.

Devine, K.A. and Mekis, É. (2008) Field accuracy of Canadian rain measurements. *Atmosphere-Ocean* 46 (2), 213–227.

Dupont, F., Royer, A., Langlois, A., Gressent, A., Picard, G., Fily, M., Cliché, P. and Chum, M.(2012) Monitoring the melt season length of the Barnes ice cap over the 1979-2010 period using active and passive microwave remote sensing data. *Hydrologic Processes*: DOI: 10.1002/hyp.9382

Epstein, H.E., Beringer, J., Gould, W.A., Lloyd, A.H.,Thompson, C.D., Chapin, F.S., III, Michaelson, G.J.,Ping, C.L., Rupp, T.S., and Walker, D.A. (2004) The nature of spatial transitions in the Arctic. *Journal of Biogeography* 31(12):1917–1933.

Essery, R., and Pomeroy, J. (2004) Vegetation and topographic control of wind-blown snow distributions in distributed and aggregated simulations for an arctic tundra basin. *J. Hydrometeor.*, 5, 735–744.

Evans, M.N., Reichert, B.K., Kaplan, A., Anchukaitis, K.J., Vaganov, E.A., Hughes, M.K., et al. (2006) A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *Journal of Geophysical Research*, 111, G03008. doi: 10.1029/2006JG000166.

Foster JL, Nghiem, N., Tedesco, M., Riggs, G., Hall, DK and Eylander J. (2008). A Global Snowmelt Product Using Visible, Passive Microwave and Scatterometer Satellite Data. *Proceedings of the ISPRS*, August 2008.

Fraser, Robert,. Olthof, Ian,. Carrière, Mélanie ., Deschamps, Alice,. and Pouliot,. Darren. (2012) A method for trend-based change analysis in Arctic tundra using the 25-year Landsat archive. *Polar Record*, 48, pp 83-93. doi: 10.1017/S0032247411000477.

Goetz S. J., A. G. Bunn, G. J. Fiske and R. A. Houghton. (2005) Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *PNAS*, 102(38), 13521–13525

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*, 54(2): 127–140.

Hall D. K., Riggs G. A. and V.V. Salomonson. (2001) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms, *NASA/Goddard Space Flight Center Greenbelt*, MD 20771, https://eosps.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd_mod10.pdf

Hall, D.K. and G.A. Riggs. (2007) Accuracy assessment of the MODIS snow-cover products. *Hydrol. Process*, 21(12), 1534–1547

Huang, C., B. Wylie, L. Yang, C. Homer, and G. Zylstra. (2002) Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing* 23: 1741-1748.

Helfrich, S. R., D. McNamara, B. H. Ramsay, T. Baldwin, and T. Kasheta. (2007) Enhancements to, and Forthcoming Developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS). *Hydrological Processes* 21(12): 1576–1586. doi:10.1002/hyp.6720.

Huete, A. Didan, K. Miura, T. Rodriguez, EP Gao, X. and Ferreira, LG. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp. 195-213.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kattenberg, A., G. F. H. Grassl, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, T. Tokioka, A. J. Weaver, and T. M. L. Wigley, (1996) Climate models—Projections of future climate. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, J. T. Houghton et al.,Eds., *Cambridge University Press*, 285–357.

Kausrud, K.L., Mysterud, A., Steen, H., Vik, J.O., Østbye, E., Cazelles, B., Framstad, E., Eikeset, A.M., Mysterud, I., Solhøy, T. & Stenseth, N.C. (2008) Linking climate change to lemming cycles. *Nature*, 456, 93–97.

- Keyser, A. R., J. S. Kimball, R. R. Nemani, and S. W. Running. (2000) Simulating the effects of climatic change on the carbon balance of North American high-latitude forests. *Global Change Biology* 6 (Suppl. 1):185-195.
- Latifovic, R., and D. Pouliot. (2005) Multi-temporal land cover mapping for Canada: methodology and products. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31:347-363.
- Latifovic, R., Trishchenko, A., Chen, J., Park, W., Khlopenkov, K., Fernandes, R., Pouliot, D., Ungureanu, C., Luo, Y., Wang, S., Davidson, A. and Cihlar, J., (2005) Generating historical AVHRR 1 km baseline satellite data records over Canada suitable for climate change studies. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31, pp. 324–348.
- Li, L., and J. W. Pomeroy. (1997) Probability of occurrence of blowing snow, *J. Geophys. Res.*, 102(D18), 21955–21964, doi: 10.1029/97JD01522.
- Liston, G, and Sturm, M. (2002a) Winter precipitation patterns in arctic Alaska determined from a blowing-snow model and snow-depth observations. *J. Hydrometeor.*, 3, 646-659.
- Liston, G., Mcfadden, J.P., Sturm, M., and Pielke, R.A. (2002b) Modelled changes in Arctic tundra snow, energy and moisture fluxes due to increased shrubs. *Global Change Biology* 8:17–32.
- Marsh, P., Onclin, C., Russell, M., and Pohl, S. (2003) Effects of shrubs on snow processes in the vicinity of the Arctic treeline in NW Canada. In: *Proceedings of the Northern Research Basins 14th International Symposium and Workshop*, 25–29 August 2003, Kangerlussuaq/Søndre Strømfjord, Greenland. 113–118.
- Marsh, P., Bartlett, P., MacKay, M., Pohl, S. & Lantz, T. (2010) Snowmelt energetics at a shrub tundra site in the western Canadian Arctic. *Hydrological Processes*, 24, 3603-3620.
- McManus K, Morton D, Masek J, Wang D, Sexton J, Nagol J, Ropars P, Boudreau S. (2012) Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biol.* 18 (7):2313-2323
- Mekis, É and Brown, R. (2010) Derivation of an adjustment factor map for the estimation of the water equivalent of snowfall from ruler measurements in Canada. *Atmosphere-Ocean* 48 (4), 284–293 doi:10.3137/AO1104.2010
- Mekis, É and Vincent, L.A. (2011) An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean* 49(2), 163-177.
- Myers-Smith I H, et al. (2011) Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities *Environmental Research Letters* 6045509
- Myneni, R., Hall, F., Sellers, P. and Marshak, A., (1995) The meaning of spectral vegetation indices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, pp. 481–486.

- Olthof, I., D. Pouliot, R. Latifovic, and W. Chen. (2008) Recent (1986-2006) vegetation specific NDVI trends in Northern Canada from satellite data. *Arctic* 61: 381- 394.
- Olthof, I. and Pouliot, D. (2009) Treeline vegetation composition and change in Canada's western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling. *Remote Sensing of Environment* .114, 4; 805-815
- Payette, S. (1983) The forest tundra and present tree-lines of the northern Québec-Labrador peninsula. *Nordicana*, 47, 3–23.
- Pisaric, M. F. J., Carey, S. K., Kokelj, S. V., & Youngblut, D. (2007) Anomalous 20th century tree growth, Mackenzie Delta, Northwest Territories. Canada. *Geophysical Research Letters*, 34, L05714. doi: 10.1029/2006GL029139
- Pomeroy JW, Bewley DS, Essery RLH, Hedstrom NR, Link T, Granger RJ, Sicart JE, Ellis CR, Janowicz JR. (2006) Shrub tundra snowmelt. *Hydrological Processes* 20: 923–941
- Pouliot, D., R. Latifovic, and I. Olthof. (2008) Detection and evaluation of NDVI trends in Canada from 1985–2006. *International Journal of Remote Sensing* 30: 149-168.
- Pouliot, D., Latifovic, R. and Olthof, I. (2009). Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006, *International Journal of Remote Sensing*,30:1, 149 — 168
- Ramage, J. M., and Isacks, B. L. (2002) Determination of melt-onset and refreeze timing on southeast Alaskan icefields using SSM/I diurnal amplitude variations, *Ann. Glaciol.*, 34, 391–398.
- Robinson, D. et al. (2012) NOAA/NCDC Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE). New Jersey, USA: Rutgers University Global Snow Lab.
- Seglenieks, F. and R. Soulis. (2000). “Generation of square grid normals for Canada – Phase 1.” U. Waterloo Contractor’s Report to Climate Research Branch, Meteorological Service of Canada, Downsview, ON.
- Serreze, M. C., Barrett, A.P., Stroeve, J. C., Kindig, D. N., Holland, M. M. (2009) The emergence of surface-based Arctic amplification . *The Cryosphere*, 3, 11–19
- Strack JE, Pielke RA, Sr., Liston GE. (2007) Arctic tundra shrub invasion and soot deposition: consequences for spring snowmelt and near surface air temperatures. *Journal of Geophysical Research* 112: DOI: 10.1029/2006JG000297.

Sturm, M., McFadden, J.P., Liston, G.E., Chapin III, F.S., Racine, C.H. & Holmgren, J. (2001) Snow-shrub interactions in arctic tundra: a hypothesis with climatic implications. *Journal of Climate* 14: 336–344.

Swain, P. H., & Davis, S. M. (1978) Remote sensing: the quantitative approach. New York: McGraw-Hill.

Tedesco, M. (2007) Snowmelt detection over the Greenland ice sheet from SSM/I brightness temperature daily variations, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02504, doi: 10.1029/2006GL028466

Tingley, Martin P. Huybers, Peter.(2013) Recent temperature extremes at high northern latitudes unprecedented in the past 600 years. *Nature*, 496 (7444): 201 DOI: 10.1038/nature11969

Thomas, V., Treitz, P., Jelinski, D., Miller, J., Lafleur, P. & McCaughey, H. (2002) Image classification of a northern peatland complex using spectral and plant community data. *Remote Sensing of Environment*. 84: 83–99

Vincent, L. A., X. L. Wang, E. J. Milewska, H. Wan, F. Yang, and V. Swail , (2012) A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis, *J. Geophys. Res.*, 117, D18110, doi:10.1029/2012JD017859.

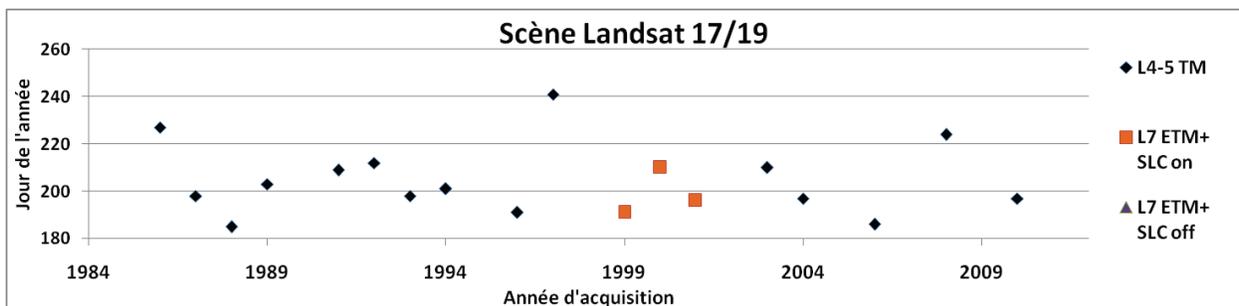
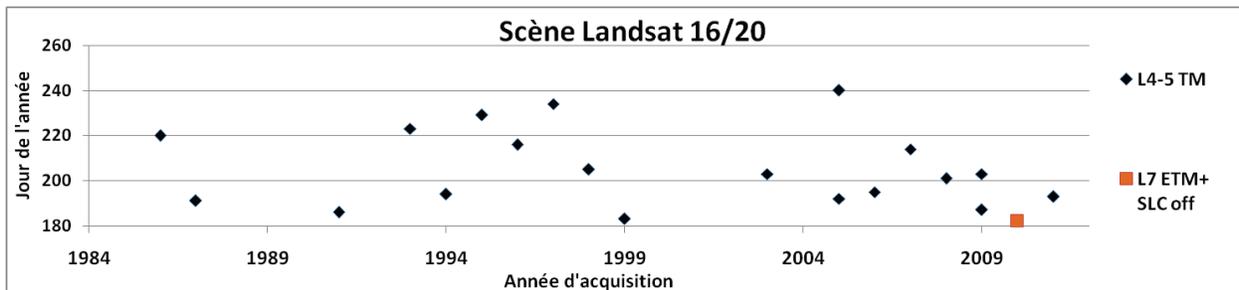
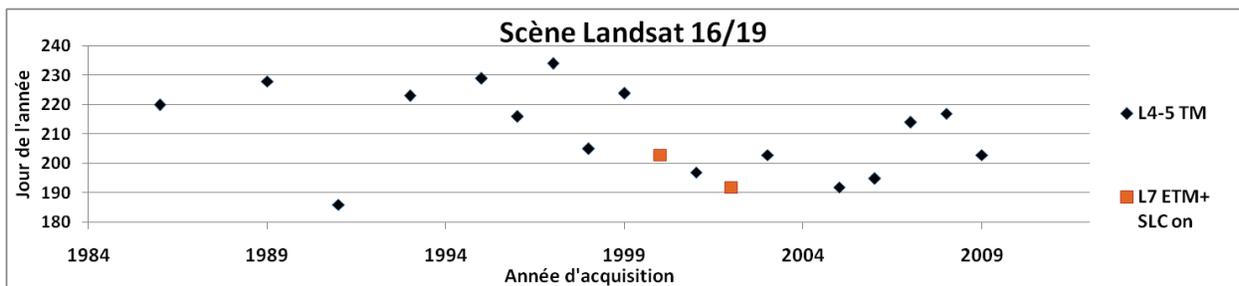
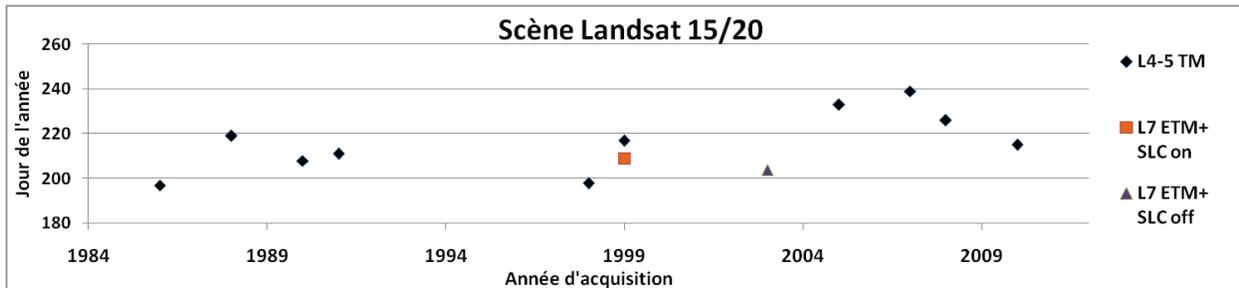
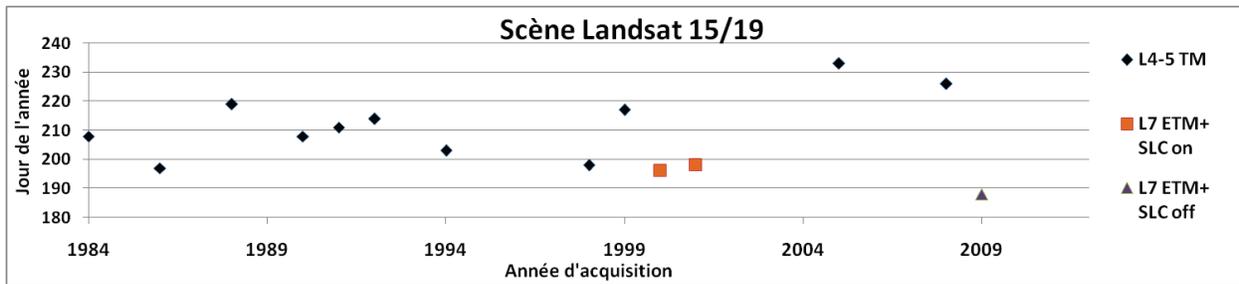
Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg and A. Niitsoo. (2000) Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38(3): 395-429.

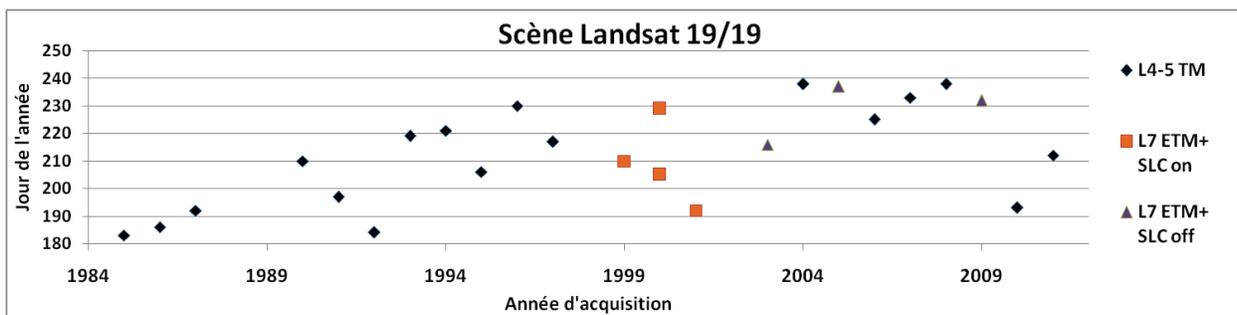
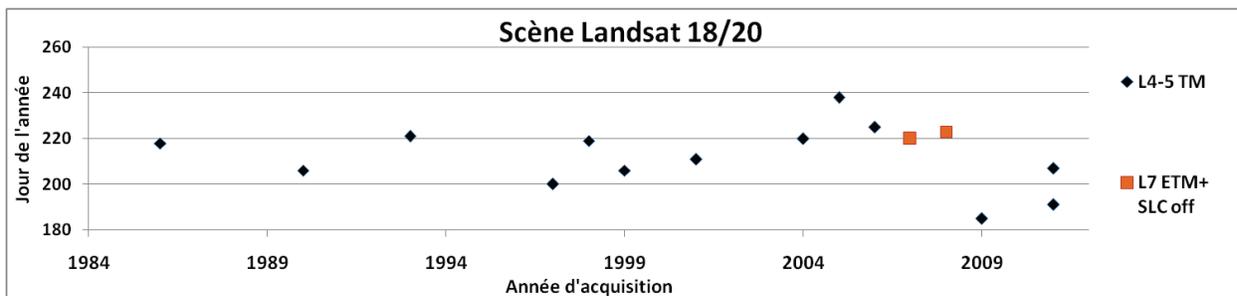
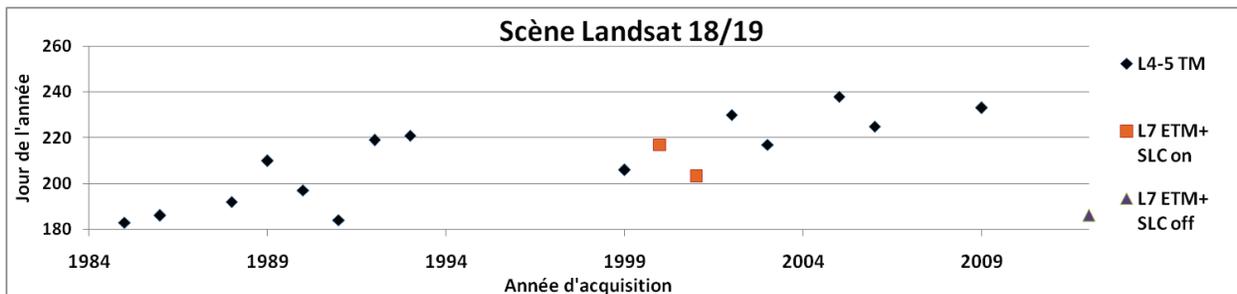
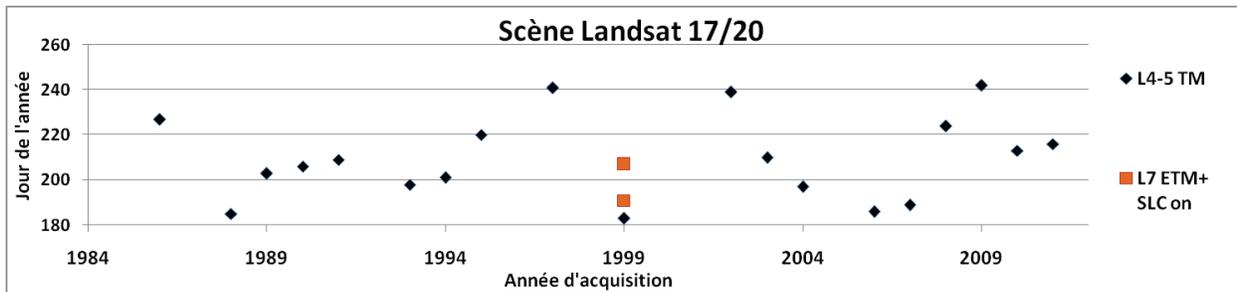
Zhang T. (2005) Influence of seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview. *Rev. Geophys.*, 43, RG4002/2005, 23p.

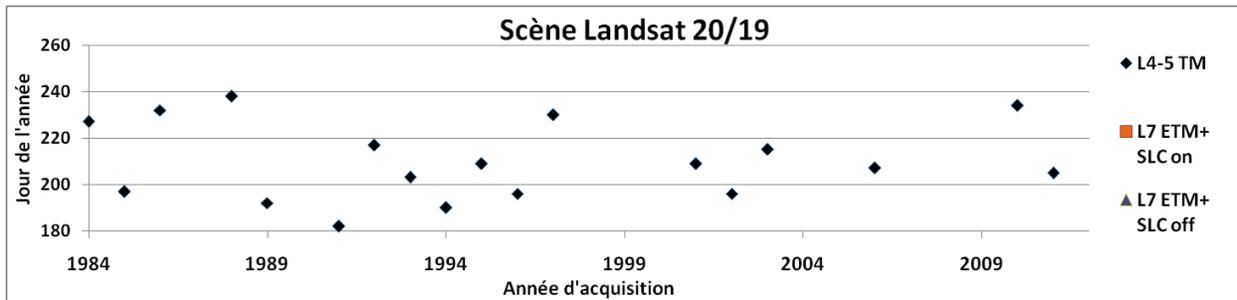
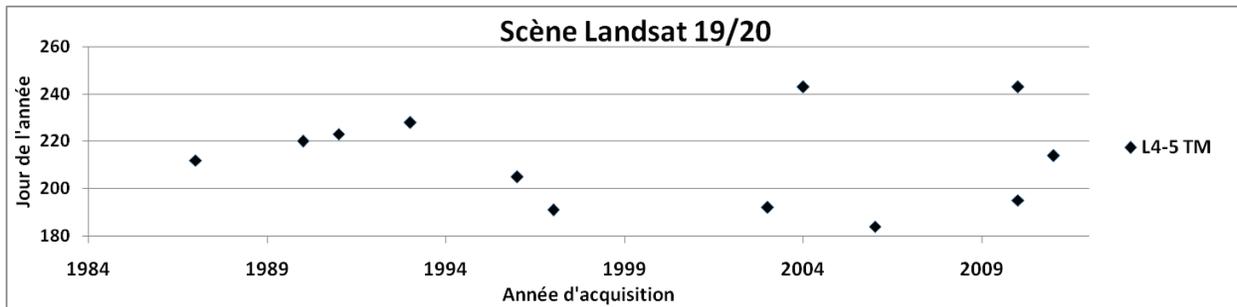
Zhao h, Fernandes R. (2009) Daily Snow Cover estimation from AVHRR Polar Pathfinder Data over Northern Hemisphere Land Surfaces during 1982-2004. *J Geophys Res*

Zhu, Z. and Woodcock, C. E., (2012) Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment* doi:10.1016/j.rse.2011.10.028

Annexe 1: Inventaire des images Landsat utilisées

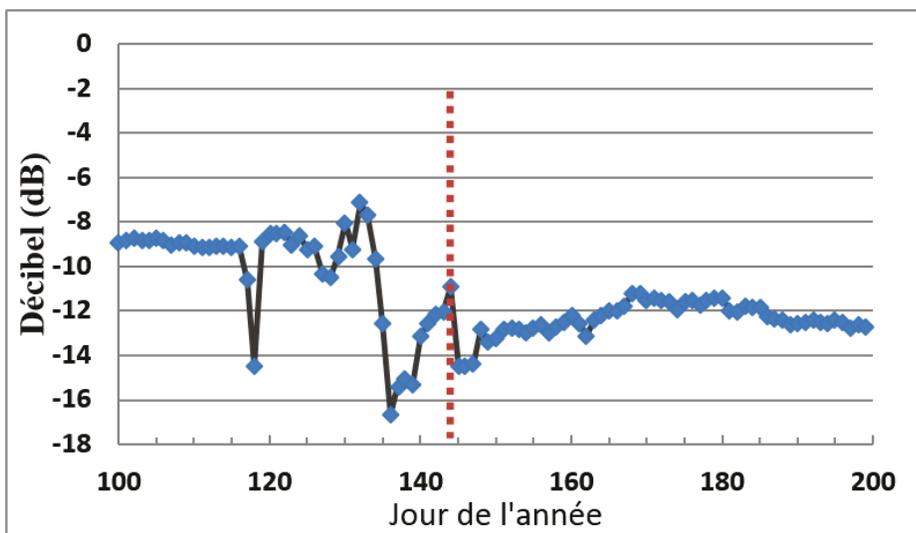




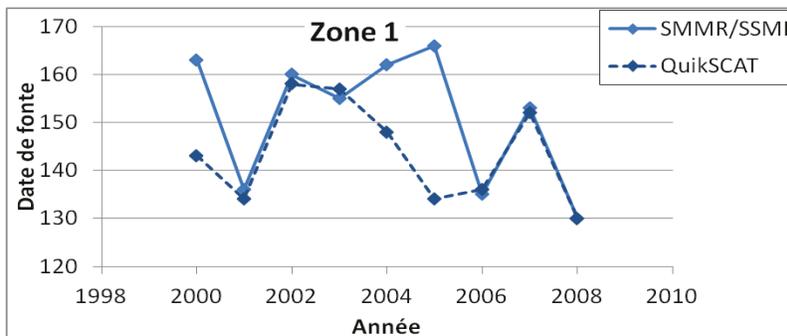


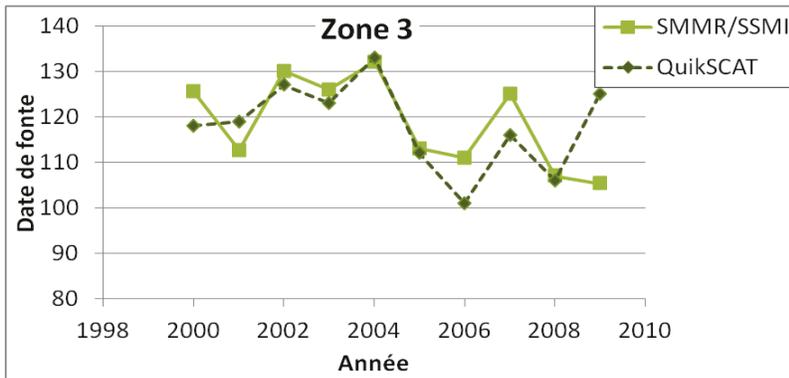
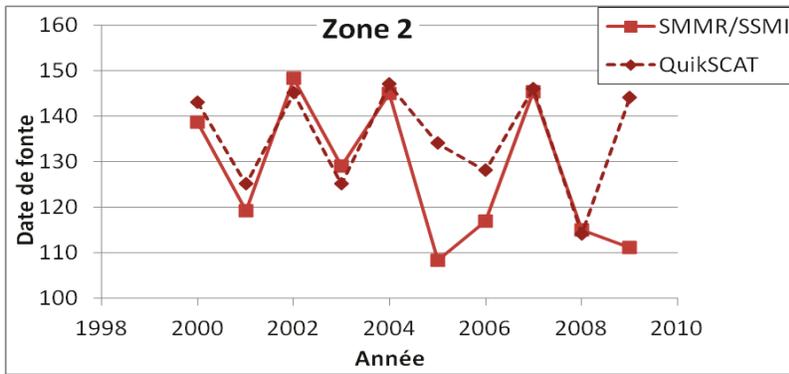
Annexe 2: Calcul du début de la fonte continue de la neige à partir de QuikSCAT

Comme les micro-ondes actives sont très sensibles à la permittivité effective de la neige et que le signal diminue lorsque la neige est mouillée, elles servent de référence pour mieux comprendre les données SSM/I et valider les dates de fontes qui en sont dérivées sur une plus longue période. Pour cette étude, le début de la fonte continue correspond à la dernière journée à laquelle le signal de rétrodiffusion a chuté d'au moins 3 décibels en deux journées. Le graphique ci-dessus offre un exemple de la méthode de seuillage pour l'année 2000 sur la zone 2. La ligne pointillée rouge indique la dernière date à laquelle le signal de rétrodiffusion a chuté d'au moins 3 décibels en 2 journées.

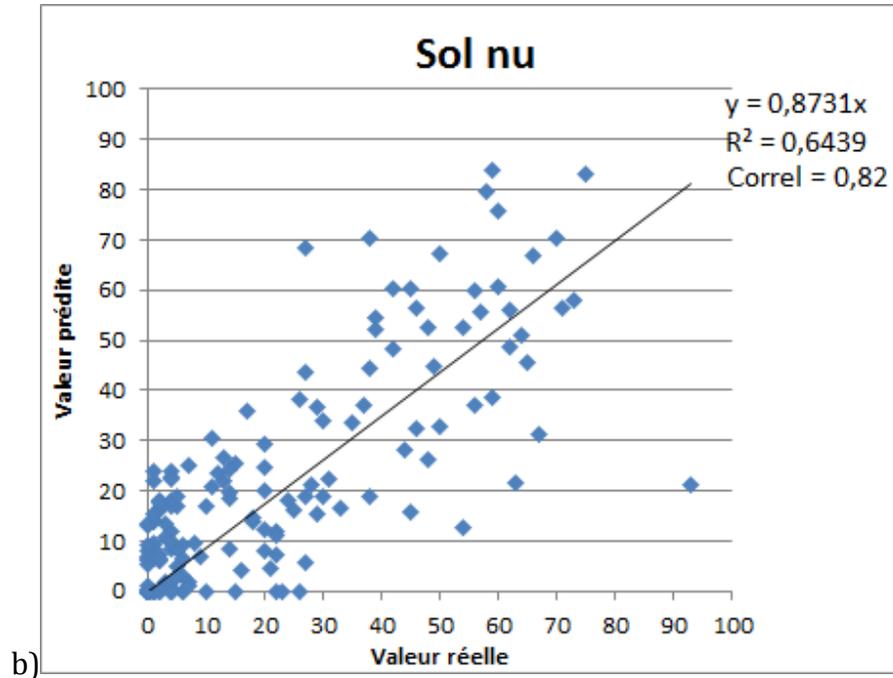
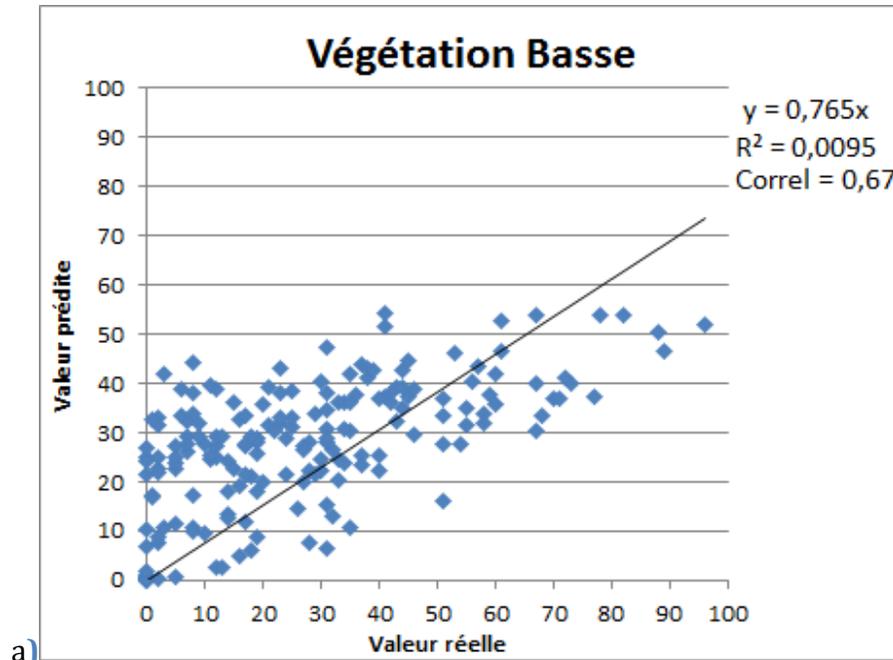


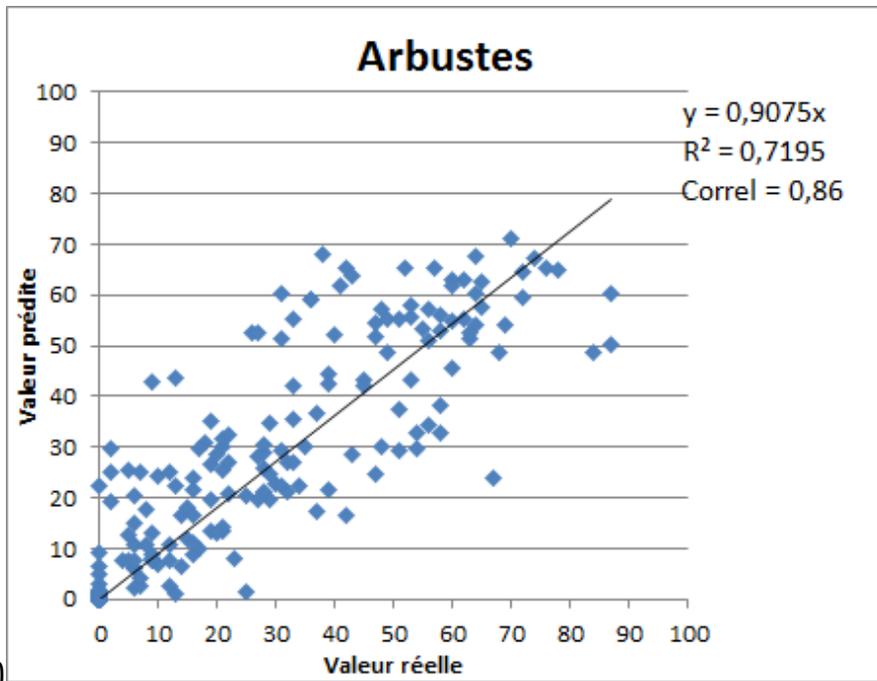
Les trois prochaines figures montrent la comparaison du début de la fonte continue dérivée des capteurs SMMR/SSM/I et QuikSCAT sur la période de 2000 à 2009 pour les trois zones.





Annexe 3: Correspondance entre les valeurs prédites par les modèles d'arbre de régression et les valeurs réelles provenant de la classification



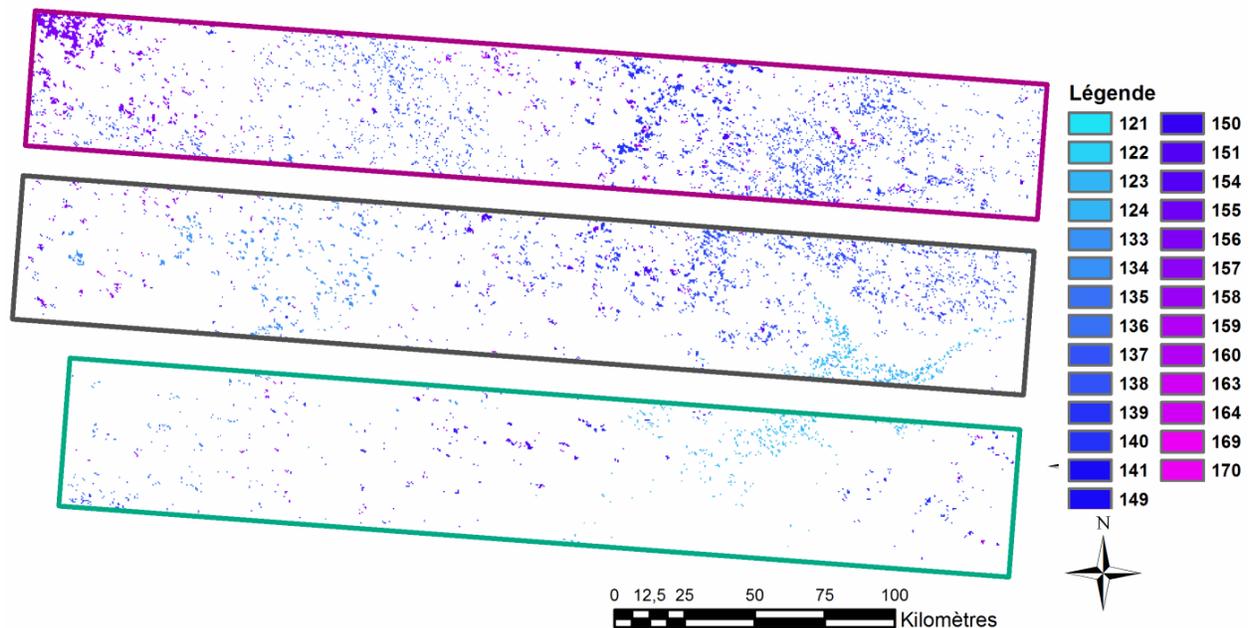


c)

Comparaison entre les valeurs de Fc prédites par le modèle d'arbre de régression et des valeurs de Fc réelles prévenants de la classification d'images à haute résolution.

Annexe 4: Fraction du couvert & date de fonte dérivée de MOD10a1

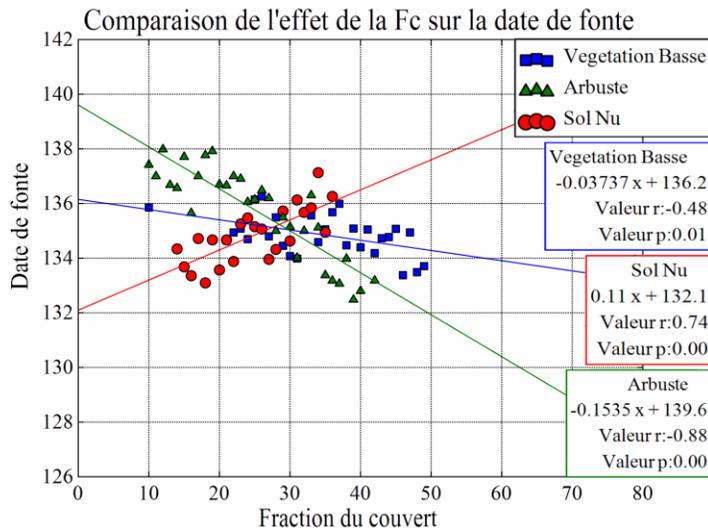
Cette section reprend l'analyse de la fraction du couvert & date de fonte dérivée de MODIS, mais avec le produit MODIS journalier, qui a l'avantage de mieux définir la date de fonte, mais qui est aussi moins bien réparti spatialement à cause des nuages. Tout comme le produit MODIS MOD10a2, le produit MOD10a1 a une résolution spatiale de 500 m et une étendue temporelle de 2000 à 2012. Seule l'année 2006 avait suffisamment de données pour être analysée. La figure ci-dessous montre la distribution des points où l'on a pu extraire une date de la disparition de la neige dans les 3 cadrans considérés. Seulement les pixels affichant une valeur avec neige suivie d'une valeur sans neige le lendemain ont été utilisés. Tous les pixels affichant une valeur sans neige suivant une valeur de nuage ont été éliminés. Ainsi, seulement les pixels non influencés par les nuages ont été utilisés pour déterminer la date de fonte. Ce procédé assure une représentation précise de la date de fonte des pixels, mais réduit considérablement la quantité de pixels utilisable.



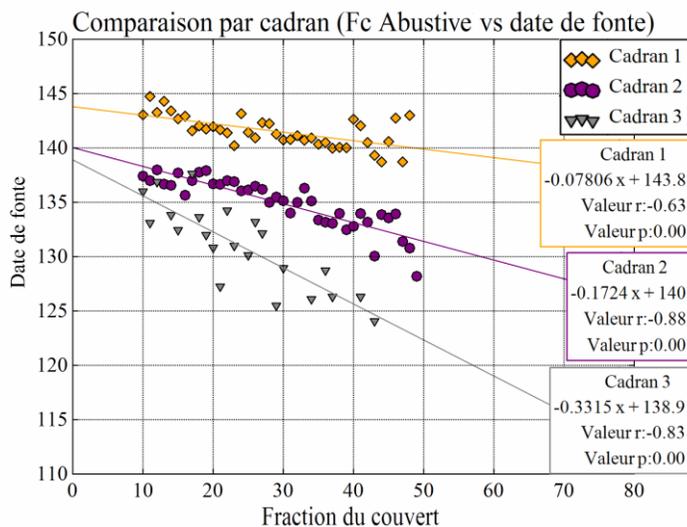
Afin de pouvoir comparer la date de fonte et le pourcentage d'arbuste, seulement les pixels d'arbuste correspondant au pixel de fonte de la neige ont été utilisés. Seulement les fractions du couvert au-delà de 10% ont été utilisées et seulement les moyennes de pourcentage contenant un minimum de 50 pixels ont été conservées pour faire les régressions.

Tout comme pour la comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige en 2006 pour le cadran 2 à partir du produit MOD10a2 (Fig. 5.25), l'analyse à partir du produit MOD10a1 montre que l'augmentation de la Fc arbustive et de végétation basse entraîne une date de fonte plus précoce de la neige alors que l'augmentation de la Fc de sol nu entraîne une date de fonte plus tardive. Cependant, de l'effet de la Fc arbustive est amplifiée. Il semble que l'utilisation du produit MODIS quotidien permet de mieux différencier l'effet du couvert arbustif

de la végétation basse sur la date de fonte de la neige (on passe respectivement de -5 à -2 jours pour la même variation de fraction du couvert).



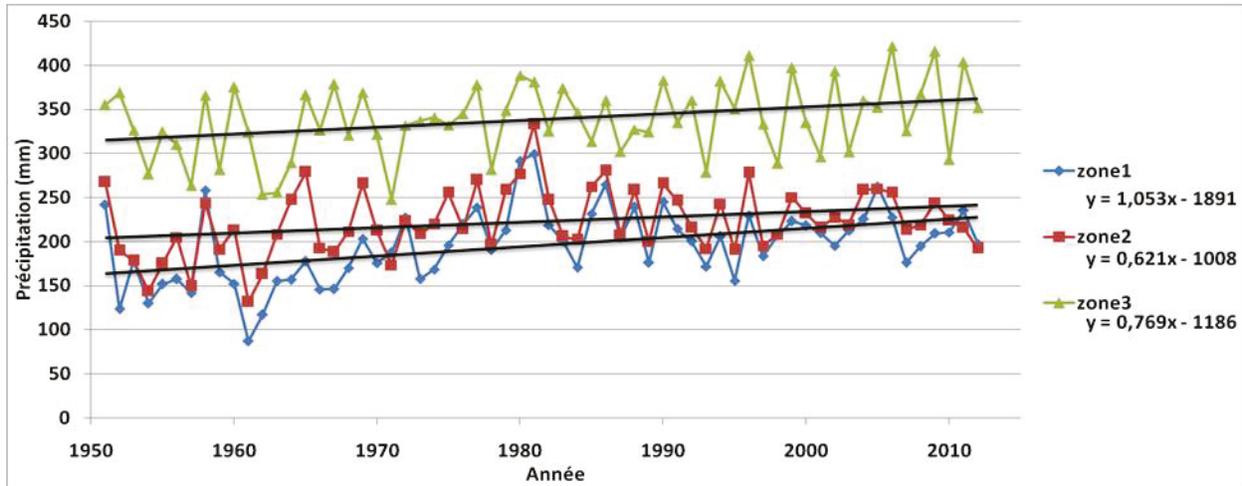
Tout comme pour la comparaison de l'effet de la fraction du couvert arbustif sur la fonte de la neige en 2006 pour les trois zones à partir du produit MOD10a2 (Fig. 5.26), la comparaison à partir du produit MOD10a1 montre une différence d'amplitude de l'effet de la Fc arbustive sur la date de fonte selon les différents cadrans considérés. Les cadrans 2 et 3 affichent une amplitude de l'effet de la Fc arbustive plus importante (-0.17 et -0.33 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc respectivement) que le cadran 1 (-0.08 jour par augmentation d'un pour cent de la Fc). Il semble y avoir dans cette évolution un effet d'amplification avec l'augmentation de la végétation qui caractérise chacune des zones (zones 3>zone2>zone1).



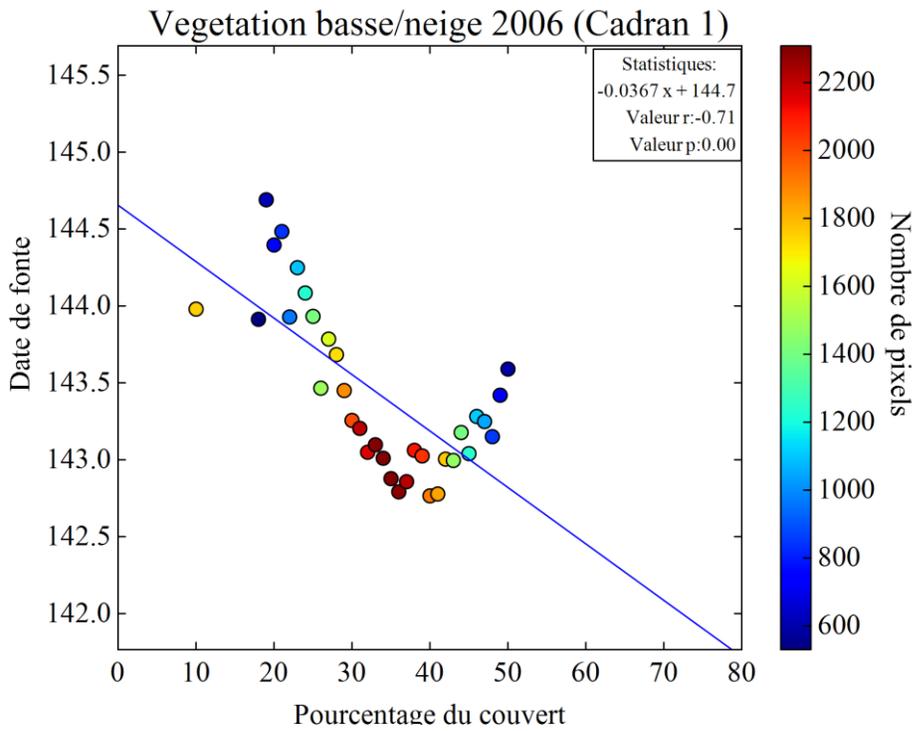
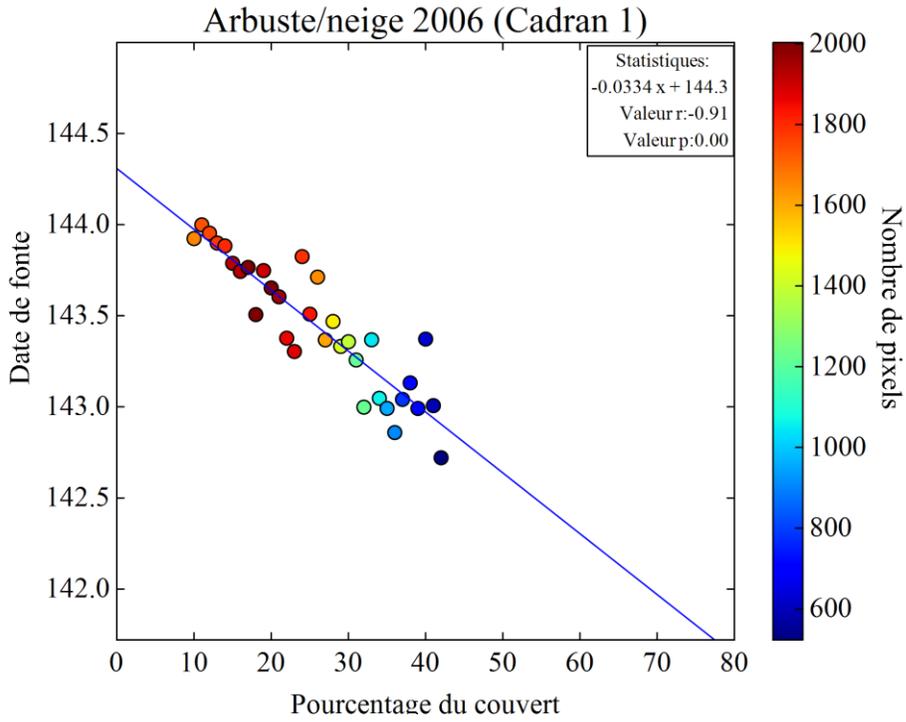
Les résultats avec MODIS journalier confirment l'analyse précédente avec MODIS hebdomadaire, et en valident par le fait même la méthodologie.

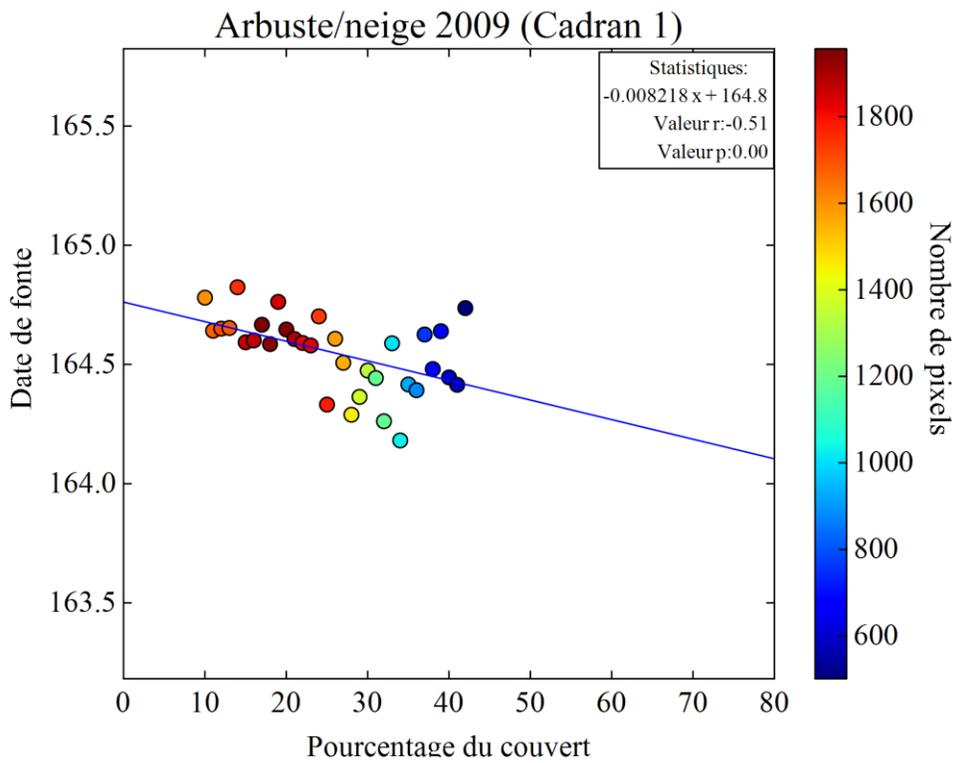
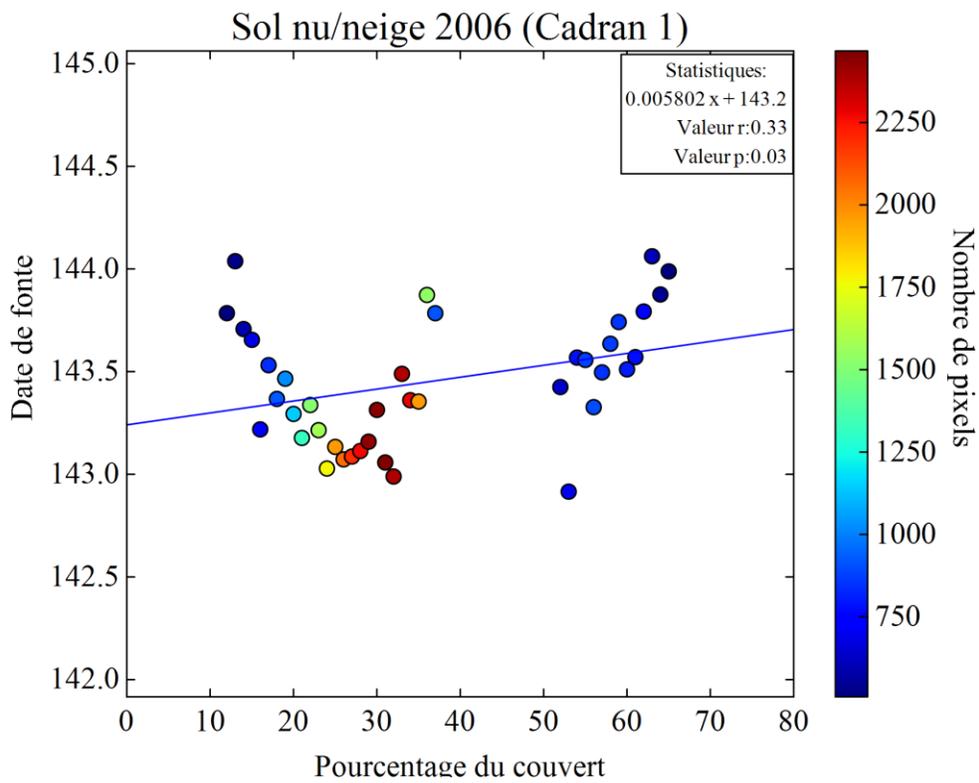
Annexe 5: Précipitation neigeuses (1951-2012)

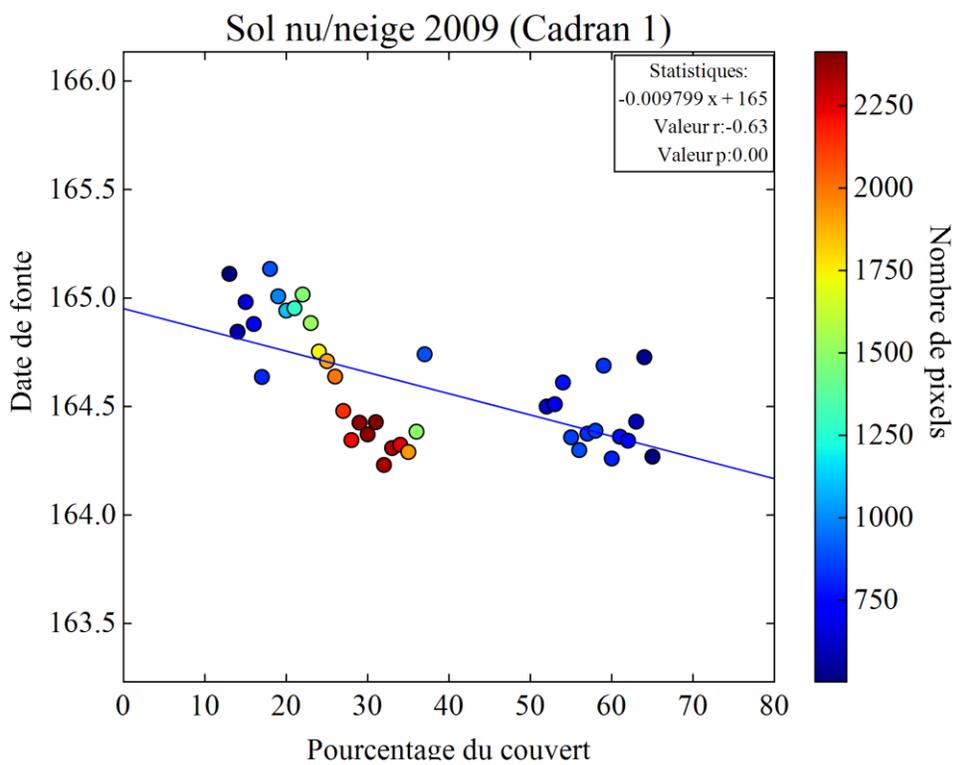
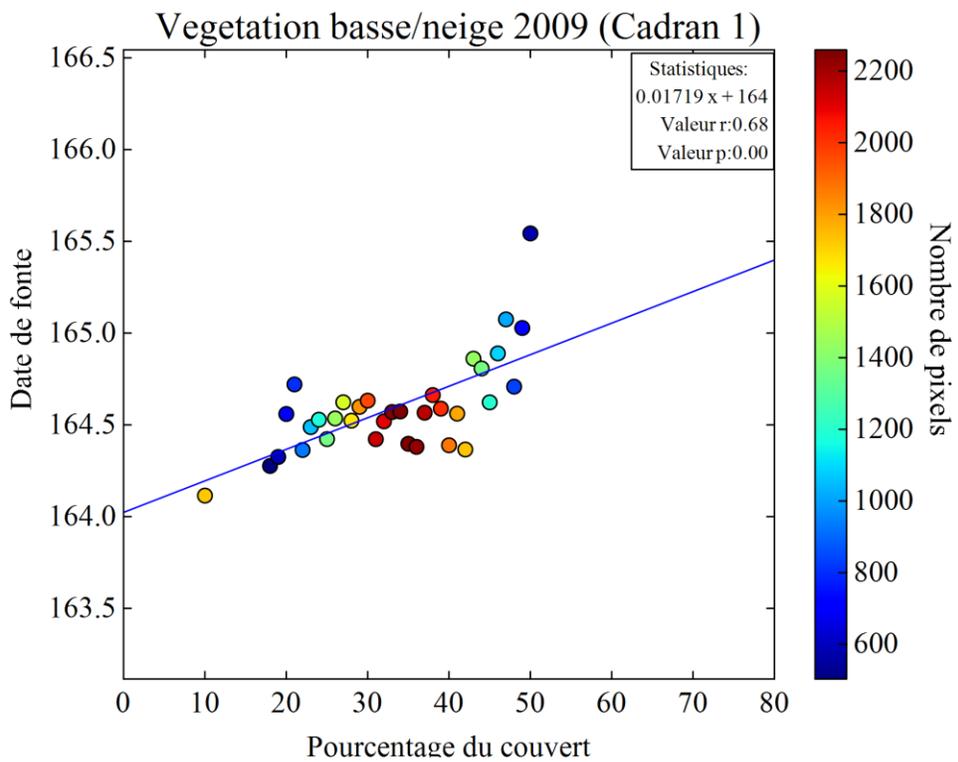
Les précipitations neigeuses ont augmenté significativement dans les 3 zones. La zone 1 a connu une augmentation de 1,05 mm par année (p: 0), soit une augmentation de 54,26 mm (33 % par rapport à la moyenne) au cours des 61 dernières années. La zone 2 a connu une augmentation de 0,62 mm par année (p: 0,019), soit une augmentation de 37,9 mm (17% par rapport à la moyenne) au cours des 61 dernières années. Finalement, la zone 3 a connu une augmentation de 0,77 mm par année (p: 0,008), soit une augmentation de 46,94 mm (14 % par rapport à la moyenne) au cours des 61 dernières années.

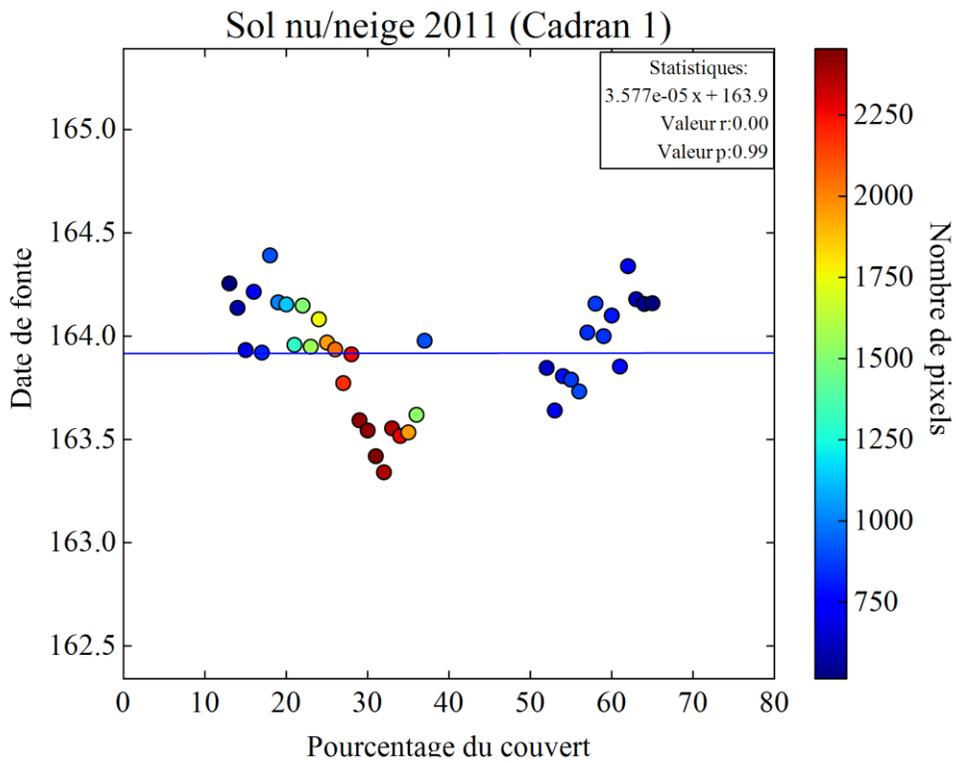
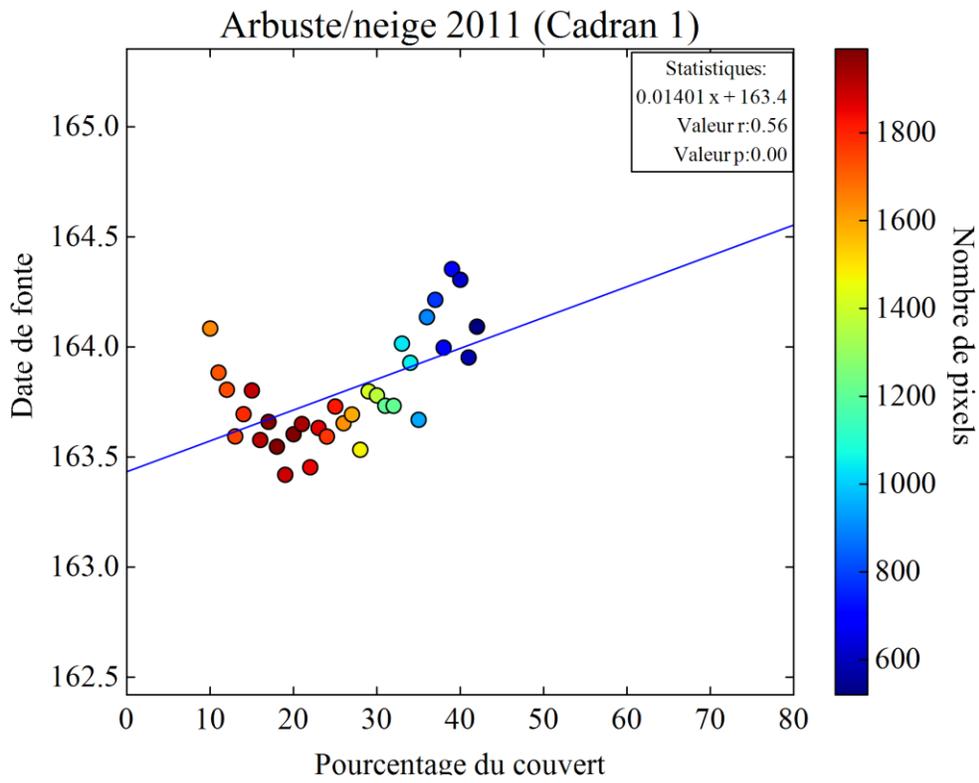


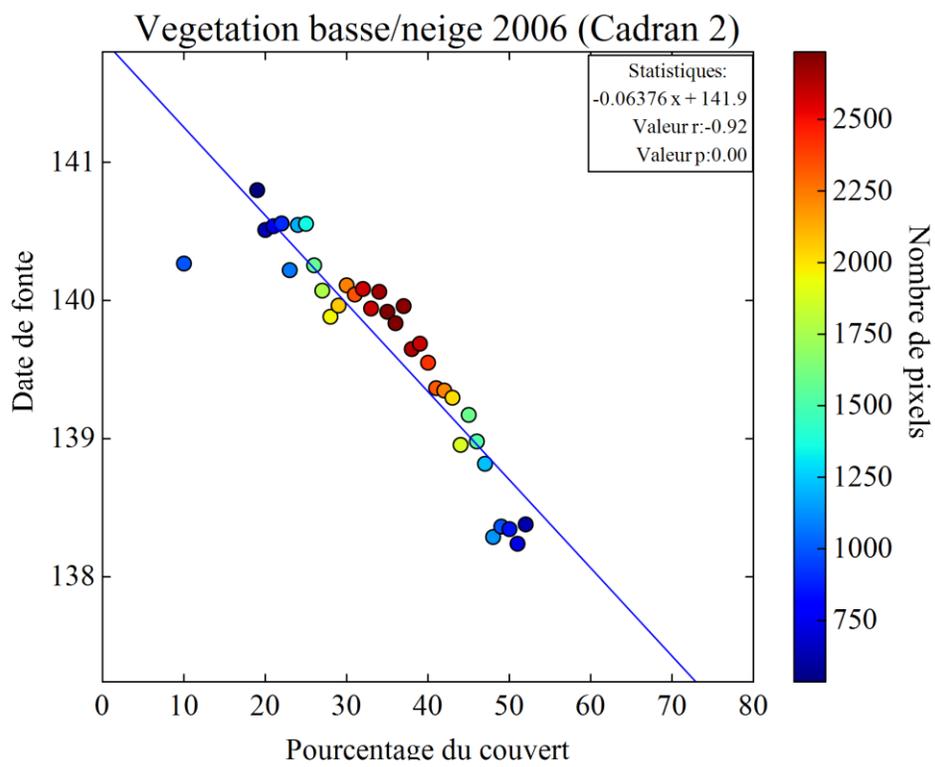
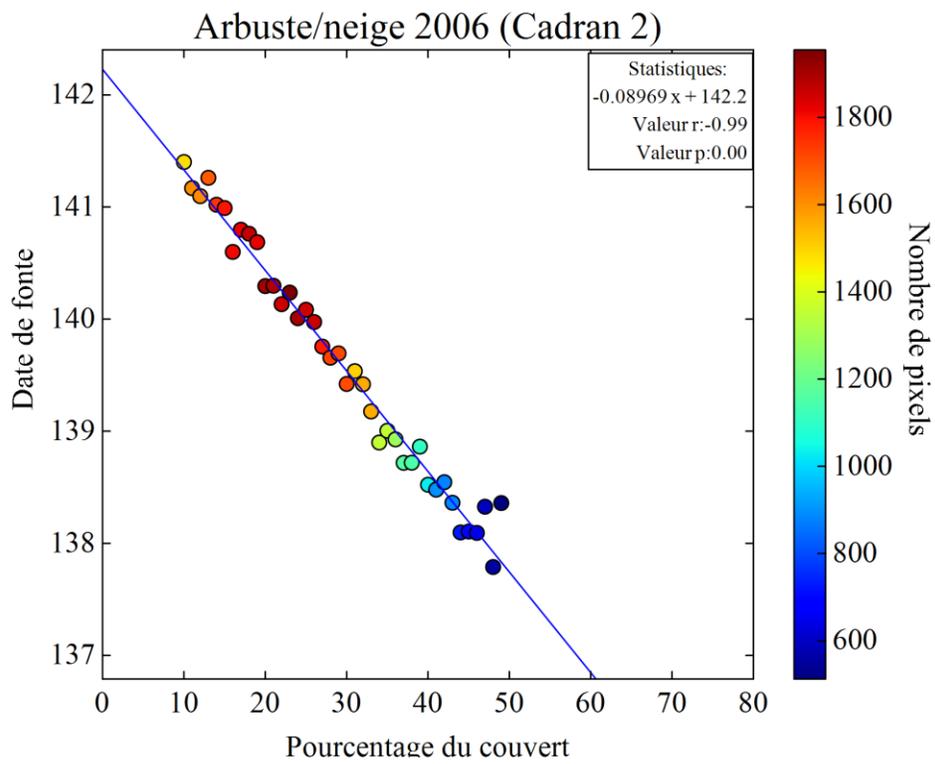
Annexe 6: Effet de la Fc sur la fonte de la neige

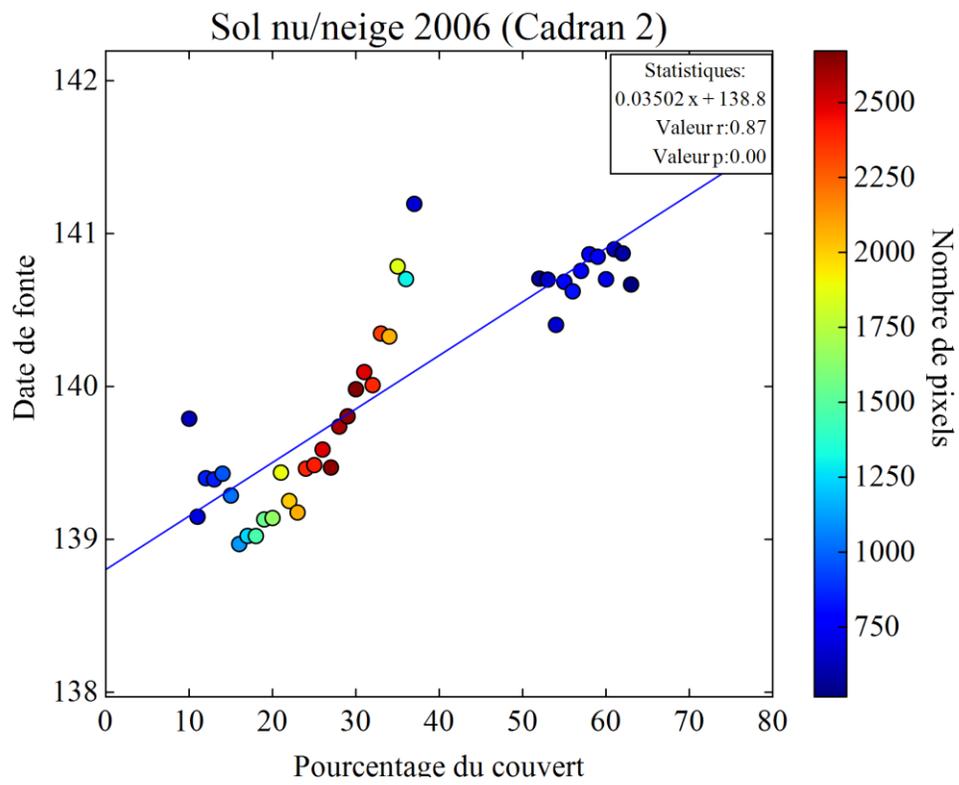


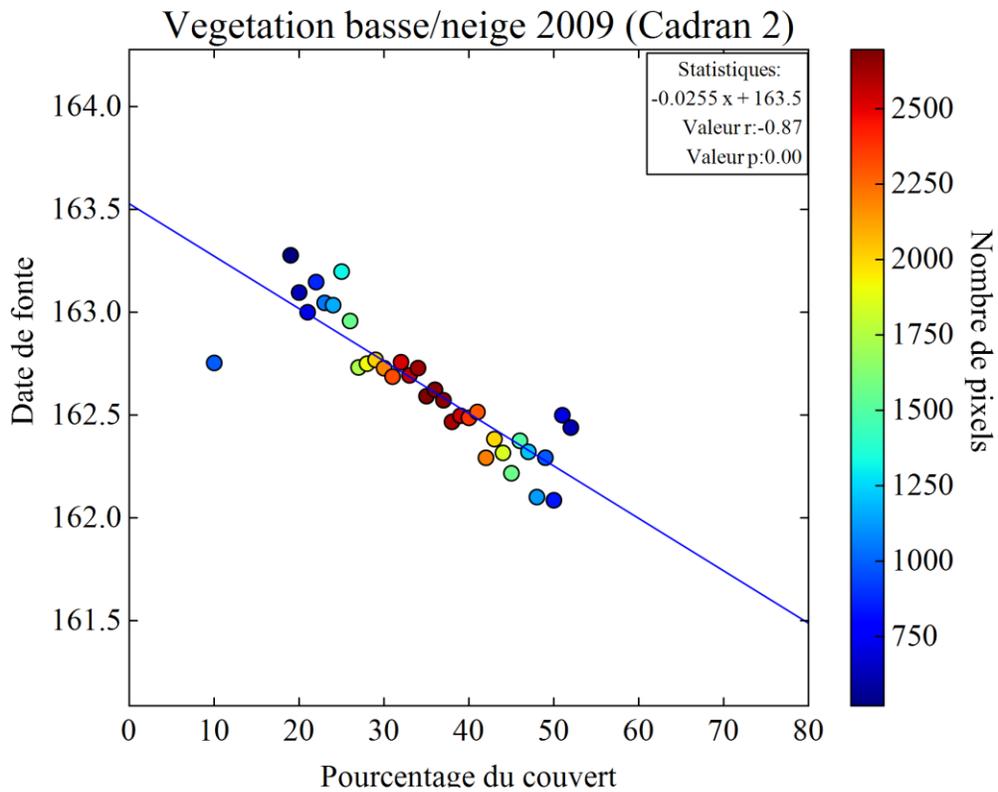
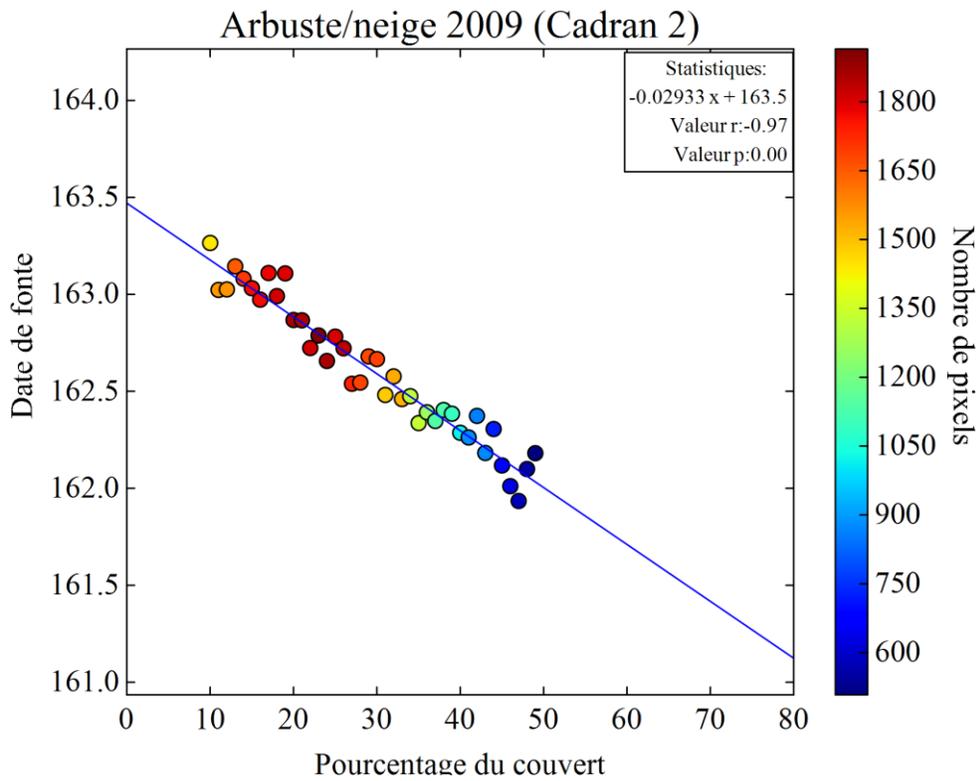


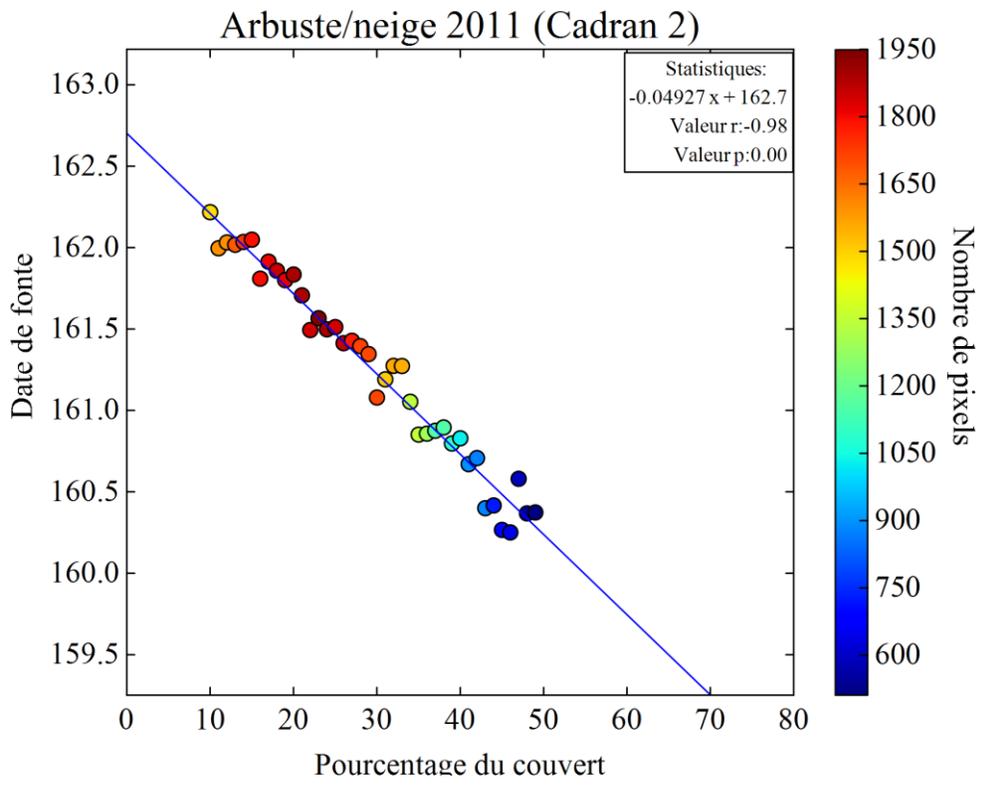
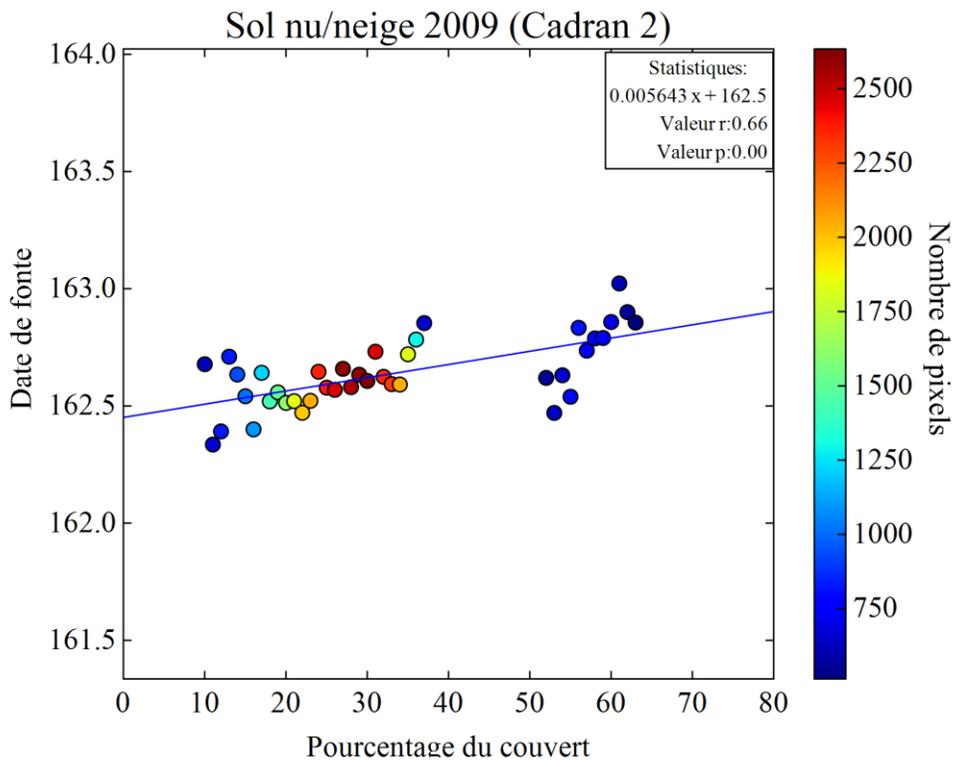


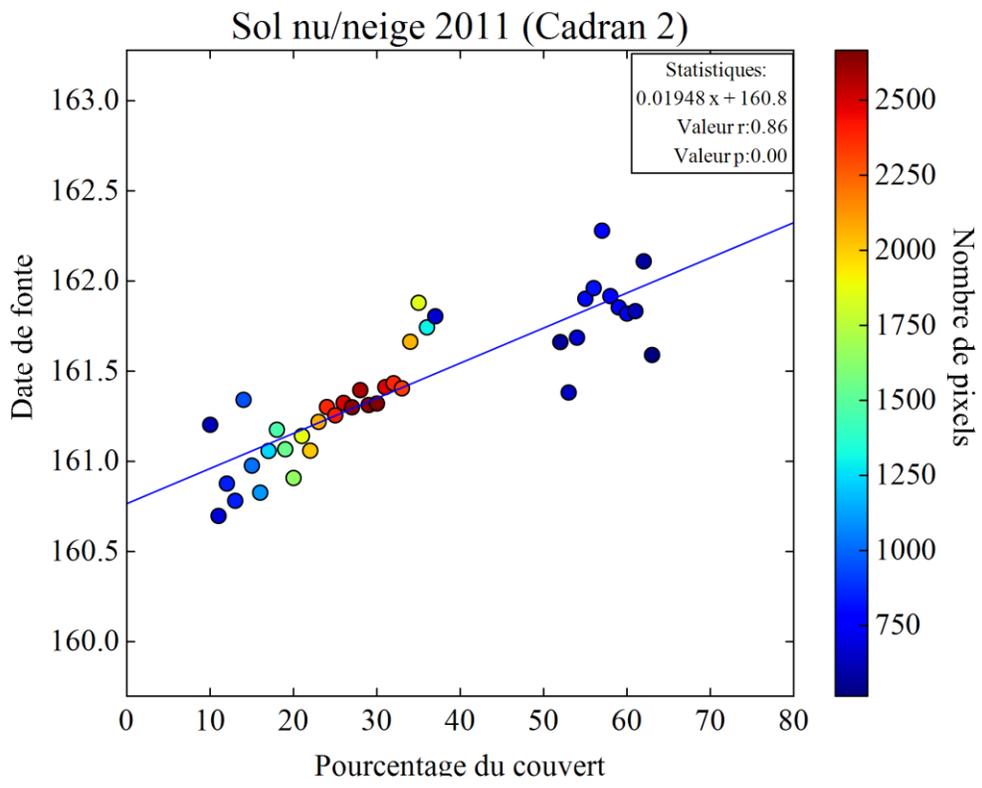
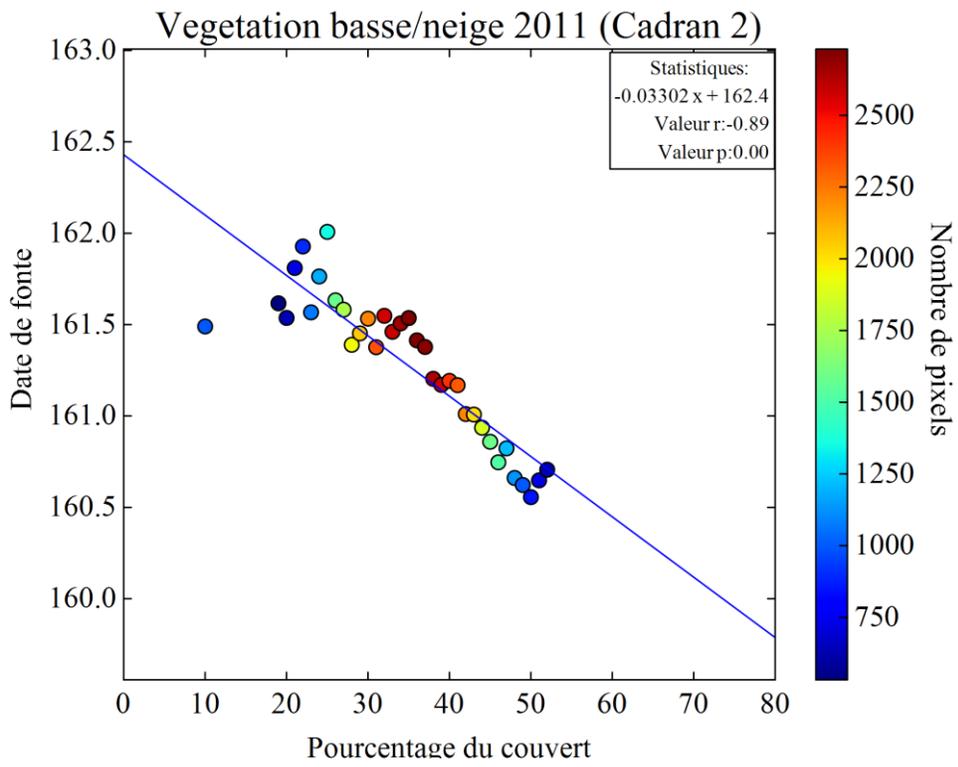


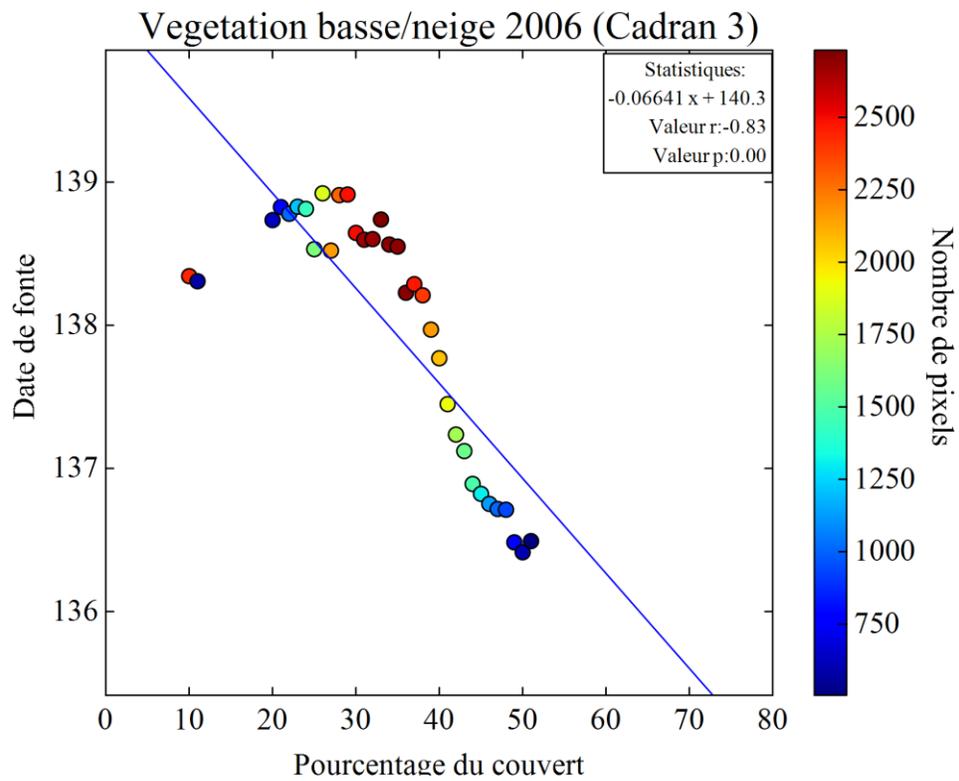
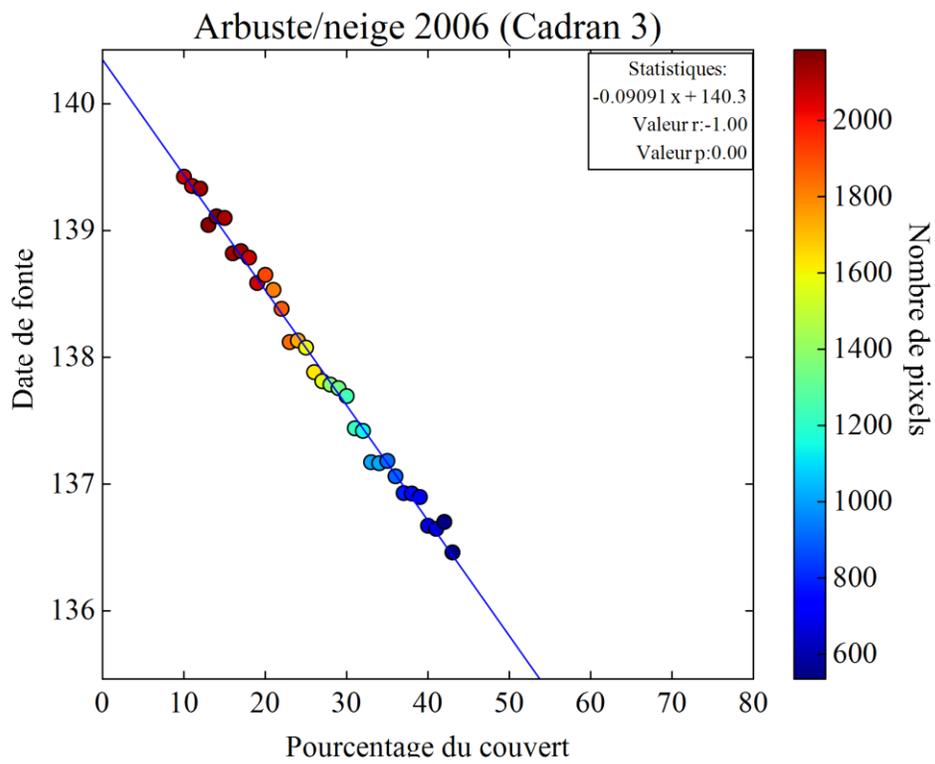




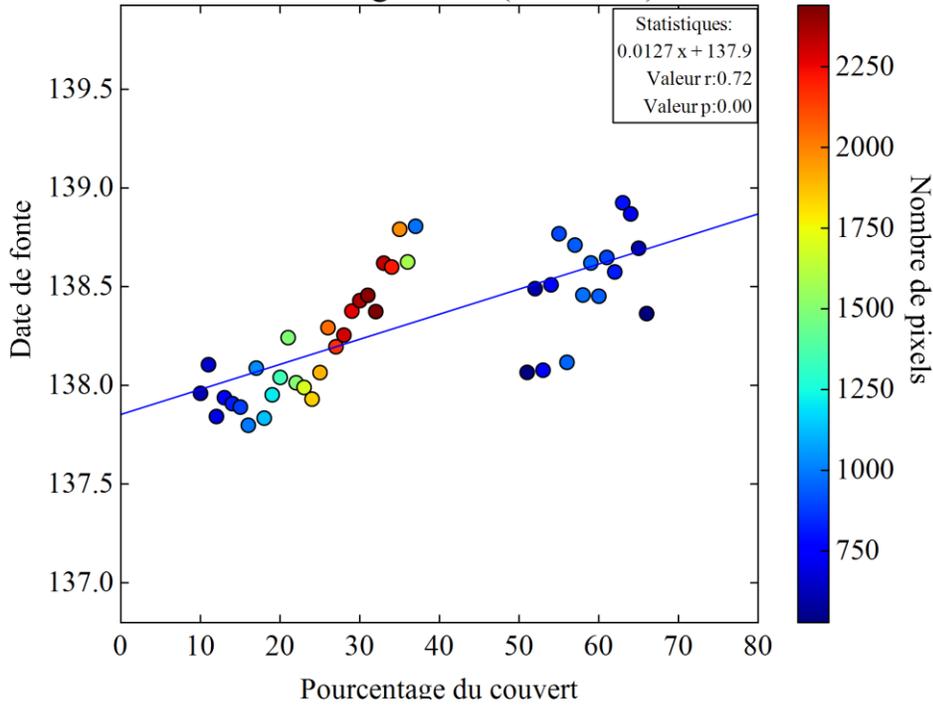




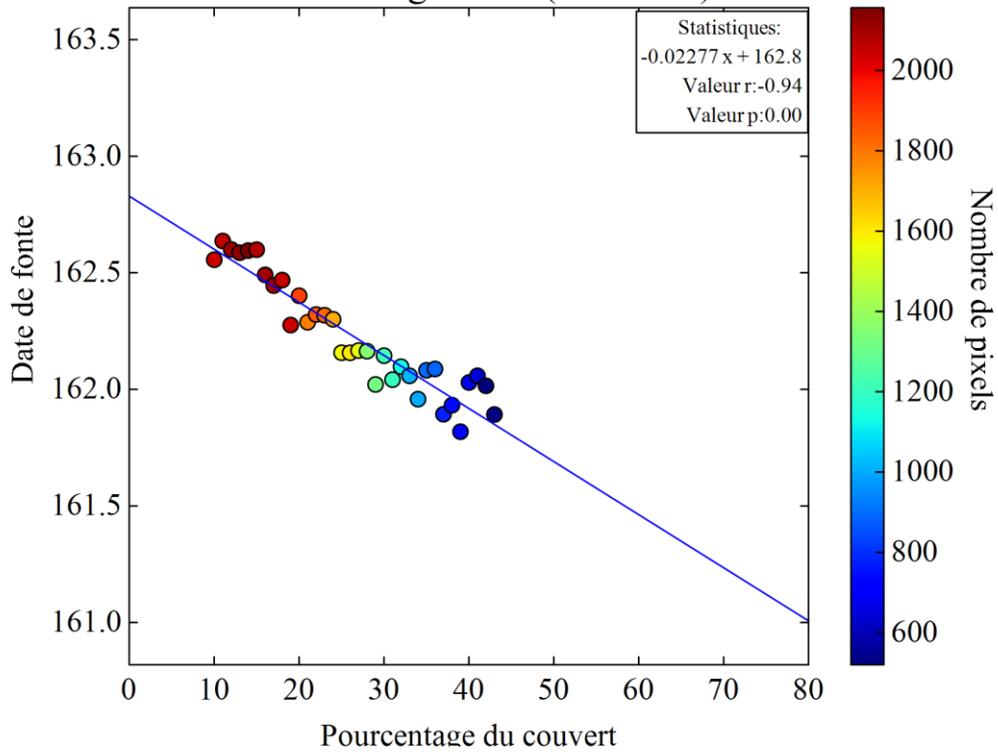


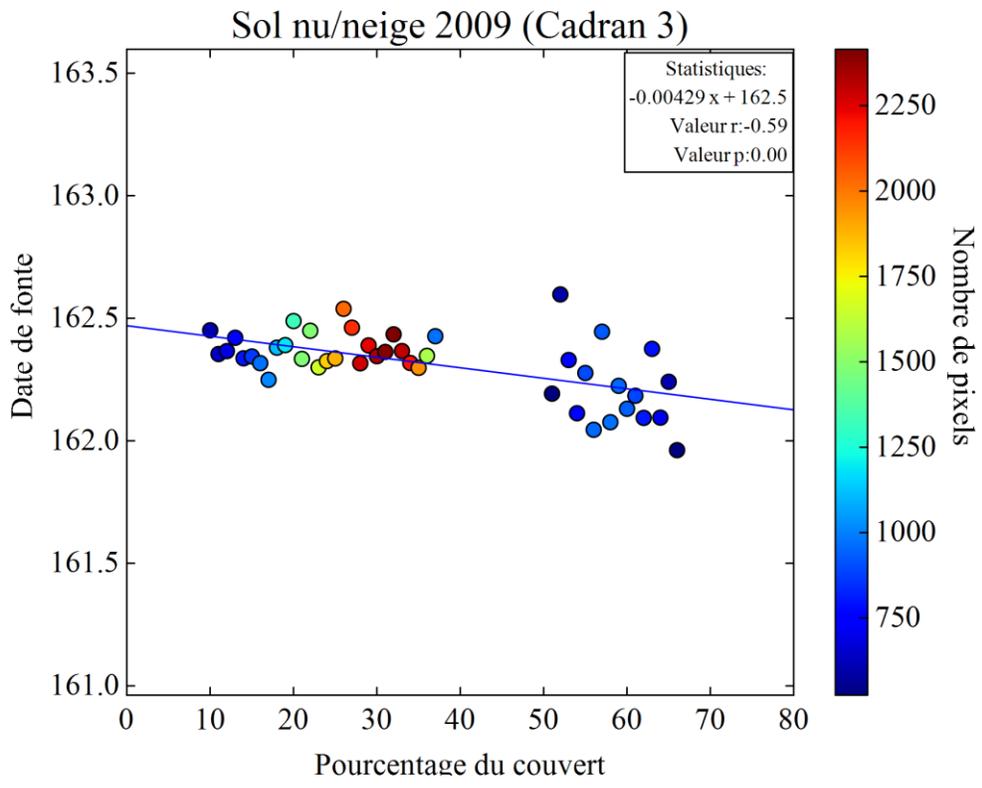
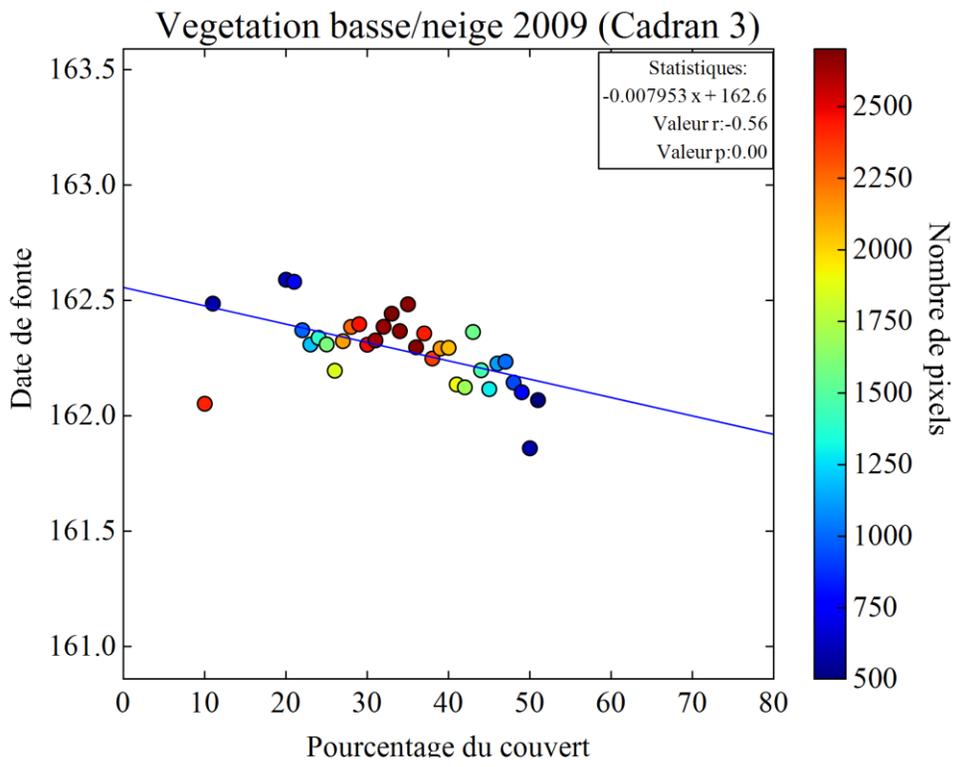


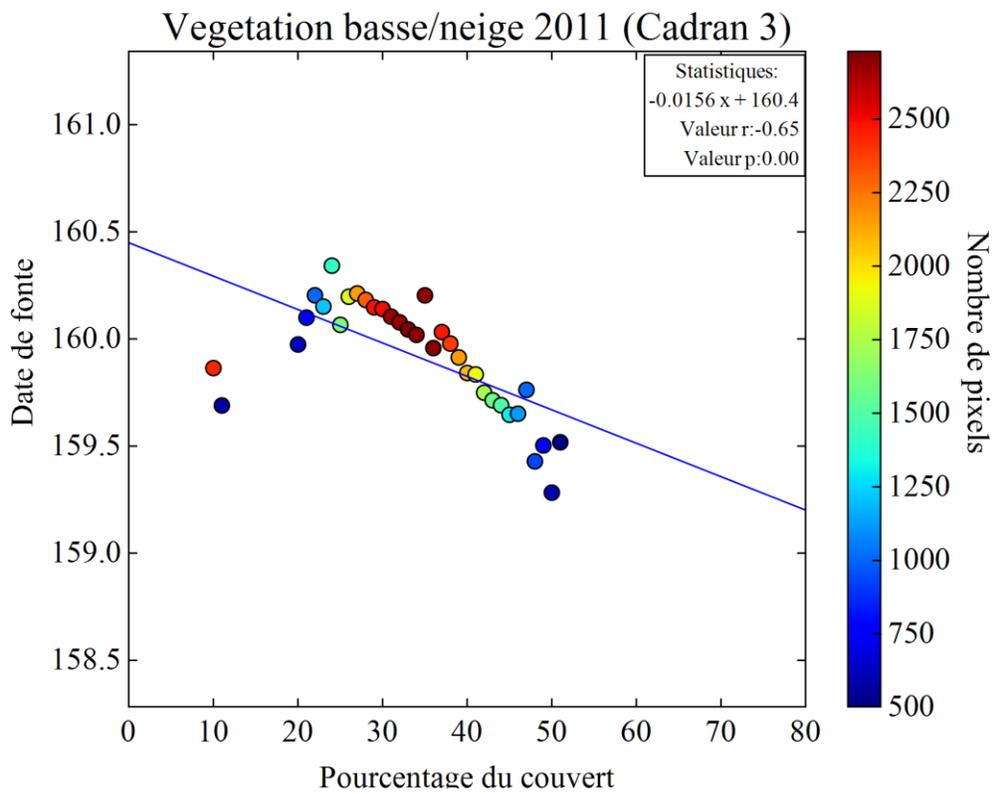
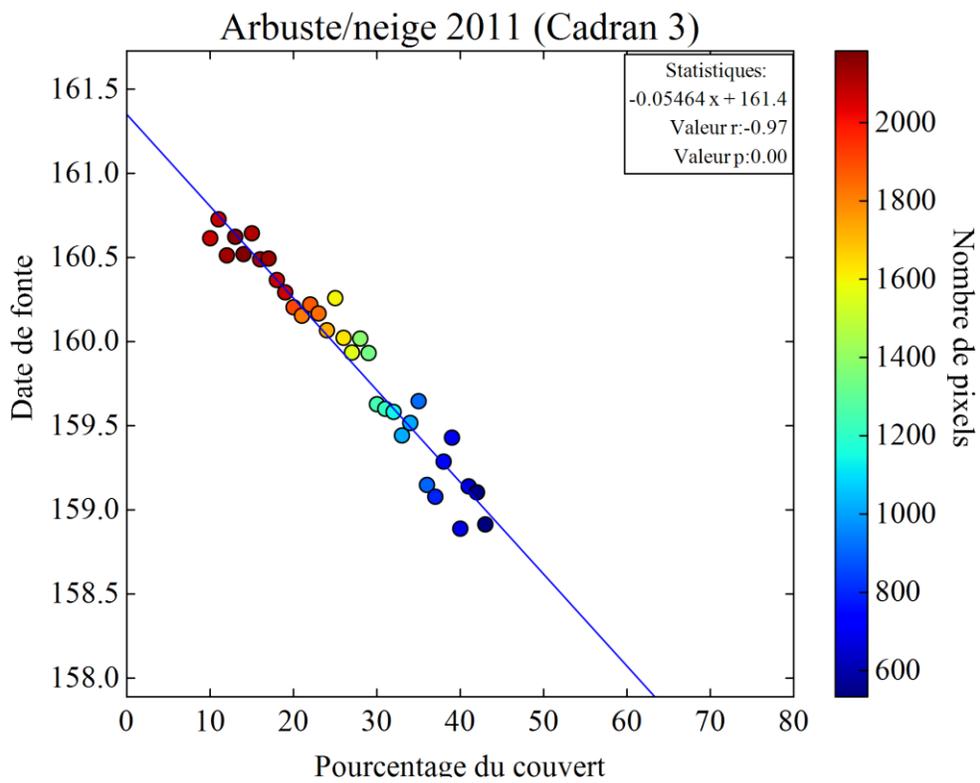
Sol nu/neige 2006 (Cadran 3)

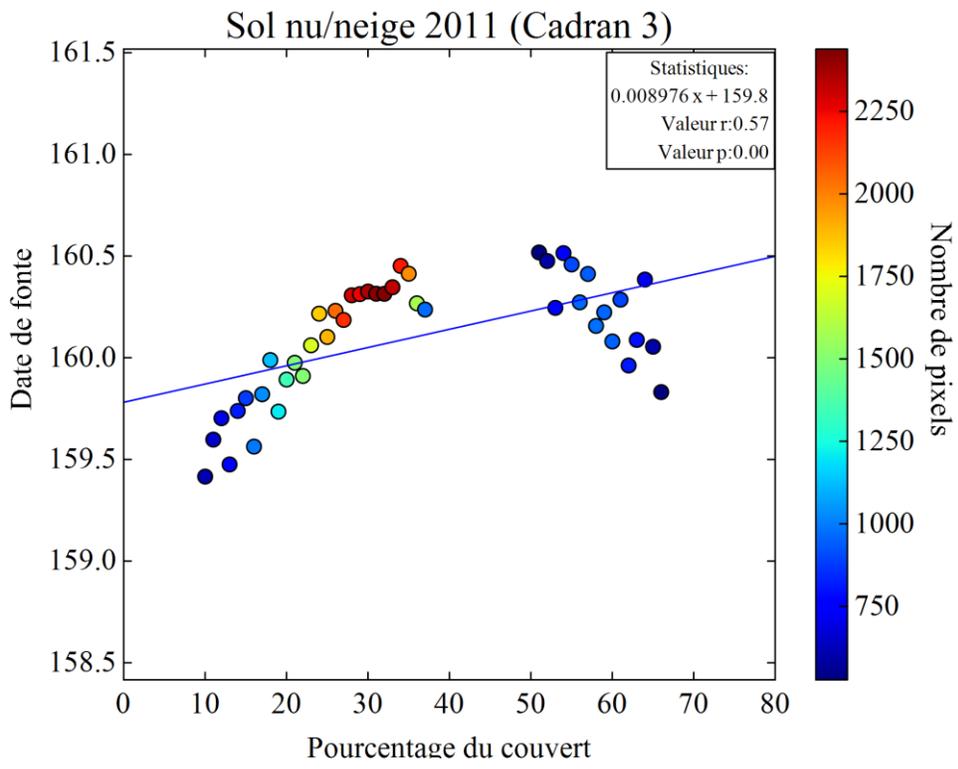


Arbuste/neige 2009 (Cadran 3)









Annexe 7: Effet de la température, du Hmax et des précipitations sur l'amplitude de l'effet de la Fc arbustive sur la fonte de la neige

