

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

**Spatialisation du modèle de couvert nival SNOWPACK dans le Nord canadien  
pour l'étude de l'accès à la nourriture du caribou de Peary**

**Félix Ouellet**

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

**Juin 2016**

**© Félix Ouellet, 2016**

## **Composition du jury**

Directeur de maîtrise :

Alexandre Langlois, professeur au Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke

Codirecteur de maîtrise :

Alain Royer, professeur au Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke

Codirectrice de maîtrise :

Cheryl Ann Johnson, Écologiste de la faune, Sciences et technologie du paysage, Environnement et Changement climatique Canada

Membre interne :

Richard Fournier, Professeur au Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke

Membre externe :

Ludovic Brucker, Earth scientist, Cryospheric Sciences Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center

## Table des matières

Liste des figures du mémoire .....	iii
Liste des figures de l'article scientifique.....	iv
Liste des tableaux du mémoire.....	v
Liste des tableaux de l'article scientifique .....	v
Liste des annexes.....	v
Glossaire.....	vi
Remerciements .....	vii
1. Introduction .....	1
1.1. État de la question .....	1
1.2. Objectifs et hypothèses.....	5
2. Cadre théorique sur SNOWPACK.....	6
2.1. Physique impliquée .....	6
2.2. Entrées .....	7
2.3. Sorties.....	8
2.4. MeteoIO .....	9
2.5. Sngui.....	10
3. Article scientifique .....	12
1.0. <i>Introduction</i> .....	15
2.0. <i>Background</i> .....	17
2.1. <i>Rangifer Tarandus</i> .....	17
2.2. <i>SNOWPACK</i> .....	18
3.0. <i>Data &amp; Methods</i> .....	19
3.1. <i>Study Area</i> .....	19
3.2. <i>Data</i> .....	19
3.3. <i>SNOWPACK Spatialization</i> .....	22
4.0. <i>Results &amp; their Interpretation</i> .....	25
4.1. <i>Preliminary Evaluations</i> .....	25
4.2. <i>Snow Parameters of Interest</i> .....	26
4.3. <i>Software &amp; Operational Results</i> .....	27
4.4. <i>Spatiotemporal Analysis of Grazing Conditions</i> .....	28
4.5. <i>Preliminary Upscaling Approach</i> .....	31
5.0. <i>Discussion &amp; Conclusion</i> .....	32
6.0. <i>Acknowledgements</i> .....	33
7.0. <i>References</i> .....	34

4. Éléments complémentaires de méthodologie, de résultats et de discussion .....	38
4.1. Site d'étude.....	38
4.2. Données météorologiques .....	39
4.3. Spatialisation de SNOWPACK.....	41
5. Conclusion globale du mémoire.....	59
6. Bibliographie complémentaire à l'article .....	62

### Liste des figures du mémoire

Figure 1 : Tendence de température 1950-2014 (source : Goddard Institute for Space Studies, 2015).....	1
Figure 2 : Tendence 1979-2009 (en jours/décennie) de la pluie-sur-neige en Arctique (source : Liston et Hiemstra, 2011).....	2
Figure 3 : Couches de neige très dure positionnées par rapport à l'épaisseur du couvert nival en région subarctique (source : Johansson et al., 2011).....	3
Figure 4 : Accès à la nourriture au sol bloqué par la présence de neige dense dans le couvert nival pour le caribou de Peary (vulgarisation). ....	4
Figure 5 : Aspect spatialisation (principe). Pour cet exemple, une information disponible pour un pixel de 5 km x 5 km est spatialisée sur une superficie d'environ 1500 km <sup>2</sup> . ....	5
Figure 6 : Physique impliquée dans SNOWPACK (source : documentation de SNOWPACK).....	7
Figure 7 : Composantes principales de MeteoIO. ....	10
Figure 8 : Exemple de visualisation sous Sngui (épaisseur de neige et densité dans le temps, péninsule Boothia, hiver 1988-1989 ; inclut le détail quantitatif de la densité pour le 23 mars 1989 à midi). ....	11
Figure 9 : Site d'étude. ....	38
Figure 10 : Organigramme méthodologique global. ....	42
Figure 11 : Organigramme méthodologique (détail du 1er objectif). ....	43
Figure 12 : Organigramme méthodologique (détail du 2ème objectif).....	44
Figure 13 : Organigramme méthodologique (détail du 3ème objectif).....	45
Figure 14 : Température de l'air (K) dans le temps : comparaison MRCC vs données mesurées aux stations d'Environnement et Changement climatique Canada à Resolute Bay et du CARTEL (UdeS) à Cambridge Bay.....	47
Figure 15 : Rayonnement de grande et courte longueurs d'onde descendantes de surface (W/m <sup>2</sup> ) dans le temps : comparaison MRCC vs données mesurées à la station du CARTEL (UdeS) à Cambridge Bay.....	47
Figure 16 : Comptes insulaires de caribous vs épaisseur cumulée (cm) pour seuil de 400 kg/m <sup>3</sup> (Lucie Portier, ex-membre du GRIMP). ....	51

Figure 17 : Indicateur de comptes insulaires de caribous vs indicateur neige (épaisseur cumulée & type de grain) pour tout l'hiver pour un seuil de 300 kg/m <sup>3</sup> . Les cercles vides représentent les années pour lesquelles aucune couche à aucun moment n'a atteint le seuil de densité....	52
Figure 18 : Maxima de l'indicateur de comptes insulaires de caribous par intervalles de l'indicateur neige (épaisseur cumulée & type de grain) pour tout l'hiver pour un seuil de 300 kg/m <sup>3</sup> . .....	53
Figure 19 : Exemple de paramétrisation initiale sous Matlab pour la spatialisation.....	55
Figure 20 : Écran d'accueil au lancement d'une spatialisation, et étapes impliquées. ....	56
Figure 21 : Polygones associés à la base de données des pixels MRCC (zone d'étude en bleu)...	57
Figure 22 : Unités désignables pour le caribou ( <i>Rangifer tarandus</i> ) au Canada (source : COSEPAC, 2011). .....	65
Figure 23 : Caribou de Peary (source : Environnement et Changement climatique Canada, 2014). .....	65
Figure 24 : Prototype de spatialisation (à gauche, rendu du <i>shapefile</i> ; à droite, rendu matriciel associé pour la densité en date du 16 mars 2010 à 06h00). .....	67
Figure 25 : Structure des fichiers de profils de neige.....	68
Figure 26 : Aperçu de la structure de la base de données ponctuelle <i>shapefile</i> des pixels MRCC. ....	68
Figure 27 : Aperçu de la structure de l'extrait principal <i>shapefile</i> (exemple pour l'année 2011). ..	68
Figure 28 : Comptes insulaires de caribous vs épaisseur cumulée (cm) pour seuil de 325 kg/m <sup>3</sup> . ..	71
Figure 29 : Rendu matriciel à partir des données NARR pour l'épaisseur cumulée, la hauteur totale de neige, un paramètre de fonte / gel et pour le <i>SWE</i> , moyennés de 2000 à 2013.....	72

### Liste des figures de l'article scientifique

Figure 1. Study area. ....	19
Figure 2. Cumulative thickness calculation example (threshold of 300 kg·m <sup>-3</sup> ). Snow layers' colours go along with associated density. ....	24
Figure 3. Peary caribou island counts in comparison with cumulative thickness (cm) above 300 kg·m <sup>-3</sup> for all winter seasons (October to May) preceding caribou observations; (a) all counts are shown (unfilled circles represent years where no layers reached the density threshold for the associated location); (b) maximum counts for each 2500 cm cumulative thickness	

intervals are shown (data gaps were filled with mean count between preceding / subsequent cumulative thickness intervals). The power relationship plotted has an $R^2$ of 0.45. The bootstrapped standard errors are also shown (based on 5000 iterations). .....	26
Figure 4. Raster output result of cumulative thickness (cm) above 300 kg·m <sup>-3</sup> for all 2011 winter (October to May). Cumulative thickness is presented on a logarithmic scale. Glaciers are not masked, but they were not used in the spatiotemporal analysis presented in Section 4.4. ....	28
Figure 5. Preliminary spatiotemporal analysis: cumulative thickness over and under 7000 cm for whole winter, averaged over 5-yr periods. ....	29
Figure 6. Preliminary upscaling approach: slope at different spatial resolutions (under / over 1°) for Banks Island. ....	31

### **Liste des tableaux du mémoire**

Tableau 1 : Paramètres météorologiques de SNOWPACK. ....	8
Tableau 2 : Paramètres MRCC disponibles. ....	39
Tableau 3 : Paramètres MRCC vs SNOWPACK.....	40
Tableau 4 : Paramètres météorologiques du format SMET. ....	40
Tableau 5 : Paramètres MCanCR4 vs SNOWPACK.....	69
Tableau 6 : Paramètres NARR vs SNOWPACK.....	70

### **Liste des tableaux de l'article scientifique**

Table 1. The number of Peary caribou surveys per island with corresponding years. ....	20
--	----

### **Liste des annexes**

Annexe 1 – Le caribou au Canada .....	65
Annexe 2 – Choix du modèle de simulation du couvert nival .....	66
Annexe 3 – Prototype de spatialisation.....	67
Annexe 4 – Aperçu des bases de données impliquées .....	68
Annexe 5 – Inclusion des données MCanCR4.....	69
Annexe 6 – Inclusion des données NARR.....	70

## Glossaire

L'expression *couvert nival* sera utilisée dans ce document. À noter qu'on aurait pu utiliser l'expression *couvert de neige* ou *couvert neigeux* à la place, qui sont des expressions ayant le même sens. On retrouvera aussi l'expression *manteau neigeux* dans la littérature.

En anglais le terme utilisé est *snowpack*, qui a inspiré un modèle de caractérisation de couvert nival du même nom, SNOWPACK, qui sera discuté dans le présent document. On peut distinguer l'un de l'autre avec les lettres majuscules. L'expression *snow cover* sera aussi utilisée. Wikipédia nous donne faussement l'expression *accumulation annuelle de neige* comme traduction de la page sur le terme *snowpack*. On comprendra que l'expression *accumulation annuelle de neige* réfère plutôt à la quantité de neige tombée au cours d'une année, ce qui est différent du couvert nival.

## **Remerciements**

Merci en tout premier lieu à mon directeur de maîtrise Alexandre Langlois, pour son guidage, ses idées, son support et sa disponibilité tout au long de la maîtrise.

Un immense merci à Environnement et Changement climatique Canada, l'initiateur du projet, non seulement pour le financement, mais pour l'étroite collaboration tout au long du projet ; particulièrement merci à Cheryl Ann Johnson (co-directrice) et à Agnes Richards.

Merci à Alain Royer (co-directeur) pour ses judicieux conseils lors de la rédaction des documents au cours de la maîtrise.

Un gros merci aussi aux collaborateurs étudiants / professionnels de recherche au département : Jean-Benoît Madore, Lucie Portier et Roxanne Lanoix.

## 1. Introduction

### 1.1. État de la question

En Arctique, la communauté scientifique constate le phénomène des changements climatiques depuis plus de trois décennies (Screen et Simmonds, 2010). Dans cette vaste région nordique, un réchauffement global de 1,06 °C par décennie est observé (Solomon et al., 2007), par rapport à 0,24 °C par décennie pour le Canada (Environnement Canada, 2015). La Figure 1 montre la répartition spatiale de la tendance de température entre 1950 et 2014 et permet de voir le réchauffement accru en Arctique par rapport au reste du globe.

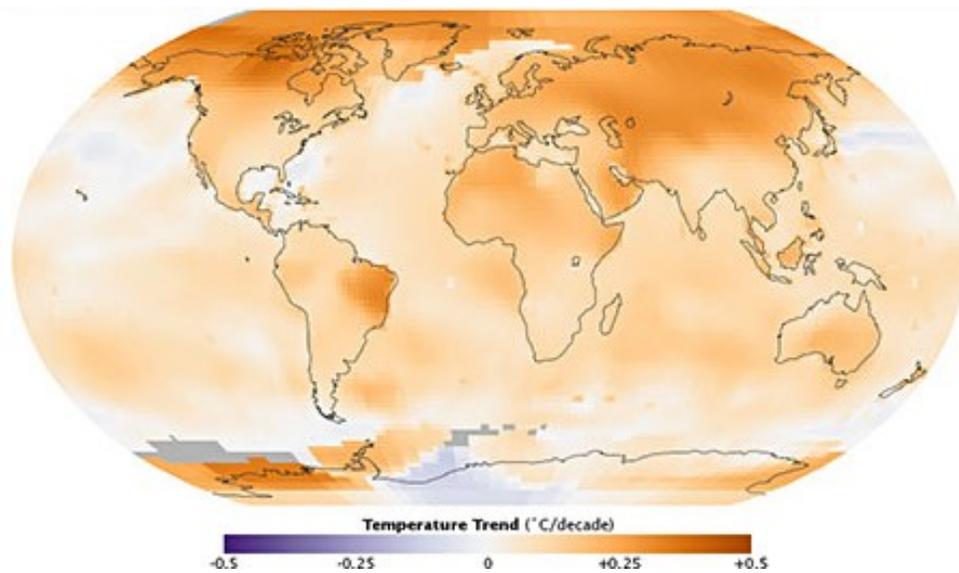
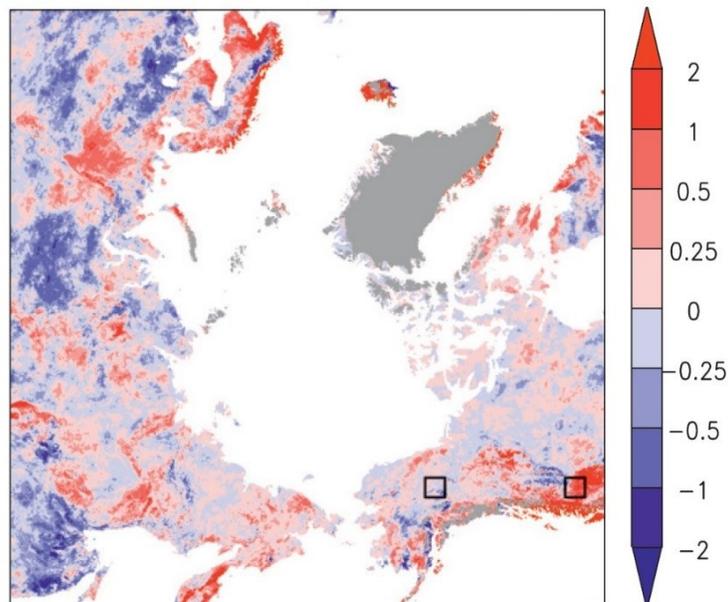


Figure 1 : Tendance de température 1950-2014 (source : Goddard Institute for Space Studies de la NASA, 2015).

Les impacts physiques de ce réchauffement sont multiples, parmi lesquels on dénote des patrons d'anomalies négatives du couvert nival (Derksen et Brown, 2012), de l'étendue de la glace de mer (Stroeve et al., 2011), des glaciers (Gardner et al., 2013) et du pergélisol (Romanovsky et al., 2010). Ces effets ont un impact important sur la réponse de la cryosphère aux changements climatiques, notamment au niveau de l'albédo et de la conductivité thermique de la neige. En effet, via son fort albédo, et sa faible conductivité thermique, la neige conditionne la quantité d'énergie absorbée par la surface (date de fonte des glaciers, du pergélisol, etc.).

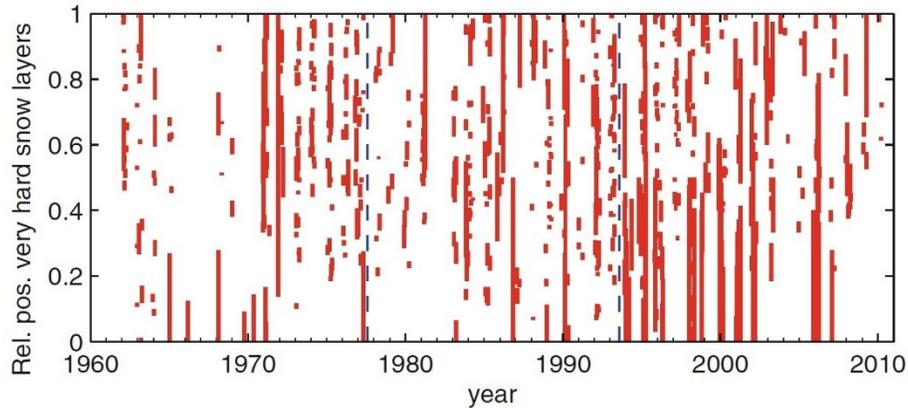
Particulièrement pour le couvert nival, qui couvre l'entièreté du territoire arctique en saison hivernale, on observe une fonte plus précoce lors de la saison printanière (Derksen et Brown, 2012).

Le réchauffement actuellement observé amène aussi l'augmentation de l'occurrence d'évènements extrêmes hivernaux tels des vagues de chaleur, des précipitations extrêmes et des périodes de pluie-sur-neige (Callaghan et Johansson, 2011 ; Dolant et al., 2015). Avec le réchauffement actuellement observé, on note une recrudescence de ces évènements dans l'hémisphère nord, dont en Arctique. Par exemple, Liston et Hiemstra (2011) ont démontré l'augmentation de l'occurrence de ces évènements en Arctique entre 1979 et 2009 (la Figure 2 illustre la tendance pour la pluie-sur-neige en jours/décennie), alors que Vincent et Mekis (2006) suggèrent une augmentation de la proportion de précipitations liquides à l'échelle annuelle entre 1950 et 2003.



**Figure 2 : Tendence 1979-2009 (en jours/décennie) de la pluie-sur-neige en Arctique (source : Liston et Hiemstra, 2011)**

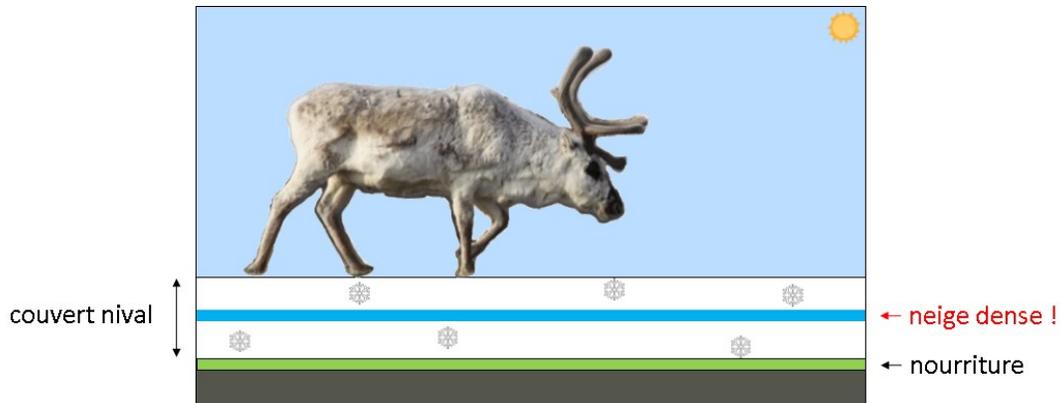
Encore très peu d'études se sont attardées à cette problématique qui amène la formation de croûtes de neige de haute densité (glace, couche de regel, neige croûtée) de plus en plus fréquentes. Parmi ces peu nombreuses recherches, Johansson et al. (2011) ont relevé qu'en région subarctique suédoise, sur une plage d'étude allant de 1960 à 2009, la période la plus récente, soit 1993-2009, est celle présentant le plus de couches de neige très dure, phénomène que l'on peut observer à la Figure 3.



**Figure 3 : Couches de neige très dure positionnées par rapport à l'épaisseur du couvert nival en région subarctique (source : Johansson et al., 2011).**

L'effet de ces croûtes reste peu connu (Montpetit et al., 2013), mais des études récentes démontrent le potentiel de leur détection avec des outils de télédétection (Montpetit, 2015 ; Dolant et al., 2015). Ceci s'avère intéressant dans la mesure où la présence de ces croûtes, non seulement modifie le bilan d'énergie de surface (Weismüller et al., 2011), mais aussi conditionne l'accès à la nourriture de plusieurs ongulés (Putkonen et Roe, 2003), comme le caribou de Peary.

Le Registre public des espèces en péril du Canada a catégorisé le caribou de Peary, l'unité désignable de l'espèce *caribou* ayant son habitat dans l'archipel arctique canadien (voir l'Annexe 1 pour son habitat et une image), comme « espèce en voie de disparition ». De façon quantitative, le nombre de caribous de Peary a diminué de plus de 70 % au cours des trois dernières générations (COSEPAC, 2011). Le Registre indique que ces couches de glace ou de neige épaisse et dense constituent le facteur le plus menaçant pour la survie à moyen / long terme du caribou de Peary. En effet, ces couches rendent difficile à certains moments de l'année l'accès à la nourriture au sol, déjà limitée en quantité, pour le caribou de Peary. Cette problématique est illustrée de façon très vulgarisée à la Figure 4.



**Figure 4 : Accès à la nourriture au sol bloqué par la présence de neige dense dans le couvert nival pour le caribou de Peary (vulgarisation).**

Toutefois, jusqu'à maintenant, la possibilité de quantifier la magnitude de l'effet de ces couches sur les populations de caribous a été freinée par le manque de données caractérisant spatialement les couches en question, l'information étant actuellement accessible localement seulement. Par rapport au manque de nourriture, l'année a été divisée par Environnement et Changement climatique Canada selon trois périodes critiques : la période de mise bas et de migration printanière (avril – juin), celle d'abondance de nourriture et de rut (juillet – octobre) et celle de migration automnale et de survie des jeunes caribous (novembre – mars).

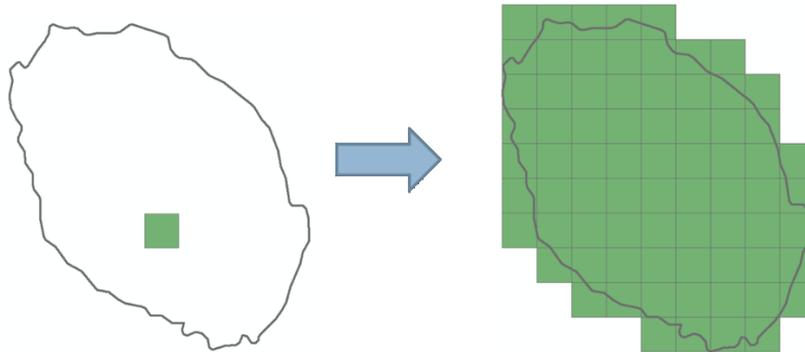
Dans le cadre d'une étude scientifique globale d'Environnement et Changement climatique Canada sur l'avenir du caribou de Peary (incluant la répartition spatiale de la nourriture et des glaces de mer ainsi que la prédation par le loup), le projet de recherche présenté dans ce document se concentre sur la détermination et la mise en place d'un outil de caractérisation du couvert nival ciblé pour l'analyse de l'accès à la nourriture au sol pour le caribou de Peary. On s'intéressera donc aux variations de comptes de caribous causées par la difficulté, voire l'impossibilité, d'atteindre la nourriture se trouvant au sol à travers le couvert nival durant l'hiver.

Ce mémoire est présenté sous forme d'article scientifique qui couvre la méthodologie et les résultats de notre recherche. On rappelle ci-dessous les objectifs et hypothèses du projet (section 1.2) et on présente le cadre théorique à la section 2. L'article scientifique est présenté à la section 3 ; tout ce qui est dans cette section ne sera donc pas repris ailleurs dans le présent mémoire. À la suite de l'article, on retrouve des sections complémentaires, traitant de points qui n'ont pas été soulevés dans l'article, dont une conclusion générale sur le projet de recherche.

## 1.2. Objectifs et hypothèses

### 1.2.1. Objectifs

Pour mettre en place un outil d'analyse du couvert nival dans l'archipel arctique canadien (AAC), l'objectif principal du projet est de spatialiser à une échelle régionale la caractérisation locale du couvert nival obtenue avec le modèle de neige SNOWPACK. Le principe de cet objectif principal est illustré à la Figure 5, où l'on peut voir une transition entre une information d'échelle locale et une information spatialisée d'échelle régionale.



**Figure 5 : Aspect spatialisation (principe). Pour cet exemple, une information disponible pour un pixel de 5 km x 5 km est spatialisée sur une superficie d'environ 1500 km<sup>2</sup>.**

En fait le système doit pouvoir cibler les paramètres du couvert nival directement en lien avec l'accès à la nourriture du caribou de Peary et par conséquent le projet s'articule autour de trois objectifs spécifiques :

#### ***1) Pilotage du modèle SNOWPACK à partir d'un modèle climatique***

Tout d'abord, le premier objectif spécifique est d'établir une procédure pour piloter le modèle de neige SNOWPACK à partir des données climatiques issues du modèle météorologique MRCC (voir section 4.2) dans l'archipel arctique canadien.

#### ***2) Étude et validation des paramètres d'intérêt pour l'accès à la nourriture du caribou de Peary***

Le deuxième objectif spécifique est d'identifier une relation variable nivale / compte de caribou, la variable nivale étant issue des simulations SNOWPACK pilotées par le MRCC (objectif spécifique 1). Le but est d'établir des liens entre des paramètres nivaux d'intérêt et des données de comptes de caribous, pour ensuite valider ces paramètres d'intérêt à l'aide de mesures terrain.

### **3) Spatialisation des paramètres d'intérêt et projections futures**

Enfin, le troisième objectif spécifique est de spatialiser les paramètres d'intérêt retenus à l'échelle de l'archipel arctique canadien en établissant une procédure automatisée de production de fichiers vectoriels sous format *shapefile* pour 4 périodes distinctes générées par le MRCC : passé (1980-1985), présent (2010-2015), futur proche (2045-2050) et futur lointain (2090-2095).

#### **1.2.2. Hypothèses**

Par rapport à ces objectifs, deux hypothèses ont été identifiées. Pour le premier objectif spécifique, nous avons supposé que la modélisation du couvert nival avec l'outil SNOWPACK allait permettre de simuler des paramètres du couvert nival pouvant être statistiquement liés aux variations de comptes de caribous.

Nous faisons aussi l'hypothèse que des densités élevées de neige pendant la saison hivernale nuisent de façon importante au caribou de Peary (Environnement Canada, 2014), et que cette nuisance se traduit par une réduction du nombre de caribous observés l'été suivant (Gunn et al., 2006).

## **2. Cadre théorique sur SNOWPACK**

SNOWPACK (version 3.3.0 utilisée) est le modèle de simulation du couvert nival retenu (Bartelt et Lehning, 2002 ; Lehning et al., 2002a, 2002b). L'Annexe 2 met en avant-plan les critères qui ont orienté la sélection du modèle. SNOWPACK est un modèle développé par l'*Institut pour l'étude de la neige et des avalanches* de Suisse (en allemand SLF), situé à Davos, qui fait partie du WSL (*L'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage*), localisé à Bimensdorf, Bellinzone, Lausanne et Sion.

### **2.1. Physique impliquée**

La physique impliquée dans SNOWPACK est résumée à la Figure 6 ; on peut y voir de façon très synthétisée les processus inclus au niveau du sol, de la neige et de la canopée. Mentionnons à ce sujet plus particulièrement que SNOWPACK peut tenir compte en option de la redistribution par le vent par la création de « pentes virtuelles » consistant en une division du pixel d'intérêt en sous-pixels (jusqu'à neuf sous-pixels). Mentionnons de plus que SNOWPACK peut tenir compte en option de la canopée en insérant entre autres des paramètres locaux de hauteur de canopée et d'indice de surface foliaire. SNOWPACK offre aussi de paramétrer une panoplie d'autres

processus physiques, notamment au niveau de la détection du givre, du transport de l'eau dans la neige / dans le sol et de la détection d'herbe sous la neige.

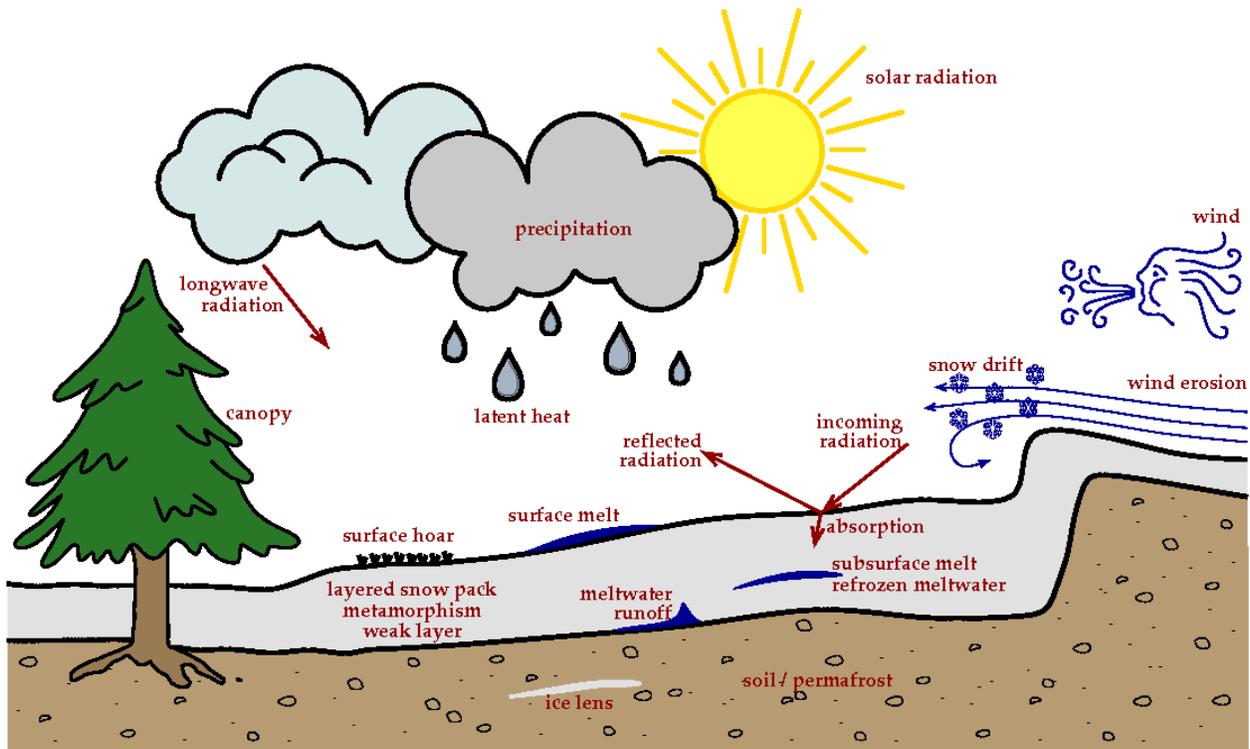


Figure 6 : Physique impliquée dans SNOWPACK (source : documentation de SNOWPACK).

## 2.2. Entrées

Le fichier de paramètres d'initialisation ou de configuration (\*.ini) comprend l'information sur l'emplacement des deux autres fichiers nécessaires en entrée à SNOWPACK, soit les fichiers d'occupation du sol (\*.sno) et de données météorologiques (\*.smet), ainsi qu'un éventail de paramètres pour le lancement de SNOWPACK (principalement sur la physique impliquée). Ce fichier d'initialisation peut être créé avec le module *INIshell* ou à l'aide d'un logiciel de traitement de texte tel que Bloc-notes.

Le format SMET (associé aux fichiers de données météorologiques \*.smet) est un format texte comprenant un en-tête ainsi qu'une section de données. L'en-tête comprend entre autres les informations de latitude (ou coordonnée y), de longitude (ou coordonnée x), d'altitude, de projection et les noms des champs. On retrouve la liste des paramètres météorologiques possibles

pour le format SMET au Tableau 4 (section 4.2). Au Tableau 1 on retrouve les paramètres SMET nécessaires en intrant à SNOWPACK.

**Tableau 1 : Paramètres météorologiques de SNOWPACK.**

Paramètre SMET	Nécessaire ?	Unités
TA (température de l'air)	X	K
RH (humidité relative)	X	%
VW (vitesse du vent)	X	m/s
ISWR (rayonnement incident de courte longueur d'onde) <b>ou</b> OSWR (rayonnement réfléchi de courte longueur d'onde)	X	W/m <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup>
ILWR (rayonnement incident de grande longueur d'onde) <b>ou</b> TSS (température à la surface)	X	W/m <sup>2</sup> K
PSUM (précipitations) <b>ou</b> HS (hauteur de neige)	X	kg/m <sup>2</sup> m
TSG (température au sol)	–	K
TS1, TS2, ... (températures de la neige à différentes profondeurs)	–	K

Ultimement, SNOWPACK nécessite une commande DOS comprenant :

- la date de fin de la simulation, sous format Année / Mois / Jour / Heure / Minutes
- l'emplacement du fichier d'initialisation (\*.ini)
- le mode de la simulation (*opérationnel* ou *recherche*)
- en mode opérationnel, le nom des stations, séparées par des virgules

### 2.3. Sorties

Les deux fichiers principaux en sortie de SNOWPACK sont les fichiers \*.pro et \*.met. Le fichier \*.met donne de l'information sur la météo et est donc étroitement lié aux données de météo en entrée à SNOWPACK. Il comprend aussi les données intégrées sur toute la hauteur du couvert nival tels l'épaisseur et l'équivalent en eau. Pour sa part le fichier \*.pro est un fichier de profil vertical du couvert nival. Il contiendra les paramètres géophysiques d'intérêt pour l'analyse de l'accès à la nourriture du caribou de Peary. C'est à partir de ce fichier qu'on pourra aussi visualiser le résultat des simulations avec l'outil Sngui présenté à la section 2.5.

Comme SNOWPACK a été développé dans un contexte de simulation de stabilité pour la prédiction d'avalanches, il produit aussi plusieurs indices de fractures potentielles, de résistance et de cohésion entre les couches. Ces paramètres ne sont évidemment pas évalués dans ce travail.

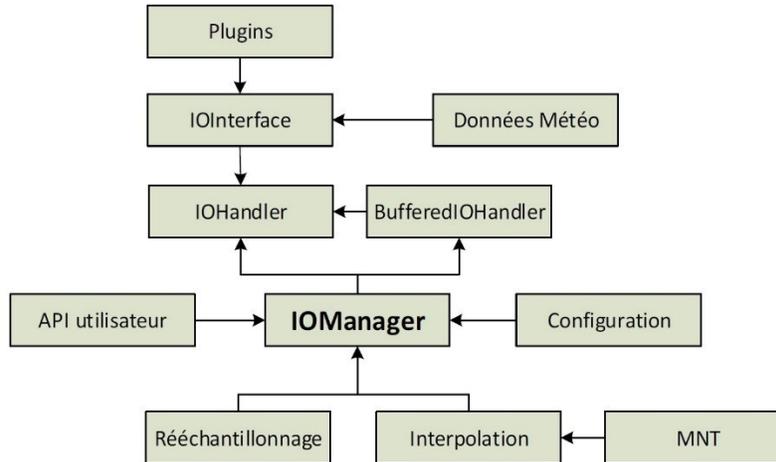
## 2.4. MeteoIO

MeteoIO (version 2.5.0 utilisée) est une librairie de fonctions qui facilite et sécurise l'accès aux données pour des simulations numériques dans le cadre des sciences environnementales nécessitant des données météo. Dans le contexte du présent projet de recherche, MeteoIO est appelé par SNOWPACK, notamment au moment d'aller chercher les données et de les formater. De manière générale, MeteoIO permet entre autres l'interpolation spatiale et temporelle, le filtrage et le rééchantillonnage de données météo. Il offre une grande souplesse, car il permet de modifier indépendamment les éléments de la librairie. Ultimement, MeteoIO permet une structure sécuritaire en sortie.

Au total, MeteoIO peut faire le pont vers 19 plugins, dont SNOWPACK. Les autres sont, notamment, le format raster d'ArcGIS, le format netCDF, le format SMET et les fichiers météo d'Alpine3D. Le noyau de MeteoIO comprend les éléments suivants :

- API utilisateur
- IOManager
- IOHandler
- BufferedIOHandler
- IOInterface

De façon très synthétisée, IOManager est le point central de MeteoIO, faisant le lien entre l'API utilisateur, IOHandler et BufferedIOHandler. Le lien avec les données météo et les plugins précédemment évoqués se fait via IOHandler, en passant par IOInterface. Au besoin, lors d'une requête sous la forme d'une zone tampon, on passera par BufferedIOHandler. Ensuite viennent se greffer à ces éléments centraux des outils d'interpolation / rééchantillonnage, de configuration, de MNT et autres. On peut voir à la Figure 7 un schéma simplifié du fonctionnement de MeteoIO.



**Figure 7 : Composantes principales de MeteioIO.**

## 2.5. Sngui

Sngui (aussi nommé en anglais *Visualisation of the SNOWPACK model*) est un outil de visualisation du fichier de profil de neige (\*.pro) en sortie de SNOWPACK ; la version 8.2 (lancée en 2008) a été utilisée. Sngui est inclus dans la version 2 de SNOWPACK, mais a été laissé de côté dans la version 3. Il permet notamment de valider d'un coup d'œil le fichier de profil de neige et d'en faire des analyses primaires. Sous Sngui, on peut visualiser le profil vertical et l'évolution temporelle de plusieurs paramètres du couvert nival, notamment au niveau de la microstructure (grains, densité, résistance) et de l'énergie (chaleur latente, chaleur sensible, gradient de température). Sngui permet aussi à l'utilisateur d'avoir une représentation des paramètres météo en entrée à SNOWPACK. Plusieurs de ces rendus ont servi à l'analyse du couvert nival dans le présent projet de recherche. Un exemple de rendu visuel est illustré à la Figure 8 ; en l'occurrence pour le paramètre de densité de la neige à différentes profondeurs selon le moment de l'année.

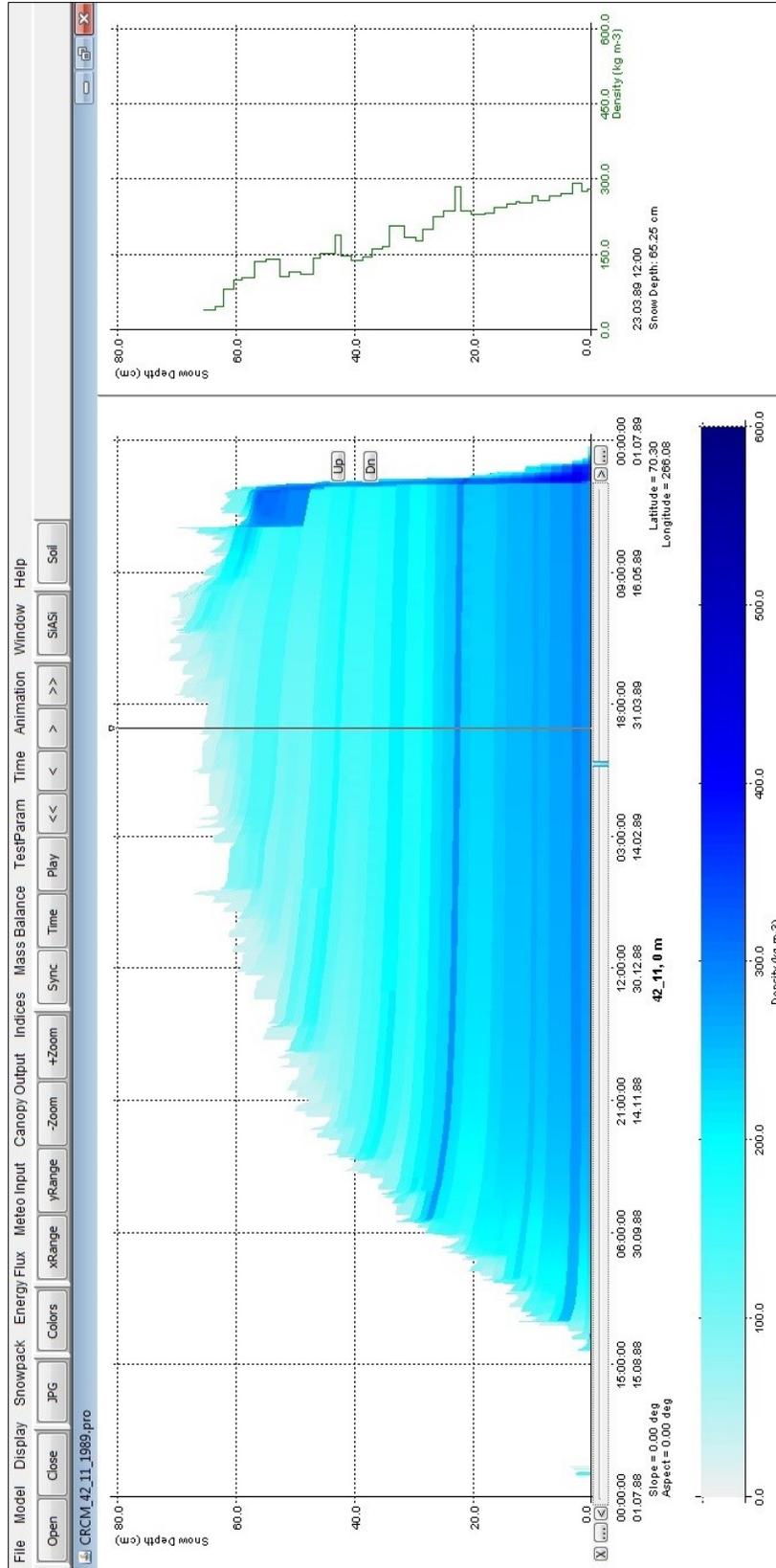


Figure 8 : Exemple de visualisation sous Sngui (épaisseur de neige et densité dans le temps, péninsule Boothia, hiver 1988-1989 ; inclut le détail quantitatif de la densité pour le 23 mars 1989 à midi).

### 3. Article scientifique

L'article scientifique qui suit, qui est donc le point central du présent mémoire, a été soumis à la revue scientifique *Physical Geography* (éditeur international *Taylor & Francis*) le 25 novembre 2015. Il est présenté de façon intégrale, et ce seulement en anglais. Il a été écrit en collaboration étroite avec Environnement et Changement climatique Canada. L'article est présentement en révision et devrait être publié prochainement, potentiellement dans une édition spéciale de la revue dédiée à l'événement *Eastern Snow Conference 2015*, tenu à Sherbrooke en juin 2015, durant lequel le projet a été présenté (Ouellet et al., 2015).

Il est à préciser que la numérotation des lignes, des sections, des figures, tableaux et équations est indépendante au reste du mémoire. Précisons aussi que les références à la section 7.0 de cet article ne sont pas répétées à la bibliographie générale du présent mémoire.

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

*Ouellet, F., Langlois, A., Blukacz-Richards, E. A., Johnson, C. A., Royer, A., Neave, E. and Larter, N. C. 2015. Spatialization of the SNOWPACK Snow Model for the Canadian Arctic to Assess Peary Caribou Winter Grazing Conditions. Physical Geography. Submitted, TPHY-2015-0077.*

1 **Spatialization of the SNOWPACK Snow Model for the Canadian**  
2 **Arctic to Assess Peary Caribou Winter Grazing Conditions**

3 Ouellet, F.<sup>1,2\*</sup>, Langlois, A.<sup>1,2</sup>, Blukacz-Richards, E. A.<sup>3</sup>, Johnson, C. A.<sup>4</sup>, Royer, A.<sup>1,2</sup> Neave, E.<sup>4</sup>  
4 and Larter, N. C.<sup>5</sup>

5  
6 <sup>1</sup> *Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP), Université de*  
7 *Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.*

8 <sup>2</sup> *Centre d'Études Nordiques, Québec, QC, Canada.*

9 <sup>3</sup> *Water Research Division, Environment and Climate Change Canada, Toronto, ON, Canada.*

10 <sup>4</sup> *Landscape Science and Technology, Environment and Climate Change Canada, Ottawa, ON,*  
11 *Canada.*

12 <sup>5</sup> *Department of Environment and Natural Resources, Government of the Northwest Territories,*  
13 *Fort Simpson, NT, Canada.*

14 **Spatialization of the SNOWPACK Snow Model for the Canadian**  
15 **Arctic to Assess Peary Caribou Winter Grazing Conditions**

16 **Abstract**

17 Peary caribou is the northernmost designatable unit for caribou species, and its population  
18 declined by about 70% over the last three generations. The Committee on the Status of  
19 Endangered Wildlife in Canada (COSEWIC) identified difficult grazing conditions through  
20 the snow cover as being the most significant factor contributing to this decline. This study  
21 focuses on a spatially-explicit assessment tool using snow model simulations (Swiss  
22 SNOWPACK model driven in an off-line mode by spatialized meteorological forcing data  
23 generated by the Canadian Regional Climate Model) to characterize snow conditions for  
24 Peary caribou grazing in the Canadian Arctic. The life cycle of Peary caribou has been  
25 subdivided into three critical periods: summer foraging and fall breeding (July – October),  
26 winter foraging (November – March) and spring calving (April – June). Winter snow  
27 conditions are analysed and snow simulations compared to Peary caribou island counts to  
28 identify a snow parameter that could potentially act as a proxy for grazing conditions and  
29 explain fluctuations in Peary caribou numbers. This analysis concludes that caribou counts  
30 are affected by simulated snow density values above  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . A software tool mapping  
31 possibly favourable and unfavourable grazing conditions based on snow is proposed at a  
32 regional scale across the Canadian Arctic Archipelago. Specific output examples are given  
33 to show the utility of the tool, mapping pixels with cumulative snow thickness above densities  
34 of  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , where cumulative thicknesses above 7000 cm are considered unfavourable.

35 **Keywords:** snow; caribou; grazing conditions; Arctic; climate change impacts

## 36 **1.0. Introduction**

37 Climate change has been observed in the Arctic over the last four decades (Screen & Simmonds,  
38 2010), where an average warming of 1.06 °C per decade has been measured (Solomon et al.,  
39 2007) compared to 0.43 °C per decade for the rest of the planet (Jin & Dickinson, 2002).  
40 Associated physical impacts include negative anomalies in permafrost (Romanovsky, Smith, &  
41 Christiansen, 2010), glacier mass balance (Gardner et al., 2013), sea ice (Stroeve et al., 2011) and  
42 snow cover (Derksen & Brown, 2012). These trends have an important impact on how the  
43 cryosphere responds to climate change, for which snow albedo and thermal conductivity are  
44 dominant processes. Snow controls the amount of energy absorbed at the surface of the Arctic  
45 Tundra (melt dates for glaciers, permafrost, etc.) through its strong albedo and its low thermal  
46 conductivity.

47 The various consequences for snow cover include enhanced spring melting (Derksen &  
48 Brown, 2012), winter heat waves, extreme precipitation events, wind and rain-on-snow  
49 (Callaghan & Johansson, 2011). It is predicted that these events will become more frequent in the  
50 northern hemisphere, including the Arctic, based on current climate warming trends (Liston &  
51 Hiemstra, 2011). Few studies have examined how changes in climate affect the formation of  
52 dense snow layers and ice crusts. Recent studies have shown the potential for the detection of  
53 high density snow layers using satellite remote sensing (Montpetit, 2015).

54 Our growing understanding of snow high-density layers, based on empirical studies,  
55 suggests a strong modification of the surface energy balance (Weismüller et al., 2011) and an  
56 important impact on ungulate (e.g., Peary caribou) grazing conditions (Putkonen & Roe, 2003).  
57 Peary caribou (see Section 2.1) has been listed as an “endangered species” by the Species at Risk  
58 Public Registry of Canada given the fact that its population decreased by 70% over the last three

59 generations (COSEWIC, 2004). It has been suggested that difficult grazing conditions through  
60 the snow cover have contributed to the decline. Prolonged and severe weather events have been  
61 linked to poor body condition, malnutrition, high adult mortality, calf losses, and major  
62 population die-offs in Peary caribou (Miller & Gunn, 2003; Parker, Thomas, Broughton, & Gray,  
63 1975). The best documented evidence of this is from the Bathurst Island Complex where four  
64 major population declines were correlated to significantly greater ( $p < 0.005$ ) September to June  
65 total snowfall (Miller & Gunn, 2003). Data on icing within the snow profile is typically  
66 unavailable, but deep snow is often correlated with increased icing in the Canadian Arctic  
67 Archipelago (Miller, Edmonds, & Gunn, 1982). Moreover, the spatial and temporal synchrony of  
68 Peary caribou and muskox die-offs supports that severe winter weather was the major causative  
69 factor (Miller & Gunn, 2003). More recently, some 15,000 reindeers died in a limited time period  
70 in northern Siberia following a heavy snow episode (“Heavy snow kills at least 15,000 reindeer  
71 in northern Siberia”, The Siberian Times, 2014).

72         Previous efforts to characterize the formation of dense snow layers have been limited  
73 given the quasi-absence of in-situ measurements and the regional scale at which this process  
74 occurs. This paper aims to develop a regional snowpack characterization tool for the assessment  
75 of the increasingly difficult grazing conditions for Peary caribou. Our three main objectives were:  
76 (1) to create an automated procedure for forcing the SNOWPACK snow model with a climate  
77 model (Canadian Regional Climate Model - CRCM 45 km), including preliminary evaluation of  
78 SNOWPACK’s input data (CRCM) and output data (snow properties), (2) to investigate and  
79 propose a derived snow parameter that may explain some of the variation in Peary caribou  
80 counts, and (3) to create a spatialization and mapping tool of the snow parameter (from objective  
81 2) over the study area (Figure 1) for a preliminary spatiotemporal analysis. The annual life-cycle  
82 of Peary caribou can be divided into three main stages: summer foraging and breeding (July –

83 October), winter foraging (November – March) and spring calving (April – June) (Gunn &  
84 Dragon, 2002; Miller, Barry, & Calvert, 2007; Johnson, Neave, Richards, Banks, & Quesnelle, in  
85 press). Our analyses were restricted to the snow-covered seasons: winter foraging and spring  
86 calving periods (summer foraging and breeding being mostly snow-free). Two main hypotheses  
87 were associated with the three objectives: (1) snow cover simulation using SNOWPACK allows  
88 specific snow parameters to be evaluated in relation to temporal and spatial variability in caribou  
89 counts across different regions of the Canadian Arctic Archipelago, and (2) high snow densities  
90 observed during winter can have a negative impact on caribou populations (COSEWIC, 2004;  
91 Gunn, Miller, Barry, & Buchan, 2006; Johnson et al., in press).

## 92 **2.0. Background**

### 93 **2.1. *Rangifer Tarandus***

94 *Rangifer tarandus* is typically called “caribou” in North America and “reindeer” in Europe and  
95 Asia. In Canada, *Rangifer tarandus* used to be divided into five subspecies, but more recently it  
96 has been divided into 12 designatable units (COSEWIC, 2011). This allows a better  
97 representation of the genetic, behavioural and morphological adaptations of the species to  
98 different environments. Peary caribou (*Rangifer tarandus pearyii*) is the most northern  
99 designatable unit (DU) across Canada. It is a rather short animal, living up to 15 years old,  
100 digging through snow during winter to access its food. When compared to other caribou DUs,  
101 Peary caribou uses fewer lichens and more moss; as well as flowers, dwarf shrubs, herbaceous  
102 plants and others. Peary caribou can travel over long distances when winter is rigorous: up to 20  
103 km a day, and up to 490-750 km a year, depending on the population.

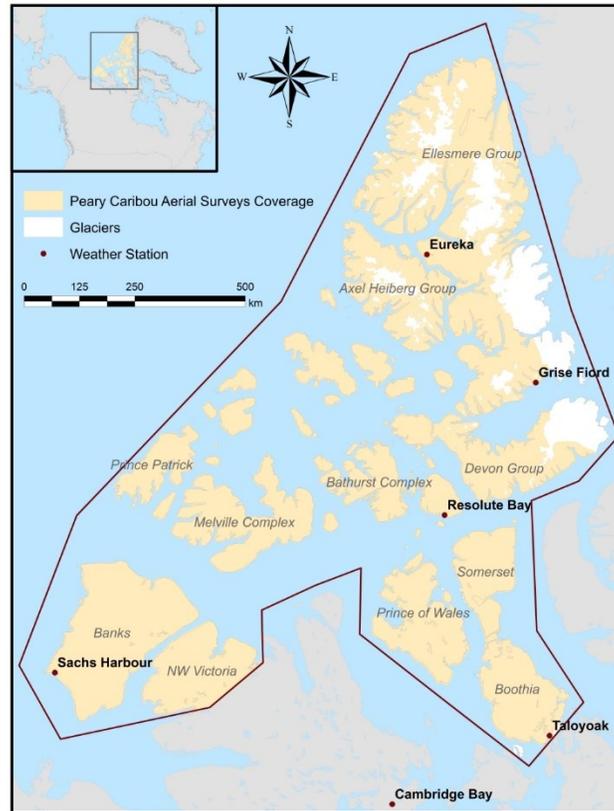
## 104 2.2. *SNOWPACK*

105 The physical snow model SNOWPACK (version 3.3.0 was used) was developed by the Swiss  
106 Institute for Snow and Avalanche Research (SLF). The model was developed for avalanche  
107 studies, and it solves the partial differential equations governing snow mass and energy fluxes  
108 using a Lagrangian finite element implementation (Bartelt & Lehning, 2002; Lehning, Bartelt,  
109 Brown, Fierz, & Satyawali, 2002a; Lehning, Bartelt, Brown, & Fierz, 2002b). The SNOWPACK  
110 model simulates main characteristics and evolution of the snow on ground, including height,  
111 snow water equivalent, density, temperature, microstructure, etc. Previous work used the model  
112 in northern regions to retrieve snow properties of interest like snow water equivalent (Langlois et  
113 al., 2012). The model's main inputs are three text files: initialization parameters, meteorological  
114 data and soil information. Mandatory meteorological variables are air temperature (K), relative  
115 humidity (%), wind speed ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), shortwave radiation ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), incoming longwave radiation  
116 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) or surface temperature (K) (option between), and precipitation ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) or snow height  
117 (m) (option between). Several optional variables can be used to further force the model, however  
118 they were not used in this study since the data was not available. The soil information file mainly  
119 consists of altitude, slope angle and slope aspect values. When launched, SNOWPACK calls a  
120 function library called MeteoIO used for the temporal interpolation of meteorological input data  
121 to SNOWPACK's core time resolution (one hour). The model's main outputs include two ASCII  
122 files: (1) a snow profile that includes layered information of snow geophysical properties, and (2)  
123 meteorological information (measured and modelled). SNOWPACK's main qualitative and  
124 quantitative visualization software is called Sngui, which allows the user to visualize the snow  
125 profile variables (microstructure / energetic parameters and multiple indices) and the input  
126 meteorological parameters over time.

127 **3.0. Data & Methods**

128 **3.1. Study Area**

129 The study area represents the spatial extent of aerial surveys conducted for the Peary caribou  
 130 counts (Figure 1), located in the northern part of the Canadian Arctic Archipelago (CAA).



131  
 132 Figure 1. Study area.

133 **3.2. Data**

134 **3.2.1. Caribou Counts**

135 Initial Peary caribou counts were obtained from two main summary reports: one by Jenkins,  
 136 Campbell, Hope, Goorts, and McLoughlin (2011) and the other by the Species at Risk Committee  
 137 (2012). These reports provided counts for 19 survey regions (islands) across the CAA (Table 1)  
 138 (COSEWIC, in press; Johnson et al., in press). They are not representative of the larger local  
 139 population units of Peary caribou; instead they represent counts of areas at the sub-population

140 scale that allow for better characterization of the spatial variability in snow conditions. For  
 141 example, reported icing events based on Aboriginal Traditional Knowledge for the population of  
 142 Banks and Northwest Victoria islands indicate differences in the timing of events between the  
 143 two areas (Species at Risk Committee, 2012). The surveys involving visual counts were  
 144 conducted by plane or by helicopter mainly during the growing season (between April and July)  
 145 by the territorial governments of the Northwest Territories and Nunavut in collaboration with  
 146 local communities.

147 Table 1. The number of Peary caribou surveys per island with corresponding years.

Region	Number of Surveys	Survey Years
Axel Heiberg Island	4	1961, 1973, 1995, 2007
Banks Island	15	1970, 1971, 1972, 1982, 1985, 1987, 1989, 1991, 1992, 1994, 1998, 2001, 2005, 2010, 2014
Bathurst Island	15	1961, 1973, 1974, 1985, 1988, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 2001, 2013
Boothia Peninsula	6	1974, 1975, 1976, 1985, 1995, 2006
Byam Martin Island	6	1972, 1973, 1974, 1987, 1997, 2012
Cornwallis Island	4	1961, 1988, 2002, 2013
Devon Island	3	1961, 2002, 2008
Eglinton Island	7	1961, 1972, 1973, 1974, 1986, 1997, 2012
Ellesmere Island	6	1961, 1973, 1989, 1995, 2005, 2006
Emerald Island	6	1961, 1973, 1974, 1986, 1997, 2012
Helena Island	9	1973, 1974, 1985, 1988, 1990, 1991, 1992, 1995, 1997
Little Cornwallis Island	6	1961, 1973, 1974, 1988, 2002, 2013
Lougheed Island	6	1961, 1973, 1974, 1985, 1997, 2007
Melville Island	7	1961, 1972, 1973, 1974, 1987, 1997, 2012
Northwest Victoria Island	8	1980, 1987, 1993, 1994, 1998, 2001, 2005, 2010
Prince of Wales Island	6	1974, 1975, 1980, 1995, 1996, 2004
Prince Patrick Island	6	1961, 1973, 1974, 1986, 1997, 2012
Russell Island	5	1975, 1980, 1995, 1996, 2004
Somerset Island	6	1974, 1975, 1980, 1995, 1996, 2004

148 Survey estimates were adjusted to include all ages (i.e., calves, one-year olds and adults),  
149 and also adjusted to a standardized island area, using Albers Equal Area Conic projection. This  
150 was done to deal with inconsistencies in reported island sizes in the literature (Johnson et al., in  
151 press). A total of 131 counts are available for the 19 locations between 1961 and 2014. A year  
152 may present a count for an island and not for another one. Not all counts were selected (49 were  
153 rejected), to match up with the limited temporal coverage of the snow simulations (see  
154 meteorological data temporal coverage at Section 3.2.2).

### 155 3.2.2. *CRCM*

156 Meteorological data were taken from the Canadian Regional Climate Model (CRCM; Music &  
157 Caya, 2007). CRCM is generated in collaboration with the Ouranos consortium, Montréal,  
158 Québec, Canada. The data are structured under the netCDF format (extension \*.nc). Many  
159 simulations are available (different versions and scenarios), for different temporal periods. The  
160 “aev” simulation was chosen (under the CRCM4.2 version). It is tied to a series of technical  
161 specifications:

- 162 • time window from 1980 to 2100;
- 163 • driven by CGCM3, following IPCC 20C3M 20<sup>th</sup> century scenario for 1980–2000 and  
164 SRES A2 scenario for 2001–2100;
- 165 • run over the North-American domain (AMNO);
- 166 • horizontal grid-size mesh (spatial resolution) of 45 km and 3-hr time step.

167 The CRCM outputs needed to drive SNOWPACK are air temperature (K), specific humidity (%),  
168 surface pressure (Pa), wind speed ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), downward solar incident radiation ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), downward  
169 longwave incident radiation ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) and precipitations ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

170 *3.2.3. Digital Elevation Model (DEM)*

171 The DEM used for developing the preliminary upscaling approach (results at Section 4.5) comes  
172 from the Canadian Digital Elevation Data (CDED); it has a spatial resolution of three seconds in  
173 latitude, and six seconds in longitude.

174 **3.3. *SNOWPACK Spatialization***

175 *3.3.1. Forcing Procedure*

176 To spatialize SNOWPACK, the model needs to first be driven with its forcing dataset (i.e.,  
177 CRCM). Snow cover simulations were conducted on an annual basis with the model starting on  
178 July 1<sup>st</sup> and ending on June 30<sup>th</sup> of the following year. This period has the advantage of starting  
179 and ending when the snowpack is globally absent. We developed a tool using MathWorks®  
180 Matlab® coding asking the user to first manually select pixels in Esri ArcGIS and identify years  
181 of interest. Then, this tool automatically extracts meteorological data for the specified time period  
182 / area. CRCM outputs specific humidity and precipitation rate; both were transformed into  
183 relative humidity and precipitation accumulation that are required as inputs for SNOWPACK. At  
184 this step, preliminary evaluations were performed in order to make sure CRCM outputs were  
185 usable; they were compared with meteorological station measurements across the CAA. Then,  
186 SNOWPACK output snow profiles were set to a 3-hr temporal resolution to match the input  
187 meteorological information from CRCM. At this step, exploratory tests were performed to assess  
188 the impact / sensitivity of SNOWPACK simulations to meteorological inputs (i.e., CRCM). Also  
189 a first order evaluation of snow simulations was conducted using surveyed data from a field  
190 campaign held by the Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP)  
191 of Université de Sherbrooke in Cambridge Bay, Nunavut, Canada, in April 2015 (see Figure 1).

192 3.3.2. *Snow Parameter Assessment*

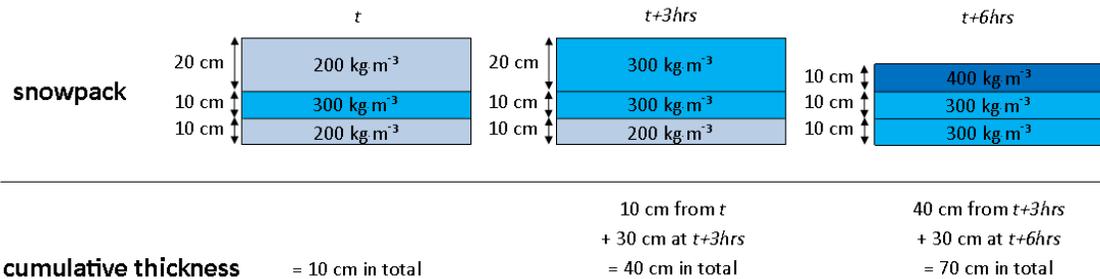
193 Step two in the analyses involved comparing the caribou count information to snow  
 194 characterization parameters. Given the rather large pixel size from CRCM (45 km x 45 km), a  
 195 threshold of 40% water was used to mask certain pixels. We hypothesized that caribou counts in  
 196 summer would reflect snow conditions (i.e., grazing conditions) during the previous year; we also  
 197 investigated the potential for a time lag effect of snow conditions on Peary caribou counts two  
 198 years prior to when each survey was conducted. Snow conditions for the months of October to  
 199 May (winter) were summarized in three different ways: (1) the whole winter for a total of 8  
 200 months, (2) monthly values, and (3) two specific critical periods for Peary caribou corresponding  
 201 to winter foraging and spring calving (presented in Section 1.0).

202 For each caribou count, snow profiles were generated locally, and then converted to  
 203 simpler parameters of interest. The main parameter of interest was snow density (Vikhamar-  
 204 Schuler, Hanssen-Bauer, Schuler, Mathiesen, & Lehning, 2013) so that average density values  
 205 were computed over the three winter time scenarios identified above. Furthermore, a density  
 206 threshold was applied to qualitatively evaluate the total snow thickness above the chosen density  
 207 threshold (i.e., how thick are the dense layers that might lead to difficult grazing conditions?).  
 208 For each 3-hr time step, the layers equal or greater than 300, 350 and 400 kg·m<sup>-3</sup> were summed  
 209 over time to calculate the cumulative seasonal snow thickness above that threshold following:

$$C(b, p) = \sum_{t=b}^{b+p} \sum_{l=1}^{N(t)} H(t, l) [D(t, l) \geq r] \quad (1)$$

210 where the brackets symbolise a condition allocated to a Boolean variable,  $C$  is the cumulative  
 211 thickness,  $b$  is the simulation beginning time ID (in terms of 3-hr steps),  $p$  is the number of 3-hr  
 212 steps for the desired time scenario,  $t$  is the time ID (in terms of 3-hr steps),  $l$  is the layer ID,  $N$  is

213 the number of layers,  $H$  is the snow thickness (cm),  $D$  is the snow density ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) and  $r$  is the  
 214 density threshold ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). One should note that the thickness of a persistent snow layer is  
 215 cumulative, up to eight times a day, which may translate in very high values at the end of the  
 216 temporal period. A simplified example of the calculation is shown in Figure 2 for a threshold of  
 217  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . The cumulative thickness values were then compared to the retained caribou counts.



218  
 219 Figure 2. Cumulative thickness calculation example (threshold of  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Snow layers' colours go along with  
 220 associated density.

### 221 3.3.3. Spatialization of the Cumulative Thickness

222 To address the third objective, the spatialization coding was carried out in two main steps: the  
 223 creation of snow profile temporary files (SNOWPACK output) and the creation of *shapefile* files  
 224 (Esri format) containing cumulative thickness information (main project output). The software  
 225 result was, after its creation, used for a spatiotemporal analysis of potentially favourable /  
 226 unfavourable grazing conditions across four time periods: past (1980–1985), present (2010–  
 227 2015), near future (2045–2050) and far future (2090–2095).

228 Since the simulations were forced with 45-km CRCM, a preliminary upscaling approach  
 229 was applied to ultimately map the snow conditions at a finer scale compatible to grazing  
 230 conditions encountered by Peary caribou. Banks Island was selected for this analysis, where the  
 231 topography is representative of the part of the study area where Peary caribou is mainly  
 232 concentrated. We focused on refining the slope angle (from the soil information SNOWPACK  
 233 input file).

## 234 **4.0. Results & their Interpretation**

### 235 **4.1. Preliminary Evaluations**

236 Our evaluation efforts concentrated on both the CRCM data and SNOWPACK output variables.  
237 The CRCM parameters were evaluated using several Environment and Climate Change Canada  
238 meteorological stations across the Arctic. Specifically, data from Eureka, Grise Fiord, Resolute  
239 Bay, Sachs Harbour and Taloyoak (Figure 1) were extracted and compared to CRCM. Results  
240 show that CRCM (meteorological forcing data) is compatible with measured station data.

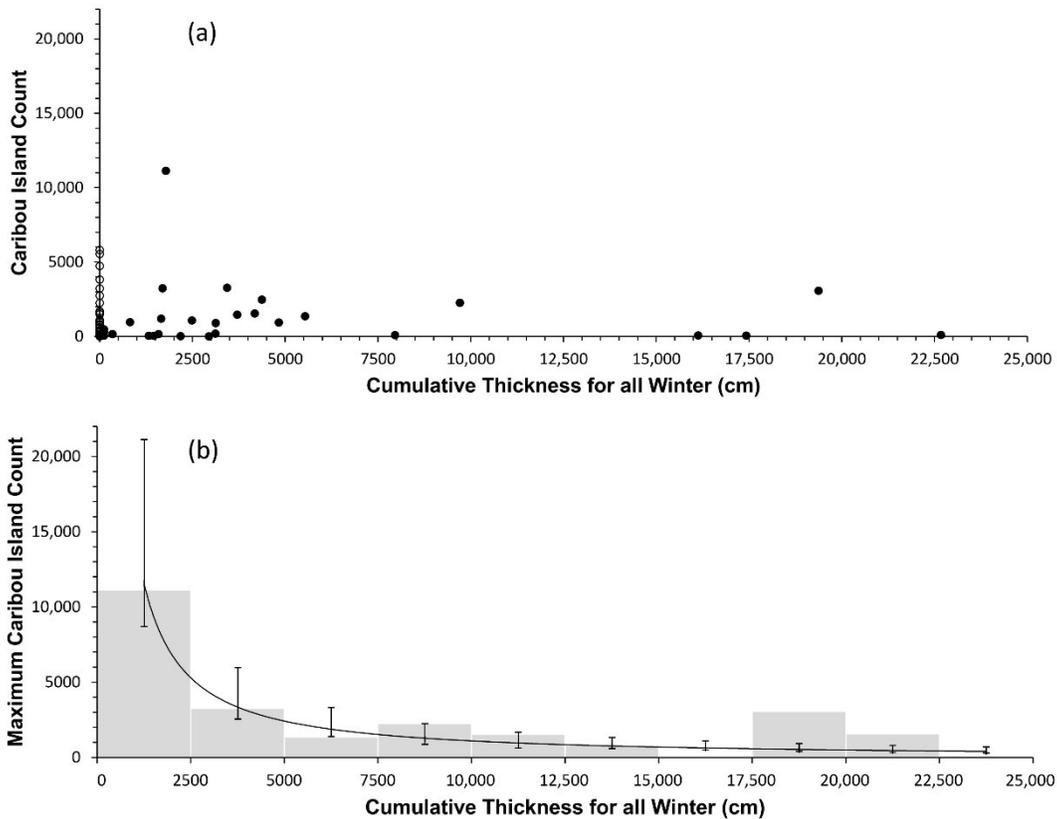
241 We also evaluated CRCM using our own meteorological station, which is located in  
242 Cambridge Bay. This station includes all the necessary input data to drive SNOWPACK (with  
243 the exception of precipitations). We used this station to evaluate CRCM short- and longwave  
244 radiations. Results also suggest compatible forcing data for SNOWPACK. Rather than apply a  
245 potential correction factor, we decided to use CRCM “as is”, since it is a climate model so that  
246 measured punctual in-situ data cannot be used for validation / correction purposes.

247 We also used the data from the Cambridge Bay 2015 field campaign to roughly evaluate  
248 the SNOWPACK output simulations generated from CRCM input data. We calculated average  
249 snow depth from 48 surveyed snowpits within an area of approximately 150 km<sup>2</sup>, an area that is  
250 more representative of the CRCM pixel size than the stations are. Snow depth averaged field  
251 measurements correspond to  $30 \pm 18$  cm (SD) compared to an overestimated simulated snow  
252 depth of  $39 \pm 0$  cm (SD). Snow density was, however, underestimated, as already shown for  
253 Arctic conditions (Langlois et al., 2012). We found an averaged simulated density of  $131 \pm 30$   
254 kg·m<sup>-3</sup> (SD) compared to field estimates of  $287 \pm 61$  kg·m<sup>-3</sup> (SD) averaged over 40 snowpits  
255 within the same area (about 150 km<sup>2</sup>). Current work in our lab is being conducted to further  
256 improve the density parameterization, adapted for Arctic conditions. However, the bias does not

257 represent a major issue in our study given the qualitative nature of our approach (a bias in snow  
 258 density would simply change the threshold value and not the relationship with caribou counts).

#### 259 4.2. *Snow Parameters of Interest*

260 We found no statistical correlations between caribou counts and simulated average snow density  
 261 values for the whole winter (8 months), monthly estimates, the winter foraging months or the  
 262 months corresponding to calving. However, a significant correlation ( $R^2$  of 0.45) with cumulative  
 263 seasonal thickness above a snow density threshold of  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  was found (Figure 3).



264 Figure 3. Peary caribou island counts in comparison with cumulative thickness (cm) above  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  for all winter  
 265 seasons (October to May) preceding caribou observations; (a) all counts are shown (unfilled circles represent years  
 266 where no layers reached the density threshold for the associated location); (b) maximum counts for each 2500 cm  
 267 cumulative thickness intervals are shown (data gaps were filled with mean count between preceding / subsequent  
 268 cumulative thickness intervals). The power relationship plotted has an  $R^2$  of 0.45. The bootstrapped standard errors  
 269 are also shown (based on 5000 iterations).  
 270

271 The density threshold per say needs further evaluation given that SNOWPACK  
 272 simulations are underestimating snow density and that the simulations are being run at the scale

273 of a 45-km pixel. Nevertheless, the results are consistent with the hypothesis that there exists a  
274 snow density threshold above which cumulative snow thickness negatively affects Peary caribou  
275 grazing conditions and, in turn, Peary caribou numbers (Miller et al., 1982; Miller & Gunn,  
276 2003).

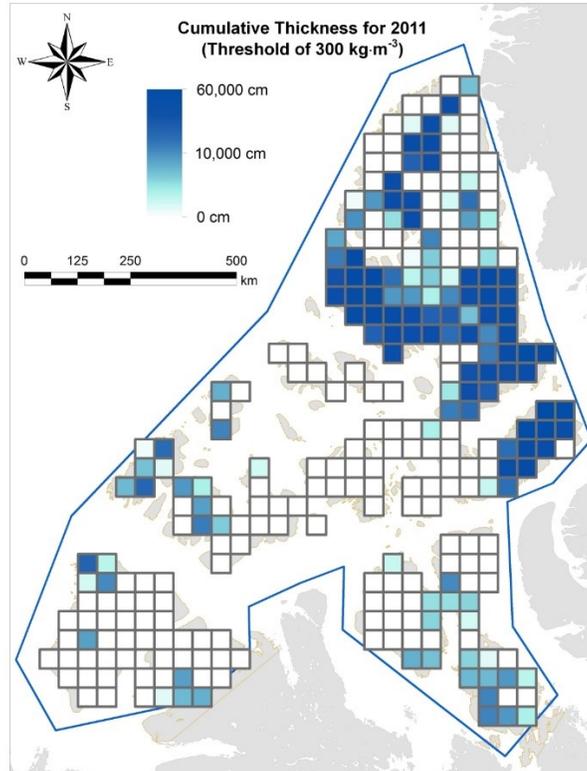
277         Thresholds of 350 and 400 kg·m<sup>-3</sup> were also tested, but provided much weaker  
278 relationships. However, in both cases, high cumulative thickness values were associated with low  
279 caribou counts (Portier, 2014). Ongoing analyses at GRIMP include grain type as a contributing  
280 snowpack characterization parameter and the preliminary results (not presented) are promising.

### 281 **4.3. Software & Operational Results**

282 For the last objective, the spatialization software / operational result was divided into five parts:

- 283         (1) the creation of a CRCM pixel database, conducted once semi-automatically,
- 284         (2) the creation of SNOWPACK input files: for each request, the user manually selects  
285         the pixels of interest with ArcGIS and the year(s) of interest, then the creation of the  
286         three input files for SNOWPACK is done automatically,
- 287         (3) the automated generation of snow profiles (with SNOWPACK) from those three  
288         input files,
- 289         (4) the *shapefile* files generation: automated reading and extraction of snow profiles  
290         according to the parameter of interest (cumulative thickness above density  
291         threshold), generated monthly between October and May,
- 292         (5) and the creation (done semi-automatically using a GIS software) of raster output(s),  
293         if desired by the user.

294         An example of a raster output for the whole study area is presented in Figure 4, for year  
295 2011, where a density value of 300 kg·m<sup>-3</sup> was chosen as a threshold for the cumulative thickness  
296 computation.



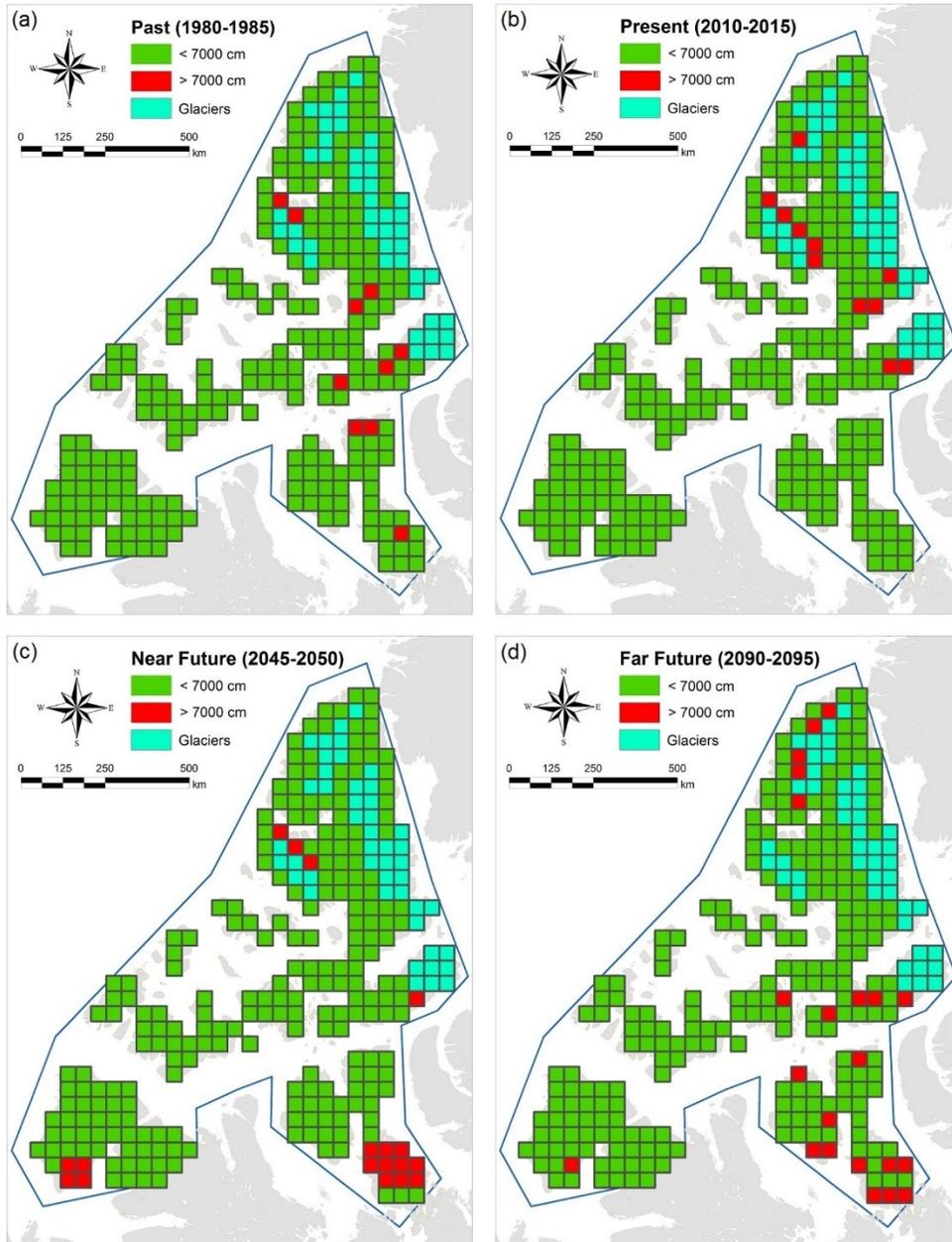
297 Figure 4. Raster output result of cumulative thickness (cm) above  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  for all 2011 winter (October to May).  
 298 Cumulative thickness is presented on a logarithmic scale. Glaciers are not masked, but they were not used in the  
 299 spatiotemporal analysis presented in Section 4.4.  
 300

301 In Figure 4, about half of the pixels (represented in white) did not reach the identified  
 302 density threshold, and the highest concentrations of dense snow are located in the northern parts  
 303 of the CAA: Ellesmere, Axel Heiberg and Devon islands. For that year, we also observed high  
 304 cumulative thickness values on Prince Patrick, Melville, Banks, Somerset and Mackenzie King  
 305 islands, as well as on Boothia Peninsula.

#### 306 4.4. *Spatiotemporal Analysis of Grazing Conditions*

307 The results for a first order characterization of spatiotemporal variability of Peary caribou grazing  
 308 conditions associated with snow conditions can be found in Figure 5. The maps were created for  
 309 the whole winter according to the cumulative thickness. Pixels are 45-km wide (according to  
 310 CRCM input spatial resolution), which corresponds to two or three moving days by Peary  
 311 caribou. A median value of 7000 cm was used based on Figure 3(b) which suggests that the rate

312 of decline in caribou numbers may attenuate at cumulative thickness values between 5000 to  
 313 10,000 cm. Winter periods were averaged over five years and glacier areas masked for the four  
 314 periods examined: past (1980–1985), present (2010–2015), near future (2045–2050), and far  
 315 future (2090–2095). The green pixels represent cumulative thickness values below 7000 cm and  
 316 the red pixels represent areas with values above 7000 cm.



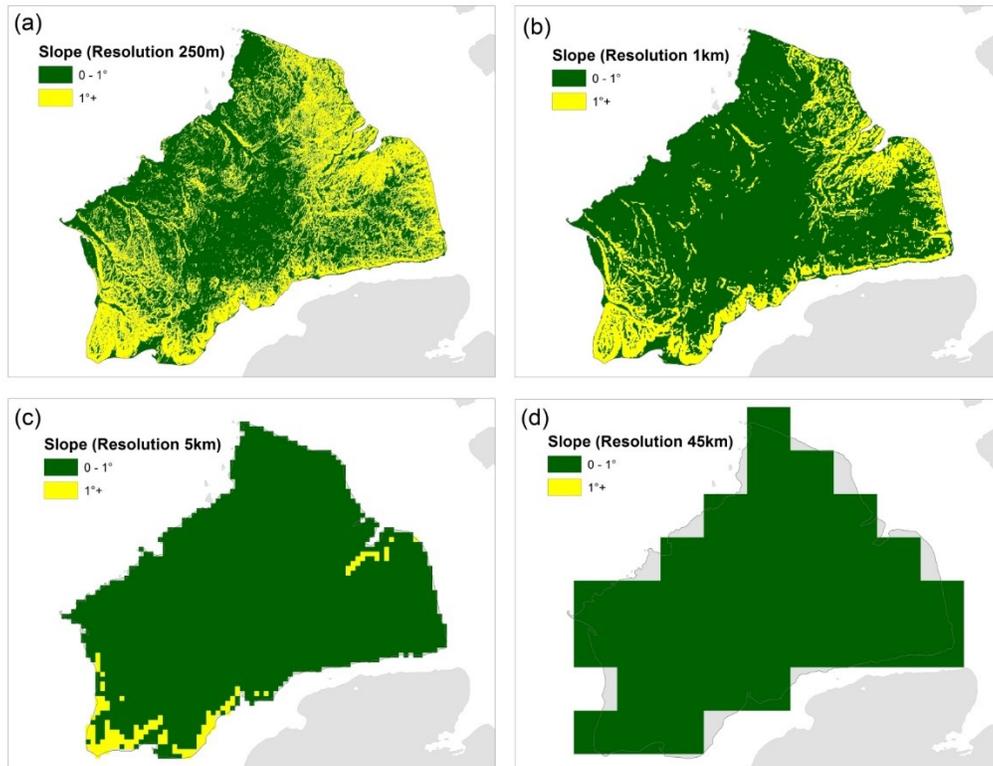
317  
 318 Figure 5. Preliminary spatiotemporal analysis: cumulative thickness over and under 7000 cm for whole winter,  
 319 averaged over 5-yr periods.

320 An increase in pixels with cumulative snow thickness above 7000 cm (red pixels) over  
321 time can be noted on Figure 5. More specifically, there are 10 red pixels for 1980–1985, 11 for  
322 2010–2015, 18 for 2045–2050 and 22 for 2090–2095. For the past and present periods, the  
323 locations of the red pixels are concentrated east and northeast of the CAA on Axel Heiberg,  
324 Ellesmere and Devon islands, potentially affected by glaciers. The red pixels in the near-future  
325 period are concentrated in the southern part of Banks Island and on Boothia Peninsula, for which  
326 the increased spatial coverage could be problematic considering the caribou traveling speed  
327 specified earlier (i.e. longer traveling time to reach favourable conditions). For the far-future  
328 period, red pixels' location shifts to the more eastern part of the study area: Boothia Peninsula  
329 and Prince of Wales, Devon and Ellesmere islands (semi-scattered distribution).

330 However, one should consider the fact that uncertainties in the forcing dataset (i.e.,  
331 CRCM) can translate into uncertainties in snow simulations. Nonetheless, the analysis provides  
332 an indication of the potential for denser snow and more difficult grazing conditions in the future.

333 **4.5. Preliminary Upscaling Approach**

334 Our preliminary analysis (based on Banks Island) indicated that  $\geq 1^\circ$  slope would have a  
 335 measurable impact on the snow profiles. A classification of the pixels reaching the  $1^\circ$  slope  
 336 threshold for Banks Island at different spatial resolutions is illustrated on Figure 6.



337  
 338 Figure 6. Preliminary upscaling approach: slope at different spatial resolutions (under / over  $1^\circ$ ) for Banks Island.

339 The preliminary downscaling approach here presented is essentially based on determining  
 340 the roughest spatial resolution that can be used in order to see a measurable impact on snow  
 341 profiles (more specifically density). Figure 6(d) shows that no pixel reaches a slope of  $1^\circ$  at the  
 342 spatial resolution of CRCM data (45 km), where the maximum slope observed is about  $0.2^\circ$ . The  
 343 number of pixels  $\geq 1^\circ$  slope increases significantly at 5 km, 1 km and 250 m respectively. This  
 344 suggests that 5-km pixels might represent the maximum spatial unit necessary to incorporate the  
 345 effect of slope on the snow density simulated by SNOWPACK.

## 346 **5.0. Discussion & Conclusion**

347 This paper presented a spatialization tool for a snow multilayer thermodynamic model. The tool  
348 was developed to support the assessment of past, present and future grazing conditions for Peary  
349 caribou. Both hypotheses were verified, in the sense that the snow cover simulation using  
350 SNOWPACK provided a parameter that could be linked to the caribou counts and that high snow  
351 density values, particularly the cumulative thickness of layers above  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , appeared to  
352 correspond to lower caribou counts (harder grazing conditions). The threshold showed  
353 statistically significant relationship with caribou counts, with a cumulative seasonal thickness of  
354 7000 cm above which snow conditions are considered as unfavourable for food access. This is  
355 supported by studies such as Miller and Gunn (2003) where massive Peary caribou die-offs  
356 occurred after severe winters. Studies have noted that other factors such as wolf predation and  
357 movement between islands can also be considered as mechanisms of caribou decline (e.g., Tyler,  
358 2010); however they were not considered here due to the lack of information across the Arctic  
359 (e.g., Nagy, Larter, & Fraser, 1996).

360 Vikhamar-Schuler et al. (2013) also investigated simulated snow density using  
361 SNOWPACK for reindeer grazing condition assessment, but their work remained at the pixel  
362 scale (no spatialization). They found a threshold of  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , which is similar to what our work  
363 suggested. The difference can be associated to different model configuration, forcing dataset,  
364 available caribou counts and local climate conditions.

365 The tool presented in this paper produces raster files that can be used to visually and  
366 quantitatively examine changes in the spatial distribution of snow conditions over time (past,  
367 present and future). Despite the known limitations, the spatialization software does show promise  
368 with respect to providing a better characterization of Peary caribou grazing conditions, as well as

369 for other arctic fauna affected by snow conditions, that can be used to better inform habitat  
370 analyses and factors influencing fluctuations in species numbers. With the upscaling work, the  
371 platform has the potential to provide finer scale variations in animal habitat use patterns in time  
372 and space, such as where snow might be too thick or wet to travel on. It also has the potential to  
373 improve existing data on snow cover extent or snow water equivalent (SWE) retrievals used in a  
374 variety of analyses.

375         With this spatialization tool now available, prioritized future work will include the  
376 improvement of dense snow layer simulations by considering wind effects and also the  
377 improvement of the spatial resolution using fine scale DEM at a resolution of less than five  
378 kilometers (considering soil type and albedo). Furthermore, a multivariate analysis including  
379 other snow properties (e.g., total height, grain type, hardness) will be investigated. This work will  
380 also be coupled with current research on rain-on-snow and ice layer detection using passive  
381 microwave remote sensing. This work is being conducted in our lab and will provide a more  
382 complete characterization of snow conditions.

## 383 **6.0. Acknowledgements**

384 Funding for this research was provided by Environment and Climate Change Canada, the Centre d'Études  
385 Nordiques (CEN) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The  
386 authors would like to thank the Université de Sherbrooke and the Groupe de Recherche Interdisciplinaire  
387 sur les Milieux Polaires (GRIMP) for logistical and administrative support. The CRCM data has been  
388 generated and supplied by Ouranos; special thanks to Ross Brown for facilitating its access. Also special  
389 thanks to Jean-Benoît Madore and Lucie Portier for initial programming efforts.

390 We are grateful to Dr. Anne Gunn for her technical guidance through the Peary caribou surveys and her  
391 dedication. We also thank Dr. Justina Ray for her continued support and dedication to Peary caribou. A  
392 special thank you for the continued technical support of the Peary caribou technical team: Dawn Andrews,  
393 Morgan Anderson, Donna Bigelow, Tracy Davison, Andrew Maher, and Peter Sinkins. We are also  
394 grateful for the independent reviews of Dr. John Fryxell, Dr. Joerg Tews, and Dr. Glenn Sutherland.

395 **7.0. References**

- 396 Bartelt, P., & Lehning, M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche  
 397 warning Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35, 123–145.  
 398 doi:10.1016/S0165-232X(02)00074-5
- 399 Callaghan, T. V., & Johansson, M. (2011). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic*  
 400 *(SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and  
 401 Assessment Programme (AMAP).
- 402 COSEWIC. (2004). *Assessment and Update Status Report on the Peary caribou Rangifer*  
 403 *tarandus pearyi and the barren-ground Caribou Rangifer tarandus groenlandicus*  
 404 *(Dolphin and Union population) in Canada*. Ottawa, Ontario, Canada: Committee on the  
 405 Status of Endangered Wildlife in Canada.
- 406 COSEWIC. (2011). *Designatable Units for Caribou (Rangifer tarandus) in Canada*. Ottawa,  
 407 Ontario, Canada: Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada.
- 408 COSEWIC. (in press). *Status Report on Peary Caribou (Rangifer tarandus pearyi) and Dolphin*  
 409 *and Union Caribou (Rangifer tarandus groenlandicus) in Canada*. Ottawa, Ontario,  
 410 Canada: Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada.
- 411 Derksen, C., & Brown, R. (2012). Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period  
 412 exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*, 39 (L19504), 1–6.  
 413 doi:10.1029/2012GL053387
- 414 Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J., ... Paul, F.  
 415 (2013). A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009.  
 416 *Science*, 340, 852–857. doi:10.1126/science.1234532
- 417 Gunn, A., & Dragon, J. (2002). *Peary caribou and muskox abundance and distribution on the*  
 418 *western Queen Elizabeth Islands, Northwest Territories and Nunavut June-July 1997*  
 419 *(File Report No. 130)*. Yellowknife, Northwest Territories, Canada: Government of the  
 420 Northwest Territories.
- 421 Gunn, A., Miller, F. L., Barry, S. J., & Buchan, A. (2006). A Near-Total Decline in Caribou on  
 422 Prince of Wales, Somerset, and Russell Islands, Canadian Arctic. *Arctic*, 59, 1–13.  
 423 doi:10.14430/arctic358
- 424 Heavy snow kills at least 15,000 reindeer in northern Siberia. (2014, March 20). *The Siberian*  
 425 *Times*. Retrieved from <http://siberiantimes.com>

- 426 Jenkins, D. A., Campbell, M., Hope, G., Goorts, J., & McLoughlin, P. (2011). *Recent trends in*  
 427 *abundance of Peary caribou (Rangifer tarandus pearyi) and Muskoxen (Ovibos*  
 428 *moschatus) in the Canadian Arctic Archipelago, Nunavut* (Wildlife Report No. 1). Pond  
 429 Inlet, Nunavut, Canada: Department of Environment, Government of Nunavut.
- 430 Jin, M., & Dickinson, R. E. (2002). New observational evidence for global warming from  
 431 satellite. *Geophysical Research Letters*, 29(10), 39-1–39-4. doi:10.1029/2001GL013833
- 432 Johnson, C. A., Neave, E., Richards, A., Banks, S. N., & Quesnelle, P. E. (in press). *Knowledge*  
 433 *assessment (community and scientific) to inform the identification of critical habitat for*  
 434 *Peary caribou, Rangifer tarandus pearyi, in the Canadian Arctic*. Ottawa, Ontario,  
 435 Canada: Environment and Climate Change Canada, Science and Technology.
- 436 Langlois, A., Royer, A., Derksen, C., Montpetit, B., Dupont, F., & Goïta, K. (2012). Coupling the  
 437 snow thermodynamic model SNOWPACK with the microwave emission model of  
 438 layered snowpacks for subarctic and arctic snow water equivalent retrievals. *Water*  
 439 *Resources Research*, 48(12), 1–14. doi:10.1029/2012WR012133
- 440 Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., & Satyawali, P. (2002a). A physical SNOWPACK  
 441 model for the Swiss avalanche warning Part II. Snow microstructure. *Cold Regions*  
 442 *Science and Technology*, 35, 147–167. doi:10.1016/S0165-232X(02)00073-3
- 443 Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., & Fierz, C. (2002b). A physical SNOWPACK model for the  
 444 Swiss avalanche warning Part III: meteorological forcing, thin layer formation and  
 445 evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, 35, 169–184. doi:10.1016/S0165-  
 446 232X(02)00072-1
- 447 Liston, G. E., & Hiemstra, C. A. (2011). The Changing Cryosphere: Pan-Arctic Snow Trends  
 448 (1979-2009). *Journal of Climate*, 24, 5691–5712. doi:10.1175/JCLI-D-11-00081.1
- 449 Miller, F. L., Edmonds, E. J., & Gunn, A. (1982). *Foraging behaviour of Peary caribou in*  
 450 *response to springtime snow and ice conditions* (Occasional Paper No. 48). Ottawa,  
 451 Ontario, Canada: Environment Canada, Canadian Wildlife Service.
- 452 Miller, F. L., & Gunn, A. (2003). Status, population fluctuations and ecological relationships of  
 453 Peary caribou on the Queen Elizabeth Islands: implications for their survival. *Rangifer*,  
 454 *Special Issue No. 14*, 213–226. doi:10.7557/2.23.5.1703

- 455 Miller, F. L., Barry, S. J., & Calvert, W. A. (2007). Near-total loss of caribou on south-central  
 456 Canadian Arctic Islands and the role of seasonal migration in their demise. *Arctic*, 60, 23–  
 457 36. doi:10.14430/arctic262
- 458 Montpetit, B. (2015). *Analyse de la modélisation de l'émission multi-fréquences micro-onde des*  
 459 *sols et de la neige, incluant les croutes de glace à l'aide du modèle Microwave Emission*  
 460 *Model of Layered Snowpacks (MEMLS)* (Masters Thesis). Université de Sherbrooke,  
 461 Sherbrooke, Québec, Canada.
- 462 Music, B., & Caya, D. (2007). Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River  
 463 Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of*  
 464 *Hydrometeorology*, 8, 969–988. doi:10.1175/JHM627.1
- 465 Nagy, J. A., Larter, N. C., & Fraser, V. P. (1996). Population demography of Peary caribou and  
 466 muskox on Banks Island, NWT, 1982-1992. *Rangifer, Special Issue No. 9*, 213–222.  
 467 doi:10.7557/2.16.4.1245
- 468 Parker, G. R., Thomas, D. C., Broughton, E. & Gray, D. R. (1975). *Crashes of muskox and Peary*  
 469 *caribou populations in 1973-74 on the Parry Islands, Arctic Canada* (Progress Notes No.  
 470 56). Ottawa, Ontario, Canada: Canadian Wildlife Service.
- 471 Portier, L. (2014). *Analyse des liens entre les propriétés nivales et la mortalité des caribous*  
 472 *Peary dans l'archipel arctique canadien à l'aide du modèle SNOWPACK* (Internship  
 473 report). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- 474 Putkonen, J., & Roe, G. (2003). Rain-on-snow events impact soil temperatures and affect  
 475 ungulate survival. *Geophysical Research Letters*, 30(4), 37-1–37-4.  
 476 doi:10.1029/2002GL016326
- 477 Romanovsky, V. E., Smith, S. L., & Christiansen, H. H. (2010). Permafrost thermal state in the  
 478 polar northern hemisphere during the international polar year 2007-2009: A synthesis.  
 479 *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 106–116. doi:10.1002/ppp.689
- 480 Screen, J. A., & Simmonds, I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic  
 481 temperature amplification. *Nature*, 464, 1334–1337. doi:10.1038/nature09051
- 482 Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... Miller, H. L.  
 483 (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working*  
 484 *Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- 485           *Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University  
486           Press.
- 487 Species at Risk Committee. (2012). *Species Status Report for Peary Caribou (Rangifer tarandus*  
488           *pearyi) in the Northwest Territories*. Yellowknife, Northwest Territories, Canada: Species  
489           at Risk Committee.
- 490 Stroeve, J. C., Maslanik, J., Serreze, M. C., Rigor, I., Meier, W., & Fowler, C. (2011). Sea ice  
491           response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010.  
492           *Geophysical Research Letters*, 38(L02502), 1–6. doi:10.1029/2010GL045662
- 493 Tyler, N. J. C. (2010). Climate, snow, ice, crashes, and declines in populations of reindeer and  
494           caribou (*Rangifer tarandus* L.). *Ecological Monographs*, 80, 197–219. doi:10.1890/09-  
495           1070.1
- 496 Vikhamar-Schuler, D., Hanssen-Bauer, I., Schuler, T. V., Mathiesen, S. D., & Lehning, M.  
497           (2013). Use of a multilayer snow model to assess grazing conditions for reindeer. *Annals*  
498           *of Glaciology*, 54, 214–226. doi:10.3189/2013AoG62A306
- 499 Weismüller, J., Wollschläger, U., Boike, J., Pan, X., Yu, Q., & Roth, K. (2011). Modeling the  
500           thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and  
501           on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 5, 741–757. doi:10.5194/tc-5-741-2011

#### 4. Éléments complémentaires de méthodologie, de résultats et de discussion

L'article scientifique présenté à la section 3 passe à travers l'essentiel de la méthodologie du projet de recherche, en plus de fournir les principaux éléments de résultats et de discussion du projet. Toutefois, certains éléments qui ne figurent pas à l'article sont ici repris avec plus de détails.

##### 4.1. Site d'étude

Le site d'étude, que l'on retrouve à la Figure 1 de l'article, est repris ici à la Figure 9 en mettant l'accent sur les sites associés à des comptes de caribous utilisés. Bien que hors de l'étendue géographique de la zone couverte par les relevés de comptes de caribous de Peary, la station météorologique du CARTEL à Cambridge Bay a aussi été utilisée dans le cadre de cette étude.

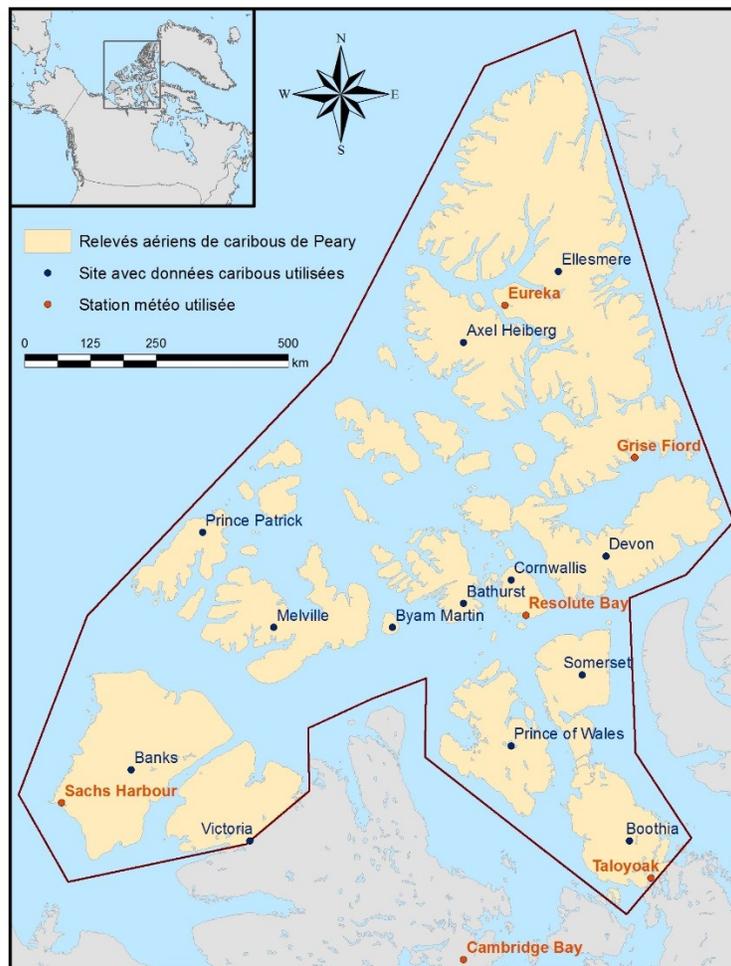


Figure 9 : Site d'étude.

## 4.2. Données météorologiques

Dans le projet, comme mentionné dans l'article (présenté à la section 3), les données météorologiques utilisées en intrant pour la spatialisation proviennent du *Modèle régional canadien du climat* (MRCC ; en anglais CRCM). Les données disponibles pour le MRCC offrent une panoplie de paramètres météorologiques, dont on retrouve une vue d'ensemble au Tableau 2.

**Tableau 2 : Paramètres MRCC disponibles.**

Paramètre	Nom du paramètre	Unités
AN	Albédo de la neige	fraction
FDL	Rayonnement de grande longueur d'onde descendant de surface	W/m <sup>2</sup>
FN	Fraction de neige	fraction
FSS	Flux solaire à la surface	W/m <sup>2</sup>
GC	Code de couvert (sol/océan/lac)	classe
GT	Température de surface	K
PCP	Flux de précipitation	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
PS	Pression à la surface	Pa
SNO	Neige au sol	kg/m <sup>2</sup>
SQ	Humidité spécifique	kg/kg
SQI	Humidité spécifique instantanée	kg/kg
ST	Température de l'air	K
STI	Température de l'air instantanée	K
SWMX	Vitesse du vent	m/s
TG	Pression de l'air	Pa
TN	Température de la neige	K
ZN	Profondeur de neige	m

Afin de répondre aux paramètres exigés en entrée à SNOWPACK (Tableau 1), les paramètres météorologiques du MRCC sélectionnés sont mentionnés dans l'article à sa section 3.2.2 ; le Tableau 3 les reprend en spécifiant l'association MRCC versus SNOWPACK. Il est à noter que le paramètre de profondeur de neige (ZN) a été laissé de côté vu qu'il est relativement mal modélisé par le MRCC (Langlois et al., 2014).

**Tableau 3 : Paramètres MRCC vs SNOWPACK.**

SNOWPACK	Néc.	Paramètre MRCC
TA	X	ST (température de l'air)
RH	X	SQ (humidité spécifique) <b>et</b> PS (pression à la surface)
VW	X	SWMX (vitesse du vent)
ISWR / OSWR	X	FSS (flux solaire à la surface)
ILWR / TSS	X	FDL (rayonnement de grande longueur d'onde descendant de surface)
PSUM / HS	X	PCP (flux de précipitation) <b>ou</b> ZN (profondeur de neige ; pas utilisée)
TSG	–	–
TS1, TS2 ...	–	TN (température de la neige ; pas utilisée)

Les paramètres météorologiques en intrant à SNOWPACK (Tableau 1) appartiennent au format SMET. D'autres paramètres sont inclus dans ce format : l'intensité de précipitations, le rayonnement réfléchi de grande longueur d'onde, la direction du vent et la vitesse maximale du vent. On retrouve au Tableau 4 une synthèse des paramètres météorologiques du format SMET, incluant les unités.

**Tableau 4 : Paramètres météorologiques du format SMET.**

Paramètre	Nom du paramètre	Unités
TA	Température de l'air	K
TSS	Température à la surface	K
TSG	Température au sol	K
RH	Humidité relative	fraction
VW_MAX	Vitesse maximale du vent	m/s
VW	Vitesse du vent	m/s
DW	Direction du vent	°
ISWR	Rayonnement incident de courte longueur d'onde	W/m <sup>2</sup>
OSWR	Rayonnement réfléchi de courte longueur d'onde	W/m <sup>2</sup>
ILWR	Rayonnement incident de grande longueur d'onde	W/m <sup>2</sup>
OLWR	Rayonnement réfléchi de grande longueur d'onde	W/m <sup>2</sup>
PINT	Intensité de précipitations	mm/h
PSUM	Accumulation de précipitations	mm/h
HS	Hauteur de neige	m

Les données météorologiques mesurées aux stations météo d'Environnement et Changement climatique Canada se situant à l'intérieur de la zone d'étude (Figure 9) sont disponibles à une résolution temporelle d'une heure, mises à part les précipitations, disponibles à une résolution temporelle d'une journée (cumulées). Les données météorologiques disponibles pour la station du CARTEL de l'Université de Sherbrooke à Cambridge Bay sont pour leur part disponibles à une résolution temporelle de 30 minutes. Le lecteur peut se référer à la section 4.3.2 pour plus de détails sur ces dernières.

### **4.3. Spatialisation de SNOWPACK**

Par rapport à la spatialisation de SNOWAPCK en tant que tel, quelques éléments n'ont pas été couverts dans l'article scientifique présenté, toujours au niveau de la méthodologie, des résultats et de la discussion. Nous présentons donc ici trois sections complémentaires qui correspondent précisément aux trois objectifs spécifiques.

À titre de complément à la méthodologie décrite dans l'article, particulièrement pour mieux comprendre l'agencement des différentes étapes du projet qui y sont décrites l'une par rapport à l'autre, un organigramme méthodologique global est présenté à la Figure 10. Pour chacune des trois étapes de la spatialisation de SNOWPACK, donc pour les trois objectifs spécifiques, un organigramme a été détaillé (Figure 11 à Figure 13). Dans l'ensemble de ces quatre organigrammes, les éléments en jaune symbolisent les intrants, ceux en bleu les opérations et ceux en vert les résultats principaux.

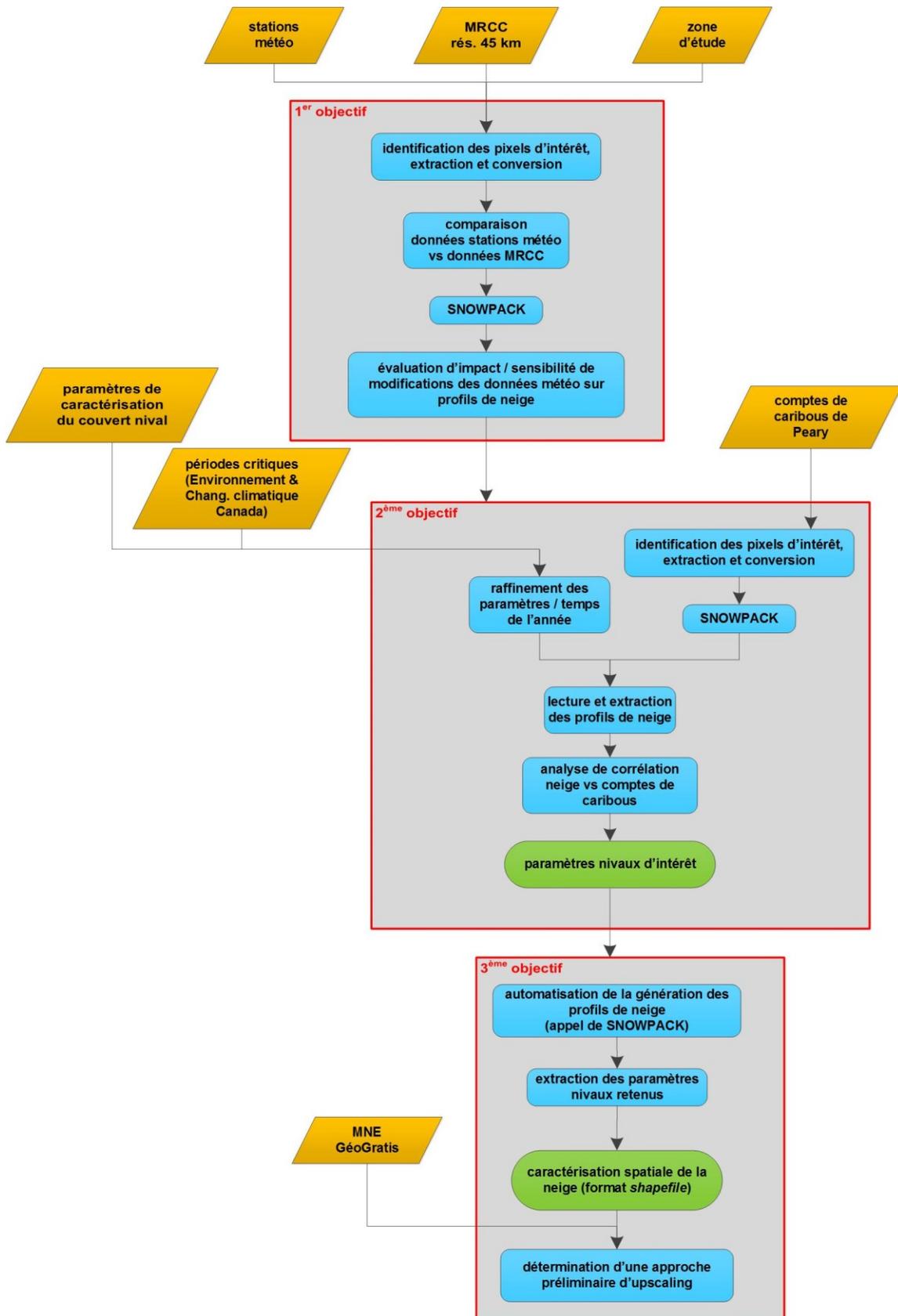


Figure 10 : Organigramme méthodologique global.

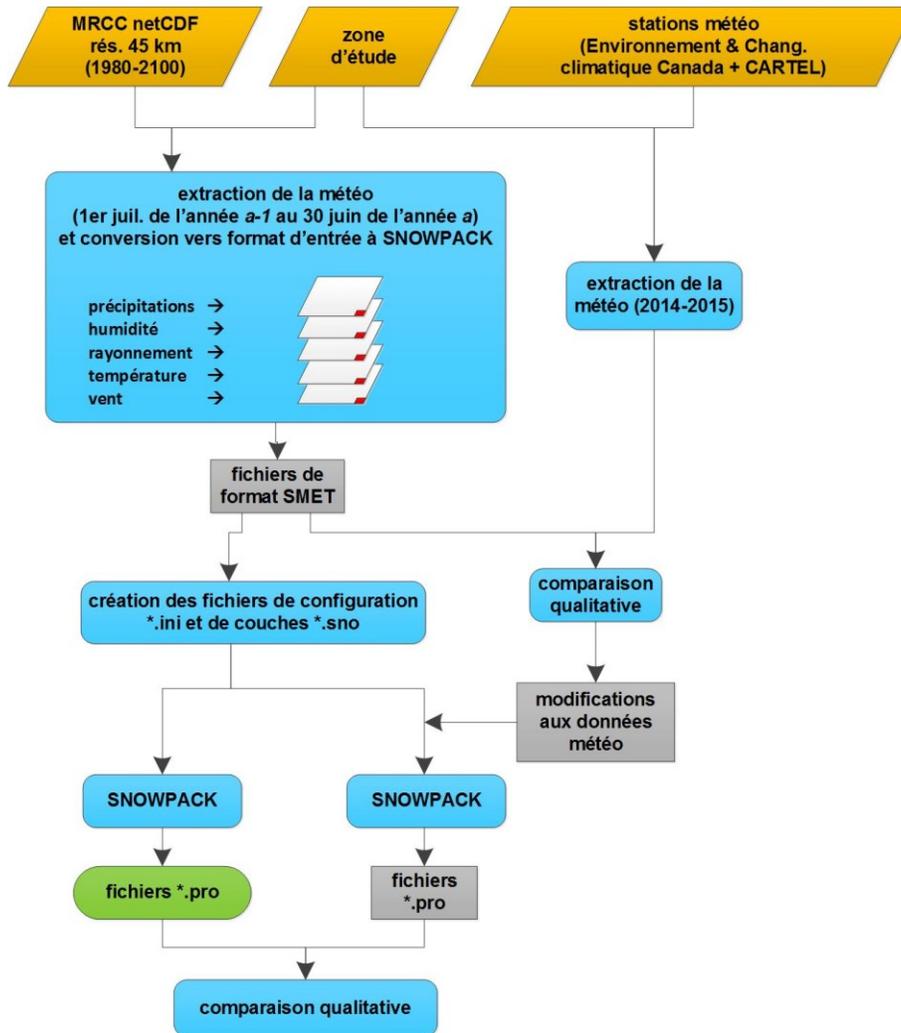


Figure 11 : Organigramme méthodologique (détail du 1er objectif).

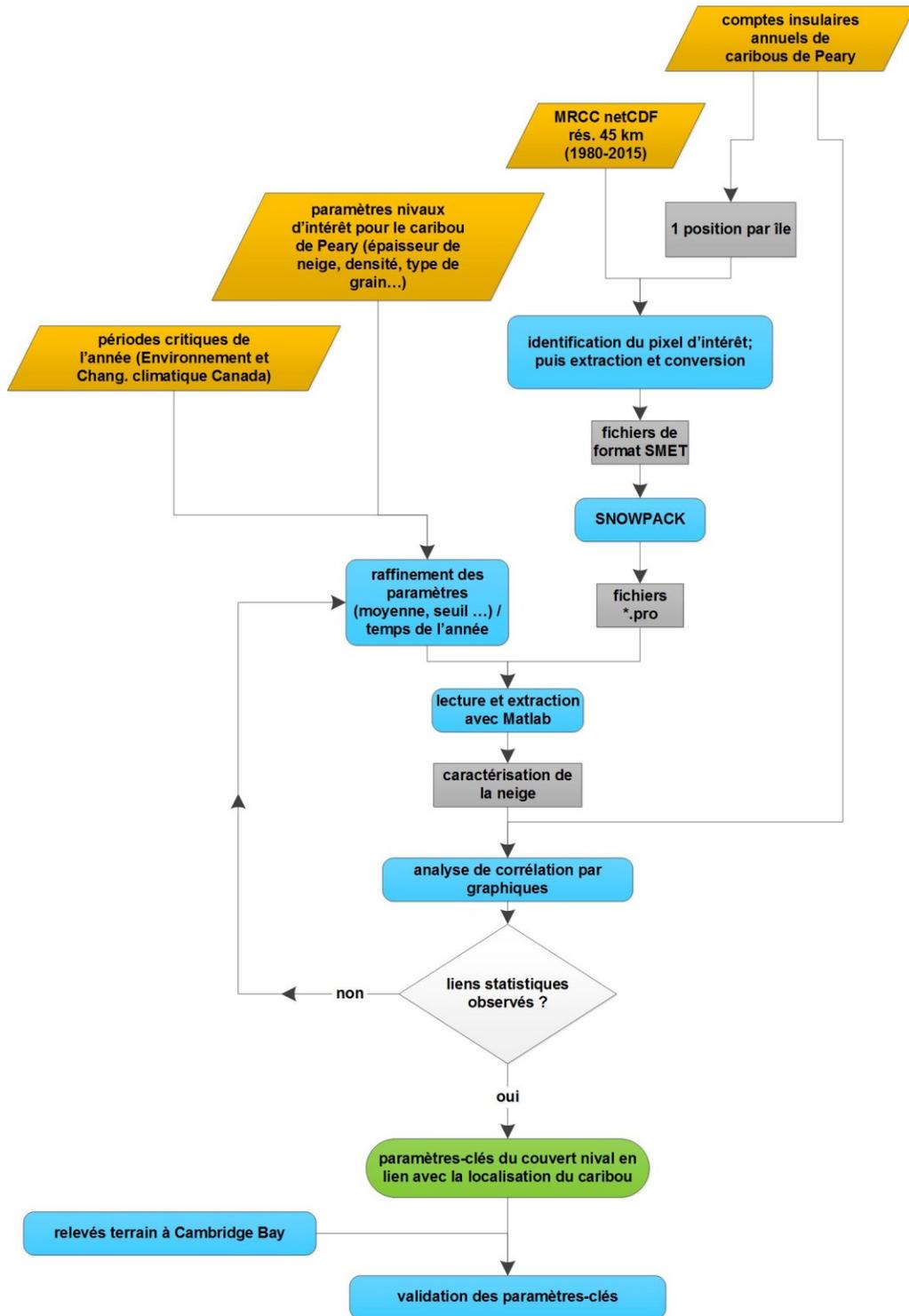


Figure 12 : Organigramme méthodologique (détail du 2ème objectif).

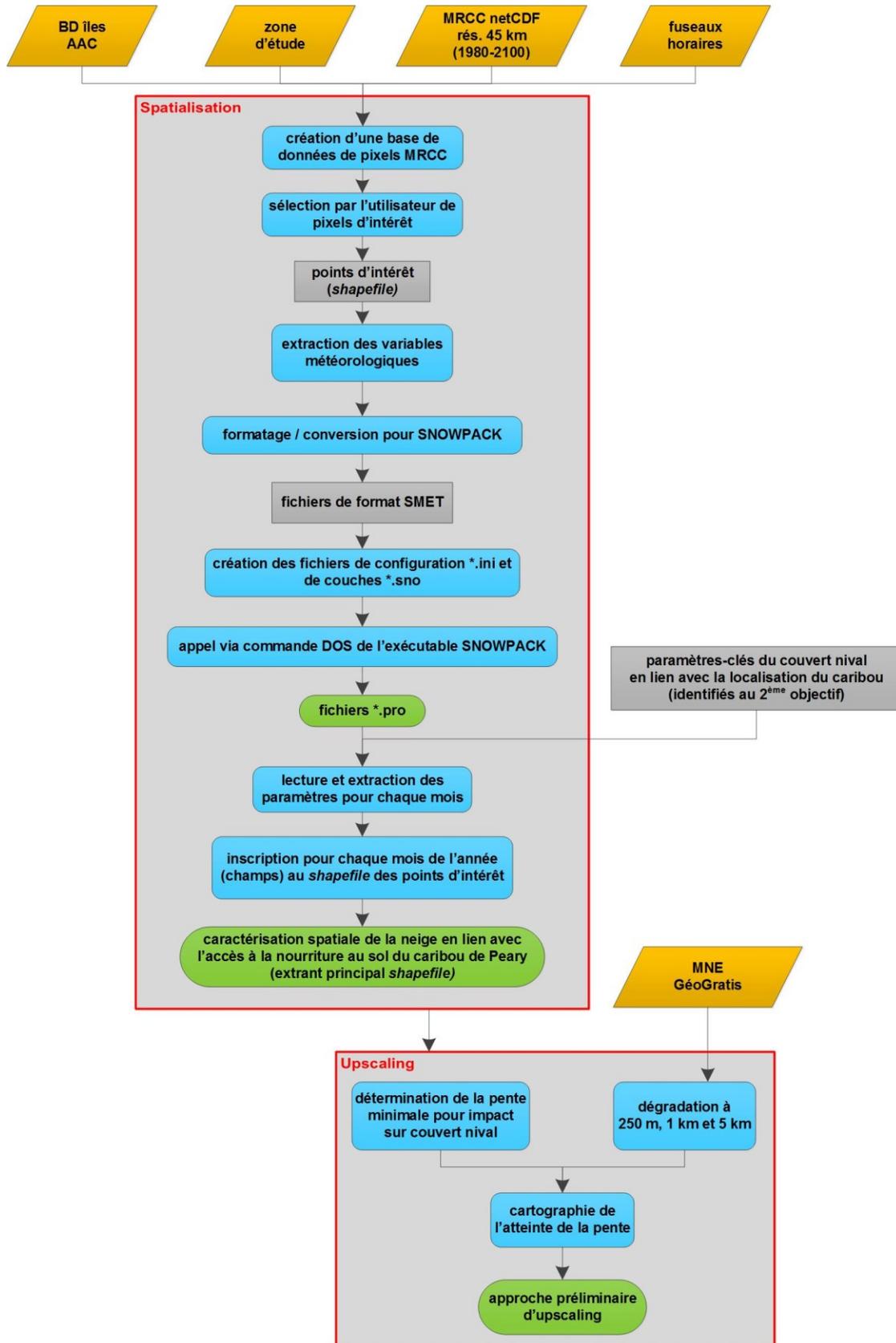
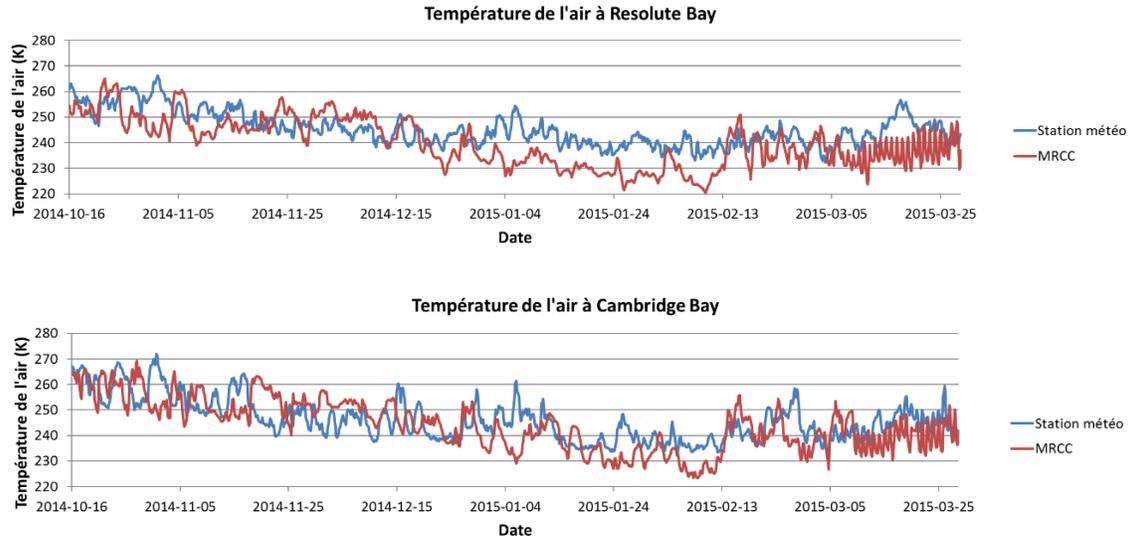


Figure 13 : Organigramme méthodologique (détail du 3ème objectif).

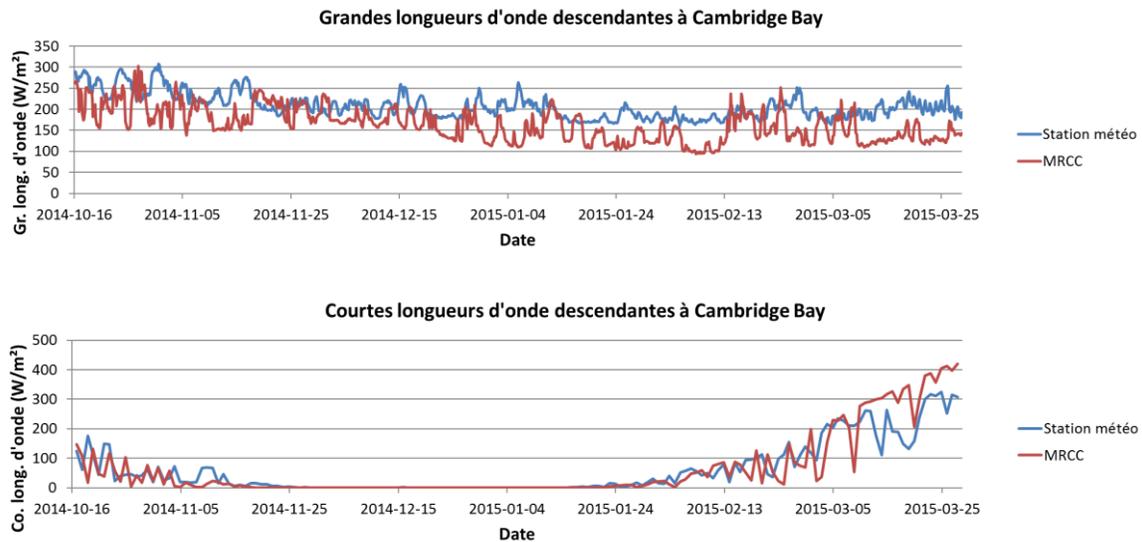
#### **4.3.1. Pilotage du modèle SNOWPACK à partir d'un modèle climatique (1<sup>er</sup> objectif)**

Comme précisé sur le site web du *Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique* (CCmaC) par rapport au modèle MRCC, « les valeurs aux points de grille ne se comparent pas directement aux données provenant de stations ». Au premier objectif (organigramme méthodologique présenté à la Figure 11), nous avons donc tenté de comparer, à titre qualitatif seulement, une information météorologique pour une superficie de 45 km x 45 km (MRCC) avec des données ponctuelles issues de stations météorologiques. La comparaison s'est faite pour évaluer le réalisme du MRCC à reproduire les conditions arctiques en intrant à SNOWPACK. Il ne s'agit donc aucunement d'une tentative de validation du MRCC.

Les stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada situées à Sachs Harbour, Eureka, Grise Fiord, Resolute Bay et Taloyoak ont fait l'objet de comparaisons par rapport au MRCC à une résolution temporelle de trois heures par rapport aux données de température de l'air. Les rayonnements de grande et de courte longueurs d'ondes descendantes de surface ont été analysés pour la seule station le permettant, soit celle de Cambridge Bay, à une résolution temporelle de respectivement trois heures et une journée (courtes longueurs d'onde analysées au maximum quotidien). Les trois autres paramètres, soit l'humidité relative, la vitesse du vent et les précipitations, ont été laissés de côté ici puisque l'ensemble des stations se trouvent en milieu côtier. À la Figure 9 on retrouve en rouge l'emplacement de l'ensemble de ces six stations météorologiques. Mentionnons que la période de comparaison est la suivante : du 17 octobre 2014 au 29 mars 2015. Cette période correspond en fait à l'intervalle temporel pour lequel l'information était disponible pour la station de Cambridge Bay au moment des analyses.



**Figure 14 : Température de l'air (K) dans le temps : comparaison MRCC vs données mesurées aux stations d'Environnement et Changement climatique Canada à Resolute Bay et du CARTEL (UdeS) à Cambridge Bay.**



**Figure 15 : Rayonnement de grande et courte longueurs d'onde descendantes de surface ( $W/m^2$ ) dans le temps : comparaison MRCC vs données mesurées à la station du CARTEL (UdeS) à Cambridge Bay.**

Par rapport à la température de l'air, on constate de manière globale que le MRCC suit la tendance des données mesurées aux stations au fil de l'année. On peut voir en effet aux graphiques de la Figure 14 que les courbes en rouge et en bleu évoluent relativement près l'une de l'autre au fil de l'hiver. À une résolution temporelle d'une semaine on n'observe toutefois pas la même correspondance. Pour l'ensemble des stations, on note que, pour des températures de l'air basses,

le MRCC a tendance à sous-estimer le paramètre pour la période d'analyse. Grise Fiord et Eureka semblent être les sites présentant la moins bonne concordance entre la température de l'air modélisée et celle mesurée. Cela pourrait venir du fait que les deux stations sont situées dans un fjord.

Par rapport au rayonnement de grande longueur d'onde, on note à la Figure 15 que le MRCC sous-estime de manière générale le paramètre, de façon plus marquée pour des valeurs mesurées basses. Pour le rayonnement de courte longueur d'onde, on note que, pendant la période d'analyse, le MRCC surestime le paramètre pour des valeurs hautes ; à noter qu'il est normal de se retrouver avec des valeurs proches de zéro entre novembre et janvier, le soleil étant absent / peu influent pour une importante partie de l'année à cette latitude en hiver.

Toutefois, la comparaison du MRCC avec les stations météo disponibles ayant été faite sur une très courte période, aucune conclusion générale ne peut être tirée ici.

Au niveau des simulations du couvert nival, plus particulièrement pour ce qui est des fichiers d'information sur le sol (\*.sno) et de paramètres d'initialisation (\*.ini) en entrée à SNOWPACK, plusieurs paramètres n'ont pas été considérés, donc laissés vacants ou par défaut. Ces paramètres incluent notamment l'albédo du sol (paramètre disponible pour les données du MRCC), l'information d'occupation du sol (paramètre de code de couvert disponible également pour les données du MRCC) et le mode *Antarctica* (option disponible dont la densification par le vent a été améliorée). Il s'agit d'éléments en cours d'analyse au sein du GRIMP.

Aussi, les simulations restent à être raffinées par rapport à la présence de neige à leur date de début. En effet, certaines régions, grossièrement les plus septentrionales, présentent de la neige tout au long de l'année, mais les simulations débutent le 1<sup>er</sup> juillet de l'année avec aucune neige. Il faudra donc creuser un peu plus la question pour ces cas et inclure une caractérisation de la neige au début des simulations, chose possible avec SNOWPACK.

#### **4.3.2. Détermination et validation des paramètres d'intérêt (2<sup>ème</sup> objectif)**

Par rapport à la détermination des paramètres d'intérêt (organigramme méthodologique présenté à la Figure 12), nous avons une période d'analyse se situant entre le 1<sup>er</sup> juillet de l'année  $a-1$  et le 30 juin de l'année  $a$  (la donnée de compte de caribous étant évaluée à l'été de l'année  $a$ ). Il s'agit en effet, par hypothèse, de l'hiver précédant la donnée de compte de caribous qui a un impact le plus

direct sur cette dernière. On retrouve à la Figure 9 (en bleu) l'emplacement des 13 secteurs présentant des données de comptes de caribous qui ont été analysés. L'analyse s'est faite par génération de graphiques, puis par appréciation qualitative et quantitative. Nous avons tout d'abord mené cette étude en analysant l'ensemble des sites indépendamment. Pour chaque point aux graphiques générés pour cette analyse (ceux présentés sont la Figure 3 de l'article et les figures de la présente sous-section), on se retrouve donc en Y avec un compte insulaire de caribous évalué pour une année  $a$ , et en X avec le paramètre nival évalué pour la totalité ou une partie de l'hiver précédant cette année.

### ***Raffinement du paramètre de densité***

En premier lieu le paramètre de densité a été analysé. Afin de dégager des liens les plus forts possible avec les comptes insulaires de caribous, ce paramètre a dû être raffiné, comme il a été introduit dans l'article scientifique présenté. En analysant chaque couche du couvert nival pour chaque période de trois heures, nous nous sommes intéressés d'une part aux valeurs mensuelles maximale et moyenne. Toujours pour la densité, un seuil d'atteinte a été introduit. Par rapport à ce seuil, nous avons évalué d'une part le nombre de couches le dépassant (paramètre élémentaire servant de premier test), d'autre part la densité cumulée (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) et l'épaisseur cumulée (en cm) des couches le dépassant. On comprendra donc que, compte tenu que l'évaluation a été faite pour chaque couche distincte du couvert nival en un temps  $t$ , et ce pour chaque période de trois heures, les paramètres évalués selon le seuil de densité peuvent prendre des valeurs relativement élevées.

En résumé, la densité de neige, évaluée pour chaque couche du couvert nival à chaque période de trois heures, a été raffinée de la façon suivante :

- densité maximale mensuelle
- densité moyenne mensuelle
- seuil de densité (300, 350 & 400  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) :
  - nombre d'occurrences
  - densité cumulée
  - épaisseur cumulée

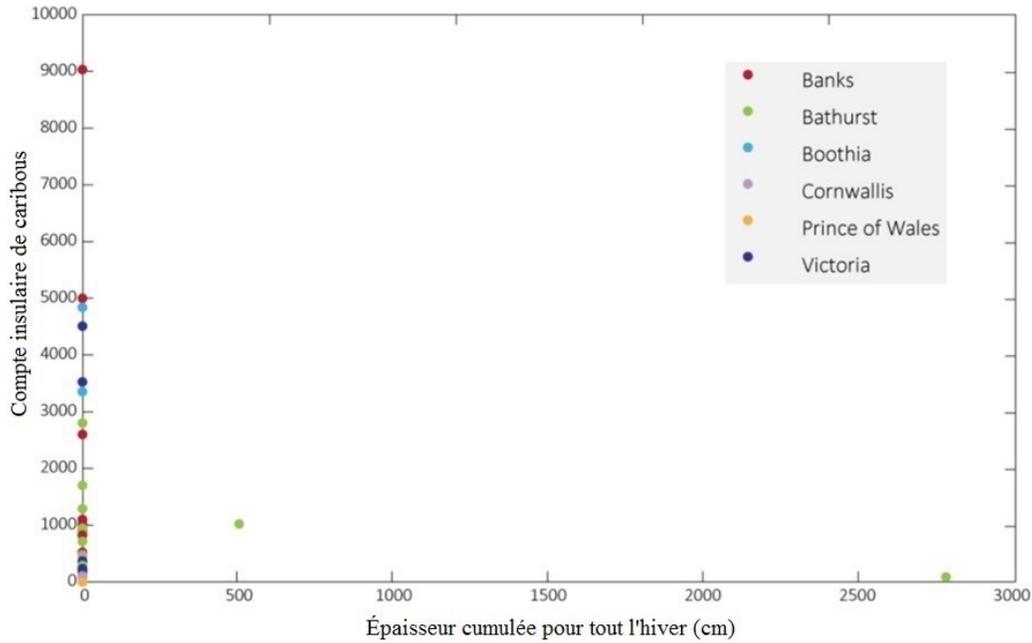
### ***Valeurs maximales***

Une valeur X du paramètre de caractérisation du couvert nival est théoriquement propice à une valeur maximale Y de compte de caribous, mais peut donc induire un compte plus faible, ce pour des raisons autres que la difficulté / facilité pour le caribou d'atteindre la nourriture, comme la

présence-même de cette nourriture. Ce fait explique qu'il est plausible de se retrouver, à la Figure 3 de l'article, avec un amas de points associés à des faibles valeurs d'épaisseur cumulée et de comptes de caribous, en l'occurrence respectivement en deçà de 4000 cm et de 3000 individus. Toujours par rapport à la Figure 3 de l'article, mis à part la valeur élevée du  $R^2$  observée, ce qui justifie qu'on puisse affirmer qu'on a une bonne relation se divise principalement en deux observations. Tout d'abord, on note que les comptes maximaux de caribous (huit points) sont associés à des faibles valeurs d'épaisseur cumulée, en l'occurrence en deçà de 4000 cm. Ensuite, on note que les valeurs maximales d'épaisseur cumulée (11 points) sont associées à des faibles valeurs de comptes de caribous, en l'occurrence en deçà de 3000 individus. Comme il a été vu à la section 4.2 de l'article, nous avons aussi consolidé les comptes insulaires de caribous en valeurs maximales par intervalles du paramètre de caractérisation du couvert nival.

### *Autres seuils de densité*

On observe donc que les comptes de caribous ont tendance à diminuer pour des valeurs d'épaisseur cumulée de plus en plus grandes. Dans l'article, un seuil de densité de  $300 \text{ kg/m}^3$  a été présenté. Il s'agit du seuil donnant la meilleure relation tout en gardant un nombre minimal de points d'analyse. Nous constatons que, plus nous augmentons le seuil, plus un nombre élevé de points se retrouvent sur l'axe des ordonnées, qui sont en fait des années pour lesquelles le seuil en question n'a pas été dépassé. Avec un seuil de 350 ou même de  $400 \text{ kg/m}^3$ , on diminue donc de beaucoup le nombre de points d'analyse. À  $400 \text{ kg/m}^3$  (Figure 16), on n'a que deux points d'épaisseur cumulée non nulle, et ces deux points vérifient la relation observée avec un seuil à  $300 \text{ kg/m}^3$  (Portier, 2014).



**Figure 16 : Comptes insulaires de caribous vs épaisseur cumulée (cm) pour seuil de 400 kg/m<sup>3</sup> (Lucie Portier, ex-membre du GRIMP).**

Mentionnons que ce dernier résultat a été obtenu avec des données météo différentes de celles présentées dans la méthodologie : les données NARR (voir l'Annexe 6 pour une description des données).

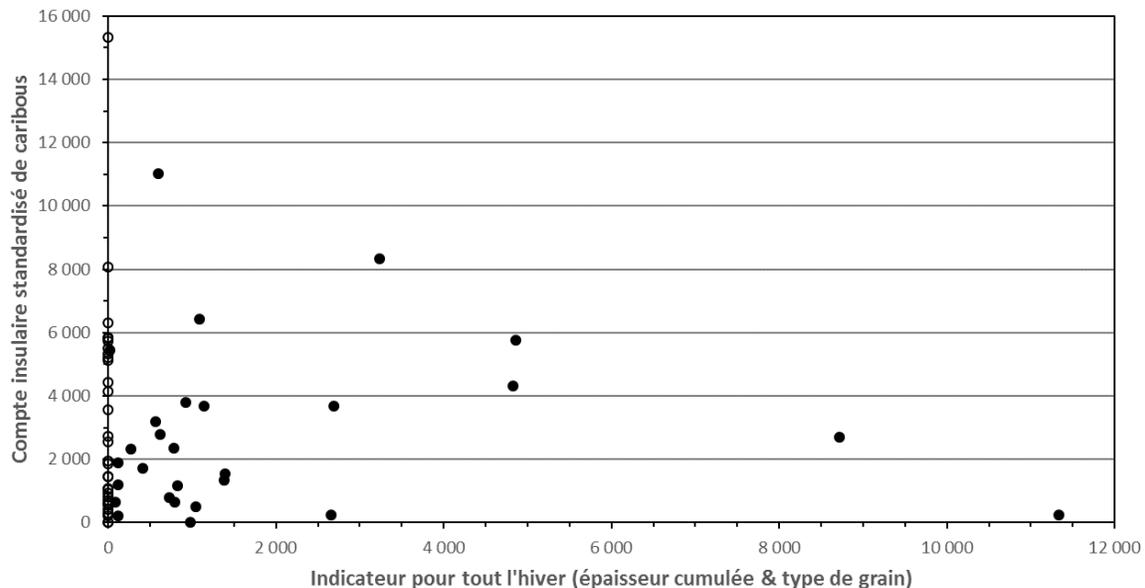
### ***Type de grain & standardisation par île des comptes de caribous***

Le paramètre de type de grain a aussi été étudié en complément à la densité pour tenir compte du fait que des hautes densités dans le couvert nival ne sont pas nécessairement associées à une difficulté à creuser pour le caribou de Peary. Par exemple, on aura parfois des hautes densités associées à de gros grains de neige, à travers lesquels il sera toutefois facile pour le caribou de creuser. L'étude du type de grain a donc été menée en analysant ce paramètre en combinaison avec le paramètre retenu de densité, pour en sortir un indicateur. Le type de grain a été évalué visuellement sous Sngui (outil présenté à la section 2.5) à partir des profils de neige selon la présence (graduée de 0 à 5 selon l'épaisseur estimée) de couches de fonte persistantes tout au long de l'hiver. Cette présence de couches de fonte a été présumée faciliter l'accès à la nourriture au sol pour le caribou de Peary, par rapport au givre de profondeur. L'équation utilisée est la suivante :

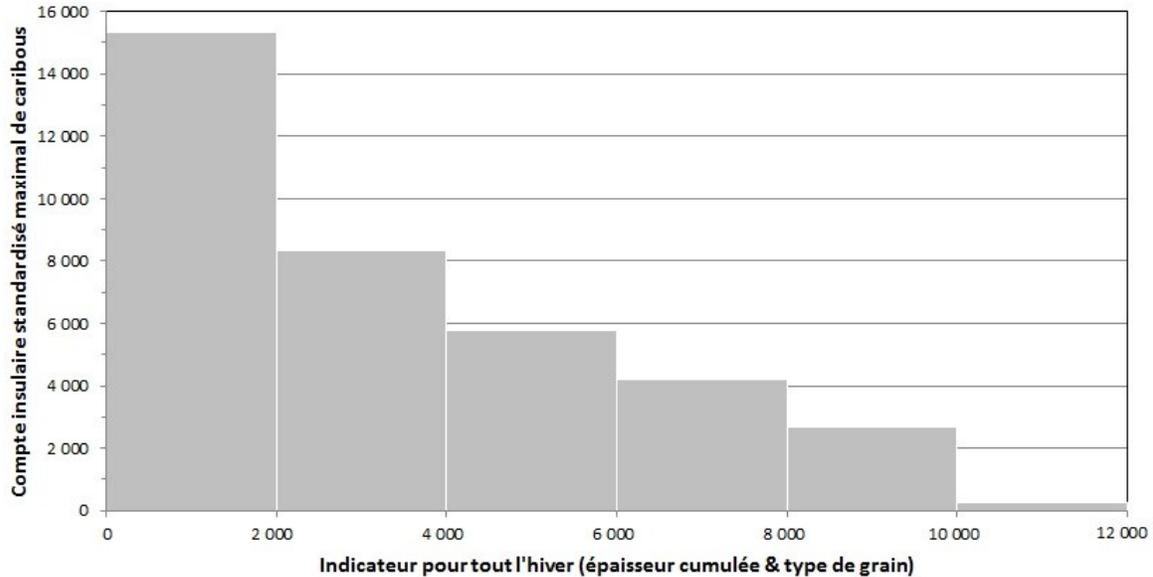
$$\text{Indicateur du couvert nival} = \frac{\text{Épaisseur cumulée}}{1 + \text{Indice de présence de couches de fonte}} \quad (1)$$

Il est à mentionner, toutefois, qu'il s'agit d'une étude préliminaire sur le type de grain ; une étude plus poussée est en cours au sein du GRIMP de l'Université de Sherbrooke sur le sujet.

Deux avenues d'analyse combinées sont présentées dans les graphiques suivants (Figure 17 et Figure 18). Il s'agit, d'une part, de cette introduction du paramètre de type de grain de neige (équation 1). D'autre part, une standardisation par île a été appliquée (complémentaire à la standardisation introduite à la section 3.2.1 de l'article), pour ramener les moyennes de comptes insulaires de caribous au même niveau pour l'ensemble de la zone d'étude (l'île Banks servant de standard). Cette dernière opération a été appliquée pour tenir en compte que, par exemple, pour une île dénombant au fil des années en moyenne moins de caribous que pour une autre, des valeurs de comptes faibles de la première peuvent être comparables à des valeurs de comptes élevées de la seconde, les conditions nivales étant donc présumées être potentiellement comparables. On comprendra donc qu'on se retrouve ici avec un indicateur sans unités simples pour la caractérisation de la neige, et tout autant avec un indicateur sans unités simples pour la présence de caribous.



**Figure 17 : Indicateur de comptes insulaires de caribous vs indicateur neige (épaisseur cumulée & type de grain) pour tout l'hiver pour un seuil de  $300 \text{ kg/m}^3$ . Les cercles vides représentent les années pour lesquelles aucune couche à aucun moment n'a atteint le seuil de densité.**



**Figure 18 : Maxima de l'indicateur de comptes insulaires de caribous par intervalles de l'indicateur neige (épaisseur cumulée & type de grain) pour tout l'hiver pour un seuil de 300 kg/m<sup>3</sup>.**

On observe donc toujours une tendance négative, dans le sens qu'une valeur de plus en plus élevée de caractérisation de la neige est associée à une valeur de plus en plus faible de présence de caribous. Ici toutefois, en comparaison avec ce qui a été présenté par rapport à la Figure 3 de l'article, la relation suggérée graphiquement est différente dans le sens que la valeur de l'indicateur du couvert nival associée à des comptes de caribous quasi-nuls (aux environs de 10 000) est approximativement égale au maximum de l'indicateur du couvert nival lui-même (valeur de 11 337 à la Figure 17). Rappelons toutefois qu'il s'agit d'une étude préliminaire, le type de grain étant en cours d'étude au GRIMP. Le fondement de la relation observée reste donc toujours à être confirmé.

### *Autres avenues d'analyse*

D'autres avenues d'analyse ont aussi été explorées afin de dégager le meilleur lien possible entre les paramètres de caractérisation du couvert nival et les comptes de caribous de Peary. D'abord, comme mentionné dans l'article à sa section 3.3.2, l'hypothèse reliée au deuxième objectif a été testée en analysant une année supplémentaire d'impact, se basant sur l'idée qu'un hiver sévère peut induire des taux de fertilisation bas pour l'automne le suivant, menant donc à des comptes de faons bas deux étés après cet hiver sévère. Nous nous sommes donc retrouvés dans ce cas avec un hiver allant du 1<sup>er</sup> juillet de l'année  $a-2$  jusqu'au 30 juin de l'année  $a-1$ . Cette analyse s'est révélée

infructueuse, donnant une relation moins concluante, confirmant donc l'hypothèse du délai d'impact d'un an.

Une évaluation séparée par île a aussi été menée, pour les îles présentant un minimum d'années d'analyse (nombre d'années fixé à sept), c'est-à-dire les îles Banks, Victoria et Bathurst. C'est pour les îles Banks et Victoria que la relation la plus forte a été observée. Par ailleurs, une étude de variation entre les comptes de caribous disponibles pour des années successives a été menée, pour l'unique secteur pour lequel les données de caribous le permettaient, c'est-à-dire l'île Bathurst ; cette étude s'est avérée infructueuse.

L'analyse du paramètre d'épaisseur cumulée a aussi été menée modifiant la période d'intérêt à l'intérieur de l'année. Une étude par périodes critiques (présentées à la section 1.1) ainsi que par mois d'intérêt a été menée, sans toutefois faire ressortir une période de l'année pour laquelle le caribou de Peary soit plus sensible aux conditions nivales que pour une autre.

Finalement, on retrouve à l'Annexe 6 les premiers pas vers l'inclusion des données *North American Regional Reanalysis* (NARR) à l'analyse, qui semble à priori mener vers une relation encore plus forte entre les comptes de caribous et l'épaisseur cumulée.

### ***Sortie à Cambridge Bay***

Comme mentionné à la section 3.3.1 de l'article, une sortie terrain a été effectuée à Cambridge Bay à l'hiver 2015 ; plus précisément, elle a eu lieu du 9 au 15 avril 2015. Cette sortie a donc été ciblée sur la validation des paramètres d'intérêt identifiés. Les mesures ont été prises en se déplaçant à motoneige à l'aide de la méthode de transects linéaires, par des relevés de type *snowpit*. Les mesures recueillies lors de cette exploration du territoire ont donc servi à effectuer une évaluation de premier ordre des simulations SNOWPACK obtenues à partir des données MRCC.

### ***Conclusion partielle***

De façon générale, l'épaisseur cumulée de neige avec une densité supérieure à  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a un effet sur les comptes de caribous de Peary. Rappelons qu'il y a toutefois de nombreux autres facteurs qui agissent sur ces comptes, tel que mentionné à la section 1.1, comme la disponibilité de nourriture, la disposition dans le temps des glaces de mer et la prédation par les loups.

### 4.3.3. Spatialisation des paramètres d'intérêt (3<sup>ème</sup> objectif)

Pour avoir une caractérisation du couvert nival à l'échelle de l'AAC selon les paramètres d'intérêt identifiés à l'objectif 2, un prototype de spatialisation a tout d'abord été élaboré (Annexe 3). Ensuite, afin d'automatiser cette spatialisation et gagner beaucoup de temps, nous avons développé un logiciel stable sous Matlab, dont la structure globale du codage et des opérations semi-automatiques a été décrite à la section 4.3 de l'article. On trouve à la Figure 13 un organigramme situant le lecteur quant à cette structure. Nous avons en fait utilisé la méthodologie de création de profils de neige identifiée au premier objectif spécifique, en la bonifiant au niveau des fichiers de configuration (\*.ini) et de couches (\*.sno) pour avoir une caractérisation du couvert nival le plus près de la réalité. Le résultat logiciel est présentement utilisé au sein du GRIMP.

La description de chacune des cinq étapes de spatialisation (numérotées plus bas) passe à travers les étapes manuelles Matlab / SIG impliquées ainsi que les bases de données pré-crées en jeu. Mentionnons par ailleurs qu'une librairie contenant une trentaine de fonctions temporelles a été utilisée. Pour obtenir un résultat matriciel pour toute la zone d'étude pour une année (étapes 2 à 5), environ 75 minutes de traitement sont nécessaires sur un ordinateur de base.

Tout d'abord, on retrouve à la Figure 19 un exemple de paramétrisation initiale sous Matlab pour la spatialisation, qui est en fait une partie du codage de la fonction principale de spatialisation, *Spatialization.m*. Ici les années d'intérêt vont de 1986 à 1991 en excluant 1987 (sous *years\_interest*) et le seuil de densité est fixé à 300 kg/m<sup>3</sup> (sous *density\_threshold*).

```

1  function Spatialization
2  -   clear;
3
4  -   years_interest=[1986,1988:1991];
5  -   pixels_interest='G:\Projet_Caribou\Zone_Etude\CRCM_Pixels_Prj_Sel_CamBay';
6  -   CRCM_data='G:\Projet_Caribou\Donnees\CRCM\Run_aev\LesDonnees';
7  -   snow_profiles='C:\Output\Runs';
8  -   output_shapefiles='C:\Output\OutputSHP';
9  -   density_threshold=300;
10 -   pro_file_min_kbytes=2000;
11 -   pause_time=0.5;

```

Figure 19 : Exemple de paramétrisation initiale sous Matlab pour la spatialisation.

Une fois les paramètres initiaux fixés, l'utilisateur lance *Spatialization.m*, pour retrouver l'écran d'accueil présenté à la Figure 20.

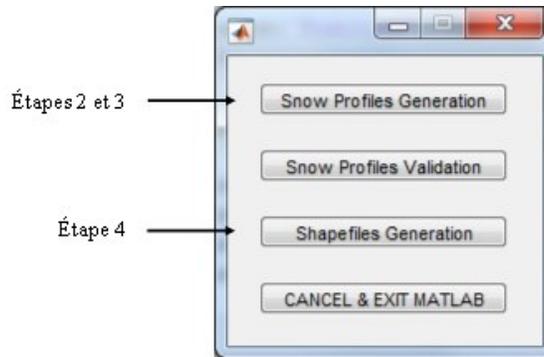
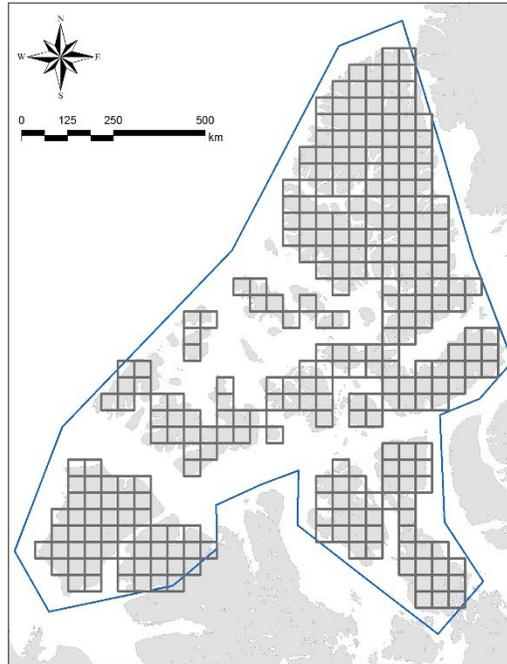


Figure 20 : Écran d'accueil au lancement d'une spatialisation, et étapes impliquées.

### 1) Création de la base de données des pixels MRCC (étape faite une seule fois, préalablement au lancement de *Spatialization.m*)

Suite à la lecture des données MRCC (de format netCDF), un premier filtre sur la latitude et sur la longitude est appliqué afin d'éliminer grossièrement les pixels non désirés : de 69°N à 84°N et de 128°O à 56°O. Ensuite, les pixels retenus sont inscrits dans un fichier ponctuel *shapefile*, aussi par codage Matlab. Puis, deux filtres supplémentaires sont appliqués : un masque sur la zone d'étude (le pixel doit être à l'intérieur) ainsi qu'un masque sur les océans. Le masque sur les océans est appliqué pour éliminer les pixels se situant dans l'océan, à tout au plus 40%, comme mentionné dans l'article. Enfin, pour les pixels filtrés, des polygones sont créés de façon semi-automatique dans ArcGIS. On se retrouve donc avec deux bases de données : une ponctuelle et une polygonale. La base de données principale ponctuelle est ensuite bonifiée de l'information sur les fuseaux horaires.

Il est à noter que la projection du MRCC a été conservée. Il s'agit d'une variante de la projection polaire stéréographique. On retrouve à la Figure 21 un aperçu visuel des polygones générés ; chaque polygone correspond à un élément de la base de données ponctuelle des pixels MRCC (aperçu illustré à la Figure 26).



**Figure 21 : Polygones associés à la base de données des pixels MRCC (zone d'étude en bleu).**

À noter que la création de ces bases de données se fait une seule fois, ce préalablement au lancement d'une spatialisation. On les sauvegardera et, par la suite, on partira de la base de données ponctuelle pour les étapes suivantes (étapes 2 à 5), étapes qui seront appliquées à chaque requête de rendu matriciel de l'utilisateur.

## **2) Création des fichiers intrants à SNOWPACK**

À cette étape, l'utilisateur doit tout d'abord sélectionner manuellement les pixels d'intérêt, à partir des bases de données générées à l'étape 1. Cela peut se faire aisément avec ArcGIS ou un autre logiciel SIG. Ensuite, la fonction de génération des profils de neige décrite à l'étape 3 appelle chacune des trois fonctions servant à créer, dans l'ordre, les fichiers de configuration \*.ini, les fichiers de couches \*.sno et les fichiers météo \*.smet.

Le codage permettant de générer des fichiers météo compatibles avec SNOWPACK (fichiers \*.smet) a été divisé en plusieurs fonctions distinctes, de manière à en alléger la lecture ainsi qu'en vue de modifications futures. On a en effet 12 fonctions seulement pour cette étape. On retrouve entre autres une fonction permettant la conversion de l'humidité spécifique en humidité relative. Par ailleurs, la génération des fichiers météo (\*.smet) fait appel à une base de données de latitudes et de longitudes ainsi qu'à une base de données temporelles, créées préalablement par un membre-

collaborateur du GRIMP. Ici, les fuseaux horaires inclus à la base de données des pixels MRCC (étape 1) sont récupérés pour inscription aux fichiers météorologiques (\*.smet), aux fichiers de configuration (\*.ini) et aux fichiers de couches (\*.sno).

### 3) Génération des profils de neige

Lorsque l'utilisateur clique sur *Snow Profiles Generation* (Figure 20), la génération des profils de neige est lancée. Pour ce faire, le codage inclut une boucle sur deux éléments : les pixels ainsi que les années. À chaque itération de chacune des boucles, un nouveau dossier est créé, dossier dans lequel sont enregistrés les différents fichiers en entrée de SNOWPACK (les fichiers \*.ini, \*.sno, \*.smet). SNOWPACK est appelé dans le code Matlab selon les variables courantes de pixel et d'année. Lorsque des fichiers \*.pro et \*.met sont obtenus, ils sont enregistrés dans le répertoire là où la boucle de codage est rendue, donc selon le pixel et l'année, avec les fichiers \*.ini, \*.sno et \*.smet associés. Le nom des fichiers \*.pro et \*.met prennent la forme suivante :

*TypeDonneesMeteo\_Colonne\_Rangee\_Année*

On peut voir à la Figure 25 la structure des répertoires des fichiers de profils de neige (\*.pro) – et autres fichiers connexes – au terme de sa création.

À noter que, à ce stade-ci du processus de codage de l'outil de spatialisation ici présenté, un message d'erreur récurrent de SNOWPACK bloquant la création de profils de neige sur une problématique de convergence de température a forcé l'ajout d'une couche de sol au fichier de couches (\*.sno), couche appliquée uniformément, indépendamment du pixel ou de l'année.

### 4) Génération des fichiers *shapefile*

Une fois les profils de neige créés, une fonction distincte pour la création de fichiers *shapefile* est appelée lorsque l'utilisateur clique sur *Shapefiles Generation* (Figure 20). Tout d'abord, une extraction du paramètre de caractérisation du couvert nival retenu (en l'occurrence l'épaisseur cumulée) est exécutée par Matlab à partir des profils de neige, ce pour chacun des mois de l'hiver (d'octobre à mai). Ensuite, Matlab ira dupliquer le fichier *shapefile* contenant les pixels d'intérêt sélectionnés par l'utilisateur (début de l'étape 2), ce pour un nombre de fois égal au nombre d'années d'intérêt, pour enfin ajouter à la / aux copie(s) l'information extraite des profils de neige. On peut voir à la Figure 27 un exemple de fichier *shapefile* ainsi généré.

### 5) Création des rendus matriciels

À partir du résultat *shapefile*, l'utilisateur peut facilement générer des rendus matriciels, pour un mois en particulier ou pour tout l'hiver, au choix. Un exemple de rendu matriciel pour l'année 2011 est présenté à la Figure 4 de l'article.

### 5. Conclusion globale du mémoire

Les trois objectifs spécifiques du projet de recherche ont été atteints. Tout d'abord, une procédure de pilotage du modèle de neige SNOWPACK à partir des données climatiques issues du modèle MRCC a été établie. Ensuite, nous avons identifié une relation entre la densité de la neige et l'accès à la nourriture du caribou de Peary, ce pour les mois allant d'octobre à mai. À cette étape, le paramètre d'épaisseur cumulée des couches atteignant un seuil de densité a été lié avec les comptes de caribous, puis la densité et l'épaisseur totale de neige ont été grossièrement validées à l'aide de mesures terrain. Finalement, le paramètre retenu d'épaisseur cumulée a été spatialisé à l'échelle de l'archipel arctique canadien à l'aide de codage Matlab menant à la production de fichiers vectoriels *shapefile* et des projections futures ont été générées.

L'article scientifique présenté a situé le projet de recherche par rapport aux autres études dans le domaine, notamment celle de Vikhamar-Schuler et al. (2013). Il a aussi mis en avant-plan les nouvelles possibilités qu'offre le produit de spatialisation créé en présentant des exemples de son utilisation, en plus d'établir les bases de la direction à suivre quant à l'*upscaling* de ce produit. Ce qui ressort principalement de l'article est que le produit de spatialisation permet de dégager des tendances quantifiables sur ce qui s'est passé et sur ce qui risque de se passer dans le futur par rapport au couvert nival, plus particulièrement au niveau de l'épaisseur cumulée au-delà du seuil de densité.

Le principal élément restant à investiguer par rapport à ce projet de recherche est certainement l'*upscaling*, introduit dans l'article. En fait, un projet en cours au GRIMP se penche actuellement sur cet aspect. La question alors à se poser : « Quelle est la taille idéale de pixel pour l'analyse des données caribou ? ». Une résolution spatiale très fine, de l'ordre de quelques dizaines de mètres, pourrait uniquement aider en ce sens ; par exemple celle de l'imagerie Landsat (30 m), imagerie utilisée comme variable prédictive de l'habitat du caribou de Peary. Mais encore faut-il pouvoir traiter l'information dans des délais convenables et connaître la sensibilité des sorties de

SNOWPACK (i.e. l'épaisseur cumulée de la neige dense) à la topographie et à l'occupation du sol à une telle échelle. Pour cet *upscaling*, mis à part ce qui a été mentionné dans l'article, une piste intéressante est certainement celle de la division des pixels en neuf sous-pixels au niveau du fichier de couches (\*.sno), qui permettrait d'économiser du temps de traitement par rapport à un *upscaling* appliqué sur l'ensemble des fichiers intrants à SNOWPACK. Aussi, l'utilisation de données météorologiques de résolution spatiale plus fine, par exemple celles du modèle MCanCR4 (données présentées à l'Annexe 5), est envisagée.

Avec une taille de pixel plus fine en place, on pourrait s'intéresser à la prise en considération de liens entre les pixels adjacents, au niveau notamment de l'inclusion à la physique de SNOWPACK du phénomène de transport de la neige par le vent. Éventuellement, *upscaling* ou pas, il serait très utile de considérer l'option d'utiliser un superordinateur, par exemple l'ordinateur *Mammoth* de l'Université de Sherbrooke, pour une exécution plus rapide du codage de spatialisation.

La précision du forçage météorologique (en l'occurrence le MRCC) pourra aussi être améliorée. En effet, l'évaluation présentée à la section 4.3.1 ne conclut pas à une robustesse à toute épreuve du modèle. Il y a certes beaucoup à faire en termes de validations du modèle MRCC, mais aussi ces données pourraient être remplacées par d'autres données météorologiques et la méthodologie / le codage de spatialisation développés resteraient sensiblement les mêmes. On peut d'ailleurs constater à l'Annexe 5 (données MCanCR4) et à l'Annexe 6 (données NARR) le travail déjà entamé en ce sens.

Au niveau de l'analyse des comptes de caribous avec les paramètres de caractérisation du couvert nival, plusieurs avenues pourront renforcer les liens quantitatifs observés. La piste des indicateurs du couvert nival par combinaison de paramètres, jusqu'à maintenant à peine effleurée, permettra sans aucun doute de dégager des liens plus forts à cet égard. Par rapport aux comptes de caribous eux-mêmes, on pourra récupérer beaucoup de comptes inutilisés en incluant les données MCanCR4 et NARR, compte tenu de leur résolution spatiale plus fine par rapport au MRCC et d'une couverture temporelle plus grande pour le passé. De plus, la standardisation des comptes de caribous présentée à la section 4.3.2 pourra être orientée sur les populations plutôt que sur les îles, pour mieux respecter les dynamiques de mouvement de l'animal. Par ailleurs, une piste d'analyse intéressante au niveau des comptes de caribous est celle des comptes séparés de faons, qui pourront

être pris en compte dans les graphiques et calculs. Enfin, il y a place à une étude plus poussée par périodes critiques pour le caribou de Peary à l'intérieur de l'année.

Par rapport au résultat logiciel de spatialisation, plusieurs bonifications sont en cours au GRIMP en collaboration avec Environnement et Changement climatique Canada. Entre autres, la traduction du codage Matlab a été faite vers le langage Python sous la forme d'une « boîte à outils » (*Toolbox*) sous ArcGIS. Aussi, les efforts ont été dirigés vers l'automatisation de la création de la base de données des pixels MRCC (étape 1 du résultat de spatialisation décrit à la section 4.3.3), l'automatisation de la génération des sorties matricielles par périodes critiques de l'année (étape 5 à la section 4.3.3) et l'intégration de paramètres de caractérisation du couvert nival supplémentaires (illustrée à la Figure 29 de l'Annexe 6). Par ailleurs, la caractérisation spatiale de la neige sous format *shapefile* pourra compléter d'autres outils pour des analyses spatio-temporelles sur l'évolution future des populations du caribou de Peary, ou même servir d'entrée à des programmes comme Maxent qui analyse l'effet des conditions changeantes de la neige sur la distribution d'espèces et la sélection d'habitat.

De façon plus générale, le projet de recherche présenté dans ce mémoire a des implications touchant aux communautés autochtones habitant dans l'archipel arctique canadien, notamment par rapport à la chasse de l'animal. Aussi, la survie du caribou de Peary rejoint des aspects de biodiversité, notamment par rapport à ses adaptations génétiques. Enfin, le projet est un élément de plus dans la conscientisation de la communauté scientifique, et éventuellement du public, dans la lutte aux changements climatiques. Les questions alors à se poser sont : « Concrètement, comment peut-on lutter contre la menace d'extinction du caribou de Peary ? Quelles sont les actions de rétablissement à poser ? ».

## 6. Bibliographie complémentaire à l'article

Ici donc seulement les ouvrages non inclus aux références de l'article sont listés.

Anderson, E.A. (1976) A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover. National Weather Service, NOAA, USA, 150 p.

Audet, R. (1995) L'impact du couvert neigeux sur l'habitat hivernal du caribou; une évaluation de l'imagerie radar ERS-1, Schefferville (Québec). Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 93 p.

Bellaire, S. and Jamieson, B. (2013) Forecasting the Formation of Critical Snow Layers Using a Coupled Snow Cover and Weather Model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 94, p. 37–44.

Bilodeau, F., Gauthier, G., and Berteaux, D. (2013) The Effect of Snow Cover on Lemming Population Cycles in the Canadian High Arctic. *Oecologia*, vol. 172, p. 1007–1016.

Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brugnot, G. (1992) A numerical model to simulate snowcover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 38, p.13–22.

Brun, B. E., Martin, E., Simon, V., and Gendre, C. (1989) An energy and mass model of snow cover sidtable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 35, n° 12, p.333–342.

Collins, W. and Smith, T. (1991) Effects of Wind-Hardened Snow on Foraging by Reindeer (*Rangifer tarandus*). *Arctic*, vol. 4, n° 3, p. 217–222.

Dolant, C., Langlois, A., Montpetit, B., Brucker, L., Roy, A., and Royer, A. (2015) Empirical development of a rain-on-snow detection algorithm using passive microwave radiometry, *Hydrological Processes*. Soumis.

Environnement et Changement climatique Canada (2016) Changements Climatiques - Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique. *in* Environnement et Changement climatique Canada, Gouvernement du Canada, Canada, <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma>.

Environnement et Changement climatique Canada (2016) Changements climatiques – Résumé de l'année 2014. *in* Environnement et Changement climatique Canada, <https://www.ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=188031DB-1>

Environment Canada (2012) Recovery Strategy for Woodland Caribou (*Rangifer tarandus caribou*), Boreal Population, in Canada. Species at Risk Act Recovery Strategy Series, Environment Canada, Ottawa, 138 p.

Fierz, C. et al. (2013) SNOWPACK: where do we stand today? International Snow Science Workshop Grenoble, Chamonix Mont-Blanc, France, p. 166–169.

Fierz, C. et al. (2009). The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology n° 83, IACS Contribution n° 1, UNESCO-IHP, Paris, 80 p.

Greasby, T.A. and Sain, S.R. (2011) Multivariate Spatial Analysis of Climate Change Projections. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, vol. 16, n° 4, p. 571–585.

Hansen, B.B. et al. (2013) Climate Events Synchronize the Dynamics of a Resident Vertebrate Community in the High Arctic. *Science*, vol. 339, n° 6117, p. 313–315.

- Hansen, B.B. et al. (2011) Climate, Icing, and Wild Arctic Reindeer: Past Relationships and Future Prospects. *Ecology*, vol. 92, n° 10, p. 1917–1923.
- Harirforoush, H. (2012) Cartography of snowcover properties from topographical, vegetation and meteorological data. *Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke*, 88 p.
- Jordan, R. (1991) A one-dimensional temperature model for a snowcover: Technical documentation for SNTherm.89. U.S. Army Corps of Engineers Special Report 91-16, 61 p.
- Langlois, A. et al. (2014) Evaluation of CLASS 2.7 and 3.5 simulations of snow properties from the Canadian Regional Climate Model (CRCM4) over Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 15, p. 1325–1343
- Langlois, A. et al. (2009) Simulation of Snow Water Equivalent (SWE) Using Thermodynamic Snow Models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, n° 6, p. 1447–1463.
- Larter, N.C. and Nagy, J.A. (2001) Variation between Snow at Peary Conditions Caribou and Muskox Feeding in Foraging Sites and Elsewhere Habitats on Banks in the Canadian Island Arctic High. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 33, n° 2, p. 123–130.
- Larter, N.C. and Nagy, J.A. (2000) Annual and Seasonal Differences in Snow Depth, Density, and Resistance in Four Habitats on Southern Banks Island, 1993–1998. Department of Resources, Wildlife & Economic Development, Government of the Northwest Territories, Inuvik, NWT, 23 p.
- Larter, N.C. and Nagy, J.A. (2000) Calf Production and Overwinter Survival Estimates for Peary Caribou. *The Canadian Field-Naturalist*, vol. 114, p. 661–670.
- Miller, F.L. and Barry, S. (2009) Long-Term Control of Peary Caribou Numbers by Unpredictable, Exceptionally Severe Snow or Ice Conditions in a Non-equilibrium Grazing System. *Arctic*, vol. 62, n° 2, p. 175–189.
- Miller, F.L. and Gunn, A. (2003) Catastrophic Die-Off of Peary Caribou on the Western Queen Elizabeth Islands, Canadian High Arctic. *Arctic*, vol. 56, n° 4, p. 381–390.
- Montpetit, B. et al (2013) Snow Microwave Emission Modeling of Ice Lenses Within a Snowpack Using the Microwave Emission Model for Layered Snowpacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, n° 9, p. 4705–4717.
- Nievinski, F.G. (2009) Ray-tracing Options to Mitigate the Neutral Atmosphere Delay in GPS. *Mémoire de maîtrise, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada*, 232 p.
- Ouellet, F., Langlois, A., Johnson, C. A. and Richards, A. (2015) Spatialization of the SNOWPACK Snow Model in the Canadian Arctic for Peary Caribou Winter Grazing conditions Assessment. *Proceedings of the 72nd Eastern Snow Conference, Sherbrooke, Québec, Canada, 9-11 juin 2015*, p. 34–38.
- Rasmus, S, Kumpula, J. and Siitari, J. (2014) Can a Snow Structure Model Estimate Snow Characteristics Relevant to Reindeer Husbandry? *Rangifer*, vol. 34, p. 37–56.
- Rasmus, S., Grönholm, T. and Lehning, M. (2007) Validation of the SNOWPACK model in five different snow zones in Finland. *Boreal Environment Research*, vol. 12, p. 467–488.
- Rasmus, S. (2005) Snow pack structure characteristics in Finland – measurements and modelling. *Dissertation académique, University of Helsinki, Helsinki*, 238 p.

Savary, S. (2002) Modélisation et suivi complet du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande, à l'aide du modèle français CROCUS. Mémoire, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, 236 p.

SLF (2016) Welcome to the WSL/SLF snow cover models! Suisse, <https://models.slf.ch>.

Stien, A., Ims, R.A. and Albon, S.D. (2012) Congruent responses to weather variability in high arctic herbivores. *Biology Letters*, p. 1002–1005.

Tews, J., Ferguson, M.A.D. and Fahrig, L. (2007) Potential Net Effects of Climate Change on High Arctic Peary Caribou: Lessons from a Spatially Explicit Simulation Model. *Ecological Modelling*, vol. 207, p. 85–98.

Vincent, L.A. and Mekis, É. (2006) Changes in Daily and Extreme Temperature and Precipitation Indices for Canada over the Twentieth Century. *Atmosphere-Ocean*, vol. 44, n° 2, p. 177–193.

Wang, L., MacKay, M. and Brown, R. (2014) Application of Satellite Data for Evaluating the Cold Climate Performance of the Canadian Regional Climate Model over Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 15, n° 2, p. 614–630.

Yao, H. and McConnell, C. (2012) Comparing and Modifying Eight Empirical Models of Snowmelt Using Data from Harp Experimental Station in Central Ontario. *British Journal of Environment & Climate Change*, vol. 2, n° 3, p. 259–277.

## Annexe 1 – Le caribou au Canada

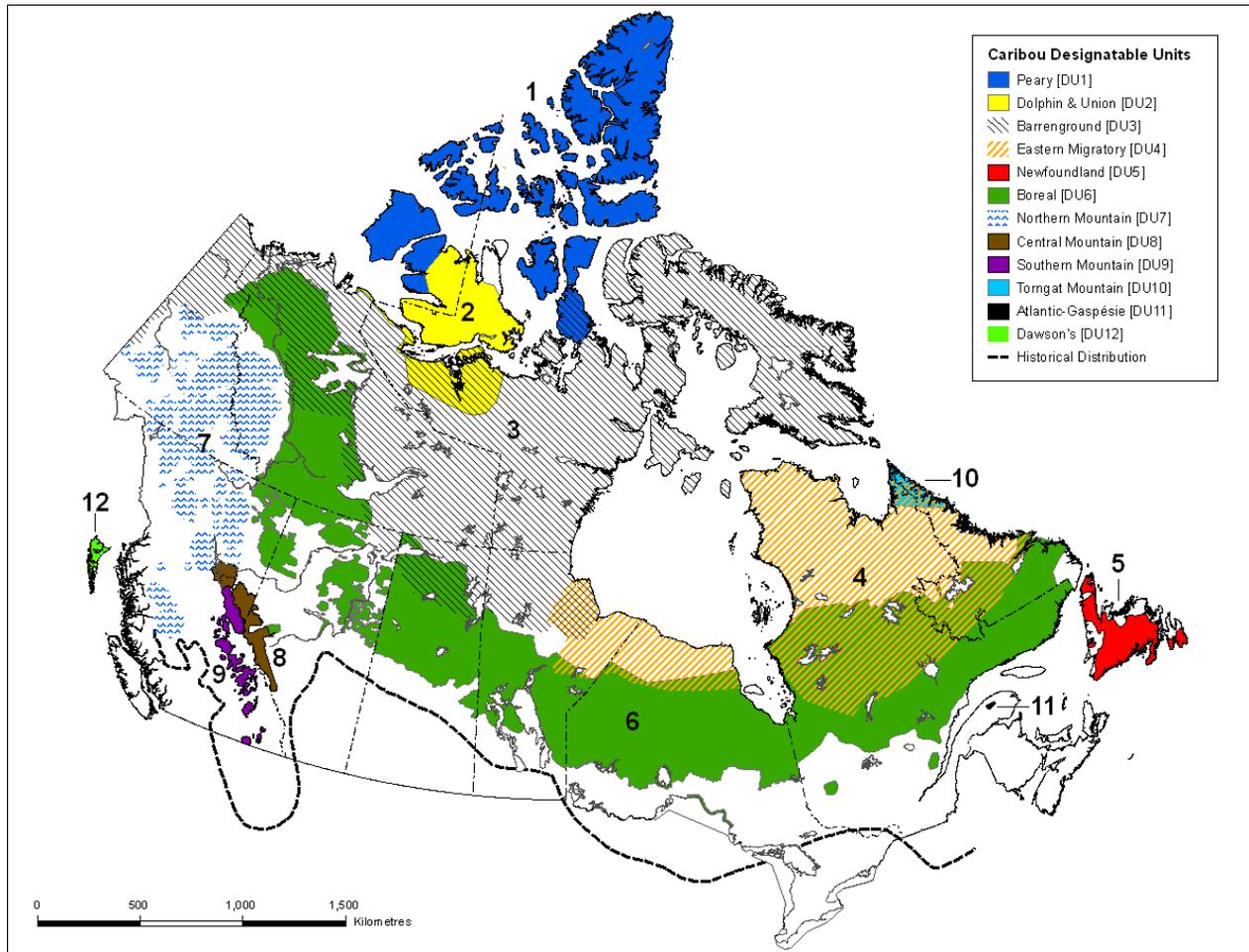


Figure 22 : Unités désignables pour le caribou (*Rangifer tarandus*) au Canada (source : COSEPAC, 2011).



Figure 23 : Caribou de Peary (source : Environnement et Changement climatique Canada, 2014).

## **Annexe 2 – Choix du modèle de simulation du couvert nival**

Pour caractériser le couvert nival, il existe une panoplie de modèles. Mis à part SNOWPACK, les plus notables sont CROCUS (Brun et al., 1989, 1992) et SNTHERM (Jordan, 1991), de par leur niveau de détail et leur résolution verticale dans le manteau neigeux et par les processus thermodynamiques traités. CROCUS a été développé par le Centre d'Études de la Neige de Météo-France pour simuler la neige saisonnière en altitude et pour aider à l'étude des risques d'avalanches. SNTHERM est un modèle qui se concentre sur la prédiction de profils de température à travers la neige et le sol gelé ; il est donc moins intéressant que CROCUS ou SNOWPACK, compte tenu du fait que, pour le présent projet, nous avons besoin de plusieurs paramètres (propriétés géophysiques) en sortie.

Pour le présent projet de recherche, SNOWPACK a donc été retenu. Il présente l'avantage d'être utilisé depuis plusieurs années au Département de géomatique appliquée à l'Université de Sherbrooke. Les membres de l'équipe ont donc publié de nombreux articles scientifiques sur son utilisation, de sorte que les problèmes et configurations sont bien connus.

### Annexe 3 – Prototype de spatialisation

Avant d'élaborer le codage pour la spatialisation décrit à la section 4.3.3, un prototype de spatialisation a d'abord manuellement été élaboré à partir des données NARR (données décrites à l'Annexe 6) pour l'île Banks, pour des fins de facilitation de la communication du format du livrable avec Environnement et Changement climatique Canada. À la Figure 24 on peut voir une représentation des points du *shapefile* créé, la visualisation étant ramenée dans la projection cartographique des données NARR. Sur la même figure est représenté un rendu visuel matriciel de ce *shapefile*, avec la densité comme paramètre d'intérêt, pour une date précise, en l'occurrence le 16 mars 2010 à 06h00 ; l'échelle de couleurs va d'une densité de 135 kg/m<sup>3</sup> (en blanc) à 180 kg/m<sup>3</sup> (en bleu foncé).

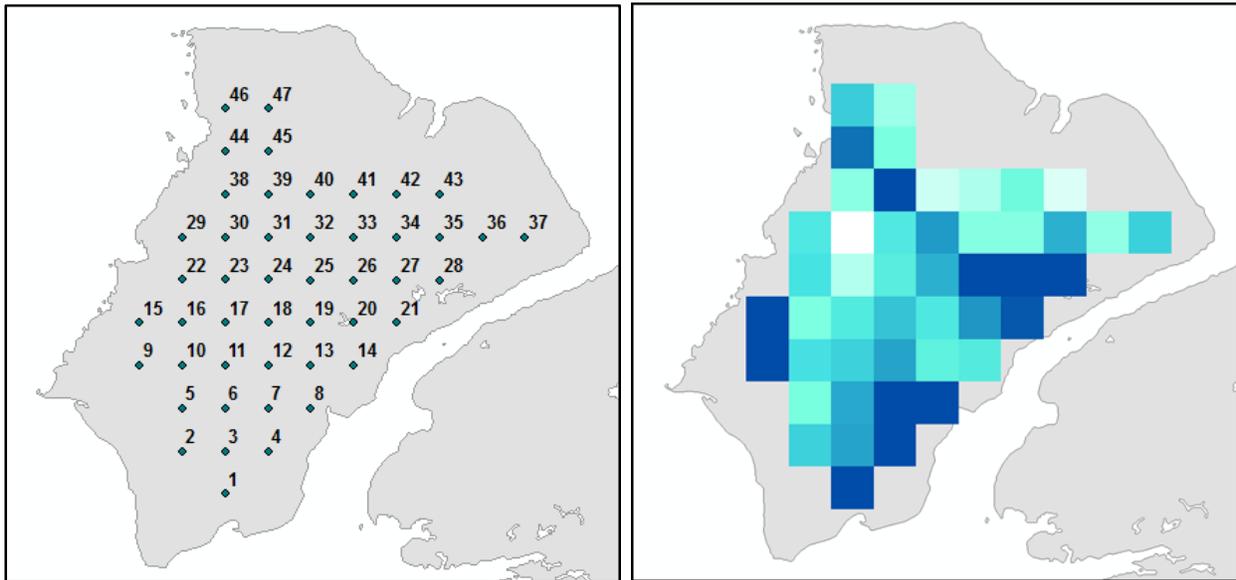


Figure 24 : Prototype de spatialisation (à gauche, rendu du *shapefile* ; à droite, rendu matriciel associé pour la densité en date du 16 mars 2010 à 06h00).

Annexe 4 – Aperçu des bases de données impliquées

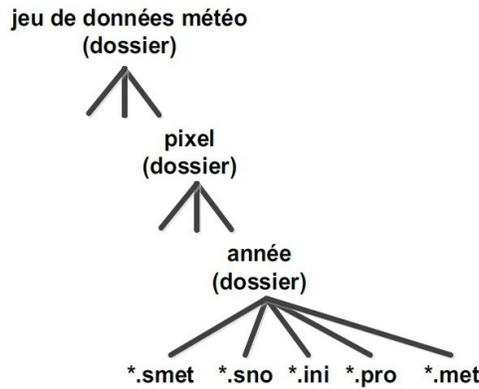


Figure 25 : Structure des fichiers de profils de neige.

FID	Shape *	xc	yc	lat	lon	xcID	ycID	TimeZone	IDPixel
0	Point	279000	661500	72,152199	234,58397	18	13	-7	18_13
1	Point	283500	657000	71,805771	236,16116	19	12	-7	19_12
2	Point	283500	661500	72,223778	235,94806	19	13	-7	19_13
3	Point	283500	666000	72,642014	235,72453	19	14	-7	19_14
4	Point	283500	670500	73,060432	235,48979	19	15	-7	19_15
5	Point	288000	652500	71,446663	237,67735	20	11	-7	20_11
6	Point	288000	657000	71,865868	237,50414	20	12	-7	20_12
7	Point	288000	661500	72,285385	237,32259	20	13	-7	20_13
8	Point	288000	666000	72,7052	237,13208	20	14	-7	20_14
9	Point	288000	670500	73,125282	236,93193	20	15	-7	20_15
10	Point	288000	675000	73,545609	236,72141	20	16	-7	20_16
11	Point	288000	679500	73,966156	236,49969	20	17	-7	20_17
12	Point	288000	684000	74,386887	236,26587	20	18	-7	20_18
13	Point	292500	652500	71,495682	238,99796	21	11	-7	21_11
14	Point	292500	657000	71,9161	238,85545	21	12	-7	21_12
15	Point	292500	661500	72,336891	238,70605	21	13	-7	21_13

Figure 26 : Aperçu de la structure de la base de données ponctuelle *shapefile* des pixels MRCC.

FID	Shape	xc	yc	lat	lon	xcID	ycID	TimeZone	IDPixel	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	TotalYr
90	Point	342000	702000	75,99	256,55	32	22	-7	32_22	0	0	0	0	0	19,61	62,48	64,25	146,34
91	Point	342000	706500	76,41	256,91	32	23	-7	32_23	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0,2
92	Point	342000	724500	78,08	258,63	32	27	-6	32_27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	Point	342000	729000	78,49	259,14	32	28	-6	32_28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	Point	346500	702000	75,89	258,27	33	22	-6	33_22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	Point	346500	706500	76,31	258,68	33	23	-6	33_23	0	0	0	0	0	17,65	55,35	56,96	129,96
96	Point	346500	711000	76,73	259,12	33	24	-6	33_24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	Point	346500	724500	77,97	260,63	33	27	-6	33_27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	Point	346500	747000	80,02	263,98	33	32	-6	33_32	1313,24	1276,8	1317,28	1316,88	1189,44	1316,88	1272,12	1314,4	10317,04
99	Point	346500	751500	80,43	264,82	33	33	-6	33_33	1104,75	1066,91	1101,12	1101,12	994,56	1096,9	1063,2	1098,64	8629,2
100	Point	346500	756000	80,83	265,74	33	34	-6	33_34	643,61	612	630,45	629,92	568,66	627,44	607,2	855,12	5174,4
101	Point	346500	760500	81,23	266,74	33	35	-6	33_35	151,28	260,4	553,88	552,75	498,72	551,39	533,2	550,18	3651,8
102	Point	351000	702000	75,79	259,96	34	22	-6	34_22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
103	Point	351000	706500	76,20	260,42	34	23	-6	34_23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104	Point	351000	711000	76,61	260,92	34	24	-6	34_24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	Point	351000	729000	78,25	263,23	34	28	-6	34_28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106	Point	351000	742500	79,47	265,44	34	31	-6	34_31	2587,42	2488,06	2562,4	2634,32	2498,46	2762,81	2669,49	2754,71	20957,67
107	Point	351000	747000	79,87	266,30	34	32	-6	34_32	4543,45	4559,66	4694,17	4682,88	4222,19	4667,36	4508,8	4649,75	36528,26

Figure 27 : Aperçu de la structure de l'extrait principal *shapefile* (exemple pour l'année 2011).

### Annexe 5 – Inclusion des données MCanCR4

Les données du *nouveau modèle canadien du climat régional* MCanCR4 (en anglais CanRCM4) font suite au MRCC. Les données MCanCR4 proposent une résolution spatiale plus fine que le MRCC, et elles couvrent plus d'années dans le passé. Plus précisément, elles sont disponibles de 1950 à 2010, par rapport aux données du MRCC disponibles de 1980 à 2100. Les données MCanCR4 (sous le format netCDF) sont disponibles sur le site web d'Environnement et Changement climatique Canada pour l'Arctique, l'Afrique, l'Europe et l'Amérique du Nord, ce à des résolutions spatiales horizontales de 0.22° (environ 25 km) et 0.44° (environ 50 km). Les données ciblées sont donc celles pour l'Arctique avec la résolution spatiale horizontale la plus fine disponible, soit 0.22°, donc 25 km. On peut voir au Tableau 5 la correspondance entre les paramètres retenus des données MCanCR4 (résolution temporelle de trois heures) et ceux en intrant à SNOWPACK.

**Tableau 5 : Paramètres MCanCR4 vs SNOWPACK.**

SNOWPACK	Néc.	Paramètre MCanCR4	Unités
TA	X	TAS (température de l'air à la surface)	K
RH	X	RHS (humidité relative en surface)	%
VW	X	UAS (vent vers l'est à la surface) <b>et</b> VAS (vent vers le nord à la surface)	m/s m/s
ISWR / OSWR	X	RSDS (rayonn. de courte long. d'onde desc. de surf.)	W/m <sup>2</sup>
ILWR / TSS	X	RLDS (rayonn. de grande long. d'onde desc. de surf.) <b>ou</b> TS (température en surface)	W/m <sup>2</sup> K
PSUM / HS	X	PR (précipitations)	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
TSG	–		
TS1, TS2 ...	–	TSN (température de la neige à la surface)	K

La seule conversion qui sera appliquée est celle de la vitesse du vent, où on combinera les composantes ouest-est et sud-nord. À noter qu'un paramètre d'humidité relative à la surface est disponible pour ce jeu de données.

Pour ce qui est de l'adaptation des données MCanCR4 au codage de spatialisation, environ une semaine de codage supplémentaire est requise. En fait, le codage de génération des fichiers de données météorologiques en intrant à SNOWPACK (\*.smet) est déjà fait.

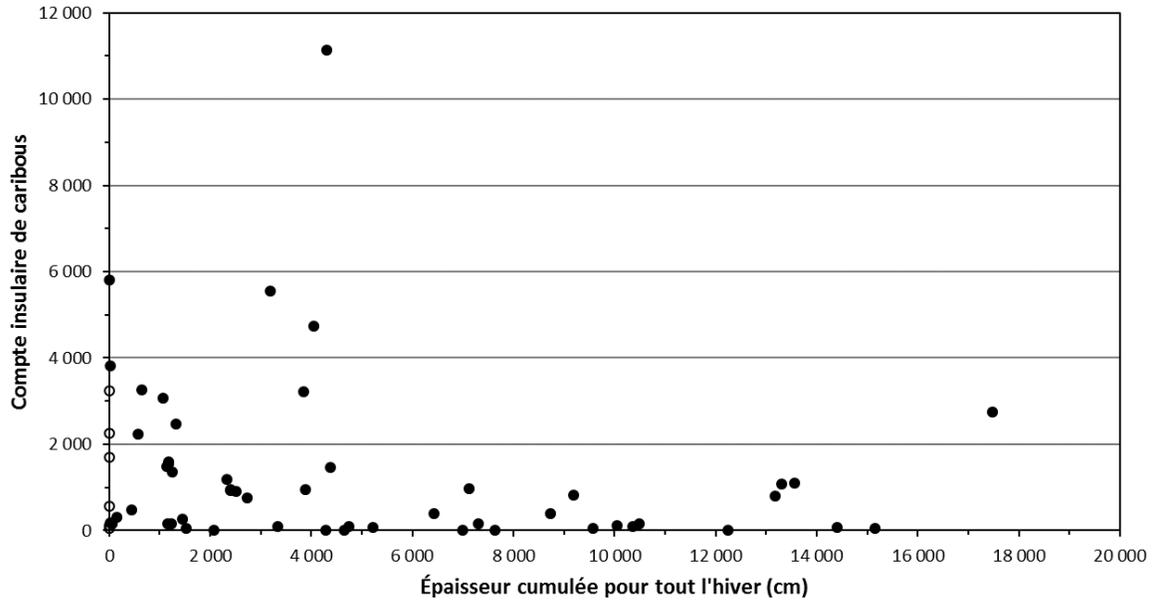
### Annexe 6 – Inclusion des données NARR

Les données *North American Regional Reanalysis* (NARR) des *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) ont aussi été considérées pour le présent projet de recherche. Il s'agit de données de réanalyse, qui s'approchent donc plus de la réalité que les données du modèle MRCC. La résolution temporelle ciblée est celle de trois heures. Ces données sont, à l'instar des données MCanCR4 (Annexe 5), uniquement disponibles pour le passé, plus précisément dans ce cas-ci entre 1979 et 2015. Les données NARR ont une taille de pixel d'environ 32,5 km. Les paramètres météorologiques retenus sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres NARR vs SNOWPACK.

SNOWPACK	Néc.	Paramètre NARR	Unités
TA	X	AIR.2M (température de l'air à 2m du sol)	K
RH	X	RHUM.2M (humidité relative à 2m du sol)	%
VW	X	UWND.10M (vent vers l'est à 10m du sol) <b>et</b> VWND.10M (vent vers le nord à 10m du sol)	m/s m/s
ISWR / OSWR	X	DSWRF (rayonn. de courte long. d'onde desc. de surf.) <b>ou</b> USWRF.SFC (rayonn. de courte long. d'onde mont. de surf.)	W/m <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup>
ILWR / TSS	X	DLWRF (rayonn. de grande long. d'onde desc. de surf.)	W/m <sup>2</sup>
PSUM / HS	X	APCP (précipitations cumulées)	kg/m <sup>2</sup>
TSG	–	–	
TS1, TS2 ...	–	–	

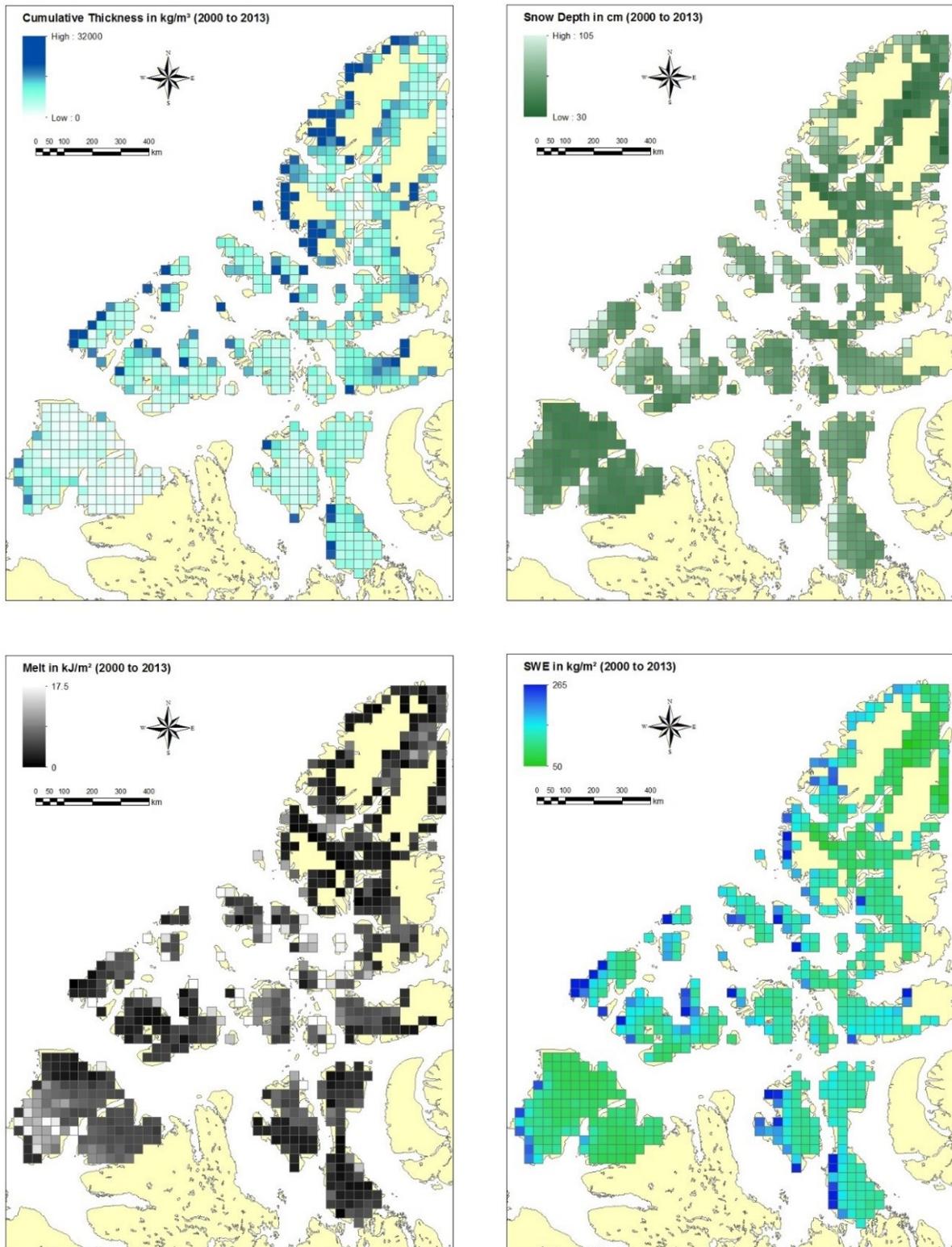
Les données NARR ont d'abord été utilisées pour la création d'un prototype de spatialisation (Annexe 3). Elles ont été ensuite introduites à l'outil de spatialisation pour analyser de nouveau la caractérisation du couvert nival (l'épaisseur cumulée) par rapport aux comptes de caribous, pour en tirer le graphique présenté à la Figure 28 ; à noter qu'ici le seuil de densité a été légèrement augmenté à 325 kg/m<sup>3</sup>, puisque la densité en sortie de SNOWPACK est de façon globale uniformément légèrement plus forte avec les données NARR qu'avec les données du modèle MRCC.



**Figure 28 : Comptes insulaires de caribous vs épaisseur cumulée (cm) pour seuil de 325 kg/m<sup>3</sup>.**

En comparaison avec le graphique généré à partir des données MRCC (Figure 3 de l'article), on a ici beaucoup plus de points avec des fortes valeurs d'épaisseur cumulée. Des résultats préliminaires obtenus au GRIMP semblent en fait démontrer que, à l'intérieur de la zone d'étude, les données NARR se rapprochent significativement plus des données météorologiques mesurées aux stations que les données du MRCC. On observe toutefois la même tendance : plus le paramètre d'épaisseur cumulée est fort, plus les comptes de caribous sont globalement bas.

Finalement, en marge du projet de maîtrise ici présenté, ces données ont servi à générer des rendus matriciels, en bonifiant le produit de spatialisation au niveau des paramètres d'intérêt avec trois paramètres niveaux supplémentaires : la hauteur totale de neige, un paramètre de fonte / gel et l'équivalent en eau de la neige (en anglais *snow water equivalent* ou *SWE*). À la Figure 29 on retrouve, pour chacun des quatre paramètres, le rendu matriciel moyennant l'information entre les années 2000 et 2013. Le même seuil de densité, soit 325 kg/m<sup>3</sup>, a été utilisé ici.



**Figure 29 : Rendu matriciel à partir des données NARR pour l'épaisseur cumulée, la hauteur totale de neige, un paramètre de fonte / gel et pour le SWE, moyennés de 2000 à 2013.**

On peut voir sur ces rendus matriciels que, pour les paramètres d'équivalent en eau de la neige, de hauteur totale de neige et d'épaisseur cumulée, les valeurs sont de façon générale plus élevées à l'ouest des îles. Aussi, de façon générale, on n'observe pas de changements spatiaux brusques dans les valeurs de ces trois paramètres ; on note donc à cet égard une évolution spatiale graduelle.

Pour l'équivalent en eau de la neige, les valeurs les plus basses se retrouvent aux îles Banks, Victoria, Ellesmere et Axel Heiberg, donc au sud-ouest et au nord-est de la zone d'étude. La même tendance est observée pour la hauteur totale de neige. Pour l'épaisseur cumulée, on a des valeurs très basses pour les îles Banks et Victoria. Par rapport au paramètre de fonte / gel, on n'observe pas de tendance claire, mis à part le fait que les très petites îles présentent de manière générale des valeurs élevées.