

# **Département de géomatique appliquée**

Faculté des lettres et sciences humaines

Université de Sherbrooke

## **Analyse des effets de la végétation sur le couvert de neige dans la zone de transition arctique-subarctique par mesures in-situ et télédétection optique (Nunavik)**

Bruno-Charles Busseau

Mémoire (TEL804) présenté pour l'obtention du grade  
de Maître ès sciences (M.Sc.) Géographique, cheminement recherche en télédétection

Février 2017

© Bruno-Charles Busseau, 2017

Directeur de recherche : Alain Royer

Codirecteur de recherche : Alexandre Langlois

Signatures :

---

Alain Royer

---

Date

---

Alexandre Langlois

---

Date

## Table des Matières

Résumé.....	vii
1. Introduction.....	- 1 -
1.1 Mis en contexte et problématique .....	- 1 -
1.2 Objectifs .....	- 2 -
1.3 Plan du mémoire.....	- 3 -
2 Méthodologie .....	- 4 -
2.1 Démarche .....	- 4 -
2.2 Sites d'étude .....	- 6 -
2.3 Données du projet.....	- 7 -
3 Analyse de l'interaction entre la neige et les arbustes dans un écosystème de taïga au Nunavik.....	- 11 -
1. Introduction .....	- 13 -
2. Study area and materials.....	- 14 -
3. Method.....	- 16 -
4. Results .....	- 19 -
a. Trapping effect.....	- 19 -
b. In-situ snow depth variations in winter.....	- 22 -
c. Temporal snowmelt analysis using remotely sensed data.....	- 23 -
d. Spatial analyses of snow cover melt .....	- 25 -
5. Conclusion .....	- 26 -
Acknowledgements.....	- 27 -
References.....	- 27 -
4 Mesure d'épaisseur de neige par fraction d'ombre.....	- 19 -
5 Conclusion .....	- 34 -
6 Références supplémentaires à l'article.....	- 36 -

### Liste des Figures :

Figure 1 : Organigramme méthodologique.....	- 6 -
Figure 2 : Variabilité de profondeur de neige dans différentes zones de couverture de sol. .....	- 8 -
Figure 1 dans l'article: The study site in Umiujaq, Québec, the Tasiapik valley. Background map: Pleiades image from January 29th 2014. Dark areas are spruce forests.....	- 15 -
Figure 2 de l'article: Weather station located in the tundra region of Tasiapik valley, with lichen and low dwarf birch. Two isolated areas of spruce thickets are also visible. This station is equipped with two ultrasound snow height gauges about 10 m apart, one on the 10 m tower, one on the 3 m tripod. ....	- 15 -
Figure 3 de l'article: Weather station located in the forested area in the Tasiapik valley, among black spruce and tall willows. The vertical pole is 3 m high. .....	- 16 -
Figure 4 de l'Article: Measuring snow depth in the tundra snow (left) and forested area (right) using the magnaprobe. ....	- 17-
Figure 5 de l'article: Location of the different transects (small dots) and snow pits (SP) in the Tasiapik valley, overlaid on the Pleiades satellite image (January 29 <sup>th</sup> 2014).Thicket in figure 8 is situated by the Northernmost weather stations. Westernmost snowpits are situated on the coastal plain. ....	- 19 -
Figure 6 de l'article: Snow depth variation from east to west over a spruce thicket. The highest snow depth are located in the spruce thicket (20-40m).....	- 20 -
Figure 7 de l'article: Variation and variability of the snow depth measured at different sections (samples) of the transects for each type of land cover. The distances (X axis) relative to each transect were shifted for plotting the data together. Data taken from transects in Figure 7. ....	- 20 -
Figure 8 de l'article: Vegetation height according to vegetation types (right y-axis) and variation of snow depth according to the vegetation type in January 2014 and February 2014 (left y-axis).....	- 21 -

Figure 9 de l'article: Snow depth variations at the two weather stations (2012-2013 and 2013-2014 winters). Tick marks represent first of the month. ....	- 23 -
Figure 10 de l'article: Variation of the NDSI snow index over the year using composite Landsat images from 2014 to 2015 for the four zones (30-m resolution). 0 Julian day means January 1 <sup>st</sup> 2014.....	- 24 -
Figure 11 de l'article: Variation of Fractional Snow cover from daily cloud-free MODIS/TERRA pixels (500-m resolution) data over the year 2015. ....	- 24 -
Figure 12 de l'article: NDSI variation of Landsat pixels in each zone according to the pixels' NDVI value in summer for two dates during the spring (A: May 14 <sup>th</sup> and B: May 29 <sup>th</sup> ). ....	- 25 -
Figure 3 : Trouver l'épaisseur de neige en différenciant la longueur d'ombre à deux différentes dates. ....	- 30 -
Figure 4 : Différence de l'ombre entre Janvier (A) et Février (B) 2014. L'ombre est représenté par le dégradé de bleu et vert, le noir représente la végétation et le gris pâle la neige. ....	- 31 -
Figure 5 : Variation de fraction d'ombre selon la zone et la date d'acquisition de l'image Pléiade.....	- 32 -
Figure 6 : La fraction d'ombre en fonction de l'épaisseur de neige .....	- 33 -

**Liste des Tableaux :**

<i>Table 1 de l'article: List of images used for this research .....</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Table 2 de l'article : In situ (individual snowpit) measurements of snow depth, mean density and snow water equivalent (SWE) for several sites in the study area for the two field campaigns. No snowpit measurements were made in high shrub areas or in dense forest. Cladonia are present at each site. ....</i>	<i>- 21 -</i>
<i>Table 3 de l'article: Mean snow depths from transect measurements as a function of the range of vegetation heights and mean summer NDVI for the four zones considered and for the two field campaigns. Std: Standard deviation. See also Figures 7 and 8. ....</i>	<i>- 22-</i>
<i>Table 4 de l'article: p values for the t-test of the difference of snow depth between land covers. ....</i>	<i>- 22 -</i>
<i>Tableau 1 : Valeur des p après avoir fait le test t des différences de fraction d'ombre</i>	<i>- 32 -</i>

## Résumé

Plusieurs études récentes démontrent que la prolifération de la végétation dans le Nord a augmenté sous un climat en réchauffement lors des quatres dernières décennies, surtout dans la zone de transition entre toundra et taïga. L'accroissement des arbustes a un effet sur les propriétés de la neige et du bilan d'énergie de surface. L'objectif de cette recherche est d'améliorer la caractérisation de l'impact des arbustes sur l'évolution de la neige (accumulation et fonte) en utilisant des données terrains et la télédétection. La recherche a été réalisée sur le site d'Umiujaq, au Nunavik, représentatif de la zone de transition entre l'Arctique de basse latitude et les zones subarctiques. La profondeur de neige, mesurée le long de nombreux transects qui couvrent plusieurs types de végétation (toundra arbustive, toundra de lichen, forêt ouverte et forêt fermée d'épinettes) démontre l'effet d'emprisonnement de la neige dans la zone de transition entre une zone de toundra arbustive vers une zone de forêt d'épinettes. Cet effet est lié à la hauteur de la végétation et à la perte de densité (la profondeur de neige augmente par des facteurs de 2,5 à 3). De plus, des mesures de profondeur de neige en continue ont été prises par deux stations météorologiques situées l'une en zone de toundra arbustive et l'autre en zone de forêt. Les résultats montrent que la neige réagit de façons très différentes selon la couverture du sol, mais reste très dépendante des sites considérés. Des analyses spatiales à très haute résolution (Pléiades) et à moyenne résolution (Landsat et MODIS) suggèrent un délai dans la fonte entre les zones de forêts et les zones de toundra de lichen et arbustives. Une technique de mesure de profondeur de neige par télédétection à haute résolution est aussi discutée.

Mots clés : Télédétection de la neige, profondeur de neige, Effet d'emprisonnement, fraction d'ombre, fonte de la neige, Nord-Est Canadien

## **Abstract**

Recent studies have shown that northern vegetation has been growing in relation to a warming climate over the last four decades, especially across the transition zone between tundra and taiga. Shrub growth affects snow properties and the surface energy budget, which must be better studied to quantify shrub-snow-climate feedbacks. The objective of this research is to improve the characterization of the impact of shrubs on snow evolution, from its accumulation to its melt, using in-situ and satellite measurements. The research is presented for the Umiujaq site, Nunavik, representative of the low Arctic – Subarctic transition zone. Snow depth, measured along numerous transects spanning different land cover types is found to increase by a factor 2.5 to 3 between tundra and forest, while snow density decreases. This illustrates the trapping effect of vegetation well. Complementary continuous snow depth measurements using weather stations from two sites (tundra with low shrubs and a small clearing with shrubs within the forest) show different site-dependent behaviors. Spatial analysis from high-resolution Pleiades images combined with Landsat (Normalized Difference Snow Index) and MODIS (Fractional Snow Cover) images suggest a slight delay in melt over open and dense forest areas compared to tundra and dense high shrubs. A technic to measure snow depth using high resolution is also discussed.

Keywords: Snow Remote Sensing, Snow Depth, Trapping Effect, Normalized Difference Snow Index, snowmelt, North-Eastern Canada



## Remerciement

J'aimerais premièrement remercier mon directeur de recherche, Alain Royer (Centre d'applications et de recherches en télédétection CARTEL, Université de Sherbrooke), pour la confiance qu'il a eue en moi pour les nombreuses missions terrains et dans la recherche pour ce mémoire. Pour toutes ses idées qui m'ont permis de contourner les nombreux murs rencontrés, sa passion pour la recherche et son goût de l'aventure, merci. J'aimerais aussi remercier mon co-directeur, Alexandre Langlois (Centre d'applications et de recherches en télédétection CARTEL, Université de Sherbrooke), qui lui aussi m'a offert sa confiance pour ces travaux. Les matchs de squash et les conseils m'auront souvent aidé à prendre du recul pour mieux cibler les problèmes de mes études.

J'aimerais aussi remercier l'équipe du local A4-276 pour leur aide, leur support morale et leur passion pour la recherche. J'aimerais remercier plus particulièrement Alexandre Roy, Jean-Benoit Madore et Vincent Beauregard pour leurs nombreux conseils et leur aide en programmation qui aura facilité l'analyse de mes données. Aussi à tous les gens qui auront participé à la collecte des données, Caroline Dolant, Fanny Larue, Patrick Cliche, Alexandre Roy, Serge Langlois, Gabriel Diab, Olivier Saint-Jean, Florent Dominé, Mathieu Barrère et Mélissa Paradis, merci.

Je veux aussi remercier les organismes qui auront financé la recherche. Le PFSN qui aura aidé à financer les campagnes terrains et le CEN qui nous aura abrité à Umiujaq et Kuujjuarapik.

J'aimerais à la fois remercier les communautés Cree et Inuit des villages de Kuujjuarapik et d'Umiujaq de nous avoir accueilli chez eux lors de nos recherches sur le terrain et de nous avoir fait découvrir leur culture.

Finalement, j'aimerais dédier ce travail à Julie-Catherine et ma famille pour m'avoir toujours supporté à travers les succès et les épreuves ces dernières années.



# 1. Introduction

## 1.1 Mis en contexte et problématique

Les températures de l'Arctique augmentent à un rythme alarmant causant plusieurs changements dans les écosystèmes (Bhatt et al., 2010; AMAP, 2011; Mauritsen, 2016; Serreze et al. 2009). La tendance du taux de réchauffement arctique observée est passée de  $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  en 1980 à  $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  en 2010 (Smith et al., 2015). Une conséquence observée est la prolifération des arbustes dans les différentes zones de toundra (Myers-Smith et al., 2011, 2015) et la migration vers le Nord de la ligne d'arbres (Ropars et Boudreau, 2012). Cette prolifération de la végétation dans le nord devrait modifier les propriétés physiques de la neige, incluant l'épaisseur de neige (augmentation due aux effets d'emprisonnement de la neige, « trapping effect » : Callaghan and Tweedie, 2011; Callaghan et al., 2011), sa densité et sa conductivité thermique (densité atténuée vu que les arbustes empêchent la compaction de la neige : Dominé et al., 2015; Gouttevin et al., 2013) et l'albédo (atténué par les branches; Menard et al., 2012). Ces modifications des propriétés de la neige affectent le bilan d'énergie de surface, générant des changements dans le climat et modifiant les régimes hydrologiques et thermiques du sol. Ces changements peuvent déstabiliser significativement le pergélisol dû au changement de la conductivité thermique de la neige (effet isolant) (Gouttevin et al., 2012). Le bilan d'énergie de surface par la présence d'arbustes affectera aussi la phénologie de la neige, le début et la fin de la fonte, tel que suggéré par Callaghan et al. (2011) et Pomeroy et al. (2006).

Malgré l'importance des processus d'interaction neige-végétation dans un climat en changement, principalement dans le Nord, plusieurs de ces interactions restent mal comprises et mal quantifiées. D'après la littérature, les arbustes modifient une grande variété de processus incluant la profondeur et la fonte de la neige, mais aussi la dynamique hydrologique, les échanges de nutriments et plus encore (Myer-Smith et al., 2011). Les observations reconnues d'expansion d'arbustes sont présentes dans presque toutes les

régions arctiques du Monde. Notamment, le Nord de l'Alaska avec l'aulne (Sturm et al, 2001; Tape et al, 2006), l'ouest de l'Arctique Canadien avec l'aulne et le saule (Lantz et al, 2010; Lantz et al., 2009; Myers et al., 2011), l'extrême arctique Canadien avec le saule et les arbustes à feuilles persistantes nains (Hudson et Henry, 2009; Hill et Henry, 2011), le Nunavik avec le boulot (Tremblay, 2010) et l'Arctique Russe avec le saule (Forbes et al, 2010). L'augmentation des arbustes est observée de trois façons : le comblement (des régions couvertes d'arbustes se remplissent), l'augmentation de la croissance (les arbustes grandissent plus vite) et la colonisation de sites au Nord de la limite d'arbustes (Myers-Smith et al, 2011).

Notre intérêt se porte plus particulièrement sur le Nunavik.

## **1.2 Objectifs**

L'objectif de ce travail est de caractériser et quantifier l'impact de la croissance de la végétation sur l'évolution du couvert de neige dans la zone de transition taïga/toundra au Nunavik à partir de la télédétection satellite et de mesures au sol. Le but principal du travail est donc d'évaluer, à climat équivalent, si la présence de la végétation accélère ou ralentit la fonte de la neige par rapport aux zones de toundra plus dénudées (Objectif 1). De plus, une analyse de l'identification de la fraction d'ombrage sur des images hautes résolutions pour mesurer l'épaisseur de neige est présentée et discutée (Objectif 2).

Le premier objectif du travail repose sur deux hypothèses :

- L'effet de la fonte accélérée de la neige due à la végétation d'une zone de toundra peut être observé par images MODIS/TERRA et Landsat ;
- L'effet d'emprisonnement causé par la végétation réussit à ralentir la fonte en zone de transition entre une zone de toundra arbustive et une forêt d'épinettes.

Le deuxième objectif est basé sur la troisième hypothèse :

- La hauteur de la neige peut être mesurée par télédétection optique à haute résolution spatiale à partir de l'ombre créée par la végétation

### **1.3 Plan du mémoire**

Suite à cette introduction, le chapitre 2 décrira les méthodes utilisées pour répondre aux objectifs. Le chapitre 3 présente une analyse de l'interaction entre les arbustes et la neige qui fait office d'un article scientifique publié dans la revue *Physical Geography*. Le chapitre 4 présente une discussion sur la méthode en plus de présenter une nouvelle méthode pour identifier la hauteur de neige à partir de l'ombrage sur deux images à haute résolution. Comme l'article présente une partie de la méthodologie appliquée dans le cadre de ce mémoire, certaines figures et sections du Chapitre 2 sont référées au Chapitre 3. Une conclusion discutant les hypothèses, les problèmes rencontrés et les recherches pouvant découler conclura le mémoire.

## **2 Méthodologie**

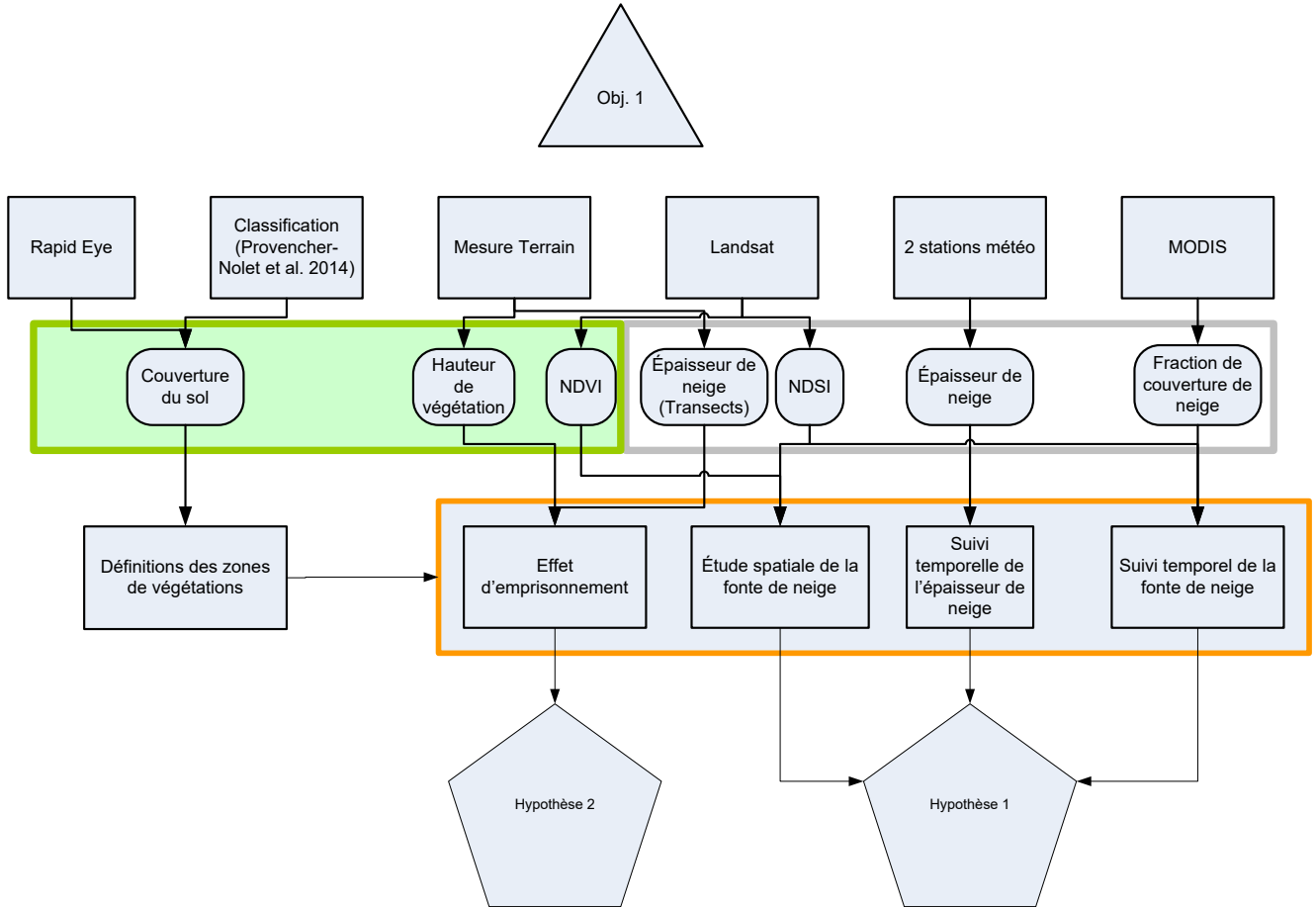
### **2.1 Démarche**

Analyser comment la profondeur de neige et sa densité sont affectées par la prolifération de végétation reste complexe vu la durée sur laquelle ce processus se produit. Une analyse spatiale de la variabilité de la hauteur de neige a ainsi été entreprise. La densité n'a pas été considérée dans cette étude. L'organigramme méthodologique général de l'étude est présenté à la Figure 1.

Puisque qu'il s'agit d'un mémoire par article, la démarche utilisée pour la première partie de la maîtrise est expliquée plus bas dans l'article.

Pour la deuxième partie du mémoire, nous avons développé une technique de mesure d'épaisseur de neige. En utilisant les images Pléiades, nous voulions isoler l'ombre créée par les arbres de façon à faire un lien avec la profondeur de neige pour différentes zones de la vallée. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode développée par Leboeuf et al. (2007) permettant de créer une carte d'ombre de végétation. Il faut mesurer le pourcentage d'une zone qui est couverte par l'ombre pour avoir une donnée que l'on peut normaliser pour les angles zénithaux du soleil et du satellite. Les données de profondeur de neige mesurées sur le terrain seront utilisées pour avoir des données de test.

La méthodologie est schématisée dans la Figure 1 pour les objectifs spécifiques 1 et 2.



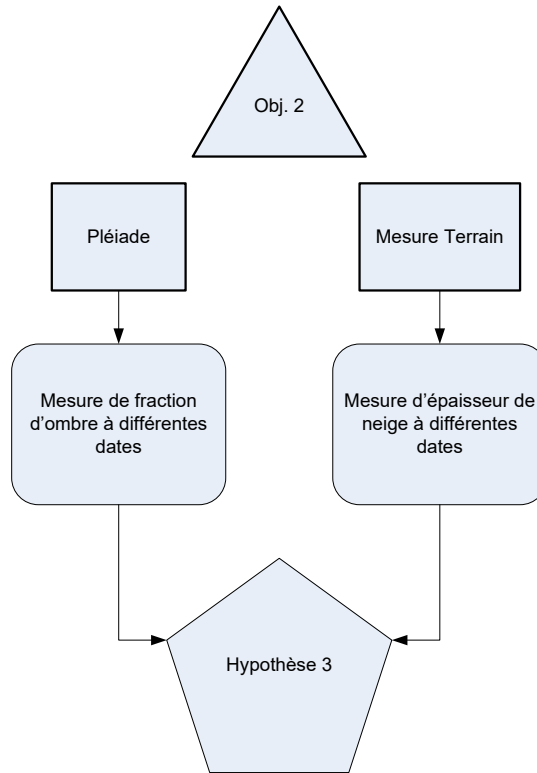


Figure 1 : Organigramme méthodologique

## 2.2 Sites d'étude

Le site d'étude est situé à quelques kilomètres à l'est d'Umiujaq, un village Inuit sur la côte Est de la Baie d'Hudson au Nunavik ( $56^{\circ} 33' 31''$  N;  $76^{\circ} 28' 56''$  O). Le site d'étude est nommé la vallée Tasiapik (Figure 1 dans l'article). La vallée a un microclimat régulé par le Golf de Richmond et les murs bordant la vallée qui apportent un environnement favorable pour accueillir différents types de végétation; on part de sol presque nu de type toundra, couvert de lichen (*Cladonia stellaris*) à des arbustes de petite et grande taille, particulièrement du bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*), saule (*Salix sp*) et d'aune (*Alnus crispa*), jusqu'à des aires de forêt ouvertes et fermées dominées par de l'épinette noire (*Picea mariana*). Des aires isolées de bosquet d'épinettes noires sont retrouvées occasionnellement dans les zones de toundra de lichen et de petits arbustes. Plusieurs corps d'eau, en grande majorité des étangs thermo karst, sont aussi observés. Cette biodiversité est retrouvée à travers une zone réduite d'environ  $12 \text{ km}^2$  (Provencher-Nolet et al, 2014).



### 2.3 Données du projet

Les données météorologiques sont étudiées à l'aide de deux stations météo situées sur le site : une dans la zone de toundra (lichen et petit bouleau) et une dans la forêt de pin et de saule (Figure 2 et figure 1 dans l'article). La station toundra est équipée avec deux jauges de mesures de neige à ultrason séparées de 10 mètres l'une à l'autre. La première est installée sur une tour de 10 mètres de haut, et l'autre sur un trépied à trois mètres de haut. La station de la forêt a aussi cet appareil de mesure de neige sur un trépied. À chaque heure, nous avons donc une mesure de profondeur de neige ainsi que plusieurs variables météorologiques (température de l'air, vitesse du vent, albédo et humidité relative). Les mesures in situ pour cette recherche sont complétées par 10 transects de profondeur de neige pris dans la vallée sur deux dates différentes. Un outil nommé *magnaprobe* fut utilisé (Figure 2). C'est une perche de 120 cm de long équipée d'un GPS et d'un enregistreur de données (Sturm et al., 2002). Ces mesures permettent la visualisation sur carte de la profondeur de neige sur les différentes zones de la vallée pour les deux différentes dates (29 janvier 2014 et 26 février 2014). Les mesures sont prises à chaque deux à trois mètres d'intervalles et un total de 1632 mesures sur 9335 m ont été prises dans la vallée. Les mesures de hauteurs de végétation furent prises à l'aide d'une sonde de deux mètres et d'un clinomètre pour les arbres plus hauts.

L'utilité du Magnaprobe pour cette recherche fut primordiale pour acquérir les valeurs de profondeur de neige à travers la vallée. Dans la figure 4 de l'article on voit comment l'outil fonctionne. Nous portons un sac à dos avec un ordinateur et l'antenne du GPS. À la main nous avons une sonde de 120 cm que nous enfonçons dans la neige. Lorsque la tige est atteinte le sol on appuie sur un interrupteur qui prend la donnée de profondeur et les coordonnées GPS. Pour cette recherche, des transects sur plusieurs km ont été pris, mais selon Clark et al. (2011) ce ne serait pas nécessaire. Selon leur recherche une distance de 30 m serait suffisante pour avoir la variabilité totale d'une zone. Nous avons voulu tester cette hypothèse avec différents couverts de sol. Dans la figure 2, ci-dessous, on observe les écarts types de profondeur de neige dans trois zones différentes. Ces tests ont été faits près

du réservoir LG3 dans la Baie-James. Lorsque nous observons un écart type maximal dans le graphique nous concluons que nous avons obtenu la variabilité nécessaire. On observe donc qu'une variabilité maximale est atteinte après 25 mètres de données en zone de forêt (*Spruce forest*) et de toundra (*Tundra*). En zone d'arbuste de type bouleau glanduleux (*Birch*), on retrouve une variabilité maximale autour de 40 mètres.

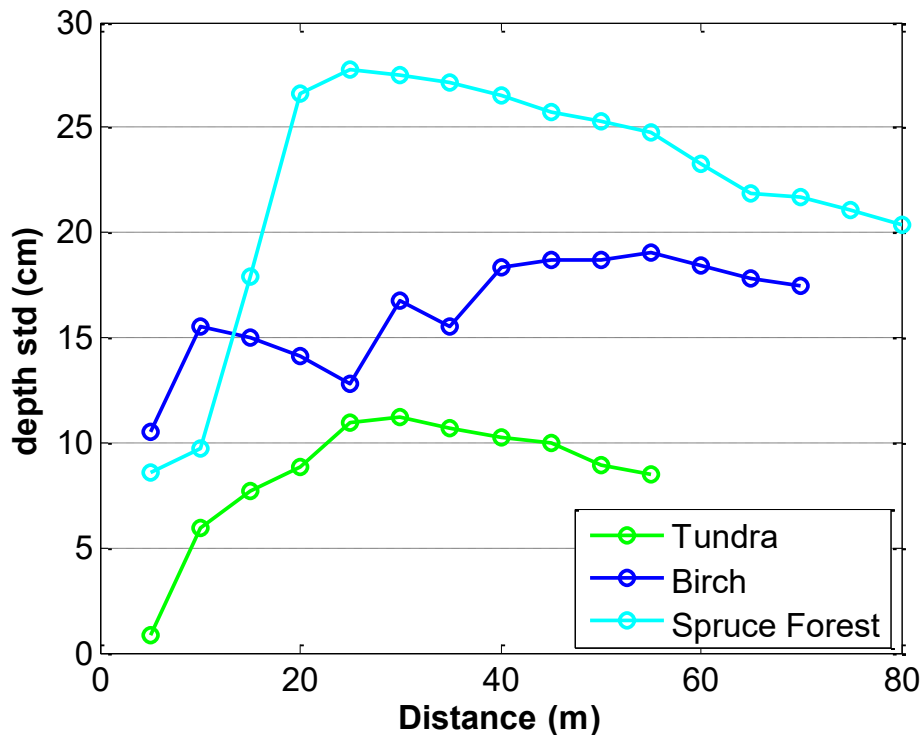


Figure 2 : Variabilité de profondeur de neige dans différentes zones de couverture de sol.

Les données de télédétection consistent en 12 images Landsat-8 du capteur OLI (sans nuages) acquises en 2015 (Tableau 1 dans l'article). Ces dernières ont été traitées de façon à obtenir les réflectances corrigées pour l'angle solaire.

Pour normaliser les images Landsat-8 pour l'analyse des NDSI et NDVI de la recherche, nous avons fait la conversion des valeurs numériques à des valeurs de réflectance soit  $\rho\lambda'$  :

$$\rho\lambda' = M_{\rho}Q_{cal} + A_{\rho}$$

Pour ensuite normaliser pour l'angle solaire pour  $\rho\lambda$  :

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})}$$

Où

$\rho\lambda'$  est la réflectance sans correction de l'angle solaire,

$M\rho$  est le facteur multiplicatif de mise à l'échelle selon la bande retrouvée dans les métadonnées,

$Q_{cal}$  est la valeur numérique initiale,

$A\rho$  est le facteur additionnel de mise à l'échelle selon la bande retrouvée dans les métadonnées,

$\rho\lambda$  est la réflectance corrigée pour l'angle solaire,

et  $\theta_{SZ}$  est l'élévation de l'angle solaire retrouvé dans les métadonnées.

Toutes les images MODIS sans nuages « MOD10A1 fractional snow cover » de 2015 ont aussi été utilisées. Deux images à très haute résolution (0,5 m) de la constellation Pléiades (pour les mêmes dates que celles des mesures in situ) ont été utilisées pour l'étude de la végétation et de la profondeur de neige durant l'hiver. Ces deux images montrent la végétation apparente au-dessus du couvert nival entre les deux dates.

Pour normaliser les angles azimutaux et zénithaux du soleil et du satellite, nous avons utilisé les équations suivantes (tiré de Leboeuf et al., 2007) :

$$SF_n = SF * C_{ZV} * C_{ZS}$$

avec

$$C_{ZV} = \frac{1}{\sin\theta_V}, \text{ où } \theta_V = \cos^{-1}(\sin Z_V * \cos(A_V - A_S))$$

et

$$C_{ZS} = \frac{\tan Z_{s\_ref}}{\tan Z_S}$$

où SF est la fraction d'ombre,  $SF_n$  est la fraction d'ombre normalisée,  $C_{ZV}$  est le facteur de correction qui prend en compte la longueur de l'ombre projetée sur le plan du satellite ( $Z_V$  :

angle d'incidence satellite),  $C_{ZS}$  le facteur de correction prenant en compte l'ombre augmentant selon l'angle zénithal solaire ( $Z_s$ ) en utilisant un angle de référence ( $Z_{s\_ref}$ ) de  $65.3^\circ$  (l'angle de l'image de février),  $A_v$  l'angle azimutal du satellite et  $A_s$  l'angle azimutal solaire.

Une image de cinq mètres de résolution RapidEye a été utilisée pour l'étude de la végétation durant l'été. De plus une classification de la végétation faite par Provencher-Nolet et al. (2014) aide à comprendre la distribution de la végétation.

### **3 Analyse de l'interaction entre la neige et les arbustes dans un écosystème de taïga au Nunavik.**

Les résultats de la variation spatiale de l'accumulation de la neige en fonction du couvert du sol sont présentés en premier temps à différentes résolutions spatiales, et pour des variations temporelles des stations météorologiques. Par la suite, différentes façons de caractériser la fonte de la neige sont analysées en utilisant des séries temporelles de données satellites. Ces deux parties sont présentées sous forme d'article. L'article a été soumis au journal *Physical Geography* (publié le 27 janvier 2017). Enfin, une analyse de la méthode de corrélation de fraction d'ombre et de profondeur de neige est analysée. Les résultats terrains sont récapitulés dans les tableaux 2 et 3 dans l'article.

L'article suivant a été soumis à la revue scientifique *Physical Geography* (éditeur international Taylor & Francis) le 1<sup>er</sup> octobre 2015. Des corrections suites aux révisions par les pairs ont été apportées à l'article ci-dessous depuis la soumission. L'article est présenté en anglais seulement. Ce projet a aussi été présenté lors de l'événement Eastern Snow Conference 2015, tenu à Sherbrooke en juin 2015. Un court article a été aussi publié dans les comptes rendus de la conférence :

*Busseau, B.C, Royer, A. et Langlois, A. (2015). Analysis of the Interactions between Snow and Shrub Ecosystem of the Taiga in Nunavik. Proceedings of the 72<sup>nd</sup> Eastern Snow Conference, Sherbrooke, Québec, Canada, p. 211-215.*

La référence pouvant être utilisée pour cet article est la suivante :

*Busseau, B.C, Royer, A., Roy, A., Langlois, A. and F. Dominé (2016). Analysis of snow-vegetation interactions in the low Arctic – Subarctic transition zone (north-eastern Canada). Physical Geography, Vol.38(2) p.159-175.*

Le travail de cet article découle de l'idée originale d'Alain Royer de caractériser et de quantifier l'effet de la végétation sur la neige. Les travaux ont été faits par moi-même avec consultance auprès d'Alain Royer, Alexandre Langlois et Alexandre Roy. L'analyse des données a été faite par moi-même avec un soutien informatique et d'analyse statistique d'Alexandre Roy et Alain Royer. Les données météorologiques ont été procurées grâce à

l'installation des stations météo de Florent Dominé, qui a aussi corrigé et relevé plusieurs commentaires sur l'article.

## Analysis of snow-vegetation interactions in the low Arctic-Subarctic transition zone (northeastern Canada)

Bruno-Charles Busseau<sup>a,b</sup>, Alain Royer<sup>a,b</sup>, Alexandre Roy<sup>b,c</sup>, Alexandre Langlois<sup>a,b</sup> and Florent Domine<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup>CARTEL, Université de Sherbrooke, Québec, Canada; <sup>b</sup>Centre for Northern Studies, Québec, Canada; <sup>c</sup>Department of Geography, Université de Montréal, Montréal, Canada; <sup>d</sup>Takuvik, Department of Chemistry, Université Laval, Québec, Canada; <sup>e</sup>CNRS, Québec, Canada

### ABSTRACT

Recent studies have shown that northern vegetation has been growing in relation to a warming climate over the last four decades, especially across the transition zone between tundra and taiga. Shrub growth affects snow properties and the surface energy budget, which must be better studied to quantify shrub-snow-climate feedbacks. The objective of this research is to improve the characterization of the impact of shrubs on snow evolution, from its accumulation to its melt, using *in-situ* and satellite measurements. The research is presented for the Umiujaq site, Nunavik, representative of the low Arctic-Subarctic transition zone. Snow depth, measured along numerous transects spanning different land cover types is found to increase by a factor 2.5–3 between tundra and forest, while snow density decreases. This illustrates the trapping effect of vegetation well. Complementary, continuous snow depth measurements using weather stations from two sites (tundra with low shrubs and a small clearing with shrubs within the forest) show different site-dependent behaviors. Spatial analysis from high-resolution Pleiades images combined with Landsat (Normalized Difference Snow Index) and MODIS (Fractional Snow Cover) images suggest a slight delay in melt over open and dense forest areas compared to tundra and dense high shrubs.

### ARTICLE HISTORY

Received 1 October 2015  
Accepted 14 January 2017

### KEYWORDS

Snow remote sensing; snow depth; trapping effect; Normalized Difference Snow Index; snowmelt; north-eastern Canada

## Introduction

Arctic temperatures are rising at an alarming rate and are predicted to keep rising causing many changes in ecosystems (Bhatt et al., 2010; AMAP, 2011; Serreze, Barrett, Stroeve, Kindig, & Holland, 2009). A widely observed consequence is the growth of shrubs on herb tundra (Myers-Smith et al., 2011) and the northward migration of the tree line (Ropars & Boudreau, 2012). Furthermore, vegetation growth is expected to modify several snow physical properties: (1) snow depth increases through the trapping effect of vegetation (Callaghan & Tweedie, 2011; Callaghan et al., 2011), (2) snow density and thermal conductivity decrease since shrubs prevent compaction (Domine, Barrere, & Morin, 2016; Domine,

Barrere, Sarrazin, & Morin, 2015; Gouttevin et al., 2012), and (3) albedo decreases due to protruding branches (Ménard, Essery, Pomeroy, Marsh, & Clark, 2012). These modifications in snow properties affect the surface energy balance, generating climate feedbacks and modifying the soil thermal and hydrological regimes, with the possibility of dramatically destabilizing permafrost (Gouttevin et al., 2012). One important impact of the modified surface energy budget in the presence of shrubs is the change in snowmelt rate, start date and end date, as suggested by Callaghan et al. (2011) and Pomeroy et al. (2006). Processes involved include increased snow depth, decreased snow density, and decreased snow albedo, which may be counterbalanced by shading by vegetation, resulting in a net effect that is difficult to predict. The purpose of this paper is thus to investigate the impact of vegetation on snow accumulation, melt rate, start date, and end date.

Regular monitoring of snowmelt from space at a local scale is a difficult task given the poor temporal resolution of high-resolution satellite imagery and cloud obstruction, while the low spatial resolution of microwave imagery remains inappropriate (Guangzhen, Peng, Zhaojun, & Shihao, 2015). Hence, this study attempts to analyze the spatial and temporal evolution of snow cover as a function of the vegetation characteristics using *in-situ* measurements and weather station data complemented by satellite remote sensing data in Nunavik, north-eastern Canada. Observations of snow trapping effects were made using *in-situ* measurements (transects of snow depth). During spring time, the rate of snowmelt over different vegetative cover types were analyzed first from continuous snow depth monitoring at two automatic meteorological stations, one in an open tundra area and another in a forest area, and secondly using time series of satellite images.

### Study area and materials

The study area is located a few kilometers East of Umiujaq, an Inuit village on the coast of Hudson Bay in Nunavik (56°33'31" N; 76°28'56" W). The area is called the Tasiapik valley (Figure 1). It has a microclimate regulated by the Richmond Gulf (which creates wind and warms the air when it is not covered by ice) and the high walls of the valley (which trap heat and humidity) that provide a suitable environment for various types of vegetation, from low vegetation dominated by lichen (*Cladonia stellaris*) to low and high shrubs, mainly birch (*Betula glandulosa*), willows (*Salix sp.*), and alder (*Alnus crispa*), to open and dense forest dominated by black spruce (*Picea mariana*). *Cladonia stellaris* is still present in every site. Isolated areas of spruce thickets, which are remnants of past warmer periods rather than recent growth due to warming (Laberge, Payette, & Pitre, 2001), are occasionally seen on lichen and low shrub tundra. Many water bodies, mainly thermokarst ponds, are also found in the valley. This great biodiversity is found throughout the 12-km<sup>2</sup> study site, ideal for the purposes of this study (Provencher-Nolet, Bernier, & Levesque, 2014).

The two automatic weather stations are located in the valley: one in the tundra region (lichen and low dwarf birch) (Figure 2) and one in the forested area with spruce and tall willows (Figure 3). The tundra station is equipped with two ultrasound snow height gages about 10 m apart, one on the 10 m tower, one on the 3-m tripod. Hourly snow depths with a SR50A acoustic snow height gage were measured at each site, along with common meteorological variables (air temperature, wind speed, broadband albedo and relative humidity). *In-situ* measurements analyzed in this study include 10 snow depth transects made in the valley with an automatic device, a magnaprobe (Figure 4). The magnaprobe is a portable 120 cm pole equipped with a GPS and data logger (Sturm, Holmgren, & Perovich, 2002). The



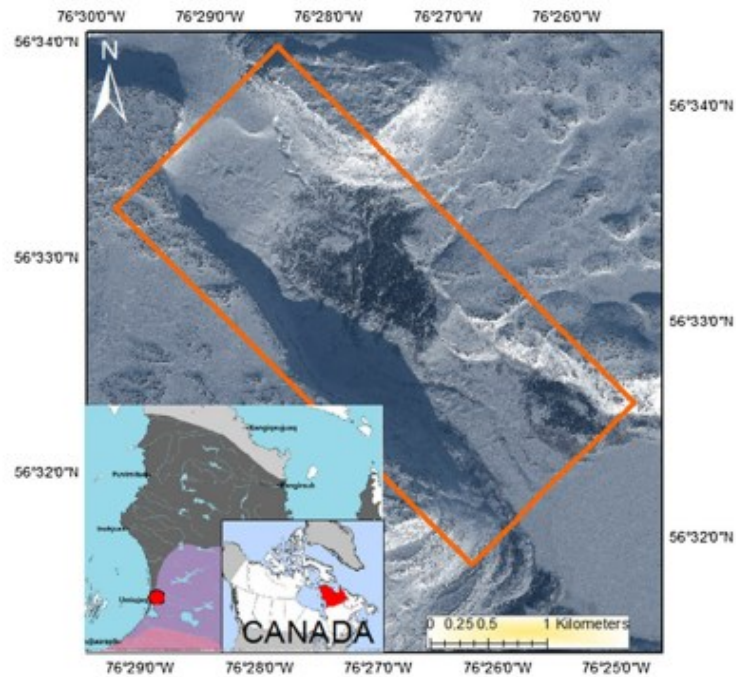


Figure 1. The study site in Umiujaq, Québec, Tasiapik valley. Background map: Pleiades image from 29 January 2014. Dark areas are spruce forests.

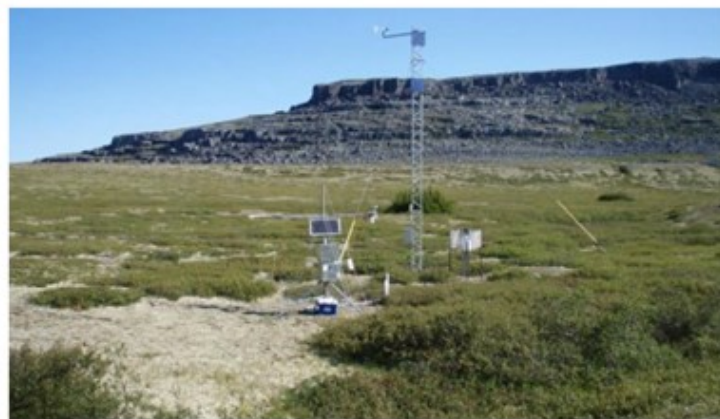


Figure 2. Weather station located in the tundra region of Tasiapik valley, with lichen and low dwarf birch. Two isolated areas of spruce thickets are also visible. This station is equipped with two ultrasound snow height gages about 10 m apart, one on the 10 m tower, one on the 3-m tripod.

magnaprobe measurements allowed the mapping (transects) of snow depth in the different areas within the valley for two different dates. Each measurement is separated by 2–6 m, and a total of 1632 measurements across 9335 m were taken in the valley. The vegetation height was measured using a 2 m avalanche probe and a clinometer for taller trees.



**Figure 3.** Weather station located in the forested area in the Tasiapik valley, among black spruce and tall willows. The vertical pole is 3 m high.

The remote sensing data consist of 12 Landsat images (cloud free) acquired between 2014 and 2015 (Table 1) with a resolution of 30 m. We also used all the cloud-free MOD10A1 fractional snow cover images from 2011 to 2015 (Table 1) with a resolution of 500 m. Two high-resolution (0.5 m) Pleiades images were used for the vegetation analysis during the winter, and a 5-m resolution RapidEye image was used for the summer vegetation analysis. The winter images show the apparent vegetation above the snow cover between the two dates (the mean snow depth in the tundra varied between 59 and 67 cm, respectively, for the two winter images).

### Method

To analyze how snow depth and density are affected by vegetation proliferation remains challenging given the large scale at which this process occurs, and the fact that shrub distribution is often patchy. The 10 transects of snow depth in the valley were acquired during two different field campaigns of about 7 days each in January and February 2014 (Figure 5). In January, the transects included: (1) a lichen and low shrub tundra area, including low birch (Figure 2; called “tundra”); (2) a combination of low shrub tundra and open forest, low density trees 2–6.5 m high, called “Open Forest;” (3) high and dense shrub area with shrubs 0.5–1.5 m high, called “high shrub;” and (4) spruce forest with high density trees 2–8 m high, called “Dense Forest” (Provencher-Nolet et al., 2014). In February 2014, two additional transects with shorter spacing in between measurements (60 m long) were conducted across a spruce thicket (north to south and east to west). Along each transect, vegetation height and trunk diameter at breast height were measured. Snow depth and vegetation height measurements for each area were compared for each date to characterize the trapping effect generated by the vegetation.

The satellite images were analyzed using PCI Geomatica© software to extract the Normalized Difference Snow Index (NDSI) and Normalized Difference Vegetation Index



Figure 4. Measuring snow depth in the tundra snow (left) and forested area (right) using the magnaprobe.

(NDVI) from Landsat images. Over 6300 Landsat pixels cover the valley. The NDSI index is based on the fact that snow and ice have a higher reflectance in the optical green ( $R_{0.56}$ )

**Table 1.** List of images used for this research.

Date	Image	Date	Image	Date	Image
2010	Vegetation Classification	24 January 2015	MOD10A1	08 June 2015	MOD10A1
15 July 2010	Rapid Eye	03 February 2015	MOD10A1	09 June 2015	MOD10A1
11 June 2013	Landsat 8	07 February 2015	MOD10A1	10 June 2015	MOD10A1
23 August 2013	Landsat 8	08 February 2015	MOD10A1	11 June 2015	MOD10A1
29 January 2014	Pléiades	17 February 2015	MOD10A1	12 June 2015	MOD10A1
26 February 2014	Pléiades	21 February 2015	MOD10A1	13 June 2015	MOD10A1
16 December 2014	Landsat 8	09 March 2015	MOD10A1	18 June 2015	MOD10A1
17 January 2015	Landsat 8	11 March 2015	MOD10A1	25 June 2015	MOD10A1
24 January 2015	Landsat 8	19 March 2015	MOD10A1	27 June 2015	MOD10A1
02 February 2015	Landsat 8	26 March 2015	MOD10A1	01 July 2015	MOD10A1
18 February 2015	Landsat 8	30 March 2015	MOD10A1	02 July 2015	MOD10A1
13 March 2015	Landsat 8	08 April 2015	MOD10A1	03 July 2015	MOD10A1
22 March 2015	Landsat 8	11 April 2015	MOD10A1	04 July 2015	MOD10A1
23 April 2015	Landsat 8	12 April 2015	MOD10A1	08 July 2015	MOD10A1
10 June 2015	Landsat 8	17 April 2015	MOD10A1	09 July 2015	MOD10A1
03 July 2015	Landsat 8	20 April 2015	MOD10A1	12 July 2015	MOD10A1
04 January 2015	MOD10A1	23 April 2015	MOD10A1	17 July 2015	MOD10A1
06 January 2015	MOD10A1	24 April 2015	MOD10A1	18 July 2015	MOD10A1
09 January 2015	MOD10A1	25 April 2015	MOD10A1	19 July 2015	MOD10A1
16 January 2015	MOD10A1	26 April 2015	MOD10A1	24 July 2015	MOD10A1
17 January 2015	MOD10A1	27 April 2015	MOD10A1	29 July 2015	MOD10A1
18 January 2015	MOD10A1	02 May 2015	MOD10A1	03 August 2015	MOD10A1
19 January 2015	MOD10A1	12 May 2015	MOD10A1	07 August 2015	MOD10A1
20 January 2015	MOD10A1	26 May 2015	MOD10A1	08 August 2015	MOD10A1
21 January 2015	MOD10A1	29 May 2015	MOD10A1	09 August 2015	MOD10A1
23 January 2015	MOD10A1	02 June 2015	MOD10A1		

Sources: (1) Ministère des Forêts, de la Faune et des Parc, Gouvernement of Québec; (2) <http://earthexplorer.usgs.gov/>; (3) [http://landsat-pds.s3.amazonaws.com/scene\\_list.gz](http://landsat-pds.s3.amazonaws.com/scene_list.gz); (4) <http://nsidc.org/data/MOD10A1/versions/6#>.

compared to the short-wave infrared ( $R_{1.61}$ ) (Crane & Anderson, 1984; Dozier, 1989; Lopez, Sirguey, Arnaud, Pouyaud, & Chevallier, 2008; Notarnicola et al., 2013).

$$NDSI = \frac{\rho_{0.56} - \rho_{1.61}}{\rho_{0.56} + \rho_{1.61}} \quad (1)$$

The NDVI, on the other hand, is used as a proxy for vegetation density associated with the intensity of photosynthetic activity (Wang et al., 2004). It is measured using the red band and near infrared band:

$$NDVI = \frac{\rho_{0.86} - \rho_{0.66}}{\rho_{0.86} + \rho_{0.66}} \quad (2)$$

The equations for NDVI and NDSI were done on the Digital Numbers, calculated from the USGS image data. Equations were used to normalize for the solar angles as well as for satellite angles and obtain top of atmosphere reflectance. Even if other indices exist for snow cover, such as NDPCSI (Hall & Riggs, 2014; Sibandze, Mhangara, Odindi, & Kganyago, 2014), only NDSI was used because it is the most commonly used (Dietz, Kuenzer, Gessner, & Dech, 2012). The same logic went into choosing NDVI for a vegetation index (Wang et al., 2004).

A MODIS/TERRA pixel (500 m resolution) was then assigned to each zone and pixels were selected based on the largest amount of Landsat pixels with the appropriate vegetation in the valley. A total of 23 MODIS pixels cover the valley, but only four were selected (one for each zone). Each area was then clipped for every Landsat image and the pixels were then statistically analyzed to derive NDSI values in each zone according to the date. Furthermore,

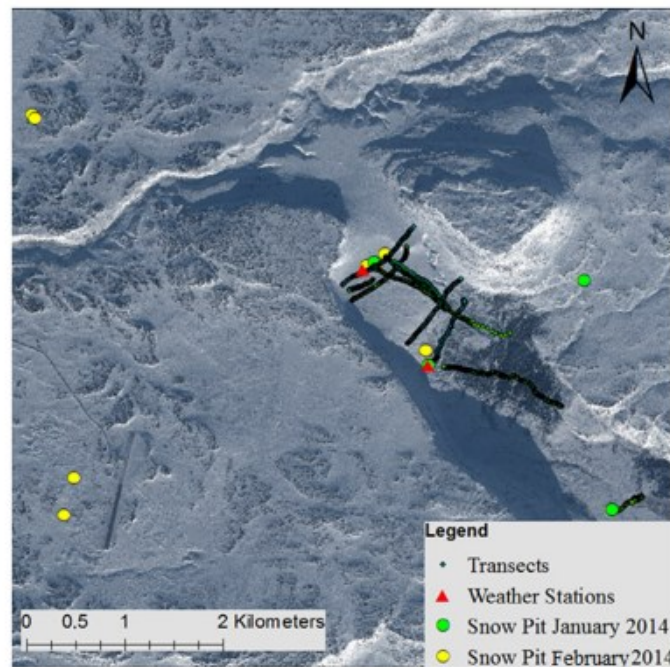


Figure 5. Location of the different transects (small dots) and snow pits (SP) in the Tasiapik valley, overlaid on the Pleiades satellite image (29 January 2014). Thicket in Figure 6 is situated by the northernmost weather stations. Westernmost snowpits are situated on the coastal plain.

summer NDVI values were gathered for each area and compared to NDSI during snowmelt. Since the temporal resolution of the Landsat data is very poor, we attempted to study each zone with the MODIS data. The Fractional Snow Cover product was used to compare the snowmelt in different zones.

## Results

Results for the spatial variation of snow accumulation as a function of land cover are first shown from transects at different scales and for temporal variations from weather stations. Snowmelt rates were then analyzed using time series of satellite data.

### Trapping effect

The trapping effect caused by vegetation is clearly shown in the *in-situ* transect measurements (Figures 6–8). Figure 6 shows the snow depth variation at a detailed local scale through a spruce thicket similar to those visible in Figure 2, with trees reaching 2 m in height. The snowpack gets deeper in the thicket regardless of the orientation of approach (from 60 cm to up to 180 cm) due to the trapping effect. Similar findings have been reported by Sturm et al. (2001). Drifts forms all around the thicket, presumably because wind comes

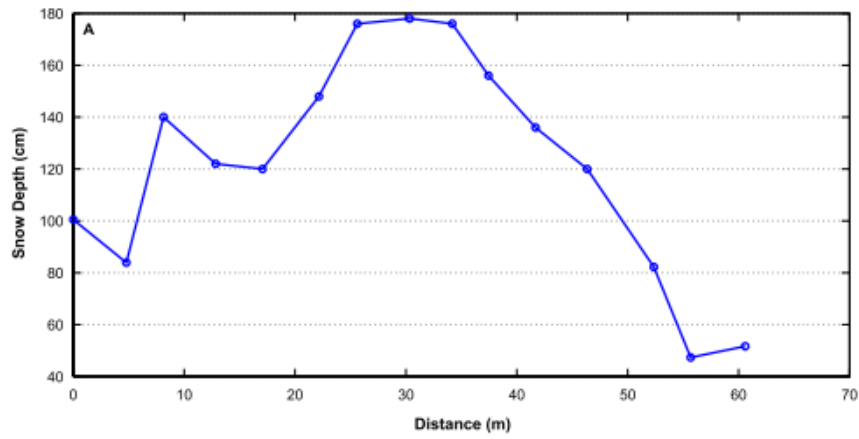


Figure 6. Snow depth variation from east to west over a spruce thicket. The deepest snow depths are located in the spruce thicket (20–40 m).

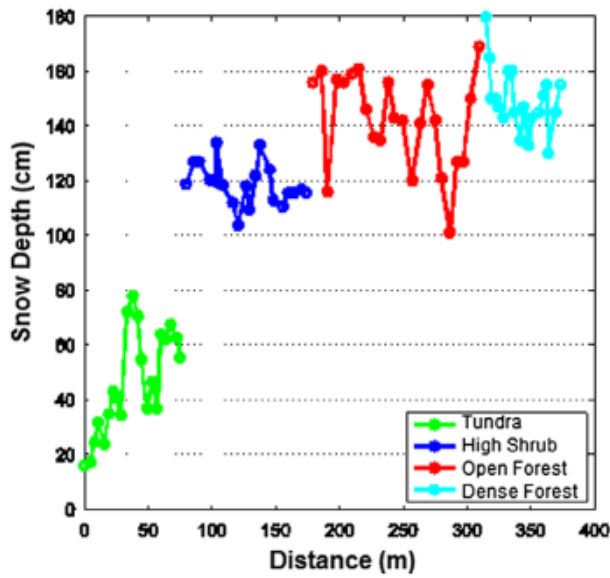


Figure 7. Variation and variability of the snow depth measured at different sections (samples) of the transects for each type of land cover. The distances (X axis) relative to each transect were shifted for plotting the data together. Data taken from transects in Figure 5.

from many directions during the long winter. Drifts keep forming until the thicket is completely covered (Figure 6). It is difficult to quantify this effect since the vegetation disappears under the snow. Some snow pit measurements in different zones further confirm variations

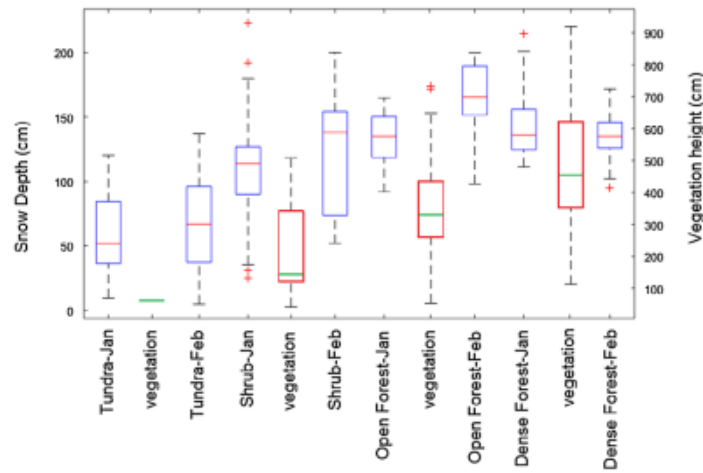


Figure 8. Vegetation height according to vegetation types (right y-axis) and variation of snow depth according to the vegetation type in January 2014 and February 2014 (left y-axis).

Table 2. *In-situ* (individual snowpit) measurements of snow depth, mean density, and snow-water equivalent (SWE) for several sites in the study area for the two field campaigns. No snowpit measurements were made in high shrub areas or in dense forest. Cladonia are present at each site.

Date	Site	Soil cover vegetation	Snow depth (cm)	Mean density (kg.m <sup>-3</sup> )	SWE (mm)	
22–26 January 2014	Lichen and low shrub tundra	<i>Cladonia</i>	37	360	133	
		Dwarf birch of variable height (0–50 cm)	70	376	263	
		Low dwarf birch	91	365	332	
		Shrub tundra, alder or willow	60	277	166	
24–28 February 2014	Open forest	Alder branches, also willow	131	320	419	
		Dwarf birch ~5 to 10 cm	45	392	141	
	Lichen and low shrub tundra	Dwarf birch ~15 to 20 cm				
		Dwarf birch ~10 to 15 cm	115	391	450	
		Dwarf birch ~5 to 10 cm				
		Dwarf birch + willow ~50 cm	86	364	311	
		Dwarf birch ~5 to 10 cm				
		Dwarf birch ~5 cm	67.5	357	241	
		Alder branches ~10 to 15 cm				
	Open forest	Dwarf birch + willow ~50 cm	60	395	237	
		Dwarf birch ~5 to 10 cm	30	314	93	
Dwarf birch ~5 cm		147	401	589		
Alder branches ~10 to 15 cm		135	343	462		

in snow depth, density, and snow water equivalent (SWE) (Table 2). The SWE values for forested areas (open and dense) appear significantly higher than in tundra and shrub tundra zones. But further studies, with more data, are needed to investigate relationships between snow density, SWE, and land cover.

Over a larger scale, including different land-cover types, Figure 7 shows examples of snow depth variations between zones and the associated typical variability. These four zones (tundra, open forest/open forest with shrubs, high shrubs, and forest) were selected

- La végétation est représentée par les boîtes rouge avec comme moyenne une ligne verte

**Table 3.** Mean snow depths from transect measurements as a function of the range of vegetation heights and mean summer NDVI for the four zones considered and for the two field campaigns. Std. is standard deviation. See also Figures 7 and 8.

Land cover type	Range of vegetation height (cm)	Mean summer NDVI ± Std	Snow depth ± Std (cm)	
			January 2014	February 2014
Tundra	0–50	0.300 ± 0.036	59.4 ± 30.55	67.7 ± 33.7
High shrubs	125–530	0.469 ± 0.027	108.1 ± 40.3	123.7 ± 45.4
Open forest	200–650	0.363 ± 0.049	133.1 ± 20.3	166.2 ± 26
Dense forest	190–780	0.286 ± 0.051	141.6 ± 22.8	135.7 ± 14

**Table 4.** *p* values for the *t*-test of the difference of snow depth between land covers.

	Tundra	High shrub	Open forest	Dense forest
<i>p</i> -value	0.0065	0.0811	0.000002	0.0468

as a function of the mean measured vegetation height and density (Table 3). The data were taken from the different transects shown in Figure 5.

We gathered data from all transects to compute the snow depth variation for each zone, plotted in Figure 8. Snow depths increase by up to a factor of 2.5 (January 2014) and 3 (February 2014) from the tundra to the open forest areas and dense forest areas. Note that inside the open and dense forest zones, snow depth variability is lower than in the tundra (lichen and low shrub tundra) or high shrubs, as it is protected from the wind by trees, even for the low vegetation density (Table 3 and Figure 8). Moreover, in tundra, high shrub and open forest areas lead to a rise in snow depth between the two dates, while the changes for the dense forest are negligible. Comparing the averages measured using a *t*-test show the values of *p* to be significant except for the high-shrub zone where a *p*-value > 0.05 is noted (table 4). This shows that the difference between snow depths averages between the zones are significant.

#### ***In-situ snow depth variations in winter***

To follow the snow depth evolution during the winter, snow depth was measured continuously at two weather stations (see Figures 2 and 3). Data obtained between October 2012 and June 2014 are plotted in Figure 9. Research on this area for these years was also conducted by Domine et al. (2015). There were technical problems with both of the tundra gages, but at least one of them was functioning at all times. Until April 2013, all three gages were functioning properly. It is important to note that summer levels represented in Figure 9 are due to vegetation and not year-round snow cover. Figure 9 illustrates the spatial variability of snow redistribution and accumulation. Precipitation was clearly similar at the three tundra gages, because they are 2 km apart in the same valley. Yet, wind redistribution is such that snow heights can show enormous variations within a short distance, illustrated by the 80 cm accumulation that occurred on 20–21 February 2013 at the tower gage, while the height increase at the nearby tripod was only 10 cm. The fact that accumulation was lower in the forest starting on 20 February 2013 may be explained by heterogeneity in the wind redistribution of snow (Domine et al., 2016). Year-to-year variability is also very high,



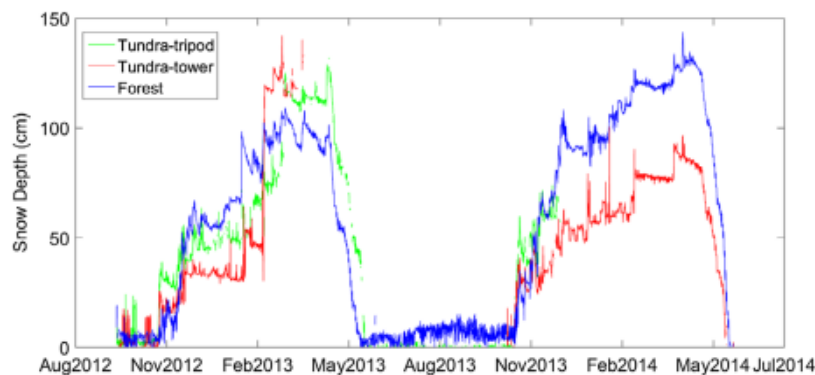


Figure 9. Snow depth variations at the two weather stations (2012–2013 and 2013–2014 winters). Tick marks represent first of the month.

as illustrated by the difference between the tundra tower and forest gages in the winters of 2013 and 2014. In 2013, the maximum height was much greater at the tundra tower site, whereas the opposite was observed in 2014. Furthermore, in 2013, snow melted earlier in the forest, while in 2014 it did so earlier in the tundra. These data lead to the conclusion that, while point snow height measurements are certainly useful, they cannot be used to reach a general understanding of snow-vegetation interactions. Remote sensing data, which provide a wider coverage, are thus used to better understand the spatial variability related to land cover.

#### **Temporal snowmelt analysis using remotely sensed data**

To assess the capacity of commonly available satellite data to monitor snow-cover variation and melt, we attempted to analyze the feasibility of using medium resolution data such as Landsat (30 m) and MODIS (500 m). We used a composite of 12 Landsat images (all the cloud-free images from 2014 and 2015; Table 1). This composite allows us to increase the temporal sampling, although there is some variability between years. We used the NDSI snow index to follow the snowmelt during the spring period (Figure 10). As expected, over most of the winter, the highest NDSI value corresponds to the tundra zone, completely covered by snow. As spring begins, we start to see a shift in the NDSI value for each zone. Considering that the temporal resolution of these data remains relatively low, even by compositing Landsat images over 5 years, and that this compositing could add noise to the signal, we do not observe significant variations in the melt date between land-cover types.

The snowmelt monitoring was also attempted using daily MODIS imagery (Figure 11). Despite its daily temporal resolution, the fractional snow cover product was not able to capture the melt differences either, due to the cloud cover still limiting the temporal sequence and because the 500 m spatial resolution makes the zone definition much more difficult (Figure 11).

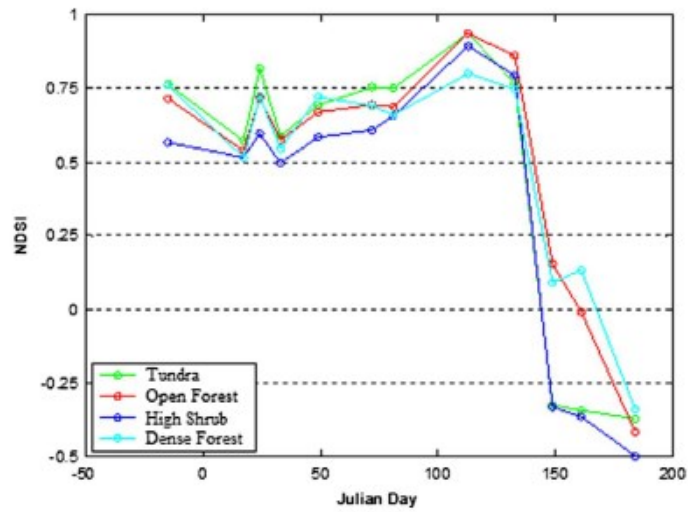


Figure 10. Variation of the NDSI snow index over the year using composite Landsat images from 2014 to 2015 for the four zones (30-m resolution). 0 Julian day means 1 January 2014.

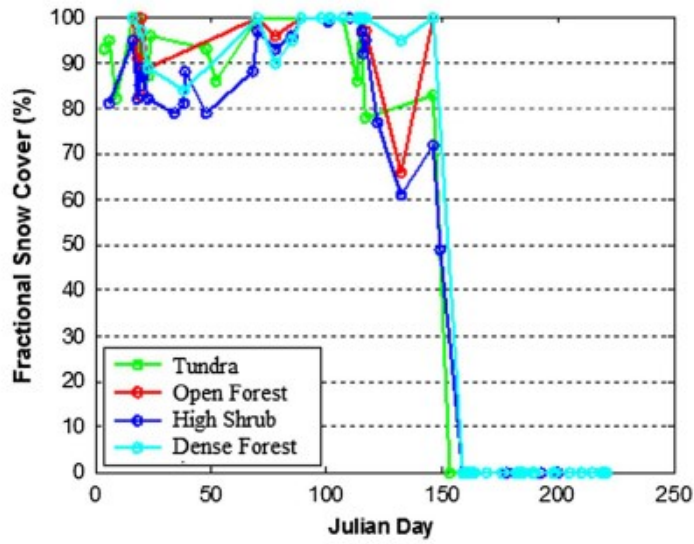


Figure 11. Variation of fractional snow cover from daily cloud-free MODIS/TERRA pixels (500-m resolution) data over the year 2015.

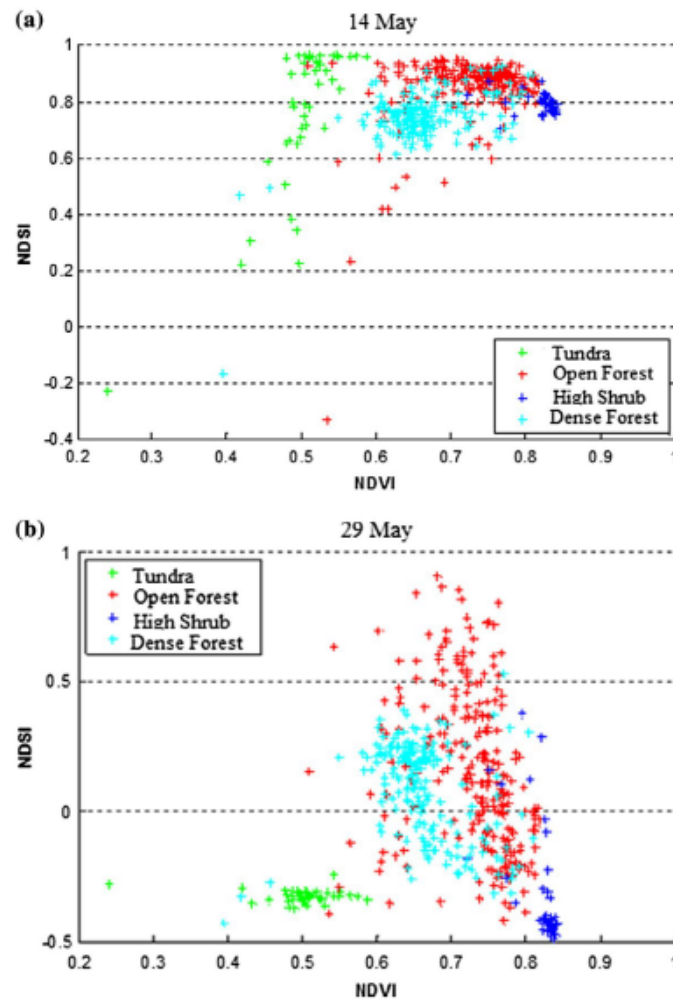


Figure 12. NDSI variation of Landsat pixels in each zone according to the NDVI values of the pixels in summer for two dates during the spring (A: 14 May and B: 29 May).

### Spatial analyses of snow-cover melt

To better visualize the vegetation-snow cover interactions during the melting period, we looked at all the Landsat pixels found inside each representative MODIS pixel for the three cloud-free dates for the same year (2015) as for the spring transition (14 and 29 May). The NDSI (a proxy for the presence of snow) of the four zones were analyzed for each date as a function of their summer NDVI values, a proxy of the vegetation density and type (see Table 3: the higher NDVI, the more shrubs). These scatterplots show different behavior following the land-cover types and dates (melt) (Figure 12). In the early spring (14 May), the

tundra exhibits a large variation of NDSI values over its NDVI range (0.15–0.35), meaning that snow in some pixels had already melted and others were still snow covered, but without a clear trend, while open forest and closed dense forest areas show a slight increase in NDSI with increasing NDVI. We notice, by looking into weather station data, that melt had already occurred by 14 May. In fact, the weather stations measured a drop in snow depth from 130 to 70 cm in the forest, from 18 April to 14 May, and from 85 to 42 cm in the tundra. This could mean that the vegetation contributes to snow trapping (more vegetation results in more snow). When melting progresses, the behavior changes, showing a slight decreasing trend in open and dense forest NDSI with increasing NDVI. This may be due to radiation effects (infrared emission by shrub branches) and warmer temperatures caused by lower albedo that accelerate the melt. Accordingly, on 29 May, there was no more snow on the tundra or over high shrubs. These scatterplots showing the spatial variability within each land-cover type appear in agreement with the *in-situ* measurements regarding the interactions between snow and vegetation.

### Conclusion

In northern regions, the observed shrub expansion (Myers-Smith et al., 2011, 2015) and the different land covers affect the snowpack in different ways, with large uncertainties in the magnitude and direction of these changes. The trapping effect by shrubs in tundra increases snow depth, limits its compaction, and favors a slight decrease in snowpack density (Lantz, Marsh, & Kokelj, 2013). The resulting impact is an increase in snow water equivalent (SWE) (product of snow depth and its density). Marsh, Bartlett, MacKay, Pohl, and Lantz (2010) observed a higher SWE at a shrub tundra site compared to a tundra site in Western Canada at the end of winter. From several snowpit data and high-density, snow-depth transects, our comparison with forested areas, generally including shrubs as well, shows a clear SWE and snow depth increase in forested areas compared to shrub-tundra sites (Table 2). We also showed the strong trapping effect of spruce thicket located in open tundra, where snow depth increased significantly in these areas. However, our continuous measurements using three instruments (two in shrub tundra and one in a clearing of open forest, shown in Figure 9) appear strongly affected by very site-dependent factors. When analyzing detailed measurements of snow depth for several kilometers of transects across different land-cover types from Arctic tundra without any vegetation to shrubs from 0.5 to 3 m height, and open and closed Subarctic black spruce forests, the results clearly show the strong impact of erect vegetation on increasing snow depth, despite a large variability.

This vegetation is also expected to affect the melt duration of the snow-covered period by modifying the energy balance: reducing the albedo, shading the snowpack, re-radiating longwave radiation from warm shrub branches, and increasing turbulent fluxes due to increased net radiation (Marsh et al., 2010; Pomeroy et al., 2006). Using satellite data (easily available, free-of-charge images, such as Landsat and MODIS data), it appears difficult to relate the melt rate to a vegetation type and density that should modulate the different components of the energy balance. However, changes in scatterplots between the snow index (NDSI) and vegetation type (NDVI) of Landsat images for the different land-cover types analyzed tend to show that snow melts more rapidly in dense high shrubs (high NDVI) compared to snow in open and dense forests (low NDVI). The outgoing longwave radiation in dense high shrubs (i.e. with stems above the snow surface) is probably increased,

accelerating melting (Marsh et al., 2010). In open and dense forest areas, the melt rate appears slightly lower, possibly due to shadowing effects.

The use of high-resolution satellite images should be better for monitoring these interactions, but their temporal resolution (rate of image acquisition) is still a major limitation. Further studies could use the dataset created for this study to validate and quantify the model of snow redistribution in dense vegetation (Marsh et al., 2010). The effect of shrubiness on the snow state change was also analyzed using a snowpack evolution model (Domine et al., 2016). The anticipated constellation of satellites such as Sentinel missions (Berger & Aschbacher, 2012) will help improve these analyses. Synthetic Aperture Radar can also be a powerful tool for monitoring the spatial distribution of wet and dry snow, as it is very sensitive to snow liquid water content and it is not affected by atmospheric conditions (Nagler & Rott, 2000; Royer, Goïta, Kohn, & DeSève, 2010).

### Acknowledgements

The authors thank Patrick Cliche and Caroline Dolant, from the Université de Sherbrooke, for their contributions to the field work to retrieve these measurements. We also thank the Centre for Northern Studies (CEN) for its logistic support at Umiujaq and for the data from the tundra tower snow gauge.

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### Funding

This work was supported by National Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC); Northern Scientific Training Program (NSTP); Université de Sherbrooke; French Polar Institute (IPEV) [program number 1042]; and Centre for Northern Studies (CEN).

### References

- AMAP. (2011). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate change and the cryosphere*. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), p. 538.
- Berger, M., & Aschbacher, J. (2012). The Sentinel missions – New opportunities for science. *Remote Sensing of Environment, Special Issue, 120*, 1–276.
- Bhatt, U. S., Walker, D. A., Raynolds, M. K., Epstein, H. E., Jia, G., Comiso, J. C., ... Webber, P. J. (2010). Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline. *Earth Interactions, 14*, 1–20.
- Callaghan, T. V., Johansson, M., Brown, R. D., Groisman, P. Y., Labba, N., Radianov, V., Bradley, R. S., ... Wood, E. F. (2011). Multiple effects of changes in Arctic snow cover. *Ambio, 40*, 32–45.
- Callaghan, T. V., & Tweedie, C. E. (2011). Multi-decadal changes in tundra environments and ecosystems: The international polar year back to the future project. *Ambio, 40*, 555–716.
- Crane, R. G., & Anderson, M. R. (1984). Satellite discrimination of snow/cloud surfaces. *International Journal of Remote Sensing, 5*, 213–223.
- Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., & Dech, S. (2012). Remote sensing of snow – A review of available methods. *International Journal of Remote Sensing, 33*, 4094–4134.
- Domine, F., Barrere, M., & Morin, S. (2016). The growth of shrubs on high Arctic tundra at Bylot Island: Impact on snow physical properties and permafrost thermal regime. *Biogeosciences, 13*, 6471–6486. doi:10.5194/bg-13-1-2016

- Domine, F., Barrere, M., Sarrazin, D., & Morin, S. (2015). Automatic monitoring of the effective thermal conductivity of snow in a low Arctic shrub tundra. *The Cryosphere Discussions*, 9, 1633–1665. doi: [10.5194/tcd-9-1633-2015](https://doi.org/10.5194/tcd-9-1633-2015)
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing of the Environment*, 28, 9–22.
- Gouttevin, I., Menegoz, M., Domine, F., Krinner, G., Koven, C., Ciais, P., ... Boike, J. (2012). How the insulating properties of snow affect soil carbon distribution in the continental pan-Arctic area. *Journal of Geophysical Research*, 117, G02020.
- Guangzhen, C., Peng, H., Zhaojun, Z., & Shihao, T. (2015). Generation of daily snow depth from multi-source satellite images and in situ observations. *Journal of Geographical Sciences*, 25, 1235–1246.
- Hall, D., & Riggs, G. (2014). Normalized-difference snow index (NDSI). In V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, (pp. 779–780).
- Laberge, M. J., Payette, S., & Pitre, N. (2001). Development of stunted black spruce (*Picea mariana*) clones in the subarctic environment: A dendro-architectural analysis. *Ecoscience*, 8, 489–498.
- Lantz, T. C., Marsh, P., & Kokelj, S. V. (2013). Recent shrub proliferation in the Mackenzie Delta Uplands and microclimatic implications. *Ecosystems*, 16, 47–59.
- Lopez, P., Sirguy, P., Arnaud, Y., Pouyau, B., & Chevallier, P. (2008). Snow cover monitoring in the Northern Patagonia ice field using MODIS satellite images (2000–2006). *Global Planetary Change*, 61, 103–116.
- 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.
- Ménard, C. B., Essery, R., Pomeroy, J., Marsh, P., & Clark, D. B. (2012). A shrub bending model to calculate the albedo of shrub-tundra. *Hydrological Processes*, 28, 341–351.
- Myers-Smith, I. H., Elmendorf, S. C., Beck, P. S. A., Wilmking, M., Hallinger, M., Blok, D., ... Vellend, M. (2015). Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. *Nature Climate Change*, 5, 887–891. doi:[10.1038/NCLIMATE2697](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2697)
- Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., ... Hik, D. S. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: Dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, 6, 045509, 15. doi:[10.1088/1748-9326/6/4/045509](https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045509)
- Nagler, T., & Rott, H. (2000). Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 754–765. doi:[10.1109/36.842004](https://doi.org/10.1109/36.842004)
- Notarnicola, C., Duguay, M., Moelg, N., Schellenberger, T., Tetzlaff, A., Monsorno, R., ... Zebisch, M. (2013). Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution, part 1: Algorithm description. *Remote Sensing*, 5, 110–126.
- Pomeroy, J. W., Bewley, D. S., Essery, R. L. H., Hedstrom, N. R., Link, T., Granger, R. J., ... Janowicz, J. R. (2006). Shrub tundra snowmelt. *Hydrological Processes*, 20, 923–941.
- Provencher-Nolet, L., Bernier, M., & Levesque, E. (2014). Short term change detection in tundra vegetation near Umiujaq, subarctic Quebec, Canada. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Québec City (pp. 4668–4670). doi: [10.1109/IGARSS.2014.6947534](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947534)
- Ropars, P., & Boudreau, S. (2012). Shrub expansion at the forest–tundra ecotone: Spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7, 015501. doi:[10.1088/1748-9326/7/1/015501](https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015501)
- Royer, A., Goïta, K., Kohn, J., & DeSève, D. (2010). Monitoring dry, wet and no- snow conditions from microwave satellite observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 670–674.
- 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.
- Sibandze, P., Mhangara, P., Odindi, J., & Kganyago, M. (2014). A comparison of normalised difference snow index (NDSI) and normalised difference principal component snow index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related land cover types. *South African Journal of Geomatics*, 3, 197–209.
- Sturm, M., Holmgren, J., & Perovich, D. K. (2002). The winter snow cover of sea ice of the Arctic Ocean at SHEBA: Temporal evolution and spatial variability. *Journal Geophysical Research-Oceans*, 107, 8047.

- Sturm, M., McFadden, J. P., Liston, G. E., Chapin, F. S., III, Racine, C. H., & Holmgren, J. (2001). Snowshrub interactions in Arctic tundra: A hypothesis with climatic implications. *Journal of Climate*, 14, 336–344.
- Wang, Y., Woodcock, C. E., Buermann, W., Stenberg, P., Voipio, P., Smolander, H., ... Myneni, R. B. (2004). Evaluation of MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment*, 91, 114–127.

## 4 Mesure d'épaisseur de neige par fraction d'ombre

De façon à faire un suivi de l'épaisseur de neige à travers l'hiver par télédétection, nous avons voulu développer une technique de mesure d'épaisseur de neige à partir des images à très haute résolution spatiale. En nous basant sur l'idée que l'ombre de la végétation devrait être moins grande alors que l'épaisseur de neige augmente (voir Figure 3), nous avons voulu établir une relation entre la fraction d'ombre mesurée et l'épaisseur de neige dans chaque zone de la vallée. Par contre, il est impossible de faire l'expérience avec la zone de toundra de lichen et de bas arbustes puisque la végétation très basse a déjà disparu dans nos images. L'expérience a été inspirée des travaux de Leboeuf et al. (2007) pour mesurer la biomasse d'une forêt. Selon Leboeuf et al. (idem), pour optimiser le rendement de la technique, il faudrait prendre des images panchromatiques, faire le calcul de la fraction d'ombre sur des zones de 30 m sur 30 m, utiliser une échelle de segmentation de 5 et trouver un seuil de la nuance de gris représentatif à l'éclaircissement de l'image.

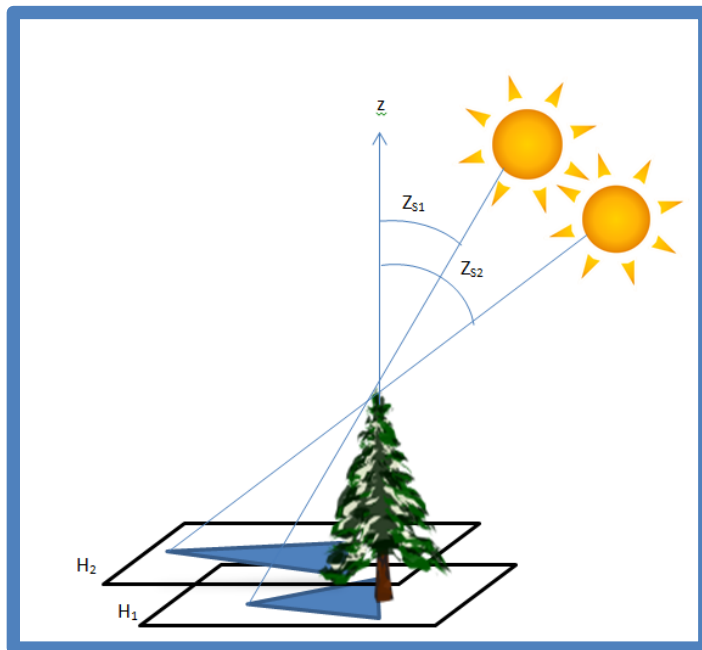
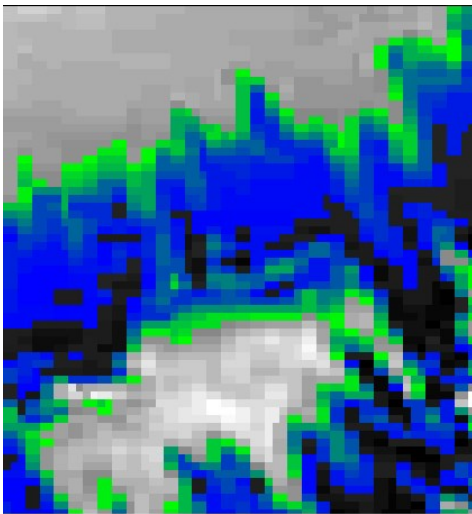


Figure 3 : Trouver l'épaisseur de neige en différenciant la longueur d'ombre à deux différentes dates.

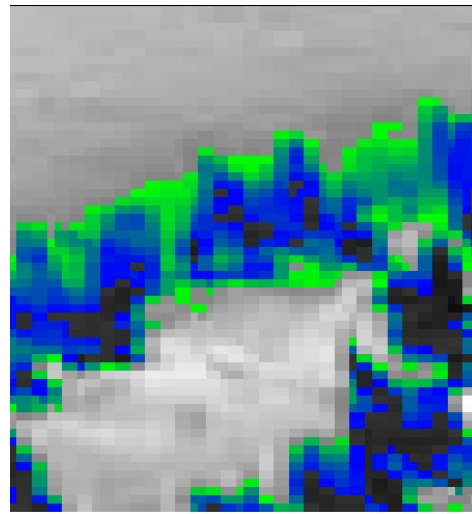


Ce que nous obtenons, après l'analyse de 10 imageries de 30 m sur 30 m à l'intérieur de chaque classe de couverture du sol et pour chacune des dates, c'est une bonne représentation de la diminution de l'ombre sur la neige alors que l'épaisseur de neige augmente entre janvier et février (Figure 5). L'image 16 représente un exemple de la classification de l'ombre dans les images. Dans ce cas nous observons la différence de l'ombre dans une zone de forêt ouverte en janvier et février. En comparant la figure 5 avec la figure 8 de l'article, nous observons bien la corrélation entre la profondeur de la neige et la fraction d'ombre. Plus il y a de neige, moins la fraction d'ombre sur le sol est importante dans les zones de hauts arbustes et de forêt ouvertes. On constate une augmentation de la fraction d'ombre dans la zone de forêt malgré une épaisseur de neige presque similaire entre les deux dates (Figure 6). Si on avait les données de plusieurs autres dates, il serait possible de créer une corrélation importante entre la fraction d'ombre et l'épaisseur de neige et il serait éventuellement possible de mesurer l'épaisseur de neige par simple calcul de fraction d'ombre. Les valeurs de p du test t dans le tableau 1 démontrent que les différences entre les dates sont toutes significatives.

A)



B)



*Figure 4 : Différence de l'ombre entre Janvier (A) et Février (B) 2014. L'ombre est représenté par le dégradé de bleu et vert, le noir représente la végétation et le gris pâle la neige.*

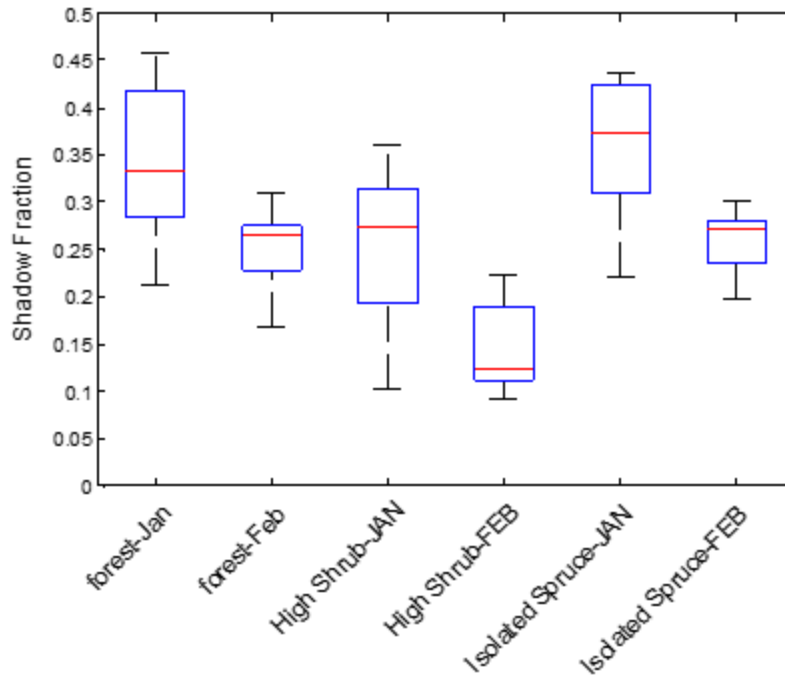


Figure 5 : Variation de fraction d'ombre selon la zone et la date d'acquisition de l'image  
Pléiade

Tableau 1 : Valeur des p après avoir fait le test t des différences de fraction d'ombre

	Forest	Highshrub	Isolated-Spruce
p-value	0,0000113	0,0000001	0,0007063

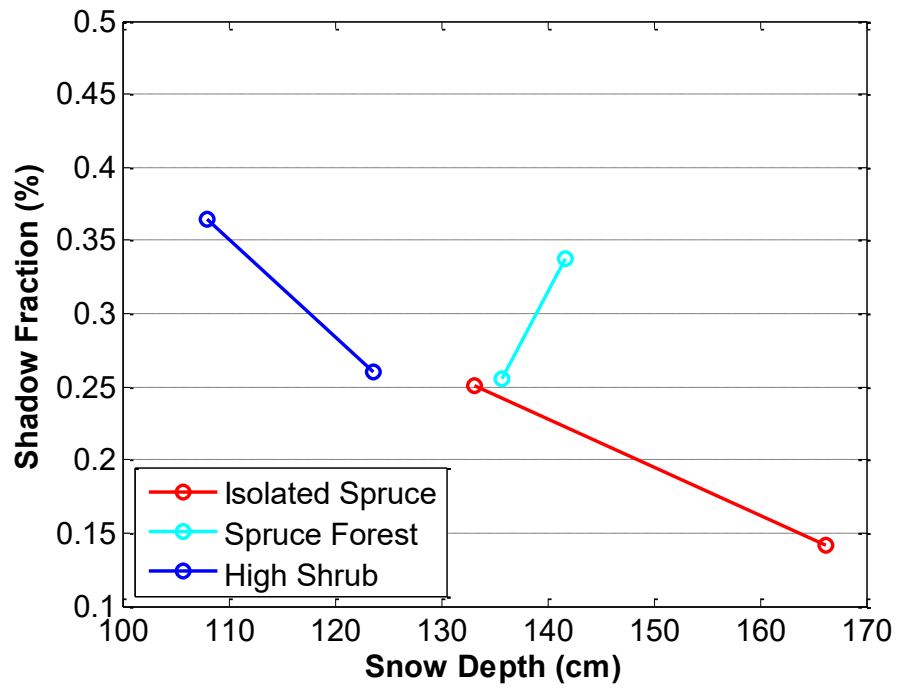


Figure 6 : La fraction d'ombre en fonction de l'épaisseur de neige

## 5 Conclusion

Dans les régions nordiques, la prolifération d'arbustes observée affecte le couvert de neige de différentes façons avec de grandes incertitudes dans la magnitude et la direction de ces changements. Nous avons démontré que l'effet d'emprisonnement de la neige par les arbustes en toundra augmente l'épaisseur de neige. De plus, il est possible que les arbustes limitent aussi sa compaction et favorisent une perte de densité (Lantz et al, 2013). L'impact résultant semble tendre vers une augmentation dans l'équivalent en eau de cette neige (SWE). Marsh et al. (2010) observent un plus haut SWE dans une zone de toundra arbustive comparativement à une zone de toundra de lichen dans l'Ouest canadien à la fin de l'hiver. À partir de plusieurs données de puits de neige, nos comparaisons avec les zones de forêt, qui généralement ont aussi des arbustes, montrent une augmentation du SWE dans les zones de forêt comparativement aux zones de toundra arbustives (Tableau 2 de l'article). Par contre, nos mesures continues des stations météo montrent plus de neige dans la station en toundra arbustive que dans celle en forêt ouverte, démontrant que les données sont très dépendantes des facteurs du site. En analysant les mesures détaillées de profondeur de neige sur plusieurs kilomètres de transects sur différentes couvertures de sol, les résultats démontrent clairement l'impact important des arbustes sur l'augmentation de l'épaisseur de neige, même avec de grandes variabilités.

Les arbustes devraient aussi avoir un effet sur la durée de la fonte en modifiant le bilan d'énergie (+ : fonte accélérée ; - : fonte ralentie) : en réduisant l'albédo (+), en faisant de l'ombre sur la couche de neige (-), par la radiation des branches et troncs des arbustes (+), et par la réduction de la vitesse des vents (+) (Pomeroy et al, 2006; Marsh et al, 2010). En utilisant des données satellites (Landsat et MODIS), il semble être difficile de relier la vitesse de fonte avec la présence ou non d'arbustes. Par contre, les changements observés dans les relations entre NDSI (neige) et NDVI d'été (densité de végétation) pour chaque classe de couverture du sol (Figure 12 dans l'article), démontrent que la fonte de la neige est plus rapide en zone de hauts arbustes comparativement à la neige en forêt ouverte et fermée. Cela peut démontrer aussi que l'effet du vent sur l'ablation est plus grand en milieu ouvert. La radiation émise en zone de hauts arbustes est probablement augmentée,

accélérant ainsi la fonte. En forêt ouverte ou en forêt fermée, la fonte semble un peu moins rapide, sûrement attribuable à l'effet d'ombrage.

Ce travail a su contribuer à la science par l'étude locale de la neige et de l'effet de la végétation sur celle-ci et les écosystèmes. Les aspects physiques de la neige affectent directement et indirectement plusieurs aspects de la lithosphère. Ils affectent directement l'isolation et l'hydrologie du sol ainsi que l'accès aux aliments pour certains animaux. Mieux comprendre le couvert nival localement permet aussi de poser des conclusions plus songées sur certaines études faites à résolution spatiale plus grossières.

L'usage d'image à très haute résolution pourrait être une meilleure option pour analyser ces interactions, mais leur prix est toujours une très grande limitation. Les constellations de satellites tels que « Sentinel missions » (Berger et Aschbacher, 2012) vont aider à améliorer ces analyses. Un radar à synthèse d'ouverture pourrait aussi être d'une grande utilité pour surveiller la distribution spatiale de neige mouillée et sèche, puisqu'il est très sensible au contenu en eau de la neige, et n'est pas affecté par les conditions atmosphériques (Nagler et Rott, 2000; Royer et al, 2010).

## 6 Références supplémentaires à l'article

- Forbes B.C., Fauria M.M. et Zetterberg P. (2010) Russian arctic warming and 'greening' are closely tracked by tundra shrub willows. *Global Change Biology*. Vol.16, p. 1542-1554.
- Hill G.B. et Henry G.H.R. (2011) Responses of High Arctic wet sedge tundra to climate warming since 1980. *Global Change Biology*. Vol 17, p. 276-287.
- Hudson J.M.G et Henry G.H.R. (2009) Increased plant biomass in a high arctic heath community from 1981 to 2008. *Ecology*. Vol. 90, p.2657-2663.
- Lantz T.C., Gergel S.E., Henry G.H.R. (2010) Response of green alder (*Alnus viridis* subsp. *Fruticosa*) patch dynamics and plant community composition to fire and regional temperature in north-western Canada. *Journal of Biogeography*. Vol. 37, p.1597-1610.
- Lantz T.C., Kokelj S.V., Gergel S.E., Henry G.H.R. (2009) Relative impacts of disturbance and temperature: persistent changes in microenvironment and vegetation in retrogressive thaw slumps. *Global Change Biology*. Vol. 15, p. 1664-1675.
- Leboeuf, A., Beaudoin, A., Fournier, R.A., Guindon, L., Luther, J.E. et Lambert, M.-C. (2007) A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using QuickBird imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 110, p.488-500.
- Mauritsen T. (2016) Arctic climate change: Greenhouse warming unleashed. *Nature geoscience*. Vol. 9, p.271-272
- Myers-Smith I.H. et al. (2011) Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*. Vol. 6, n.4
- Myers-Smith I.H., Hik D.S., Kennedy C., Cooley D., Johnstone J.F., Kenney A.J. et Krebs C.J. (2011) Expansion of Canopy-Forming Willows Over the Twentieth Century on Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *Ambio*. vol. 40(6), p.610-623.
- Smith S.J., Edmonds J., Hartin C.A., Mundra A. et Calvin K. (2015) Near-term acceleration in the rate of temperature change. *Nature Climate Change* vol. 5, p.333-336.

Sturm M., Racine C. et Tape K. (2001) Climate Change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*. Vol. 411, p. 546-547.

Tape K., Sturm M., et Racine C. (2006) The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*. Vol. 12 p. 686-702.

Tremblay B. (2010) Augmentation récente du couvert ligneux, érigé dans les environs de Kangiqsualujjuaq (Nunavik, Québec) *MSc thesis* Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada.