

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

**Activité pédagogique GAE724 - Essai en géomatique appliquée**

**Amélioration de la résolution spatiale de simulations de neige du modèle SNOWPACK dans  
un contexte de l'accès à la nourriture du caribou de Peary**

**Maxime Beaudoin-Galaise**

**Dans la cadre d'une maîtrise en sciences géographiques  
avec cheminement de type cours en géodéveloppement durable (M.Sc.)**

**Août 2016**

## Sommaire

Le caribou de Peary, désigné en voie de disparition, n'est pas épargné par les changements climatiques. Par le passé, des hivers successifs caractérisés par des conditions météorologiques extrêmes ont entraîné des déclinés importants de population en quelques années, pouvant aller jusqu'à 98 %. L'augmentation des épisodes de redoux hivernaux et de pluies sur neige réduit les conditions d'accès à la nourriture de cette sous-espèce. Ces conditions ont pour conséquence d'augmenter la densité des couches de neige dans le manteau neigeux, ce qui empêche le caribou d'avoir accès au fourrage couvrant le sol en hiver. Dans cet esprit, l'outil de spatialisation de SNOWPACK dans l'Arctique (OSSA) développé dans Ouellet *et al.* (2016) permet la spatialisation des conditions d'accès à la nourriture du caribou de Peary en utilisant le modèle de simulation du couvert nival SNOWPACK. Le paramètre du couvert nival utilisé est l'épaisseur cumulée au-delà d'un seuil fixe de densité durant la saison hivernale (ECD). L'OSSA fournit un résultat d'une résolution spatiale de 32 km puisque les données météorologiques utilisées sont les données de réanalyses du *North American Regional Reanalysis* (NARR) qui possède une résolution de 32 km. Cette résolution grossière ne permet pas de documenter et prédire la migration locale des différentes populations sur les îles de l'archipel arctique canadien. L'objectif principal de ce projet est donc d'évaluer le potentiel d'une approche de raffinement spatial de l'OSSA à une résolution de 1 km. Afin d'affiner la résolution spatiale de la simulation de l'ECD, des données de pente et de l'albédo du sol à une résolution de 1 km ont été utilisées. Avant d'effectuer les simulations à haute résolution, la sensibilité de l'ECD à ces deux paramètres du terrain a été testée. Les simulations préliminaires ont permis de démontrer que plus la pente est élevée, plus l'ECD sera faible. Également, il a été identifié que la pente va affecter l'ECD à partir d'un seuil de 3°. L'albédo du sol a aussi un impact significatif sur l'ECD, mais à un niveau moins important que la pente. Finalement, la comparaison des résultats à faible et haute résolution a pu démontrer que l'approche de raffinement spatial appliquée permet d'obtenir une information plus détaillée des conditions d'accès à la nourriture du caribou de Peary. Les résultats d'ECD obtenus à 1 km de résolution montrent des écarts avec l'ECD à 32 km de résolution pouvant dépasser les 2000 cm. Finalement, cette étude montre l'intérêt d'automatiser cette approche afin de pouvoir spatialiser les conditions d'accès à la nourriture à une résolution de 1 km et de prédire certaines micro-variabilités dans les déplacements futurs des caribous de Peary en fonction des changements climatiques.

## Table des matières

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>V</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexte et problématique.....	1
1.2. Objectifs.....	3
<b>2. CADRE THÉORIQUE.....</b>	<b>4</b>
2.1. Caribou de Peary .....	4
2.1.1. <i>Présentation générale de l'espèce</i> .....	4
2.1.2. <i>Statut de protection</i> .....	7
2.1.3. <i>Causes du déclin</i> .....	8
2.2. Modèle SNOWPACK.....	9
2.3. Caractérisation des conditions d'accès à la nourriture .....	11
<b>3. DONNÉES ET MÉTHODES.....</b>	<b>14</b>
3.1. Zone d'étude .....	14
3.2. Données .....	14
3.2.1. <i>North American Regional Reanalysis (NARR)</i> .....	14
3.2.2. <i>Données numériques d'élévation du Canada</i> .....	15
3.2.3. <i>Données d'occupation de sol</i> .....	16
3.3. Simulations SNOWPACK.....	17
3.3.1. <i>Test de sensibilité de l'ECD à la pente et à la couverture du sol</i> .....	17
3.3.2. <i>Couplage et spatialisation de SNOWPACK</i> .....	19
<b>4. RÉSULTATS.....</b>	<b>26</b>
4.1. Sensibilité du seuil de densité à la topographie .....	26
4.2. Sensibilité du seuil de densité à l'occupation du sol .....	28
4.3. Spatialisation à 32 km.....	30
4.4. Spatialisation à 1 km.....	31
<b>5. DISCUSSION.....</b>	<b>34</b>
5.1. Sensibilité de l'ECD à la pente et l'albédo du sol .....	34
5.2. Potentiel de la méthode de raffinement spatial.....	38
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>41</b>
<b>7. RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>43</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>45</b>

<b>ANNEXE 1 : EXEMPLE D'EN-TÊTE DU FICHIER DE COUCHE DE SNOWPACK (*SNO) .....</b>	<b>50</b>
<b>ANNEXE 2 : EXEMPLE D'EN-TÊTE DU FICHIER MÉTÉOROLOGIQUE DE SNOWPACK (*.SMET) .....</b>	<b>51</b>
<b>ANNEXE 3 : TABLEAU DÉTAILLÉ DES TYPES D'OCCUPATION DU SOL (ADAPTÉ DE RNCAN (2007, P. 2-5)) .....</b>	<b>52</b>

## Liste des figures

Figure 2.1: Caribou de Peary (Musée canadien de la nature (2015)).....	4
Figure 2.2: Aire de répartition du caribou de Peary (Ouellet <i>et al.</i> , 2016).....	5
Figure 2.3: Répartition spatiale des différentes populations du caribou de Peary (COSEPAC, 2004, p. 13).....	6
Figure 2.4: Visualisation de la densité avec l'outil <i>SNGui</i> .....	10
Figure 2.5: Schéma simplifié du calcul de l'ECD (Ouellet <i>et al.</i> , 2016).....	11
Figure 2.6: Corrélation entre l'ECD et les populations de caribous (Ouellet <i>et al.</i> , 2016).....	12
Figure 2.7: Spatialisation des conditions d'accès à la nourriture du Caribou de Peary (Ouellet <i>et al.</i> , 2016).....	13
Figure 3.1: Zone d'étude réduite pour les simulations du couvert nival .....	14
Figure 3.2: Couverture des données circa 2000-vectorielle (RNCAN, 2009, p. 13) .....	16
Figure 3.3: Emplacement des zones NARR choisies pour les simulations préliminaires.....	18
Figure 3.4: Zones choisies pour évaluer le potentiel du raffinement spatial.....	20
Figure 3.5: Organigramme de la création de la couche de pente .....	20
Figure 3.6: Carte de la pente pour la zone d'étude .....	21
Figure 3.7: Organigramme de la création de la couche de l'occupation du sol.....	22
Figure 3.8: Occupation du sol pour la zone de simulation de l'Île Banks .....	23
Figure 3.9: Occupation du sol pour la zone de simulation de l'Île Victoria.....	23
Figure 3.10: Organigramme de l'évaluation du potentiel du raffinement spatial.....	24
Figure 4.1: Classification de la pente à une résolution de 1 km selon un seuil de 3° .....	27
Figure 4.2: Carte de l'ECD à basse résolution spatiale (32 km) pour 2013 .....	31
Figure 4.3: Cartographie de l'ECD simulée à haute résolution pour la zone Banks pour 2013 .....	32
Figure 4.4: Cartographie de l'ECD simulée à haute résolution pour la zone Victoria pour 2013 .....	34
Figure 5.1: Visualisation dans <i>SNGui</i> de la densité : A) Albédo de 0.10; B) Albédo de 0.40 .....	35
Figure 5.2: Visualisation dans <i>SNGui</i> de la température A) Albédo de 0.10; b) Albédo de 0.40 .....	36
Figure 5.3: Visualisation dans <i>SNGui</i> de la distribution de la taille des grains A) Albédo de 0.10; b) Albédo de 0.40 .....	37
Figure 5.4: Visualisation dans <i>SNGui</i> de la densité et de la température du couvert nival pour la deuxième zone de test: A)-B) Albédo de 0.10; C)-D) Albédo de 0.40 .....	38

Figure 5.5: Relation entre les résultats d'ECD et les données de pente et d'albédo du sol pour la zone Banks pour 2013 .....	39
Figure 5.6: Relation entre les résultats d'ECD et les données de pente et d'albédo du sol pour la zone Victoria pour 2013 .....	40

### **Liste des tableaux**

Tableau 3.1: Informations sur les couches de données circa 2000-vectorielle utilisées pour l'essai .....	17
Tableau 4.1: Variation de l'ECD par rapport à la pente pour 2013 .....	26
Tableau 4.2: Statistiques des valeurs de pentes présentes dans les deux zones de simulations à haute résolution .....	27
Tableau 4.3: Variation de l'ECD par rapport à l'albédo du sol pour 2013 .....	28
Tableau 4.4: Valeur d'albédo associée à chaque type d'occupation de sol.....	29
Tableau 4.5: Variation des valeurs d'albédo du sol pour les deux zones de simulations pour 2013 .....	30
Tableau 4.6: Statistiques sur les résultats d'ECD simulées à haute résolution (1 km) pour la zone Banks pour 2013.....	32
Tableau 4.7: Statistiques sur les résultats d'ECD simulées à haute résolution pour la zone Victoria pour 2013.....	33

## **Remerciements**

Je tiens à remercier premièrement mon directeur Alexandre Langlois qui a été d'un grand soutien durant toute la durée de réalisation de l'essai. Il a été d'une grande disponibilité afin de répondre à mes questions et de m'orienter dans mon travail par sa grande expérience. Par ses commentaires et conseils judicieux, j'ai pu constamment améliorer mon travail jusqu'au résultat final.

Je remercie aussi Félix Ouellet, étudiant aux cycles supérieurs du Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP) de l'Université de Sherbrooke, qui a pu partager ses connaissances sur ce sujet et apporter son soutien au cours de l'essai. Je remercie aussi les nombreux étudiants du GRIMP et du département de géomatique appliquée.

Je tiens également à remercier les collaboratrices du service canadien de la faune : Cheryl-Ann Johnson, Erin Neave et Agnes Richards. En espérant que ce travail puisse apporter une contribution à leurs recherches en cours sur le caribou de Peary. De plus, je tiens à souligner et remercier l'aide financière fournie pour ce projet de la part d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Finalement, je tiens à remercier ma conjointe et aussi mon entourage qui ont su être d'un soutien moral et d'une source d'encouragements durant mon essai et mon parcours académique.

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte et problématique

Les changements climatiques sont une préoccupation grandissante pour l'ensemble de la planète puisqu'ils tendent à modifier les différents écosystèmes. Différentes études montrent une tendance au réchauffement global depuis les quatre dernières décennies (Screen et Simmonds, 2010; Comiso et Hall, 2014). Plus particulièrement, l'Arctique est la région où la situation est la plus alarmante en raison d'une amplification de ce réchauffement de 1.5 à 4.5 fois supérieur au réchauffement global selon les modèles climatiques utilisés (Holland et Bitz, 2003; Kaufman *et al.*, 2009; Hay et McCabe, 2010; Serreze et Barry, 2011). Ce réchauffement de la température de l'air apporte des changements pour différentes variables d'état dont la température du sol, l'étendue des glaciers, ainsi que la couverture de glace de mer (Derksen *et al.*, 2012). La couverture de neige est également sensible au réchauffement, soit par une diminution de 2.12 % par décennie du couvert nival printanier (Derksen et Brown, 2012; Comiso et Hall, 2014).

Avec le réchauffement s'accompagne une augmentation de l'occurrence de certains phénomènes météorologiques tels que des vagues de chaleur et des précipitations de pluie sur neige (Liston et Hiemstra, 2011; Dolant *et al.*, 2016). Ces événements de pluie sur neige peuvent avoir des impacts saisonniers importants sur la température du sol et conséquemment, sur la survie à long terme du pergélisol (Romanovsky *et al.*, 2010). De plus, plusieurs études démontrent que les pluies sur neige peuvent avoir des conséquences importantes sur les populations d'ongulés par la création de couches de neige de haute densité (Putkonen et Roe, 2003 ; Tyler, 2010), ce qui engendre une diminution des conditions d'accès à la nourriture (Solberg *et al.*, 2001; Langlois *et al.*, 2016; Ouellet *et al.*, 2016).

Le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*), vivant dans l'archipel arctique canadien, n'est pas épargné par ce phénomène. Cette sous-espèce du caribou (*Rangifer tarandus*) est ajoutée à la liste des espèces en péril selon la *Loi sur les espèces en péril* (LEP) et désignée espèce en voie de disparition afin de lui attribuer un statut de protection légal (COSEPAC, 2004; Johnson *et al.*, 2016). Le principal facteur de son déclin, estimé à 72% en trois générations, est les conditions météorologiques hivernales difficiles de pluie verglaçante et de temps doux, causant des couches de glace et de neige dense dans le couvert nival emprisonnant le fourrage et limitant son accès (COSEPAC, 2004). Il a déjà été démontré que des événements sporadiques de neige de haute



densité et de glace ont produit des déclinés importants, tel qu'une diminution de 98 % de la population de l'île de Bathurst (Miller et Gunn, 2003). Cette situation est des plus inquiétante en considérant que les projections climatiques prédisent des températures plus chaudes et des épisodes hivernaux de pluie sur neige plus importants et fréquents (Rinke et Dethloff, 2008; Hansen *et al.*, 2011; Langlois *et al.*, 2016).

Le caribou de Peary occupe un grand territoire, isolé, rendant le suivi des conditions de neige difficile (Festa-Bianchet *et al.*, 2011). L'utilisation des outils de télédétection afin d'estimer le couvert nival (Langlois *et al.*, 2012 ; Montpetit *et al.*, 2013) permettrait aux écologistes d'avoir une information de l'habitat du caribou sur une étendue spatiale et temporelle large afin de diminuer les efforts mis dans la collecte d'information *in situ* (Maher *et al.*, 2012). L'extraction d'un profil vertical de densités demeure cependant impossible. Le modèle de neige SNOWPACK est un exemple d'outil permettant une analyse stratigraphique du couvert nival à l'aide d'un forçage de données météorologiques telles que la température de l'air, l'humidité relative et les précipitations (Langlois *et al.*, 2009 ; Ouellet *et al.*, 2016). Cependant, un des problèmes concernant les données météorologiques disponibles pour des simulations sur la région arctique est que la résolution spatiale est généralement grossière. Par exemple, les données de réanalyses climatiques du *North American Region Reanalysis* (NARR) offrent une résolution spatiale de 32 km (NCEP, 2015), correspondant donc à une résolution faible ne permettant pas d'évaluer l'effet du couvert nival sur la micro-variabilité locale du caribou de Peary. Une estimation de la couverture de neige à l'aide de SNOWPACK à une résolution spatiale plus fine permettrait de mieux prédire la migration locale des différentes populations sur les îles de l'archipel arctique canadien. Puisqu'aucune donnée météorologique n'est disponible à une résolution spatiale plus représentative de la variabilité locale des déplacements du caribou, une modification dans les simulations à partir du modèle SNOWPACK permettrait de modifier la résolution. L'utilisation de données topographiques telles qu'un modèle d'élévation numérique (MNE) représente une solution possible afin d'affiner la résolution spatiale des estimations du couvert nival, et par conséquent une visualisation à une échelle plus fine des conditions d'accès à la nourriture pour le caribou de Peary dans l'archipel arctique canadien. L'information de la pente pourrait être utilisée dans les simulations dans SNOWPACK puisque qu'il s'agit d'un paramètre d'entrée possible du modèle et qu'il a déjà été observé dans une démarche préliminaire que le pente a une influence sur le couvert nival (Ouellet *et al.*, 2016).

## 1.2. Objectifs

L'objectif général de cet essai est donc d'évaluer le potentiel d'une approche de raffinement spatial de l'outil de spatialisation de SNOWPACK dans l'Arctique (OSSA), développé par Ouellet *et al.* (2016), spatialisant les conditions d'accès à la nourriture du caribou de Peary

. Afin de mieux y répondre, trois objectifs spécifiques sont posés:

- Évaluer la sensibilité du couvert nival simulé à la topographie et à l'occupation du sol;
- Développer et implémenter un couplage des données de pente et d'occupation de sol avec SNOWPACK dans l'OSSA permettant des simulations à haute résolution (1 km);
- Comparer les simulations obtenues à une résolution spatiale de 1 km par rapport au résultat initial à une résolution de 32 km, plus particulièrement le paramètre d'intérêt d'épaisseur cumulée au-delà d'un seuil fixe de densité (ECD) durant la saison hivernale déterminé par Ouellet *et al.* (2016).

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Caribou de Peary

#### 2.1.1. Présentation générale de l'espèce

Le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) est, depuis 1961, reconnu comme une sous-espèce distincte du caribou du Canada (Banfield, 1961). Cette sous-espèce est également acceptée comme unité désignable par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC), ce qui distingue le caribou de Peary des autres caribous d'un point de vue spatial, écologique ou génétique (COSEPAC, 2011). Ce statut implique donc que la sous-espèce du caribou de Peary sera évaluée et attribuée un statut de protection indépendamment des autres sous-espèces de caribou. Le caribou de Peary se distingue également des autres sous-espèces de caribou, entre autres, par son pelage d'un blanc plus prononcé, sa taille moins imposante et son museau plus court (COSEPAC, 2011). La Figure 2.1 tirée du Musée canadien de la nature (2015) présente ces différentes caractéristiques.



**Figure 2.1: Caribou de Peary (Musée canadien de la nature, 2015)**

Le caribou de Peary est endémique au Canada et son aire de répartition, telle qu'illustrée sur la Figure 2.2 tirée de Ouellet *et al.* (2016), couvre deux territoires du pays, soit le Nunavut et le Territoire du Nord-Ouest. Son aire de répartition, couvrant une superficie d'environ 602 356 km<sup>2</sup>, est complexe puisqu'elle est discontinue et répartie sur de nombreuses îles de l'archipel arctique canadien (Environnement Canada, 2016).

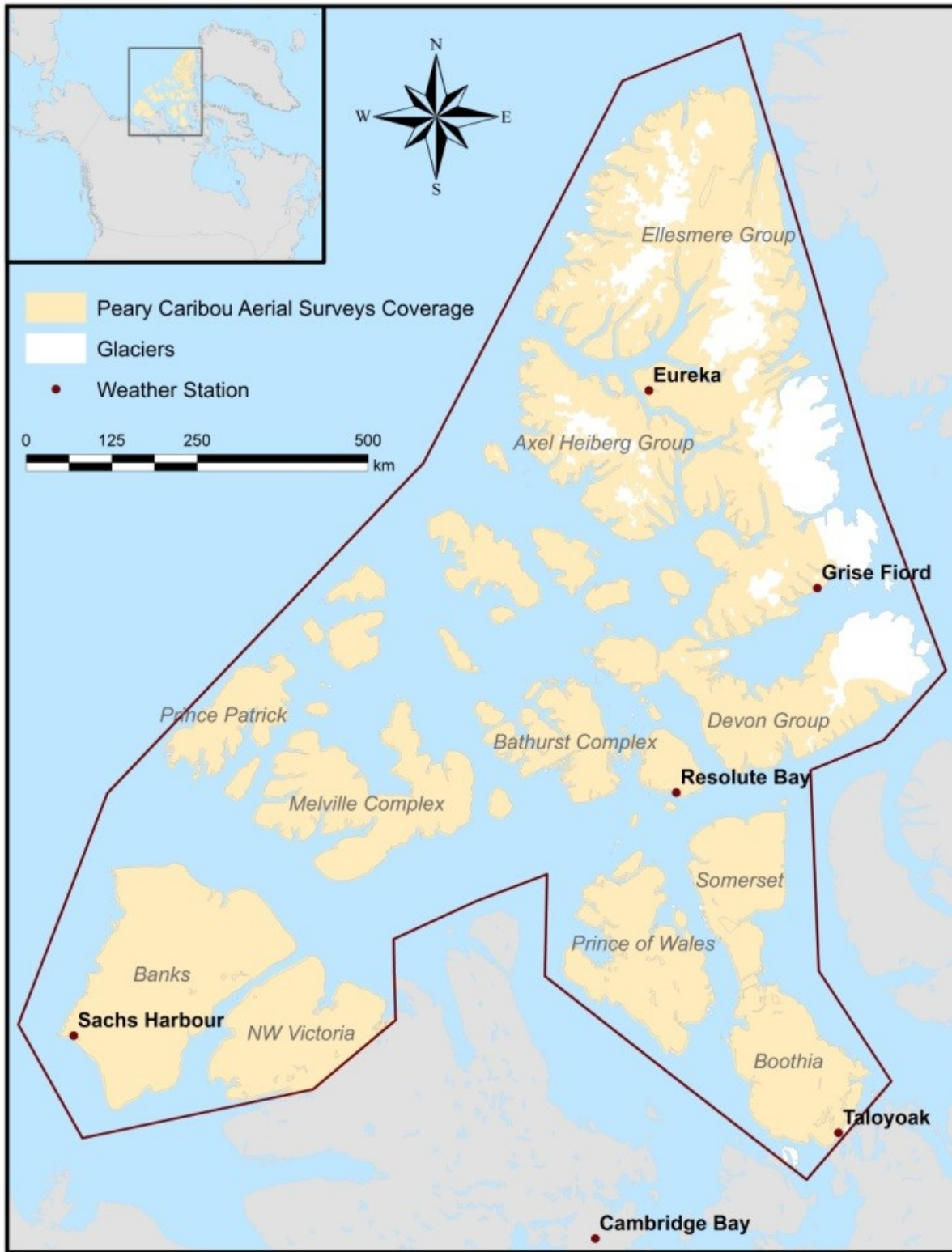
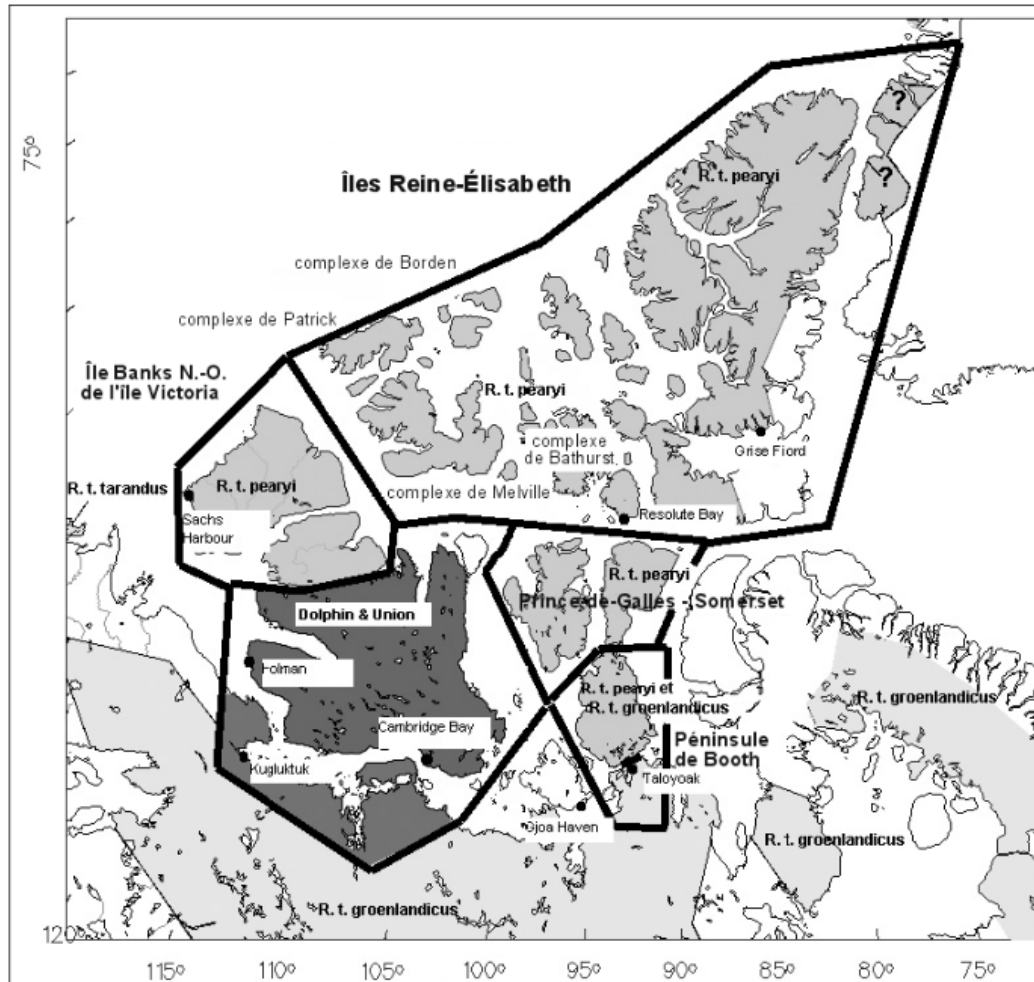


Figure 2.2: Aire de répartition du caribou de Peary (Ouellet *et al.*, 2016)

Les caribous peuvent être subdivisés en quatre populations distinctes selon leur distribution sur le territoire : les îles de la Reine-Élisabeth, l'Île Banks - nord-ouest de l'Île Victoria, les îles Prince-de-Galles et Somerset et finalement la péninsule de Booth, toutes illustrés à la Figure 2.3 tirée de COSEPAC (2004, p.13).



**Figure 2.3: Répartition spatiale des différentes populations du caribou de Peary (COSEPAC, 2004, p. 13)**

Le nombre total d'individus est estimé à 7890 caribous (Environnement Canada, 2016). Par contre, cette estimation reste imprécise en raison des inventaires à intervalle irrégulier dans l'Arctique, une région où le caribou reste encore difficile à recenser. L'habitat du caribou de Peary est caractérisé uniquement par la toundra arctique (COSEPAC, 2004). La topographie y est très variable avec des zones beaucoup plus plates dans le sud-ouest de son territoire et des zones plus montagneuses dans le nord-est (Environnement Canada, 2016). De plus, des complexes insulaires sont formés pendant une grande proportion de l'année par les glaces qui relient

différentes îles entre elles. Les caribous sont regroupés en petits groupes de 10 individus en moyenne (Festa-Bianchet *et al.*, 2011) au contraire des autres sous-espèces, tel que le caribou de la toundra (*R. t. groenlandicus*) formant des groupes de plus grande envergure (Environnement Canada, 2016). Le caribou de Peary s'alimente majoritairement de mousses et également de lichens. À l'hiver, l'accessibilité à la nourriture sera limitée lorsque le sol est recouvert d'une couche de glace ou de neige de grande densité qui emprisonne le fourrage (Environnement Canada, 2016). Les populations vont donc généralement effectuer des migrations interinsulaires saisonnières à la recherche de ressources nécessaires à leur survie et ainsi optimiser l'exploitation des ressources sur le territoire (Miller, 1990; COSEPAC, 2004). Les caribous auront tendance à rechercher des zones en pentes ou des crêtes où la neige est moins dense et aura une plus faible chance de durcir sous l'effet du vent (Environnement Canada, 2016). Ces zones de relief, et en particulier lorsque la pente fait face au sud, seront également celles où la végétation apparaît et croit en premier.

### **2.1.2. Statut de protection**

Le caribou de Peary est en 1979 la première sous-espèce du caribou du Canada à se voir attribuer un statut de protection, soit comme espèce menacée (Festa-Bianchet *et al.*, 2011). En 2004, le COSEPAC attribue le statut d'espèce en voie de disparition au caribou de Peary. Cette décision a été prise, entre autres, par un déclin global de 72 % pour ce taxon entre 1980 et 2001 (COSEPAC, 2004). Par contre, ce n'est qu'en 2010 que le Gouvernement du Canada ajoute cette sous-espèce au registre de la *Loi sur les espèces en péril* (LEP) (Environnement Canada, 2016).

Plusieurs épisodes de mortalité sévères se sont produits au cours des dernières années. Certaines études menées sur des populations ou des îles en particulier montrent d'importantes diminutions de population dans le temps. L'étude de Gunn *et al.* (1981) est la première mettant en évidence un déclin important chez la sous-espèce du caribou de Peary. En comparant les populations entre 1961 et 1974 pour l'Île Élisabeth, un déclin de 89 % est observé. Une seconde étude montre pour les îles Prince-de-Galles, Somerset et Russell que le nombre d'individus, incluant les veaux, passe de 6048 individus en 1980 à seulement 100 en 1995, soit un déclin de 98 % en 15 ans (Gunn *et al.*, 2006). En comparant les observations de caribou entre 1982 et 1991 pour l'Île Banks, la population qui était initialement de 6 970 individus décline à 897 (Nagy *et al.*, 1996). Finalement, selon l'étude de Miller et Gun (2003), un déclin de 98 % sur la population sur l'Île Bathurst sévit

entre 1994 et 1997. Il est démontré dans cette étude que la diminution d'observation de caribou dans la zone d'étude entre les deux années est bien attribuée à une mortalité massive et non à la migration des individus vu la présence importante de carcasses.

### **2.1.3. Causes du déclin**

Plusieurs pressions pèsent sur les différentes populations du caribou de Peary et les déclin peuvent être dus autant à des causes biotiques qu'abiotiques. Parmi ces causes, il y a premièrement la prédation par le loup (Nagy *et al.*, 1996 ; Gunn *et al.*, 2000). Par des observations *in situ* sur l'Île Banks, cette cause a pu être démontrée par la découverte de signes de prédatons sur des carcasses de caribou (Nagy *et al.*, 1996). La prédation par le loup a un impact plus important chez les populations plus petites et également dans les zones où le bœuf musqué, *Ovibos moschatus*, est absent ou en abondance plus faible que le caribou (Gunn *et al.*, 2000). Pour citer un autre type de prédation, il y a la chasse du caribou par l'humain, dont surtout la chasse de subsistance faite par les populations inuits sur le territoire du caribou de Peary (Gunn *et al.*, 2000 ; Festa-Bianchet *et al.*, 2011). Dans certaines portions de l'archipel arctique canadien tel que l'Île Banks, le caribou de Peary représente une source de nourriture de subsistance pour les Inuits, tel que ceux situés à Sachs Harbour (Nagy *et al.*, 1996). Bien que la chasse ne soit pas la cause principale du déclin, elle peut prolonger et accélérer le déclin de la population lors d'années où le climat est défavorable (Gunn *et al.*, 2000). Il est également difficile de quantifier l'effet de la chasse sur les populations de caribous vu qu'il y a peu d'information sur les prélèvements effectués chaque année (Festa-Bianchet *et al.*, 2011).

Une des principales causes du déclin du caribou est reliée au climat. L'étude de Miller et Gunn (2003) a démontré que des déclin importants dans la population du complexe de l'Île Bathurst sont reliés à des conditions météorologiques hivernales et printanières extrêmes. Les trois hivers entre 1994 et 1997 sont caractérisés par des précipitations de neige au-dessus des moyennes saisonnières. Les premières précipitations de neige ont été suivies de conditions favorables à la formation de neige croutée (par l'action du vent, par exemple), augmentant ainsi la densité des couches du couvert nival et diminuant les conditions d'accès à la nourriture. Les événements de pluie sur neige peuvent également affecter grandement les populations de caribous. Lors de ces événements, la pluie s'écoule au travers du manteau neigeux, ce qui peut, par l'action du gel, créer des couches de glace au travers du couvert nival (Grenfell et Putkonen, 2008). Ces

événements de pluie sur neige sont reliés avec des épisodes de déclin dans différentes populations de caribous (Miller *et al.*, 1975). Les conséquences de ces derniers événements sont encore plus inquiétantes pour les populations de caribou puisqu'il est estimé que leurs fréquences et amplitudes augmenteront dans le futur (Putkonen et Roe, 2003; Rinke et Dethloff, 2008). En effet, Langlois *et al.* (2016) ont démontré une augmentation significative d'occurrence de pluies sur neige et de présence de croûtes de glace sur 18 îles de l'archipel Arctique Canadien. Plus précisément, l'occurrence a triplé entre 1979-1995 et 1996-2011 démontrant ainsi une accélération du phénomène. Finalement, la conservation du caribou de Peary demeure ardue, puisque sa survie est grandement reliée à des variables abiotiques de son environnement qui sont aléatoires et occasionnelles comme la température et les précipitations de neige et de pluie.

## **2.2. Modèle SNOWPACK**

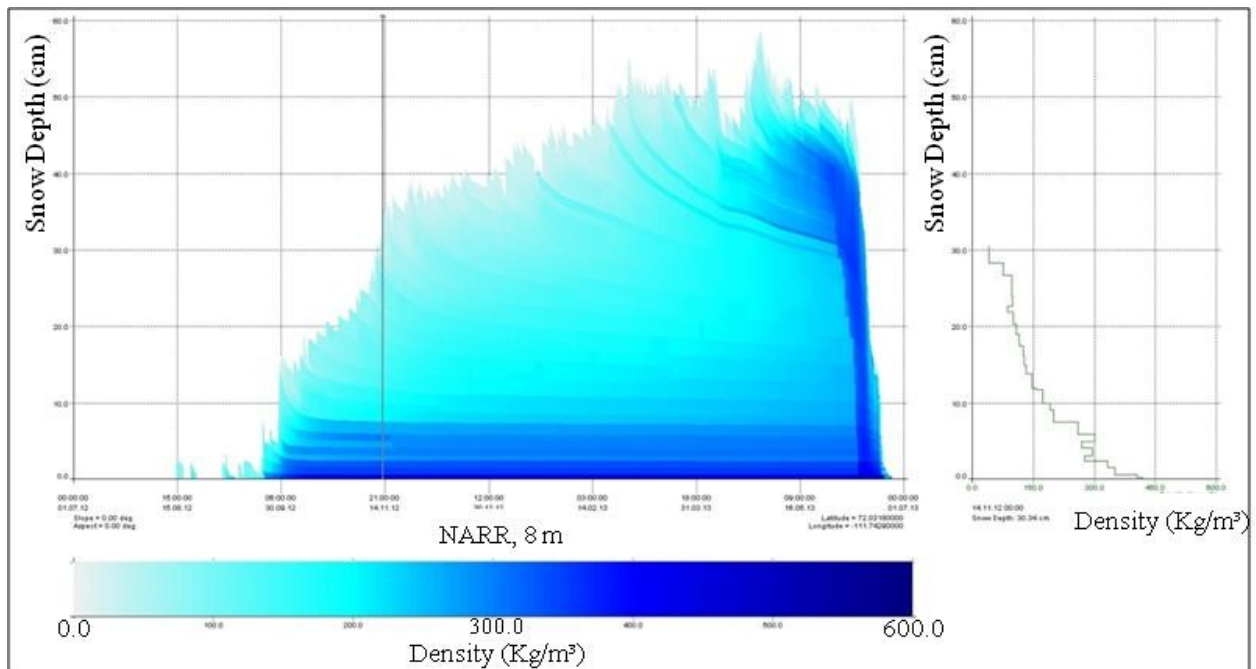
Comme décrites dans la section précédente, les conditions météorologiques sont la cause de nombreux déclin importants chez le caribou de Peary. Ces événements météorologiques affectent les caractéristiques de la neige en créant, par exemple, des couches de glace ou de neige à haute densité dans le manteau neigeux. Ces conditions réduisent les conditions d'accès à la nourriture pour les individus, ce qui a pour conséquences d'augmenter la mortalité ou d'induire la migration des groupes de caribous vers des endroits favorables à l'alimentation. La simulation du couvert nival dans l'archipel arctique canadien permettrait d'obtenir une information pertinente sur l'état du territoire du caribou de Peary à grande échelle. À l'aide de données météorologiques issues de prédictions futures, il sera possible d'anticiper les conséquences des changements climatiques pour les populations de caribou, d'identifier les régions qui seront les plus affectées et possiblement de prédire les déplacements de populations.

Le modèle choisi dans le cadre de ce travail est le modèle suisse SNOWPACK (Bartelt et Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a, 2002b). Bien qu'il ne soit pas l'unique modèle de simulation du couvert nival, celui-ci a été choisi principalement parce que, selon les objectifs de cet essai, il est nécessaire d'utiliser l'OSSA, développé par Ouellet *et al.* (2016), qui intègre le modèle SNOWPACK. Le modèle de neige SNOWPACK a été développé par le *Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research* (SLF) afin, comme objectif initial, d'améliorer la surveillance des risques d'avalanches dans les Alpes (Lehning *et al.*, 1999). Ce modèle est principalement utilisé afin d'effectuer la stratification des couches du couvert nival et de décrire



la microstructure de la neige (SLF, s.d.). Bien que le modèle soit conçu en Suisse, il est appliqué dans de nombreux pays, dont le Canada (Côté *et al.*, 2016). Ce modèle a été utilisé dans de nombreuses études liées à différents domaines, dont l'hydrologie, les changements climatiques, l'étude du pergélisol, etc. (SLF, s.d.).

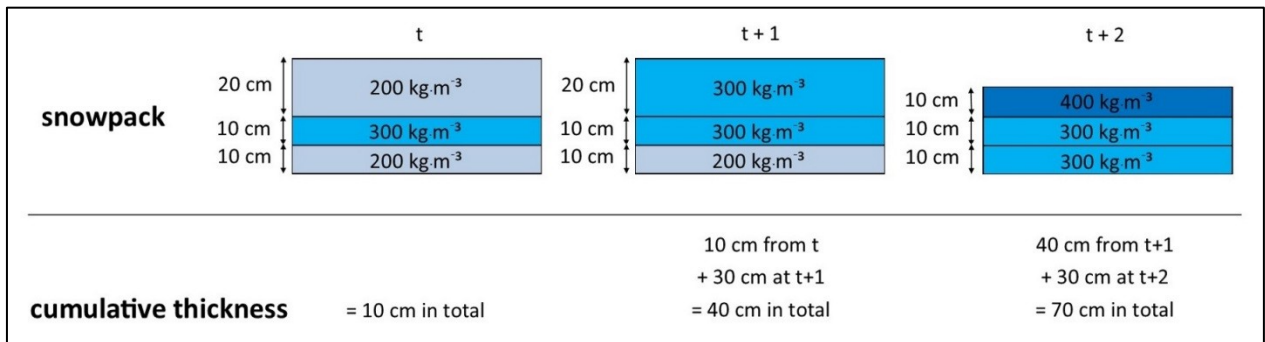
Le modèle nécessite la création de différents fichiers en entrée, soit le fichier de configuration (\*.ini), le fichier de couche (\*.sno) et le fichier météorologique (\*.smet). Le fichier de configuration peut être produit à l'aide du module *INShell* ou par la création manuelle d'un fichier en format texte. Les fichiers \*.sno et \*.smet sont en format texte et possèdent une structure stricte telle qu'illustrée en annexes Annexe 1 :et Annexe 2 : respectivement. Les simulations sont lancées par une commande DOS. En sortie, deux types de fichiers sont créés, soit un fichier de profil de neige (\*.pro) et un fichier des données météorologiques (\*.met). L'outil *Sngui* permet de visualiser l'ensemble des variables créées (résultats se rapportant aux fichiers \*.pro et \*.met) telles que la densité, illustrée en exemple à la Figure 2.4. Le graphique de gauche illustre l'évolution de la densité de neige des différentes couches du manteau neigeux qui se forment avec le temps. Le graphique de droite quant à lui permet de connaître avec plus de précision le densité de chaque couche à un temps précis. Il est également possible de visualiser les paramètres météorologiques utilisés en entrée du modèle.



**Figure 2.4: Visualisation de la densité avec l'outil *SNGui***

### 2.3. Caractérisation des conditions d'accès à la nourriture

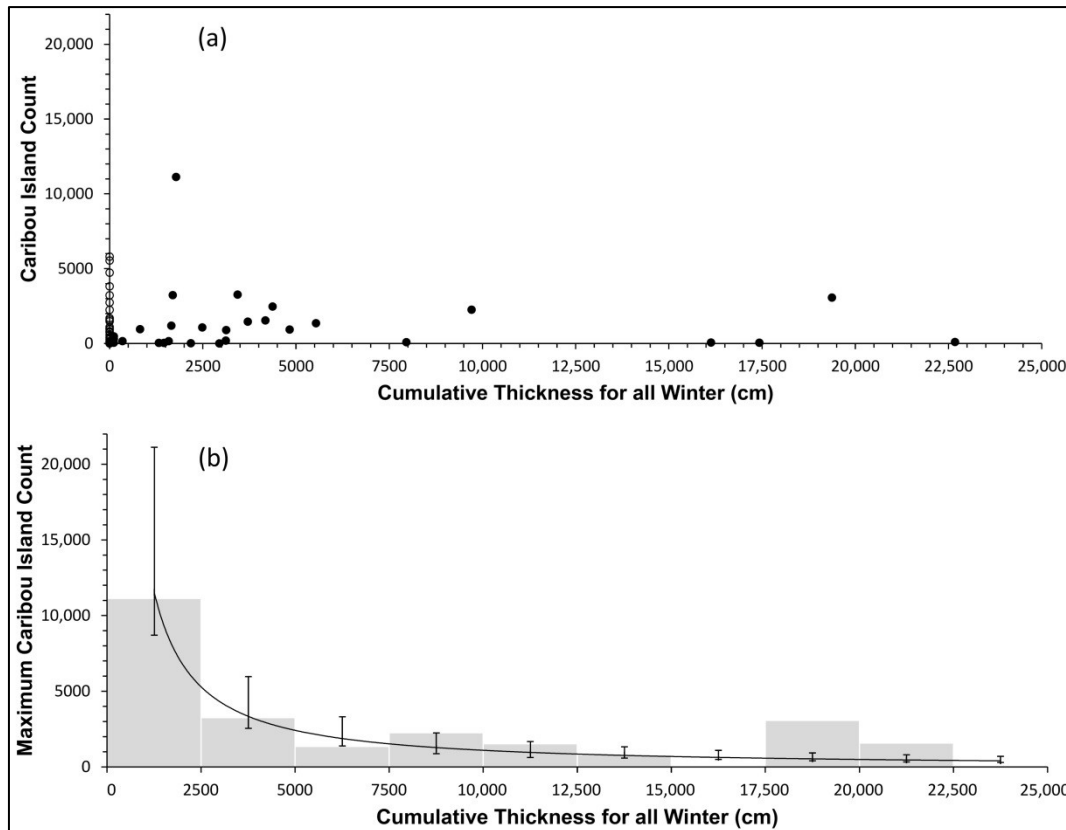
À l'aide du modèle SNOWPACK, il est possible, à partir de données météorologiques, de connaître les caractéristiques du couvert nival. Une grande partie de la méthodologie de ce projet, décrite dans les sections subséquentes, prend sa source de l'étude de Ouellet *et al.* (2016). L'objectif de cette étude était la mise en place d'un outil permettant la spatialisation du couvert nival à l'aide du modèle SNOWPACK. Afin de caractériser si les conditions d'accès à la nourriture sont favorables ou non, le paramètre d'intérêt du couvert nival qui a été ciblé dans Ouellet *et al.* (2016) est la densité. Tel que documenté à la section 2.1.3., le caribou de Peary sera sensible aux couches de neige de grande densité puisqu'elles diminuent la facilité du caribou à fourrager au travers du manteau neigeux durant la saison hivernale. Plus précisément, c'est l'épaisseur cumulée au-delà d'un seuil fixe de densité durant la saison hivernale (ECD) qui a été analysée afin de démontrer un lien plus fort avec le nombre de caribous. Dans cette étude, la saison hivernale demeure fixe et est comprise entre les mois d'octobre et mai. La Figure 2.5 tirée de Ouellet *et al.* (2016) illustre le concept du calcul de l'ECD.



**Figure 2.5: Schéma simplifié du calcul de l'ECD (Ouellet *et al.*, 2016)**

Les résultats issus de SNOWPACK permettent de connaître à chaque pas de temps (t), l'épaisseur des différentes couches de neige ainsi que leur densité respective. En considérant un seuil de densité à  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , la somme des épaisseurs des couches ayant une densité plus grande ou égale au seuil pour chaque pas de temps est calculée. C'est un calcul cumulatif, puisqu'une même couche retrouvée dans deux ou plusieurs pas de temps successifs, telle que la couche centrale à la Figure 2.5, sera considérée plusieurs fois dans le calcul de l'ECD totale et pas seulement qu'à son apparition.

Une portion importante de l'étude de Ouellet *et al.* (2016) a été de déterminer la valeur du seuil de densité. Ce seuil peut se traduire par la densité minimale d'une couche de neige pouvant diminuer l'accès à la nourriture pour le caribou. La méthode générale employée a été de comparer des données historiques de populations de caribous avec des résultats d'ECD selon différents seuils, soit 300, 350 et 400  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La Figure 2.6 tirée de Ouellet *et al.* (2016) montre cette comparaison avec un ECD produit avec un seuil de 300  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

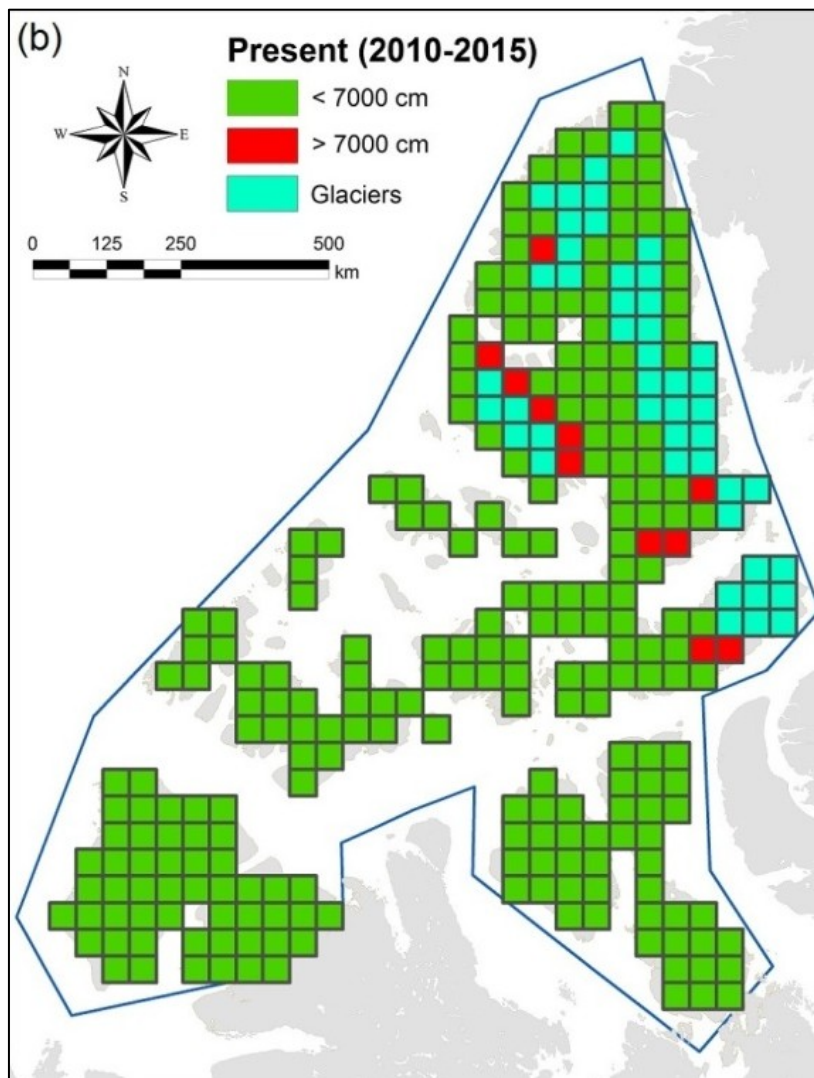


**Figure 2.6: Corrélation entre l'ECD et les populations de caribous (Ouellet *et al.*, 2016)**

Ces résultats permettent la validation de l'utilisation de l'ECD afin de caractériser les conditions d'accès à la nourriture puisque plus l'ECD est élevée, moins de caribous sont dénombrés. Les simulations dans SNOWPACK ont été effectuées avec les données météorologiques du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM). Il a été choisi, pour l'OSSA, un seuil de densité de 300  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en raison que c'est celui qui démontre la plus forte corrélation tel que démontré à la Figure 2.6. En ce qui concerne le seuil de densité utilisé pour ce projet, un seuil de 325  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Ouellet : mémoire, 2016) a été utilisé pour cette étude suite à des analyses supplémentaires utilisant des

données météorologiques du *North American Regional Reanalysis* (NARR) (données utilisées pour ce projet et décrites à la section 3.2.1).

La relation entre l'ECD et les populations de caribous montre, à part certaines exceptions, que le nombre de caribous est nul à partir d'une ECD entre 5 000 et 10 000 cm. Ouellet *et al.* (2016) pose une valeur médiane de 7 000 cm comme seuil d'ECD où les zones caractérisées par une valeur d'ECD supérieure sont désignées comme étant défavorables pour le caribou. La Figure 2.7 montre une représentation des conditions d'accès à la nourriture pour l'ensemble de l'aire de répartition du caribou de Peary. La résolution spatiale de cette information est de 32 km, correspondant approximativement à celle des données CRCM en entrée des simulations.

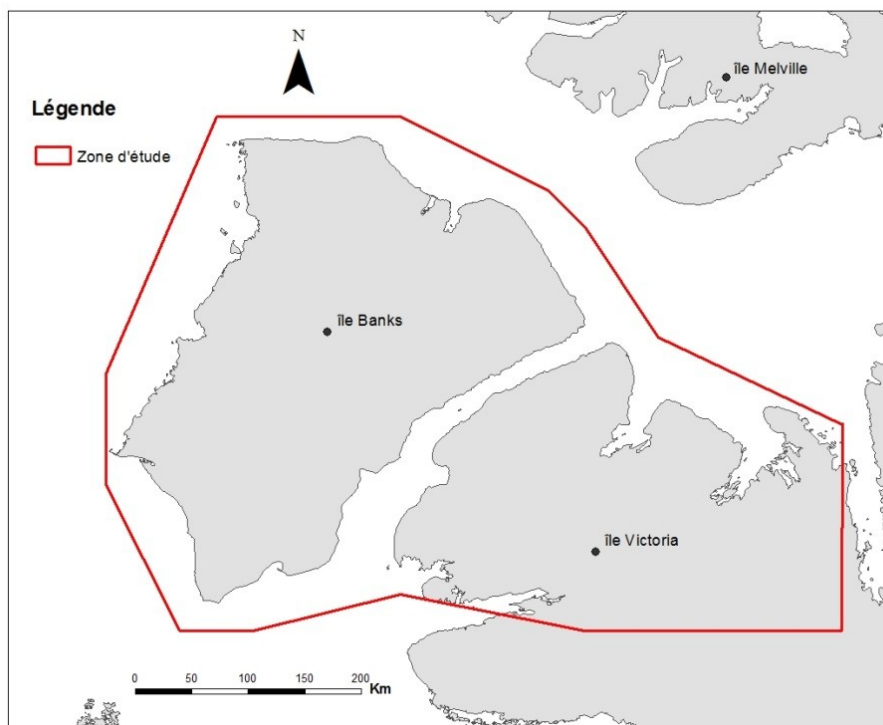


**Figure 2.7: Spatialisation des conditions d'accès à la nourriture du Caribou de Peary (Ouellet *et al.*, 2016)**

### 3. Données et méthodes

#### 3.1. Zone d'étude

La zone d'étude pour ce projet se rapporte globalement à l'aire de répartition de la sous-espèce du caribou de Peary, préalablement présentée à la Figure 2.2, qui englobe la majorité de l'archipel arctique canadien. Bien que les objectifs de ce projet puissent s'appliquer à l'ensemble de ce territoire, il a été choisi de concentrer les efforts sur une zone plus restreinte dans le cadre de cet essai. Les simulations du couvert nival ont donc été concentrées sur deux îles, soit l'Île Banks et la portion nord-ouest de l'Île Victoria, tel que montré à la Figure 3.1 ci-dessous.



**Figure 3.1: Zone d'étude réduite pour les simulations du couvert nival**

#### 3.2. Données

##### 3.2.1. *North American Regional Reanalysis (NARR)*

Les données météorologiques qui sont utilisées en entrée du modèle SNOWPACK pour ce projet sont les données du *North American Regional Reanalysis (NARR)*. La production de ces données est à l'origine d'un projet supporté par le *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* (Mesinger *et al.*, 2006). Ces données sont produites par le *National Centers for*

*Environmental Prediction* (NCEP), centre spécialisé du *National Weather Services* (NWS), faisant lui-même partie du NOAA (NCEP, 2015). Les données NARR sont produites par une méthode de réanalyses qui se résume brièvement à l'utilisation d'un modèle météorologique combiné à des données d'observation (stations météorologiques, satellites, etc.) afin de produire des données météorologiques couvrant de grands territoires jusqu'à l'ensemble du globe (Reanalyses.org, 2016).

Les données NARR sont une extension des données de réanalyses NCEP *Reanalysis* I et II, mais où la modélisation de la température, du vent et des précipitations a été améliorée (ESLR, 2016). Les données NARR couvrent toute l'Amérique du Nord avec un intervalle temporel du 1er janvier 1979 jusqu'à aujourd'hui à un pas de temps de 3 h. Elles sont produites par l'utilisation du modèle de prévision météorologique ETA (Mesinger *et al.*, 2006). Ces données sont disponibles en format NetCDF-3 et sont divisées en différents fichiers selon la variable météorologique et l'année. Dans l'OSSA, l'extraction des données est faite automatiquement dans les fichiers correspondants aux variables nécessaires à la modélisation du couvert de neige dans SNOWPACK. Les variables utilisées sont la température de l'air (TA) (K), rayonnement incident de grande longueur d'onde(ILWR) ( $W/m^2$ ), rayonnement réfléchi de grande longueur d'onde(OLWR) ( $W/m^2$ ), rayonnement incident de courte longueur d'onde(ISWR) ( $W/m^2$ ), rayonnement réfléchi de courte longueur d'onde(OSWR) ( $W/m^2$ ), vitesse du vent (VW) (m/s), direction du vent (DW) ( $^{\circ}$ ), humidité relative (RH) (%) et le taux des précipitations sur le pas de temps courant (PSUM) (mm/h).

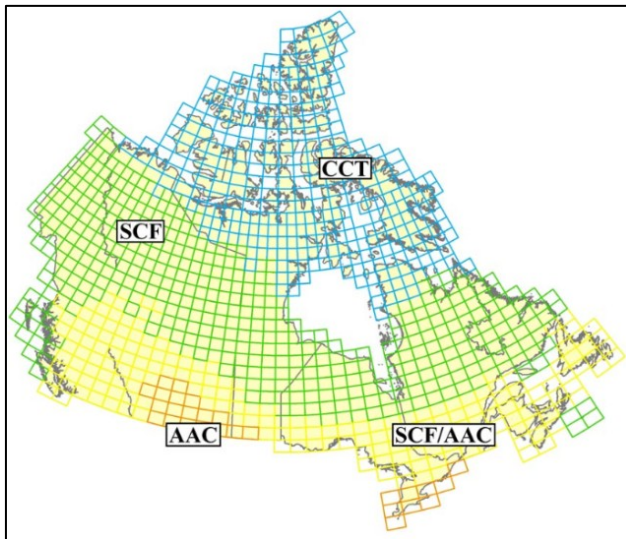
### **3.2.2. Données numériques d'élévation du Canada**

Les données utilisées pour le calcul de la pente sur l'ensemble de la zone d'étude sont les données numériques d'élévation du Canada (DNEC). Les DNEC peuvent être représentées par un quadrillage de valeurs d'élévation représentées en mètre. Ces données sont produites par le Centre d'information topographique (CIT) et créées à partir des éléments hypsographiques et hydrographiques de la Base nationale de données topographiques (BNDDT). Pour faciliter le téléchargement, les données sont subdivisées selon le Système national de référence cartographique (SNRC). Il est possible de télécharger une grille en format vectoriel ou KML afin de choisir plus facilement les couches à télécharger. Les DNEC sont utilisées comme données primaires pour plusieurs applications, dont le calcul de la pente du terrain. Elles sont disponibles

en format USGS DEM (un format matriciel développé par le *United States Geological Survey* (USGS)) à une échelle de 1:50 000 ou 1:250 000. Les DNEC téléchargées sont d'une échelle de 1:50 000 qui correspond à une résolution spatiale plus fine, soit d'environ 23 m (N.-S.) et 8-17 m (E.-O.) pour les données au nord du 68<sup>e</sup> parallèle. Les données sont disponibles à partir du site web de GéoGratis sous licence ouverte. (RNCAN, 2007)

### 3.2.3. Données d'occupation de sol

Les données choisies pour la description de l'occupation du sol sur la zone d'étude sont les données de couverture du sol circa 2000-vectorielle téléchargeable sous licence libre sur le site de GéoGratis en format vectoriel. Pour ce projet, seulement les couches couvrant les deux zones de simulations ont été téléchargées. Ces données ont été publiées en 2009, mais ont été produites par la vectorisation de classification d'orthophotos Landsat 5 et Landsat 7 produites entre le 2 août 1999 et le 23 août 2001 (RNCAN, 2009). Ces données sont produites par différents organismes gouvernementaux fédéraux selon le type de couverture, et comme le montre la Figure 3.2 tirée de RNCAN (2009, p. 13), les données correspondantes à la zone d'étude, couvrant le nord du Canada, ont été réalisées par le Centre canadien de télédétection (CCT).



**Figure 3.2: Couverture des données circa 2000-vectorielle (RNCAN, 2009, p. 13)**

La couverture forestière est réalisée par le Service canadien des forêts (SCF) et la couverture agricole par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Il existe 44 types d'occupation sol identifiés sur l'ensemble du territoire couvert. Les données ont été téléchargées en format *shapefile*. Les couches comprennent plusieurs attributs en plus du code d'utilisation du sol tels

qu'illustrés sur le Tableau 3.1 qui montre le nom de l'attribut et sa valeur respective pour les couches de données utilisées pour cet essai.

**Tableau 3.1: Informations sur les couches de données circa 2000-vectorielle utilisées pour l'essai**

Nom de l'attribut	Valeur associée aux couches utilisées
Date de validité	2 août 1999
Fournisseur	Fédéral
Technique d'acquisition	Classification d'images
Précision	31 m

### 3.3. Simulations SNOWPACK

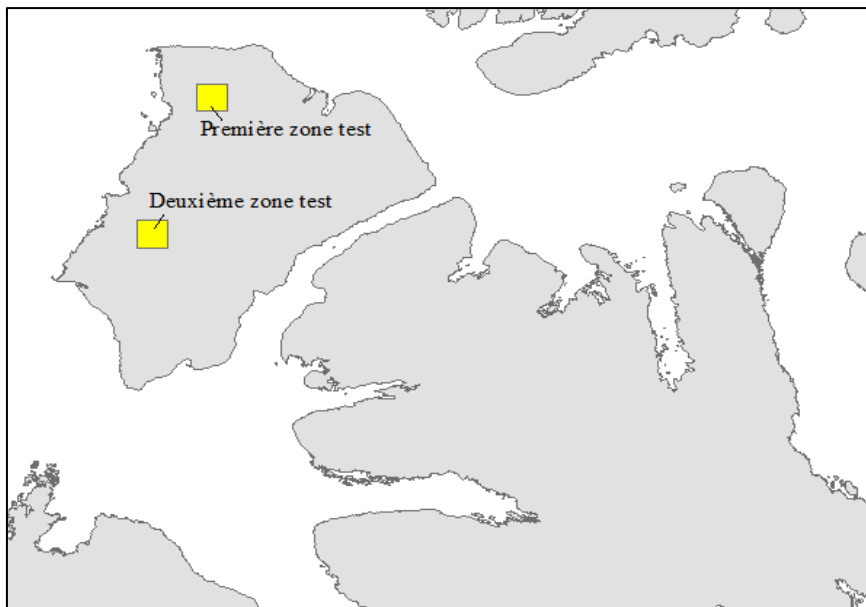
#### 3.3.1. Test de sensibilité de l'ECD à la pente et à la couverture du sol

Afin de réaliser des simulations dans SNOWPACK, l'OSSA réalisé par Ouellet *et al.* (2016) a été utilisé. Cet outil a été conçu à l'aide du codage MATLAB et permet la préparation des données météorologiques NARR, la simulation du couvert nival avec le modèle SNOWPACK et la création de couches vectorielles en format *shapefile*. L'outil demande comme information en entrée, l'année et la zone d'intérêt pour la simulation. La zone d'intérêt est précisée par un fichier *shapefile* de type 'point' correspondant au point central d'une zone couverte par une cellule NARR. À partir d'une couche *shapefile* de l'ensemble des points centraux des cellules de données NARR, il est possible de sélectionner à l'aide du logiciel ArcGIS, le point d'intérêt et de l'exporter dans une nouvelle couche. En sélectionnant plusieurs points et/ou en indiquant plusieurs années, il est possible de lancer ainsi plusieurs simulations simultanément. Avec ces informations, il est possible de lancer une simulation qui débute par la création des fichiers en entrée du modèle SNOWPACK, soit le fichier de configuration (\*.ini), le fichier de couche (\*.sno) et le fichier météorologique (\*.smet). Les deux premiers fichiers sont créés à partir de l'année et la zone choisie ainsi que certains paramètres avec des valeurs par défaut et inscrits directement dans le code. Le fichier météorologique (\*.smet) est produit par l'extraction des données météorologiques des différents fichiers NARR selon l'emplacement géographique et l'année sélectionnée. À la suite de la création de ces trois fichiers, l'OSSA lance la simulation dans SNOWPACK via la commande DOS. En sortie de la simulation avec SNOWPACK, un fichier de profil de neige (\*.pro) est généré. Il est possible avec une fonction distincte de l'OSSA de faire la lecture et l'extraction des données du fichier de profil de neige afin de créer une



couche vectorielle en format *shapefile* de type 'point' contenant différentes informations concernant le couvert nival. L'information d'intérêt pour cet essai est l'épaisseur cumulée au-delà d'un seuil fixe de densité de  $325 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  durant la saison hivernale, ECD, décrite plus en détail dans la section 2.3. Les couches vectorielles générées contiennent également l'information sur la hauteur de neige et l'équivalent en eau de la neige pour la saison hivernale, mais également pour le reste de l'année.

Différentes simulations préliminaires ont été effectuées avant les simulations à haute résolution afin d'évaluer l'effet de certaines variables d'initialisation sur l'ECD. Ces tests vont permettre de valider si la pente et la couverture du sol ont un impact significatif sur la simulation de l'ECD. La première étape a été d'évaluer la sensibilité de l'ECD à la pente, afin de connaître à partir de quelle inclinaison, celle-ci aura un effet sur l'épaisseur cumulée simulée. Les simulations ont été faites sur deux zones de données NARR situées sur l'île Banks telle que montrées sur la Figure 3.3.



**Figure 3.3: Emplacement des zones NARR choisies pour les simulations préliminaires**

En ayant les résultats sur deux différentes zones, il sera possible de vérifier si le phénomène observé s'applique à l'ensemble de la zone d'étude ou s'il existe une variabilité entre les zones. Des simulations ont été faites pour chacune des zones en imposant un niveau de pente, pour chaque degré de pente dans un intervalle dans de  $0^\circ$  à  $10^\circ$ . La valeur de pente est inscrite dans le code MATLAB permettant la création du fichier de couche (\*.sno) sous le paramètre *SlopeAngle*

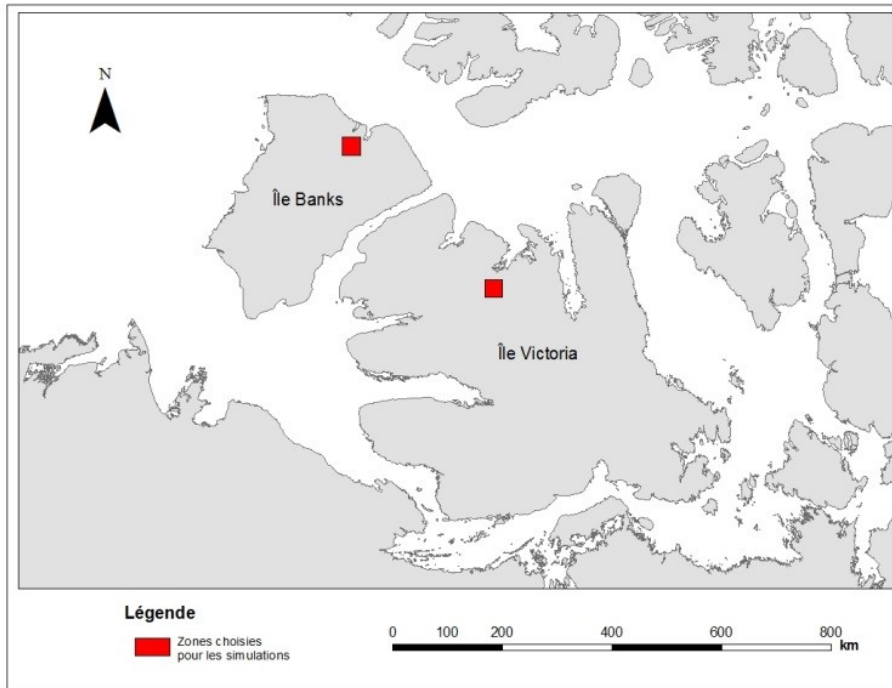
qui a une valeur nulle par défaut. Selon les résultats obtenus, il sera possible d'évaluer un seuil de pente correspondant au niveau de pente où l'ECD y est sensible. Une classification pourra être ainsi produite afin de cartographier pour l'ensemble de l'archipel arctique canadien, la répartition des zones où la pente a un impact sur l'ECD.

Par la suite, des simulations ont été faites afin d'évaluer la sensibilité de l'ECD à l'occupation du sol. Puisque les données de couverture du sol circa 2000-vectorielle caractérisent un total de 44 types de couverture, la première étape a été de lister les types d'occupation du sol présents dans les deux zones NARR choisies pour les simulations à haute résolution spatiale. Dans le logiciel ArcGIS, il a été conservé uniquement les portions des couches circa 2000-vectorielle présentes dans les deux zones NARR avec l'outil *Clip*. En consultant les propriétés de la couche, il a été listé et décrit seulement les différents types de sols présents dans les pixels choisis. Le paramètre choisi afin de paramétrer les différentes couvertures du sol dans SNOWPACK est l'albédo du sol. Une recherche dans la littérature a été effectuée afin de trouver des valeurs correspondantes à chaque type d'occupation du sol. Bien que d'autres paramètres dans SNOWPACK puissent être mis en relation avec le type de sol présent, la modification de plusieurs paramètres augmenterait l'incertitude des résultats puisqu'il n'y a pas de données du couvert nival *in situ* qui puissent confirmer la validité des valeurs utilisées ni d'information géophysique sur le sol. Des simulations préliminaires ont été faites afin de comparer l'épaisseur cumulée simulée selon les différentes valeurs d'albédo du sol correspondantes aux types d'occupation du sol présent. La spécification de l'albédo du sol se fait, comme pour la pente, dans le code de l'OSSA associé à la création du fichier de couche sous le paramètre nommé *SoilAlbedo* qui est par défaut à une valeur de 0.2. Ces simulations ont été faites sur deux zones pour les mêmes raisons que pour les tests de la sensibilité du couvert nival à la pente. Ce test permettra de confirmer que l'épaisseur cumulée est sensible à l'albédo du sol, ainsi que du choix de ce paramètre afin de réaliser des simulations à haute résolution spatiale.

### **3.3.2. Couplage et spatialisation de SNOWPACK**

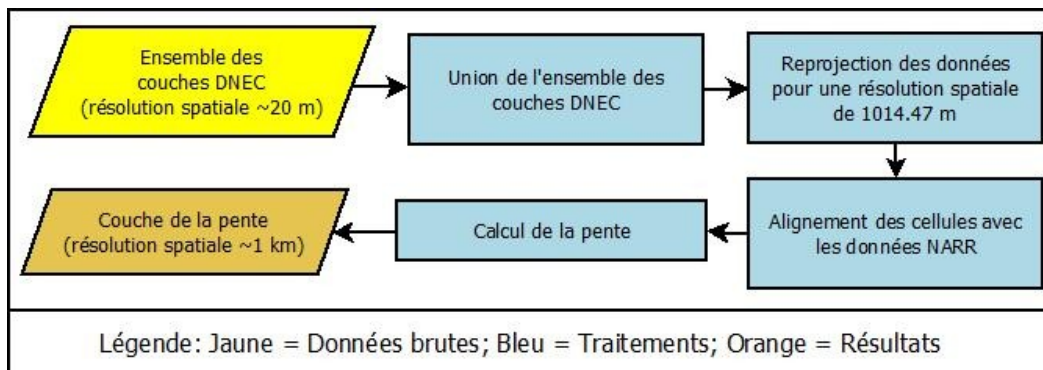
Premièrement, deux zones de simulations ont été choisies afin d'évaluer le potentiel de raffinement spatial sur deux pixels contenant une variabilité intéressante d'occupation du sol et de pente. Puisque les simulations utilisent des données de pente, les données d'élévation ont été utilisées afin de choisir des zones avec une topographie variable. La Figure 3.4 présente les deux

zones choisies, dont une dans le nord-est l'Île Banks et une deuxième presque au centre de l'Île Victoria.



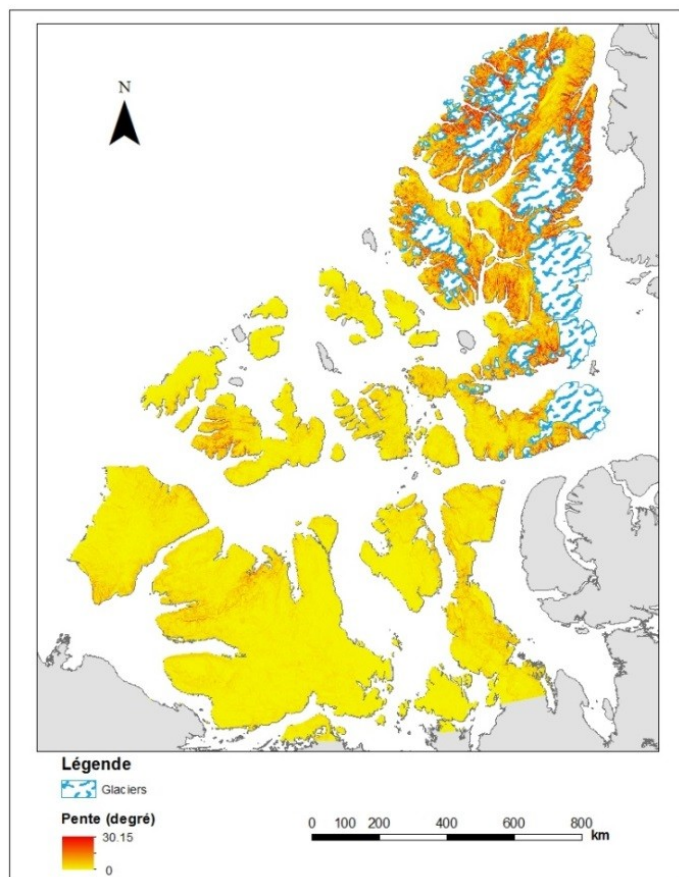
**Figure 3.4: Zones choisies pour évaluer le potentiel du raffinement spatial**

Avant de pouvoir réaliser les simulations d'épaisseur cumulée à haute résolution (1 km), certains traitements ont dû être effectués sur les données spatiales permettant le raffinement spatial, soit les données de pente et d'occupation de sol. Premièrement, l'information de la pente à une résolution spatiale de 1 km sera préparée pour l'ensemble de l'archipel arctique canadien. Pour ce faire, les données numériques d'élévation du Canada ont été utilisées. La Figure 3.5 présente un organigramme des traitements effectués des DNEC jusqu'à la couche de pente à 1 km de résolution spatiale.



**Figure 3.5: Organigramme de la création de la couche de pente**

Les traitements ont été faits à l'aide du logiciel ArcGIS. Ce même logiciel sera utilisé afin de pouvoir cartographier les résultats. Afin de faciliter les traitements, l'ensemble des couches DNEC a été uni en une seule couche à l'aide de l'outil *Mosaic To New Raster*. La Figure 3.6 présente la carte de la pente de l'ensemble de la zone d'étude créé à partir du résultat de l'étape précédente.

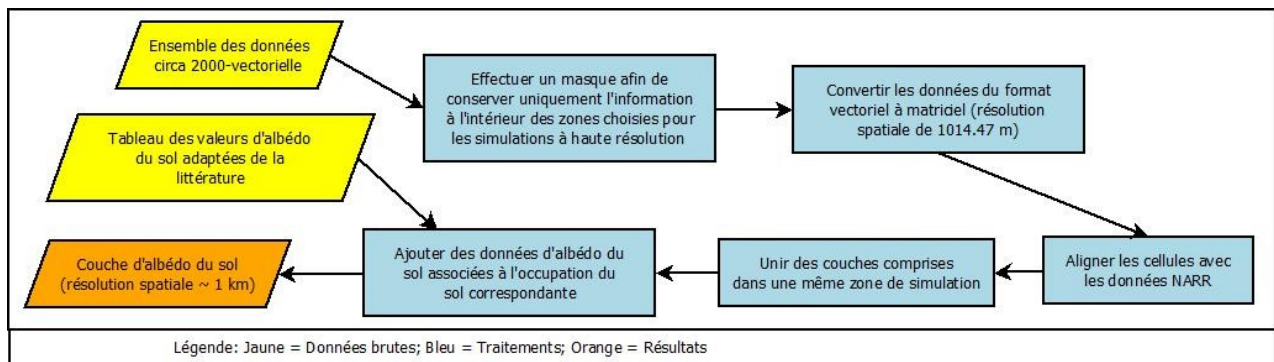


**Figure 3.6: Carte de la pente pour la zone d'étude**

Cet outil permet également de modifier le format des données DNEC du format USGS DEM vers un format TIFF. L'outil *Project Raster* a permis par la suite de transformer le système de coordonnées pour une projection conique conforme de Lambert permettant une meilleure visualisation de la grille de données NARR. C'est également avec cet outil que la dimension des cellules est modifiée pour 1014.47 m. Il faut préciser dans l'environnement de l'outil que les cellules soient alignées avec les données NARR afin d'éviter des chevauchements entre les différentes couches de données. Ensuite, l'outil *Slope* a été utilisé afin de créer une couche donnant l'information de la pente en degré à partir des données d'élévation des DNEC. Un

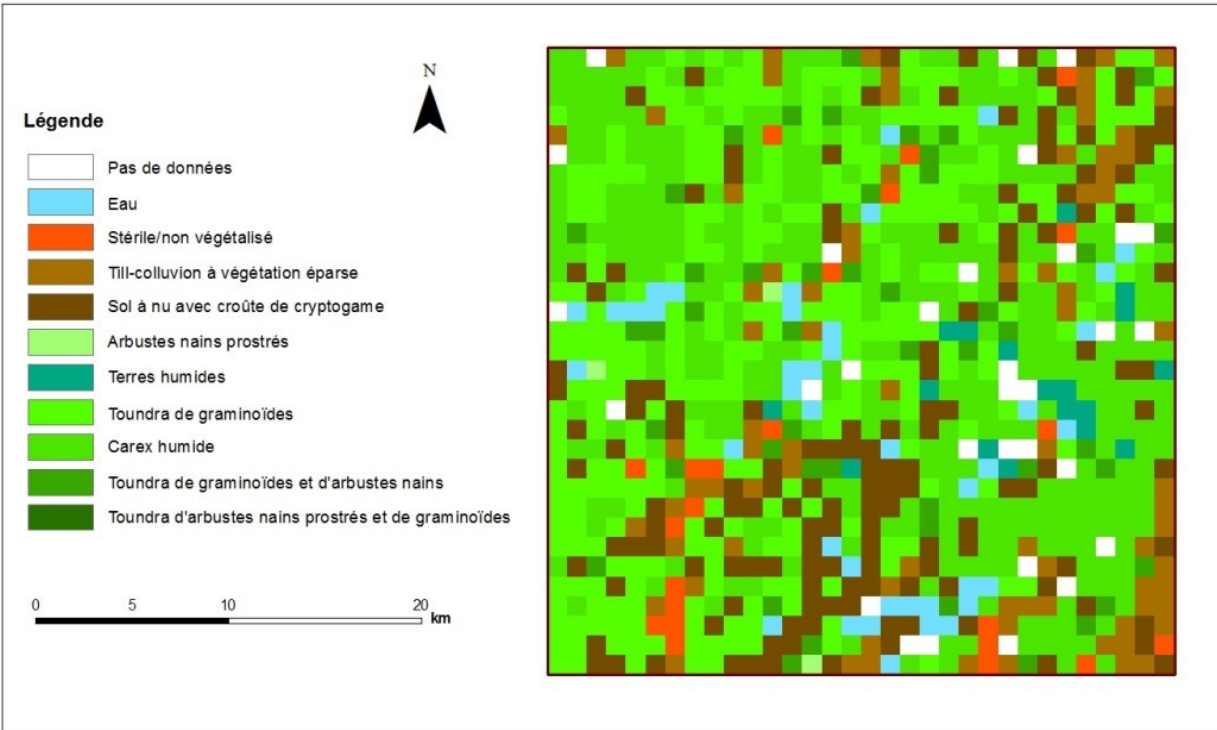
masque a pu être appliqué afin d'éliminer les zones superposées à des glaciers ou à la surface aquatique à l'aide de l'outil *Extract by Mask*. En sélectionnant les informations de pente à l'intérieur des deux zones de simulations, il sera possible de produire une grille de la valeur de pente pour chaque cellule. Ces valeurs pourront alors être utilisées afin de coupler la donnée de pente aux simulations de l'ECD pour chaque cellule d'environ 1 km de résolution spatiale.

Afin de coupler l'occupation de sol aux simulations, la première étape a été d'identifier les types de couverture présents dans les deux zones de simulation. La Figure 3.7 présente un organigramme de l'ensemble des traitements effectués pour la création de la donnée d'occupation du sol à environ 1 km de résolution spatiale.

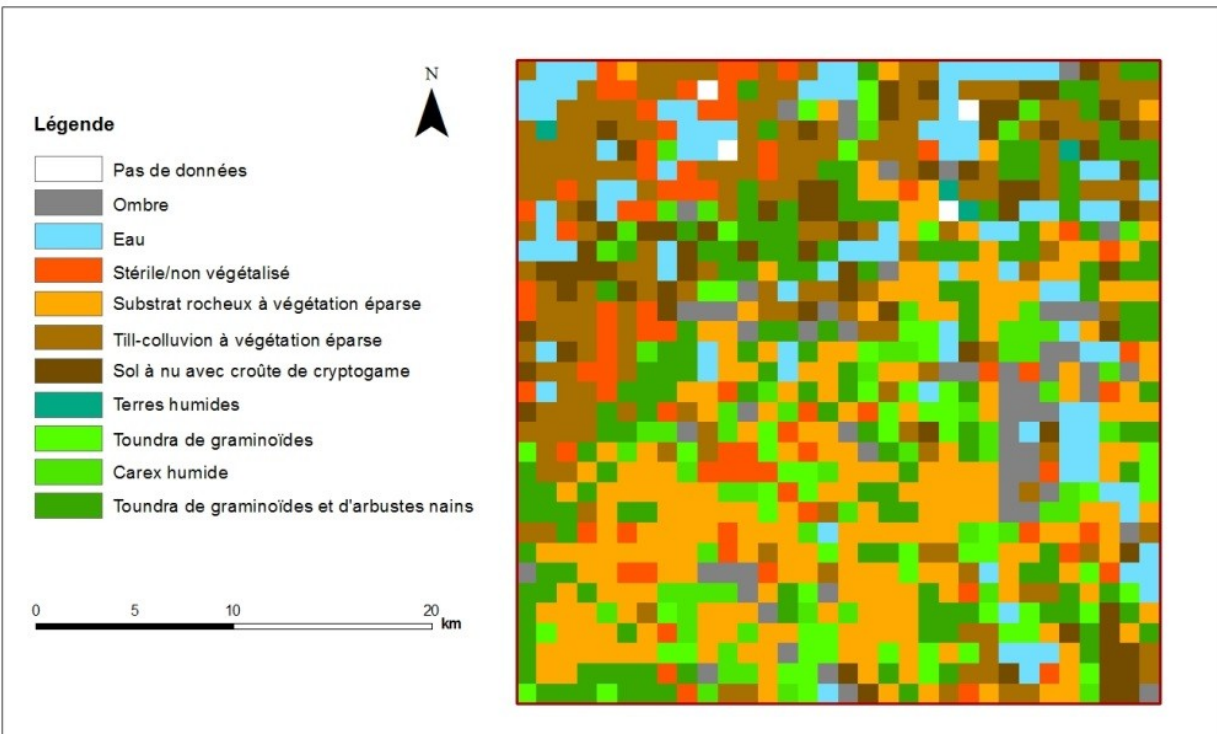


**Figure 3.7: Organigramme de la création de la couche de l'occupation du sol**

Comme pour la pente, l'outil *Extract by Mask*, appliqué aux données circa 2000-vectorielle, a été utilisé afin de conserver uniquement l'information à l'intérieur des zones de simulation. Les couches ont par la suite été converties du format vectoriel vers matriciel afin de pouvoir produire l'information de l'occupation du sol pour des pixels de 1014.47 m de résolution spatiale, tout en précisant que les cellules soient alignées avec les données NARR dans l'environnement de l'outil. Les figures 3.8 et 3.9 présentent respectivement la carte de l'occupation du sol pour la zone de simulations sur Banks et sur Victoria. Les types d'occupation de sol sont très différents entre les deux zones. La zone Banks se compose majoritairement de couverture végétale, alors que la zone Victoria est en majorité composée de couvertures rocheuse et stérile. Ensuite, il a été créé pour chaque couche un nouvel attribut afin d'y ajouter la valeur d'albédo associée à chaque type d'occupation du sol. Cette étape consiste en la sélection des types d'occupation présents un à un et d'y attribuer la valeur d'albédo correspondante à l'aide de l'outil *Field Calculator*.

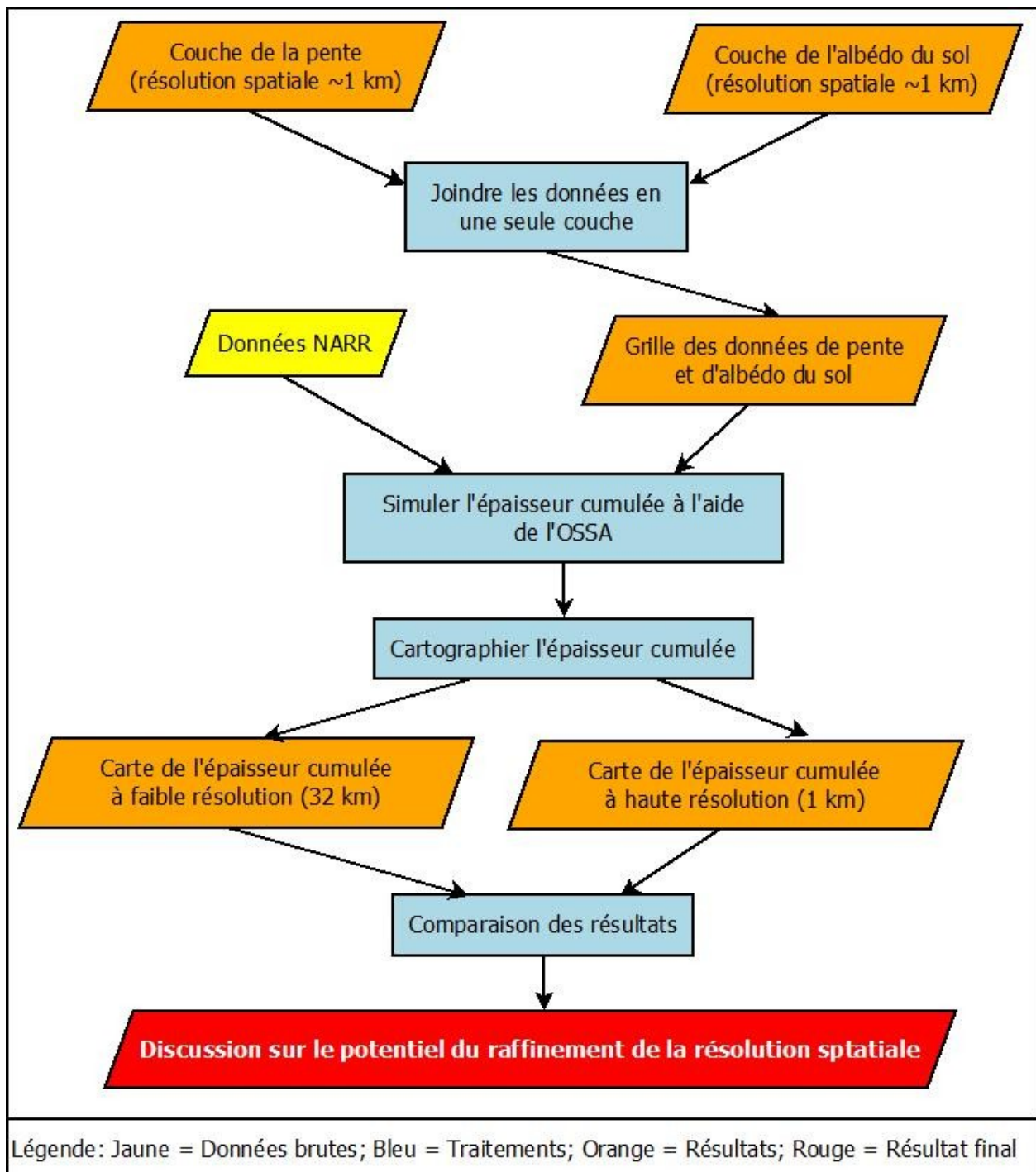


**Figure 3.8: Occupation du sol pour la zone de simulation de l'Île Banks**



**Figure 3.9: Occupation du sol pour la zone de simulation de l'Île Victoria**

Pour l'évaluation du potentiel du raffinement spatial de l'approche utilisée, la Figure 3.10 présente un organigramme simplifié de ce qui a été fait.



**Figure 3.10: Organigramme de l'évaluation du potentiel du raffinement spatial**

Premièrement, une simulation pour chaque zone a été lancée afin d'obtenir la valeur de référence d'épaisseur cumulée à basse résolution. Ces résultats serviront de comparaison afin d'évaluer le

potentiel de l'approche utilisée. L'OSSA a été utilisé pour ces simulations en conservant les valeurs définies par défaut. Deuxièmement, pour les simulations à haute résolution, elles ont été lancées une après l'autre en entrant manuellement les valeurs de pente et d'albédo du sol dans le codage MATLAB. L'OSSA ne permet pas l'entrée de plusieurs valeurs de pente et d'albédo du sol simultanément. Les simulations ont été faites seulement sur la moitié nord de chaque zone, donc sur une zone de 16 x 32 km, ce qui fait un total de 512 cellules par zones. Afin de faciliter l'exécution de l'ensemble des simulations, une grille pour chaque zone a été conçue afin de rassembler les valeurs de pente et d'albédo du sol dans une même couche. Pour ce faire, la couche de pente de chaque zone, représentant déjà une zone NARR quadrillée à haute résolution, a été convertie en format vectoriel.

Par la suite, les données d'albédo ont été jointes à cette couche quadrillée à l'aide d'une jointure spatiale. Par cette opération, les probabilités d'erreur dans l'attribution des couples de données (pente, albédo) sont réduites puisque ces informations ont été consultées dans une seule couche au lieu de deux. Ensuite, un nouvel attribut représentant l'épaisseur cumulée a été ajouté à la couche. Après chaque simulation, le résultat d'ECD compris dans la couche *shapefile* créée pourra être ajouté sous cet attribut en mode édition dans le logiciel ArcGIS. À la suite des simulations, une carte a été produite pour chaque zone afin d'illustrer la variabilité spatiale de l'épaisseur cumulée, ainsi que la variabilité des conditions d'accès à la nourriture pour le caribou de Peary. Finalement, il a été calculé différentes valeurs statistiques telles que la moyenne, écart-type, valeur minimum et valeur maximum pour les résultats obtenus à haute résolution pour chaque zone. Ces résultats seront comparés avec les résultats d'ECD à basse résolution afin de déterminer si le raffinement spatial effectué dans cet essai permet une variation de l'épaisseur cumulée significative et fournirait ainsi une information sur la micro-variabilité locale du caribou de Peary. Ce résultat permettra de conclure si l'approche employée possède un potentiel afin d'être appliquée à l'ensemble de l'habitat du caribou de Peary.



## 4. Résultats

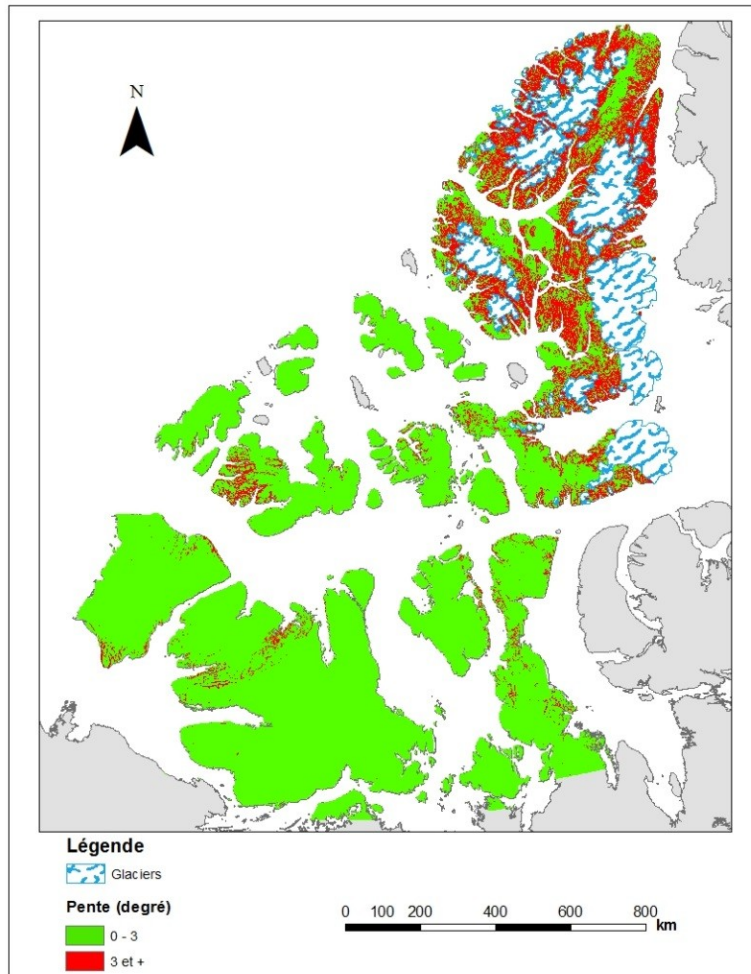
### 4.1. Sensibilité du seuil de densité à la topographie

La sensibilité de l'ECD à la pente a pu être vérifiée à la suite des simulations du couvert nival dans deux zones tests en imposant des valeurs de pente entre 0° et 10° en entrée de l'OSSA. Les résultats de ces simulations sont montrés au Tableau 4.1 ci-dessous.

**Tableau 4.1: Variation de l'ECD par rapport à la pente pour 2013**

Pente (degrés)	ECD (cm)	
	Première zone test (coordonnées point central (73.9844, -122.6475))	Deuxième zone test (coordonnées point central (72.5945, -123.4570))
0	179.43	444.18
1	178.83	444.27
2	186.61	442.49
3	184.26	341.08
4	84.00	99.78
5	0.00	122.38
6	0.00	141.21
7	59.03	156.78
8	75.46	110.90
9	101.89	94.20
10	90.88	86.39

Pour les deux zones, la variation d'ECD est faible pour les simulations avec une pente entre 0° à 2°, soit une différence maximale de 7.78 cm. La variation est plus importante à partir de 4° pour la première zone (différence de 100.26) et à partir de 3° pour la deuxième zone (différence de 101.41). Il a été choisi un seuil de pente à 3° comme la valeur de pente minimale pouvant affecter significativement l'épaisseur cumulée simulée. Ce seuil pourra également être confirmé ou affiné avec les résultats des simulations à haute résolution (1 km). Telle qu'illustrée à la Figure 4.1, une classification de la pente (résolution spatiale de 1 km) selon un seuil à 3° a été effectuée afin de démontrer les zones sur le territoire où l'ajout de données de pente aux simulations affecte les résultats d'ECD. En prenant en considération seulement la pente, le nord de l'archipel arctique canadien ainsi que l'ouest du complexe de Melville sont les portions du territoire où le raffinement spatial monterait probablement le plus de variation.



**Figure 4.1: Classification de la pente à une résolution de 1 km selon un seuil de 3°**

Dans les deux zones choisies pour les simulations à haute résolution, le Tableau 4.2 présente certaines statistiques par rapport à l'ensemble des valeurs de pente à 1 km de résolution spatiale incluse dans la zone de 16 x 32 km.

**Tableau 4.2: Statistiques des valeurs de pentes présentes dans les deux zones de simulations à haute résolution**

	Pente (degrés)	
	Zone Banks (coordonnées point central (73.8762, -119.7061))	Zone Victoria (coordonnées point central (72.0318, -111.7429))
<b>Moyenne</b>	1.34	2.15
<b>Écart-type</b>	0.71	1.17
<b>Minimum</b>	0.01	0.02
<b>Maximum</b>	5.78	9.57
<b>Nombre de cellules avec une pente <math>\geq 3^\circ</math></b>	52	242

Ces résultats montrent que la zone située sur l'Île Victoria possède une topographie plus importante et variable que la zone sur l'Île Banks en raison d'une moyenne et d'un écart-type plus important. Également, l'intervalle des valeurs de pente inclus dans la zone Victoria est plus étendu par la présence de pentes allant jusqu'à 9.57°. En considérant la sensibilité de l'ECD à la pente, les résultats issus des simulations à haute résolution devraient montrer une plus grande hétérogénéité pour la zone Victoria qui compte un plus grand nombre de cellules de pente supérieure à 3° que la zone Banks.

#### 4.2. Sensibilité du seuil de densité à l'occupation du sol

En ce qui concerne la sensibilité de l'ECD par rapport à l'occupation du sol, il a été choisi de considérer uniquement l'albédo du sol comme paramètre représentatif des différents types de couverture du sol. Afin d'évaluer la sensibilité de l'ECD à l'albédo du sol, différentes simulations ont été faites avec différentes valeurs d'albédo en entrée du modèle SNOWPACK. Le Tableau 4.3 présente les résultats de ces simulations. Les deux zones de test utilisées sont les mêmes que celles du test de sensibilité à la pente.

**Tableau 4.3: Variation de l'ECD par rapport à l'albédo du sol pour 2013**

Albédo	ECD (cm)	
	Première zone test	Deuxième zone test
0.10	6626.45	861.81
0.15	6626.46	861.69
0.20	4718.20	863.69
0.25	3183.63	863.75
0.30	3120.86	863.74
0.35	3166.93	770.84
0.40	1736.57	68.03

Bien que l'intervalle des valeurs d'ECD soit très différent entre les deux zones de test, ces résultats montrent une importante variabilité. La première zone montre plusieurs diminutions importantes de la valeur d'ECD à partir d'une valeur d'albédo de 0.15. Par contre, pour la deuxième zone test, c'est seulement à partir d'un albédo de 0.30 qu'une diminution importante d'ECD est observée. Ces résultats confirment l'intérêt d'utiliser le paramètre d'albédo du sol dans le raffinement spatial, puisqu'une légère différence dans l'albédo du sol peut entraîner une différence importante dans le résultat d'épaisseur cumulée.

Même si la relation entre l'albédo du sol et l'ECD est la même pour les deux zones, cette diminution ne se produit pas à partir du même seuil. Par exemple, la différence d'ECD entre les valeurs albédo de 0.15 et 0.20 est de 1908 cm pour la première zone, mais seulement de 2 cm pour la deuxième zone de test. Ces résultats démontrent donc que le couvert nival est sensible à la valeur d'albédo du sol, mais que cette sensibilité possède une variation spatiale pouvant être influencée par d'autres facteurs que ceux pris en compte dans cette étude. Selon les résultats obtenus, il semble que l'ECD varie beaucoup plus dans une zone avec une épaisseur cumulée élevée.

Le Tableau 4.4 montre les différents types d'occupation de sol présents dans les deux zones de simulations accompagnées de la valeur d'albédo associée. Le Tableau 4.4 consiste en une version simplifiée du tableau présenté à l'Annexe 3 : qui inclut une description détaillée de chaque type d'utilisation du sol. Les valeurs possibles d'albédo dans les deux zones de simulation à haute résolution varient entre 0.13 et 0.20.

**Tableau 4.4: Valeur d'albédo associée à chaque type d'occupation de sol**

Nom de l'occupation de sol	Albédo
Stérile/non végétalisé	0.17
Substrat rocheux à végétation éparse	0.17
Till-colluvion à végétation éparse	0.16
Sol à nu avec croûte de cryptogames - éminences dues au gel	0.17
Terres humides	0.13
Toundra de graminoides parsemée de buttes de gazon	0.20
Carex humide	0.18
Toundra de graminoides et d'arbustes nains, humide à sèche sans butte de gazon	0.20
Toundra d'arbustes nains prostrés et de graminoides	0.20

Le Tableau 4.5 montre le nombre de cellules associées aux différentes valeurs d'albédo possible comprises dans chaque zone de simulation. Ces résultats démontrent une hétérogénéité relative dans chaque zone où la majorité des cellules sont réparties selon deux classes. Ces classes sont également différentes entre les deux zones : la zone Banks possède une majorité de cellules avec un albédo de 0.16 et 0.17, alors que la zone Victoria possède en majorité de cellules d'albédo de 0.18 et 0.20. Selon le type de sol correspondant à ces valeurs d'albédo, la zone Banks comprend un environnement en majorité végétalisé, donc avec un sol organique, vu le grand nombre de cellules de couverture du sol de type carex humide et toundra. La zone Victoria, quant à elle,

représente une région majoritairement composée d'un sol minéral vu la présence de plusieurs cellules à couverture du sol de type stérile, substrat rocheux et till-colluvion.

**Tableau 4.5: Variation des valeurs d'albédo du sol pour les deux zones de simulations pour 2013**

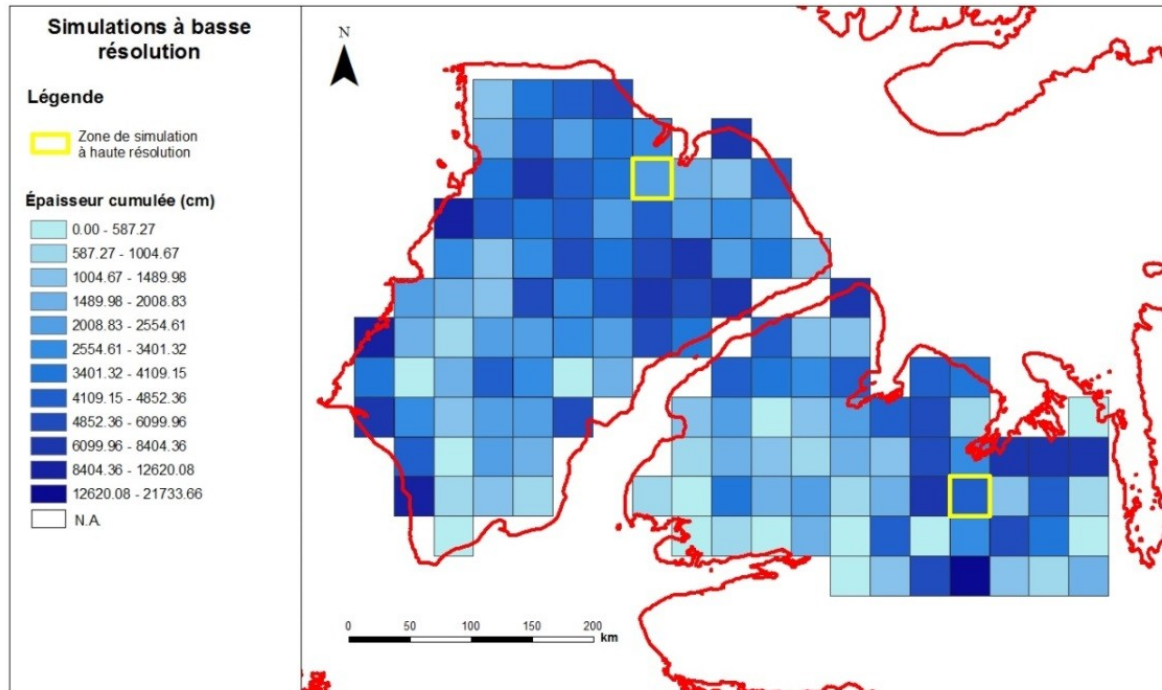
Valeur d'albédo	Nombre de cellules	
	Zone Banks	Zone Victoria
<b>0.13</b>	0	3
<b>0.16</b>	17	150
<b>0.17</b>	44	139
<b>0.18</b>	244	9
<b>0.20</b>	190	117
<b>Total</b>	495	418

Le nombre total de cellules est différent pour les deux zones et inférieur au nombre maximal possible de 512 cellules par zone. Le nombre est inférieur en raison des cellules associées à une couverture du sol de type 'pas de donnée' ou 'eau' qui ne sont pas maintenues dans l'analyse. Si la couverture est de type aquatique, il n'est pas pertinent de simuler cette zone vu qu'on n'y retrouvera pas de couvert neigeux et que les caribous n'y retrouveront pas de nourriture.

### 4.3. Spatialisation à 32 km

L'OSSA a été utilisé afin de produire la cartographie de l'épaisseur cumulée à basse résolution (32 km), soit la résolution spatiale des données NARR. La Figure 4.2 présente les résultats pour l'Île Banks et la section nord-ouest de l'Île Victoria.

La carte ci-dessous montre une grande hétérogénéité dans l'ECD sur l'ensemble du territoire d'étude. La moyenne d'épaisseur cumulée simulée à 32 km de résolution est de 3301.80 cm et l'intervalle des valeurs possibles est de 0 à 21733.66 cm. Les encadrés jaunes sur la Figure 4.2 montrent les deux zones choisies pour le raffinement spatial. Les valeurs d'ECD obtenues pour ces deux zones est de 2356.89 cm pour la zone Banks et de 4852.36 cm pour la zone Victoria. Ces résultats ont été simulés avec un albédo du sol de 0.20 et une pente nulle, ce qui correspond aux valeurs par défaut désignées dans l'OSSA de Ouellet *et al.* (2016). Les simulations à faible résolution ne peuvent pas intégrer des paramètres du terrain vu que ceux-ci y sont trop variables. Il est important de considérer que les résultats à 32 km de résolution ne correspondent pas à une valeur d'ECD de référence. Ces résultats serviront plutôt de base de comparaison afin de déterminer si la méthode de raffinement spatiale appliquée démontre de la variabilité.



**Figure 4.2: Carte de l'ECD à basse résolution spatiale (32 km) pour 2013**

Il est possible d'observer un effet de bordure sur la carte, où les pixels superposés aux côtes possèdent généralement une ECD plus élevée. Bien que seulement les cellules recouvrant au moins 60 % de la surface terrestre aient été conservées, certains pixels surestiment probablement l'ECD. Les données météorologiques NARR utilisées correspondront à l'information pour l'ensemble de la zone de 32 x 32 km, donc intégreront la météorologie dans la zone océanique. Ceci induit donc une température plus froide, une plus grande humidité et des vents plus forts, ce qui correspond à des conditions propices à la formation de couches de neige de forte densité.

#### 4.4. Spatialisation à 1 km

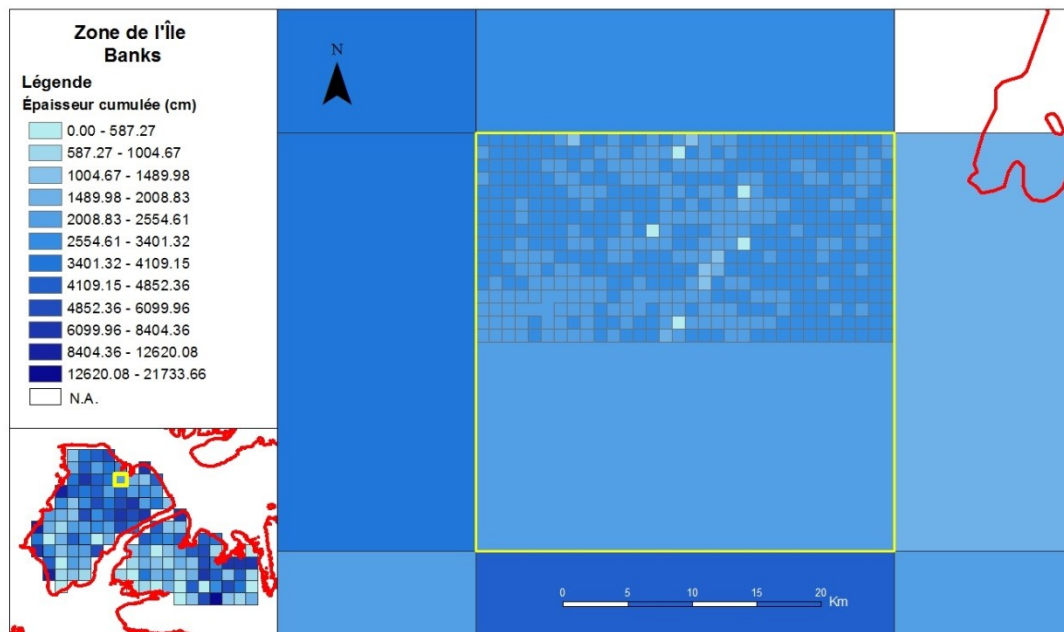
Pour les deux zones choisies pour le raffinement spatial, des simulations à une résolution de 1 km ont été effectuées en intégrant la valeur de pente et d'albédo. Pour chaque zone, différentes statistiques ont été produites pour l'ensemble des résultats, mais également regroupées selon la valeur d'albédo attribuée. Les statistiques produites à partir des résultats d'ECD de la zone située sur l'Île Banks sont présentées au Tableau 4.6 ci-dessous. Presque l'ensemble des ECD moyennes sont similaires, mis à part les cellules d'albédo de 0.20 qui sont en moyenne plus faibles d'environ 350 cm. Par comparaison à l'ECD simulée à basse résolution (2356.89 cm), l'ECD moyenne des cellules de 0.20 d'albédo montre un résultat différent des autres. L'ECD moyenne est plus faible

que l'ECD à basse résolution et également d'un écart moins important. Les autres classes montrent, quant à elles, une ECD plus élevée d'au moins 221.98 cm.

**Tableau 4.6: Statistiques sur les résultats d'ECD simulées à haute résolution (1 km) pour la zone Banks pour 2013**

Albédo du sol	Zone Banks				
	0.16	0.17	0.18	0.20	Moyen
Moyenne	2578.87	2642.86	2640.24	2272.90	2497.49
Écart-type	266.91	5.64	145.45	384.90	317.58
Moyenne des écarts absolus avec ECD à 32 km	319.35	285.97	306.56	86.49	220.63
Moyenne des écarts avec ECD à 32 km	221.98	285.97	283.35	-83.99	140.60
Nombre de cellules	16	45	244	190	495

La Figure 4.3 présente une carte illustrant la variabilité des résultats à haute résolution, ainsi qu'une comparaison entre ces derniers et les résultats environnants à faible résolution.



**Figure 4.3: Cartographie de l'ECD simulée à haute résolution pour la zone Banks pour 2013**

Certaines cellules de 1 km de résolution ont un résultat de type non applicable (N.A.) en raison que l'occupation du sol de ces cellules qui peut être de type 'eau' ou 'pas de données'.

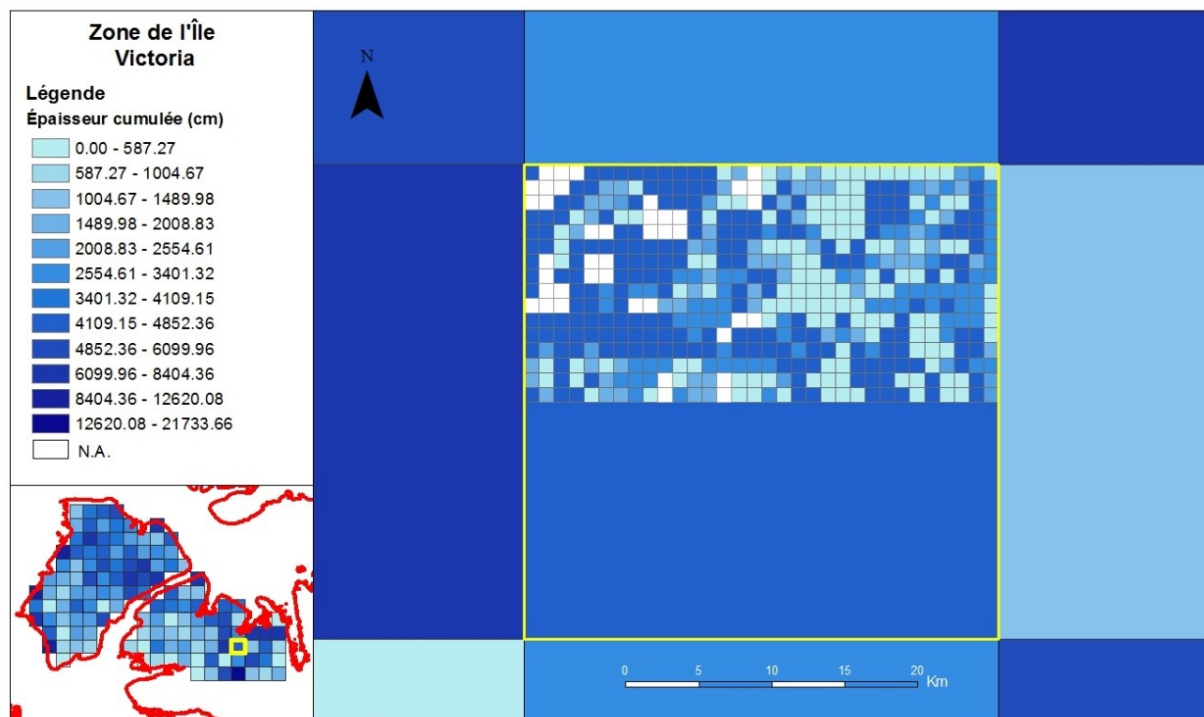
Pour la zone située sur l'Île Victoria, des résultats beaucoup plus variables que ceux de la zone Banks y sont retrouvés, tel qu'illustré au Tableau 4.7.

**Tableau 4.7: Statistiques sur les résultats d'ECD simulées à haute résolution pour la zone Victoria pour 2013**

	<b>Zone Victoria</b>					
<b>Albédo du sol</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>0.17</b>	<b>0.18</b>	<b>0.2</b>	<b>Moyen</b>
<b>Moyenne</b>	3885.62	3377.26	3319.78	3575.83	2116.12	2970.25
<b>Écart-type</b>	1229.70	1773.99	1913.08	2027.31	1177.71	1771.87
<b>Moyenne des écarts avec ECD à 32 km</b>	-966.74	-1475.10	-1532.58	-1276.53	-2736.24	-1882.11
<b>Nombre de cellules</b>	3	150	139	9	117	418

Dans le cas de la zone Victoria, la moyenne des écarts absolus avec l'ECD à faible résolution n'est pas affichée dans le Tableau 4.7 simplement parce que la valeur est similaire sauf pour le fait qu'elle soit positive. La valeur maximale d'ECD obtenue est de 4614.23 cm, soit 268.13 cm de moins que la valeur d'épaisseur cumulée simulée à basse résolution (4852.36 cm). Les moyennes d'ECD associées à chaque valeur d'albédo sont plus variables que pour la zone Banks, mises à part les classes 0.16 et 0.17 qui sont relativement similaires. La moyenne d'ECD pour la classe de 0.20 d'albédo est également plus faible que les autres classes. Les résultats sont également beaucoup plus variables pour cette zone de simulation avec un écart-type global de 1771.87 cm et d'au minimum 1177.71 cm selon la classe d'albédo. L'écart avec la valeur d'ECD à faible résolution est également plus important que la zone Banks avec, en moyenne, une valeur plus faible de 1882.11 cm. La Figure 4.4 présente une carte de la superposition des résultats d'ECD obtenus à haute résolution et basse résolution pour la zone Victoria.





**Figure 4.4: Cartographie de l'ECD simulée à haute résolution pour la zone Victoria pour 2013**

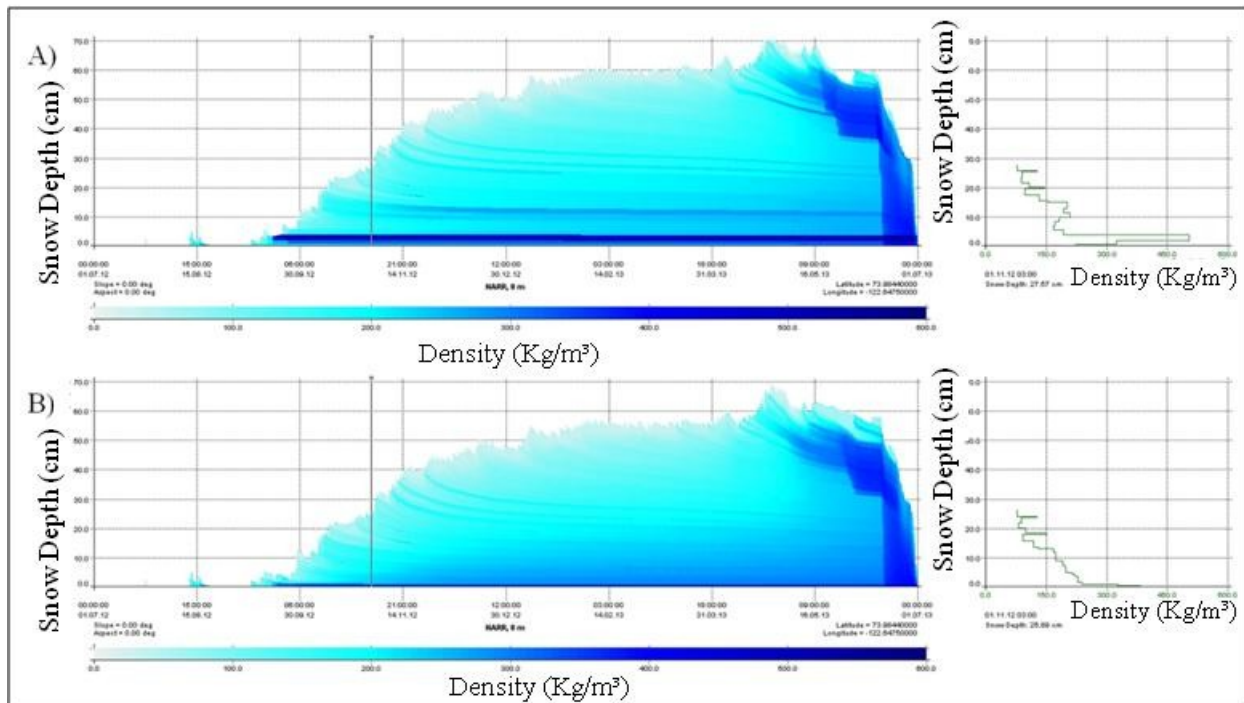
## 5. Discussion

### 5.1. Sensibilité de l'ECD à la pente et l'albédo du sol

Les résultats concernant la sensibilité de l'épaisseur cumulée à la pente montrent une relation où plus la pente est élevée, plus l'ECD est faible. Cette relation est logique, puisque dans un terrain plat, l'action du vent sera plus importante, ce qui induira une augmentation de la densité. Les résultats à haute résolution (1 km) confirment le seuil identifié à  $3^\circ$  comme étant la pente minimale ayant une influence significative sur l'épaisseur cumulée. Pour les résultats de l'Île Banks, les résultats en dessous de  $3^\circ$  restent relativement similaires, outre une différence d'environ 300 cm selon la valeur d'albédo associée. C'est entre  $3.00^\circ$  et  $3.02^\circ$  que la plus grande différence est observée, soit de 1064.68 cm (diminution de 2648.82 cm à 1572.90 cm). Le phénomène est similaire pour les résultats de l'Île Victoria, où pour une même valeur d'albédo du sol, l'ECD passe de 4614.23 cm à 1539.56 cm (diminution de 3074.67 cm) en raison d'une faible augmentation de la pente de  $2.9909^\circ$  à  $3.0653^\circ$ . Ces résultats supplémentaires confirment effectivement que les pentes au-dessus de  $3^\circ$  montrent une influence significative, à la baisse, sur l'ECD. Bien que l'ECD diminue généralement à partir de  $3^\circ$ , l'envergure de cette diminution n'est

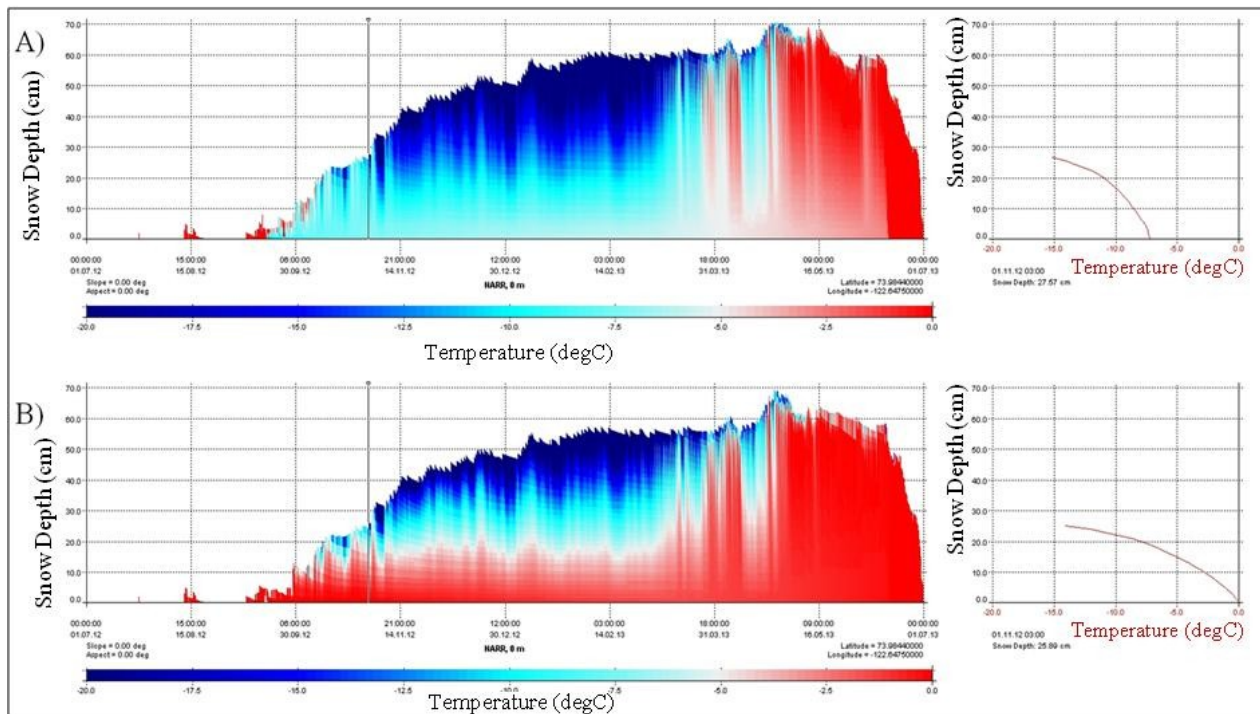
pas constante entre les cellules d'une même valeur d'albédo ou entre les zones. Cette différence suggère que d'autres facteurs non considérés dans cette étude peuvent intervenir dans la simulation du couvert nival.

Les résultats issus du test de sensibilité de l'ECD à l'albédo du sol démontrent une relation où plus l'albédo du sol est élevé, plus l'épaisseur cumulée sera faible. Cette relation correspond à ce qui était attendu, puisqu'un sol avec un albédo plus faible va absorber davantage les rayonnements solaires, donc de chaleur. Les premières précipitations de neige se déposeront donc sur un sol plus chaud, ce qui induira une humidité plus importante dans cette couche de neige. L'arrivée de température plus froide créera donc une couche avec une densité plus élevée que pour une couche de neige plus sèche. Après visualisation des fichiers de couches dans l'outil *SNGui* provenant des simulations avec un albédo forcé de 0.10 et 0.40, il a été possible de comprendre davantage la raison de la variation verticale de cette sensibilité. Comme illustré à la Figure 5.1, les deux graphiques montrent une couche de neige à forte densité (c.-à-d. une croûte de glace) à la base du couvert nival. Cependant, la Figure 5.1-A possède une couche d'épaisseur beaucoup plus importante que la Figure 5.1-B.



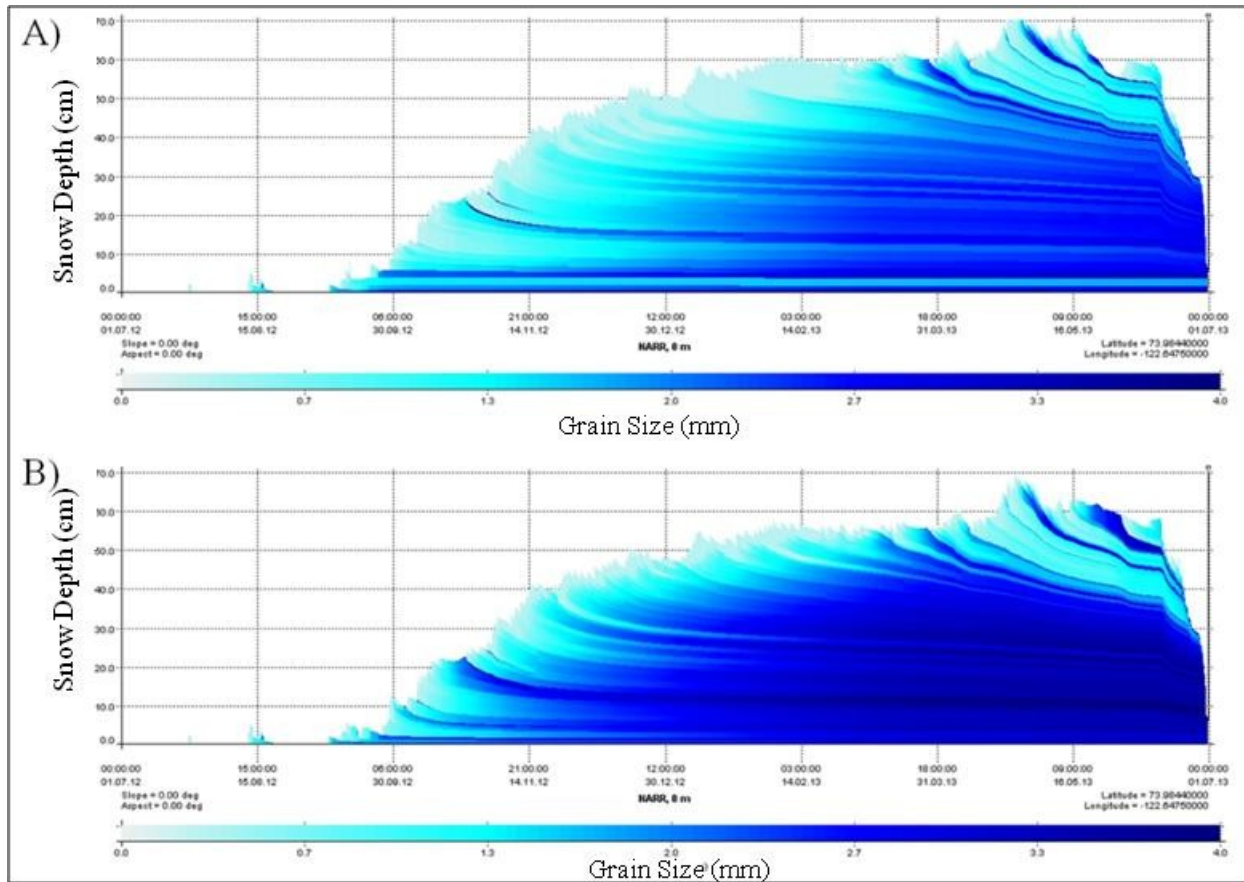
**Figure 5.1: Visualisation dans SNGui de la densité : A) Albédo de 0.10; B) Albédo de 0.40**

Pour le couvert nival, le sol est une grande source de flux géothermique. La présence d'une importante croûte de glace bloque donc les échanges thermiques entre le sol et la neige. La Figure 5.2 présente ce phénomène où la Figure 5.2-A montre des températures beaucoup plus faibles à la base du manteau de neige que la Figure 5.2-B, où la couche de glace est d'une épaisseur moindre.



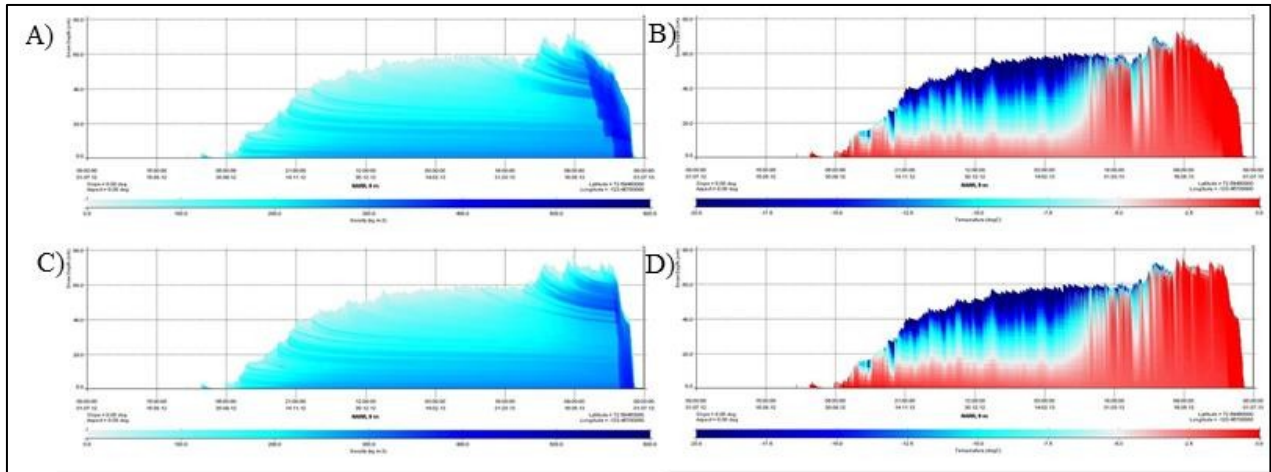
**Figure 5.2: Visualisation dans SNGui de la température A) Albédo de 0.10; b) Albédo de 0.40**

Vu que le sol contribue beaucoup moins aux échanges thermiques au travers du couvert nival, le métamorphisme des grains est grandement diminué. Comme la montre la Figure 5.3, les simulations du couvert nival forcées avec un albédo du sol de 0.10 (Figure 5.3-A) montrent une taille des grains en général beaucoup plus faible que lorsque l'albédo est de 0.40 (Figure 5.3-B). Un gradient de température fort favorisera un métamorphisme des grains de neige devenant plus gros. En conséquence de la présence d'une importante couche de glace tôt en période hivernale, le métamorphisme des grains est ralenti et résulte en une taille de grains généralement plus faible.



**Figure 5.3: Visualisation dans Sngui de la distribution de la taille des grains A) Albédo de 0.10; b) Albédo de 0.40**

La deuxième zone utilisée pour les tests de sensibilité montre un cas où aucune croûte de glace n'est formée. Tel qu'illustré à la Figure 5.4, la situation correspondante à un albédo de 0.10 (Figures 5.4-A et 5.4-B) montre tout de même une densité plus élevée pour les couches près du sol, réduisant les échanges thermiques, mais à une envergure moindre comparée aux exemples présentés aux Figures 5.1, 5.2 et 5.3. La sensibilité de l'ECD est donc variable dans l'espace parce que les conditions météorologiques le sont aussi.



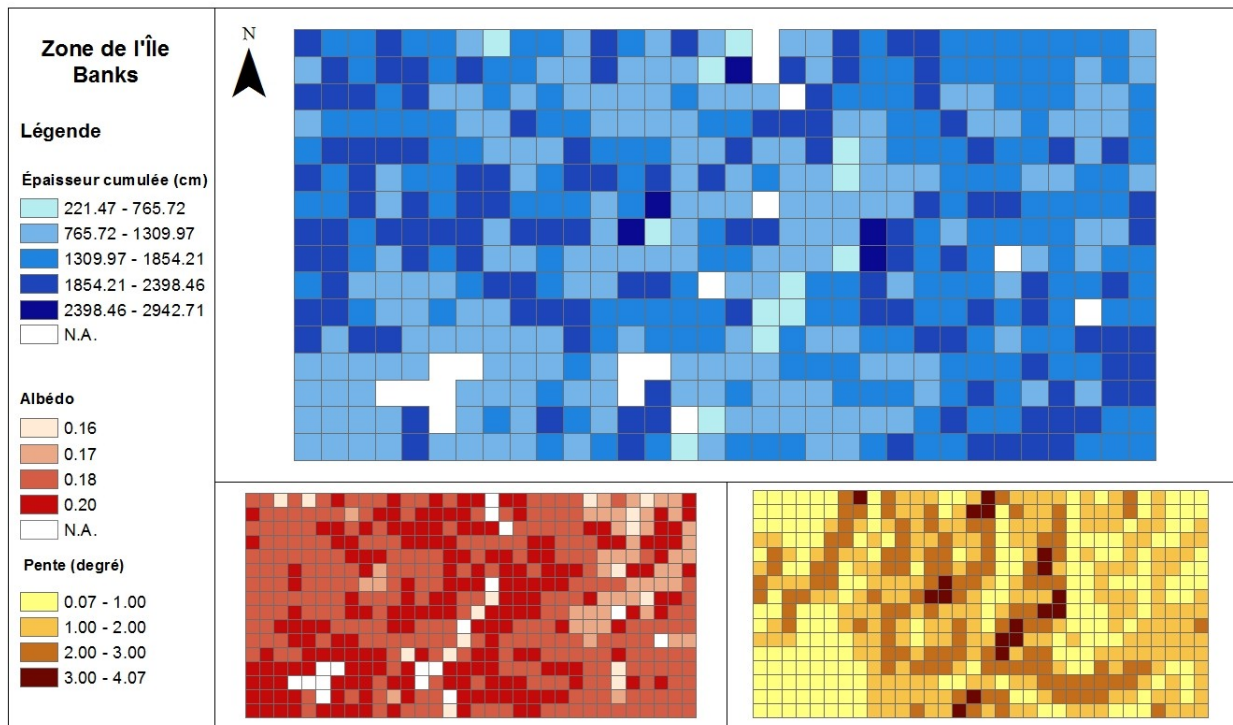
**Figure 5.4: Visualisation dans SNGui de la densité et de la température du couvert nival pour la deuxième zone de test: A)-B) Albédo de 0.10; C)-D) Albédo de 0.40**

La comparaison des résultats des deux zones où la même pente (valeur nulle) et le même albédo est soumis en entrée du modèle montrent qu'il existe évidemment une importante variabilité spatiale induite par des différences dans les données météorologiques NARR. La météorologie de cellules en bordure d'une île contre une autre plus à l'intérieur sera différente, telles que des cellules à différentes latitudes. Ceci confirme donc que bien que certains paramètres puissent être contrôlés en entrée des simulations, les données météorologiques en entrée sont la principale raison de différence entre deux zones et affectent le niveau de sensibilité de l'ECD à l'albédo du sol.

## 5.2. Potentiel de la méthode de raffinement spatial

Les résultats semblent démontrer que la méthode employée par l'utilisation de l'information de la pente et de l'albédo à 1 km de résolution offre un potentiel intéressant pour la simulation du territoire à haute résolution. L'intégration de ces deux paramètres à l'OSSA permet d'augmenter la qualité des résultats produits. D'une part, ce sont des paramètres ayant un effet sur l'épaisseur cumulée tel que démontré par les tests de sensibilité. D'autre part, ce sont des paramètres qui ne pourraient pas être utilisés à une résolution de 32 km, puisqu'il devient incohérent d'associer une seule valeur de pente ou d'albédo du sol à une cellule de 32 km de résolution. Tel que démontré précédemment, des changements minimes dans la valeur de pente et d'albédo peuvent avoir un effet significatif sur le résultat d'épaisseur cumulée. L'ajout de ces deux informations simultanément montre une variabilité intéressante qui pourrait potentiellement aider à l'interprétation et prédiction de l'habitat du caribou de Peary. Pour la pente, une grande majorité

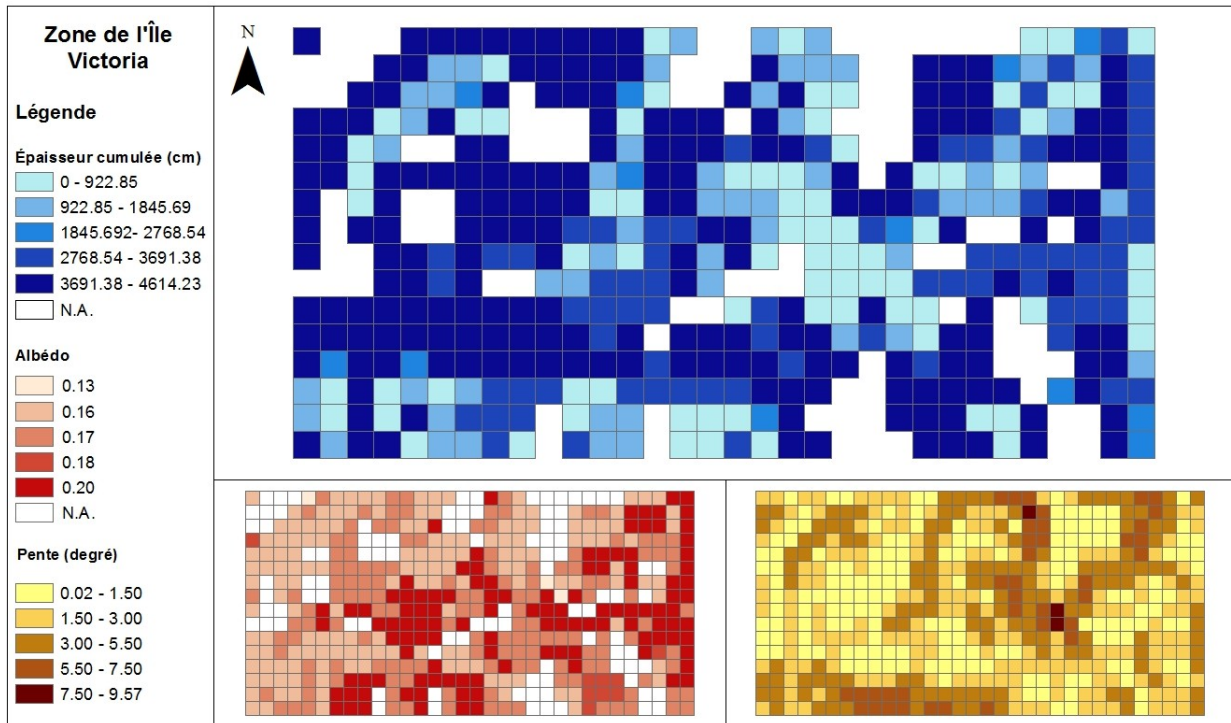
du territoire possède une pente, à 1 km de résolution, en dessous du seuil de pente de 3°. Le raffinement spatial avec seulement la pente n'aurait probablement pas permis un aussi bon potentiel qu'avec la combinaison de l'albédo du sol aux simulations. Comme le montre la Figure 5.5, la variabilité dans la zone de l'Île Banks est beaucoup plus sensible à l'albédo du sol qu'à la pente.



**Figure 5.5: Relation entre les résultats d'ECD et les données de pente et d'albédo du sol pour la zone Banks pour 2013**

En prêtant attention à la légende de la pente, peu de cellules montrent une pente au-dessus de 3°. Par contre, plusieurs cellules montrent un albédo de 0.20 qui correspond à la classe d'albédo s'isolant le plus des autres par rapport aux résultats d'ECD. En excluant les cellules avec une faible ECD ( $ECD \leq 765.72$  cm) associées à des valeurs de pente supérieures à 3°, les cellules avec les résultats d'ECD les plus faibles sont presque entièrement associées à une valeur d'albédo de 0.20. Cette classe d'albédo est également celle ayant une ECD moyenne se rapprochant le plus de la valeur à faible résolution. Ceci est simplement dû au fait que la valeur d'albédo du sol mise par défaut par l'OSSA est de 0.20 également. La zone Banks montre que l'approche de raffinement spatial appliquée démontre une certaine variabilité même dans les zones où le relief est peu accidenté par la sensibilité de l'ECD à l'albédo.

Pour la zone Victoria, il est possible de voir une plus grande variabilité, principalement parce que la pente y est beaucoup plus variable et plus importante que celle de la zone Banks, telle qu'illustrée à la Figure 5.6 ci-dessous.



**Figure 5.6: Relation entre les résultats d'ECD et les données de pente et d'albédo du sol pour la zone Victoria pour 2013**

Dans le cas de la zone Victoria, un peu plus de la majorité des cellules (environ 57.9 %) sont au-dessus du seuil de pente de 3°. En comparant la distribution spatiale de la pente et des résultats d'ECD, les zones où la pente est supérieure à 3° correspondent généralement aux ECD plus faibles. Certaines portions ayant une pente faible démontrent tout de même de la variabilité, mais en raison d'une occupation du sol différent.

La comparaison de ces deux zones montre que la pente correspond à un paramètre influençant davantage la simulation de l'ECD, mais que l'albédo permet tout de même de faire varier l'ECD dans les zones où la pente est plus homogène. La comparaison entre les résultats d'ECD à haute résolution et la référence à basse résolution, montre que les résultats obtenus peuvent être très variables. Donc, puisque les cellules montrent un écart généralement plus grand que 300 cm, il est plausible d'évaluer que la méthode de raffinement spatiale montre un potentiel intéressant pour l'application de cette méthode à l'ensemble du territoire du caribou de Peary. Malgré que ces

résultats puissent démontrer que l'ECD est sensible à l'albédo du sol et à la pente, il n'a pas été possible pour cet essai de chiffrer la corrélation entre ces variables. Des travaux futurs incluront une analyse de corrélation plus approfondie afin de déterminer numériquement la sensibilité de l'ECD aux variables du sol.

## **6. Conclusion**

À la suite de l'analyse des résultats, il a été conclu que tous les objectifs ont été atteints. Les simulations préliminaires ont permis de voir la sensibilité de l'épaisseur cumulée à la topographie et à l'occupation du sol. Même si l'occupation du sol pourrait être paramétrée avec plus de détails, l'utilisation de l'albédo a tout de même montré que des changements minimes peuvent affecter significativement l'épaisseur cumulée. Les relations observées lors des tests de sensibilité ont été également retrouvées dans les résultats d'ECD à haute résolution. L'ajout de l'information de la pente et de l'albédo du sol à OSSA ont permis de produire des simulations à haute résolution (1 km). L'ajout de ces données a été possible, puisque le modèle SNOWPACK permet la modélisation du couvert de neige selon ces paramètres. De plus, les résultats produits du couvert nival sont sensibles à la physique et la dynamique des changements de pente et d'albédo du sol dans la caractérisation des différentes couches du manteau neigeux. Après l'obtention des résultats à une résolution de 32 km et de 1 km pour deux zones de simulation, il a été possible d'en faire la comparaison selon les résultats d'épaisseur cumulée au-delà d'un seuil de densité fixé à  $325 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ . Pour les deux zones choisies, l'écart est relativement élevé. L'épaisseur cumulée varie beaucoup plus entre chaque cellule pour la zone située sur l'Île Victoria en raison de la pente qui y est variable et également plus abrupte que celle de la zone de l'Île Banks. Tout de même, une certaine variabilité est observée concernant les résultats d'ECD de l'Île Banks, mais principalement en raison de la variation de l'albédo du sol qui permet de produire une information tout de même distincte de l'épaisseur cumulée à basse résolution. Ensuite, le potentiel de cette approche de raffinement spatiale a pu être jugé adéquat vu que les résultats à haute résolution permettent l'obtention d'une information beaucoup plus détaillée du territoire.

Finalement, la méthode appliquée permettrait de spatialiser les conditions d'accès à la nourriture à plus grande échelle afin de prévoir la micro-variabilité dans la distribution des caribous selon les conditions météorologiques, mais aussi selon les caractéristiques du terrain. En considérant que les simulations à 32 km de résolution ne prennent pas en compte la pente, les zones avec une



grande proportion de pentes plus grandes que 3° montreront des résultats très variables. Par exemple, en se référant aux résultats de Ouellet *et al.* (2016) présentées à la Figure 2.7, plusieurs cellules de haute épaisseur cumulée sont retrouvées dans le nord de l'archipel arctique canadien. Ces régions, telle qu'illustrée à la Figure 4.1, sont composées d'une grande proportion de cellules de pente élevée. En simulant l'épaisseur cumulée à haute résolution pour ces zones où les conditions d'accès à la nourriture sont défavorables ( $ECD > 7000$  cm), les conclusions posées pourraient être différentes. En considérant la sensibilité de la pente observée pour ce projet, une cellule montrant des conditions défavorables, lorsque simulée avec une pente nulle, a des chances de montrer un résultat de conditions favorables en simulant avec une pente plus grande que 3°. Vu que la pente y est très importante dans l'ensemble de cette cellule, les cellules des régions montagneuses seront associées à des ECD beaucoup plus faibles et prédiront que les caribous migreront probablement vers ces cellules. Donc, au lieu de prédire que les caribous migreront en dehors d'une cellule de 32 km de résolution, il sera possible de prédire plutôt leur déplacement et distribution dans cette même zone.

Tel que mentionné par Environnement Canada (2016), les caribous préfèrent les zones en forte de pente afin de se nourrir en saison hivernale. Les résultats produits durant cet essai appuient ces observations en confirmant que pour une même zone de données NARR, les cellules de pente plus élevée montrent une épaisseur cumulée plus faible et, donc, des conditions d'accès à la nourriture plus favorables. Les zones de végétation où l'albédo du sol y est plus élevé sont également les cellules où l'épaisseur cumulée est la plus faible. Bien que l'objectif des simulations est la spatialisation des conditions d'accès à la nourriture, les zones où l'albédo du sol est élevé, par exemple la toundra, seront supposément des zones où la nourriture du caribou risque d'y être en plus grande abondance. À l'inverse, les zones décrites pour une occupation du sol de type substrat rocheux et associée à des valeurs d'albédo du sol plus faibles seront probablement beaucoup plus pauvres en nourriture. Cette observation laisse entrevoir que l'information d'albédo du sol soit, en plus d'être relié aux conditions du couvert nival et d'accès à la nourriture, relié fortement à la concentration de nourriture présente. L'OSSA à haute résolution pourrait donc être un outil intéressant afin lier les conditions d'accès à la nourriture au potentiel d'habitat du caribou de Peary.

## 7. Recommandations

D'après les résultats produits lors de cet essai, la méthode de raffinement spatial des simulations de l'épaisseur cumulée à une résolution de 1 km montre du potentiel par la création de résultats plus riches que ceux produits à une résolution de 32 km. L'ajout de l'information de la pente et de l'albédo ont pu démontrer que l'ECD obtenu à 1 km fournit une information plus détaillée sur les conditions d'accès à la nourriture pour le caribou de Peary. Par contre, l'outil utilisé n'est pas optimisé pour les simulations à haute résolution autant au niveau des données en entrée que les résultats en sortie. Bien qu'une couche vectorielle de l'ensemble des cellules à 1 km de résolution contenant l'information de la pente et de l'albédo du sol fut créée, ces informations devaient, quant à elle, être ajoutées manuellement dans le codage responsable de la création du fichier de couche (\*.sno). Chaque simulation demandait environ 4 minutes en incluant la modification des paramètres de pente et d'albédo du sol. Ce temps peut paraître court, mais pour la simulation de l'ensemble du territoire du caribou de Peary, il demanderait beaucoup trop de temps pour obtenir les résultats d'une seule année. Si on prend en compte que le territoire du caribou de Peary se compose de 1280 cellules de données NARR qui se divisent en 1024 cellules d'environ 1 km (1 310 720 cellules), il faudrait environ 3 932 160 minutes, soit un peu plus de 2730 jours sans arrêt pour simuler l'ensemble des cellules pour une seule année. Le temps de traitement serait alors beaucoup trop long surtout que, dans une perspective de changements climatiques, il devient intéressant de simuler plusieurs années afin de démontrer des changements dans le territoire sur des horizons de 5 ans, par exemple. Afin de faciliter l'automatisation, il serait nécessaire de créer une couche vectorielle de l'ensemble des cellules à 1 km de résolution et contenant l'information de la pente et l'albédo du sol. Cette couche vectorielle de type (centre de chaque cellule de 1 km) pourrait contenir l'information à la zone NARR associée. Il serait alors possible de sélectionner plusieurs cellules à 1 km de résolution pour la spatialisation du couvert nival et l'outil n'aurait qu'à utiliser l'information de la pente et de l'albédo dans les attributs dans la couche des points d'intérêt. Lors de la production de *shapefile* contenant, entre autres, l'information de l'épaisseur cumulée, l'outil utiliserait la couche des points d'intérêt afin de permettre la spatialisation du couvert nival.

Des ajustements similaires à ceux décrits précédemment permettraient le lancement de plusieurs simulations simultanément. Il serait possible alors de lancer des simulations pour plusieurs cellules à la fois, comme, par exemple, pour l'ensemble du territoire ou pour des zones où le

caribou de Peary y est plus menacé. Bien que les simulations puissent être lancées sur un ordinateur de base, l'utilisation d'un super-ordinateur améliorerait la vitesse d'exécution de simulations sur de grands territoires et/ou sur plusieurs années en simultané.

Il faut tout de même considérer que l'objectif principal de ce projet est d'évaluer le potentiel du raffinement spatial. Bien que l'approche utilisée montre du potentiel, les résultats produits ne peuvent pas nécessairement correspondre à la réalité sur le terrain. L'analyse des résultats s'est concentrée principalement sur la comparaison des résultats à faible et haute résolution et non sur l'exactitude de ces résultats du couvert nival par rapport à la réalité sur le terrain. Afin d'améliorer la spatialisation du couvert nival, il serait intéressant d'envisager le développement d'un meilleur paramétrage de l'occupation du sol. L'albédo du sol a été l'unique paramètre utilisé afin de caractériser l'occupation du sol dans les paramètres d'entrée du modèle SNOWPACK. La revue de littérature effectuée pour ce projet n'a pas permis de trouver des références scientifiques abordant directement l'attribution de valeurs relatives à l'occupation du sol pour le Nord canadien. Les données d'albédo du sol utilisées sont donc très arbitraires et nécessiteraient des travaux de validation à partir de données terrains. Bien que l'occupation du sol corresponde à des données d'une précision en deçà d'un kilomètre (environ 31 m) et jugée acceptable pour ce projet, il n'a pas été possible de valider la précision des valeurs d'albédo du sol associées à chaque type d'occupation du sol. Également, d'autres paramètres propres à différents types de couverture du sol pourraient être ajoutés par validation sur le terrain. Un seul paramètre a été utilisé afin de faciliter l'analyse des résultats, mais l'amélioration des couches de sol utilisées et l'ajout de paramètres, telle que la rugosité du sol, pourrait permettre de modéliser avec une meilleure précision les différents types de couverture du sol. D'autres paramètres non reliés à l'occupation du sol pourraient également être ajoutés à la méthode de raffinement spatial, mais n'ont pas été testés dans cet essai. Un exemple de ces paramètres serait l'orientation de la pente avec le soleil, dont sa variation pourrait probablement affecter la densité et l'épaisseur cumulée du couvert nival. Des tests et simulations supplémentaires permettraient de vérifier si ces ajouts au raffinement spatial offriraient une variabilité plus importante entre les valeurs d'ECD à basse et haute résolution et permettraient ainsi de fournir une information plus détaillée et plus exacte des conditions d'accès à la nourriture du caribou de Peary.

## Références

- Banfield, A. W. F. (1961). A revision of the reindeer and caribou, genus Rangifer, National Museum of Canada, Bulletin n° 177, Queen's Printer, Ottawa, 137 p.
- Bartelt, P., et Lehning, M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35 (3), p. 123–145.
- Comiso, J. C., et Hall, D. K. (2014). Climate trends in the Arctic as observed from space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 5 (3), p. 389–409.
- Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2004). Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le caribou de Peary Rangifer tarandus pearyi et le caribou de la toundra Rangifer tarandus groenlandicus (population de Dolphin-et-Union) au Canada – Mise à jour. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xi + 101 p. [http://www.registrelep.gc.ca/status/status\\_f.cfm](http://www.registrelep.gc.ca/status/status_f.cfm).
- Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2011). Unités désignables du caribou (*Rangifer tarandus*) au Canada. COSEPAC, Ottawa, 88 p.
- Côté, K., Madore, J.-B., et Langlois, A. (2015). Uncertainties in the SNOWPACK multilayer snow model for a Canadian avalanche context: sensitivity to climatic forcing data. *Physical Geography* (sous presse).
- Derksen, C., et Brown, R. (2012). Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*, vol. 39 (19), p. 1–6.
- Derksen, C., Smith, S. L., Sharp, M., Brown, L., Howell, S., Copland, L., Mueller, D. R., Gauthier, Y., Fletcher, C. G., et Tivy, A. (2012). Variability and change in the Canadian cryosphere. *Climatic Change*, vol. 115 (1), p. 59–88.
- Dolant, C., Langlois, A., Montpetit, B., Brucker, L., Roy, A., et Royer, A. (2016). Empirical development of a rain-on-snow detection algorithm using passive microwave radiometry, *Hydrological Processes* (sous presse).
- Earth System Research Laboratory (ESRL) (2015). NCEP North American Regional Reanalysis: NARR. In Physical Sciences Division, ESRL, NOAA, Boulder, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>. (Consulté le 1 mars 2016)
- Environnement Canada (2016). Profil d'espèce (Caribou de Peary). In Registre public des espèces en péril, Environnement Canada, Ottawa. [http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/species/speciesDetails\\_f.cfm?sid=823](http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/species/speciesDetails_f.cfm?sid=823). (Consulté le 20 novembre 2015)
- Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D., et Gunn, A. (2011). Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian Journal of Zoology*, vol. 89 (5), p. 419–434.

- Grenfell, T. C., et Putkonen, J. (2008). A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing. *Water Resources Research*, vol. 44 (3), p. 1-9.
- Gunn, A., Miller, F. L., et Thomas, D. C. (1981). The current status and future of Peary caribou *Rangifer tarandus pearyi* on the Arctic Islands of Canada. *Biological Conservation*, vol. 19 (4), p. 283-296.
- Gunn, A., Miller, F. L., et Nishi, J. (2000). Status of endangered and threatened caribou on Canada's arctic islands. *Rangifer*, vol. 20 (5), p. 39-50.
- Gunn, A., Miller, F. L., Barry, S. J., et Buchan, A. (2006). A near-total decline in caribou on Prince of Wales, Somerset and Russell Islands, Canadian Arctic. *Arctic*, vol. 59 (1), p. 1-13.
- Hansen, B. B., Aanes, R., Herfindal, I., Kohler, J., Sæther, B. E., et Oli., M. K. (2011). Climate, icing, and wild arctic reindeer: Past relationships and future prospects. *Ecology*, vol. 92 (10), p. 1917-1923.
- Hay, L. E., et McCabe, G. J. (2010). Hydrologic effects of climate change in the Yukon River Basin. *Climatic Change*, vol. 100 (3), p. 509-523.
- Holland, M. M., et Bitz, C. M. (2003). Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics*, vol. 21 (3-4), p. 221-232.
- Institute for Snow and Avalanche Research (SLF) (s.d.). SNOWPACK. In WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, SLF, [http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee\\_permafrost/projekte/snowpack/index\\_EN](http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee_permafrost/projekte/snowpack/index_EN). (Consulté le 5 avril 2016).
- Johnson, C. A., Neave, E., Blukacz-Richards, A., Banks, S. N., et Quesnelle, P. E. (2016). Knowledge assessment (community and scientific) to inform the identification of critical habitat for Peary caribou, *Rangifer tarandus pearyi*, in the Canadian Arctic. Environment and Climate Change Canada, Science and Technology, Ottawa, Ontario, Canada.
- Kaufman, D. S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Miller, G.H., Otto-Bliesner, B. L., Overpeck, J. T., et Vinther, B. M. (2009). Recent warming reverses long-term arctic cooling. *Science*, vol. 325 (5945), p. 1236-1239.
- Langlois, A., Kohn, J., Royer, A., Cliche, P., Brucker, L., Picard, G., Fily, M., Derksen, C., et Willemet, J. M. (2009). Simulation of snow water equivalent (SWE) using thermodynamic snow models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10 (6), p. 1447-1463.
- Langlois, A., Royer, A., Derksen, C., Montpetit, B., Dupont, F., et Goita, K. (2012). Coupling the snow thermodynamic model SNOWPACK with the microwave emission model of layered snowpacks for subarctic and arctic snow water equivalent retrievals. *Water Resources Research*, vol. 48 (12), p. 1-14.

- Langlois, A., Johnson, C.-A., Montpetit, B., Royer, A., Blukacz-Richards, E.A., Neave, E., Dolant, C., Roy, A., Arhonditsis, G., Kim, D.-K.F, Kaluskar, S., et Brucker, L. (2016). Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for the Peary caribou habitat in the Canadian arctic, *Remote Sensing of Environment* (sous presse).
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stoeckli, U., et Zimmerli, M. (1999). SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 30, p. 145– 157.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R. L., et Fierz, C. (2002a). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35 (3), p. 169-184.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R. L., Fierz, C., et Satyawali, P. K. (2002b). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; part II: Snow microstructure. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35 (3), p. 147–167.
- Liston, G. E., et Hiemstra, C. A. (2011). The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979-2009). *Journal of Climate*, vol. 24 (21), p. 5691-5712.
- Maher, A. I., Treitz, P. M., et Ferguson, M. A. D. (2012) Can Landsat data detect variations in snow cover within habitats of arctic ungulates?. *Wildlife Biology*, vol. 18 (1) p. 75-87.
- Mesinger, F., G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jovic, J. Woollen, E. Rogers, E. H. Berbery, M. B. Ek, Y. F. R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish, et Shi, W. (2006). North American Regional Reanalyses. *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 87 (3), p. 343–360.
- Miller, F. L. (1990). Inter-island movements of Peary caribou: A review and appraisal of their ecological importance. *Canada's missing dimension: Science and history in the Canadian Arctic Islands*. Ottawa: Canadian Museum of Nature, vol. 2, p. 608–632.
- Miller, F. L., Russell, R. H., et Gunn, A. (1975). The Recent Decline of Peary Caribou on Western Queen Elizabeth Islands of Arctic Canada. *Polarforschung*, vol. 45 (1), p. 17-21.
- Miller, F. L., et Gunn, A. (2003). Catastrophic die-off of Peary caribou on the western queen Elizabeth Islands, Canadian High Arctic. *Arctic*, vol. 56 (4), p. 381-390.
- Montpetit, B., Royer, A., Roy, A, Langlois, A., et Derksen, C. (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 (9), p. 4705-4717.
- Musée canadien de la nature (2015). Caribou de Peary. *In Mammifères, Carnets d'histoire naturelle*, Musée canadien de la nature, <https://nature.ca/notebooks/francais/caribou.htm>. (Consulté le 16 avril 2015)

- Nagy, J. A., Larter, N. C., et Fraser, V. P. (1996) Population demography of Peary caribou and muskox on Banks Island, N.W.T. 1982-1992. Rangifer special Issue, vol. 9, p. 213-222.
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2015). North American Regional Reanalysis Homepage. NCEP, College Park, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>. (Consulté le 22 novembre 2015)
- Ouellet, F. (2016). Spatialisation du modèle de couvert nival Snowpack dans le Nord canadien pour l'étude de l'accès à la nourriture du caribou de Peary, Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 86 p.
- Ouellet, F., Langlois, A., Blukacz-Richards, E. A., Johnson, C. A., Royer, A., Neave, E., et Larter, N. C. (2016). Spatialization of the SNOWPACK Snow Model for the Canadian Arctic to Assess Peary Caribou Winter Grazing Conditions. Physical Geography (sous presse).
- Putkonen, J., et Roe, G. (2003). Rain-on-snow events impact soil temperatures and affect ungulate survival. Geophysical Research Letters, vol. 30 (4), p. 1-4.
- Reanalyses.org (2016). Reanalyses.org Home Page. In Home, Advancing Reanalysis, Reanalyses.org, <https://reanalyses.org/atmosphere/overview-current-reanalyses>. (Consulté le 24 février 2016)
- Ressources naturelles Canada (RNCCan) (2009). Couverture du sol, circa 2000-vectorielle: Spécifications de produit – Édition 1.0. Centre d'information topographique, Secteur des sciences de la Terre, RNCCan, Sherbrooke, 16 p.
- Ressources naturelles Canada (RNCCan) (2007). Données numériques d'élévation du Canada, Niveau 1: Spécifications de produit - Édition 3.0. Centre d'information topographique, Secteur des sciences de la Terre, RNCCan, Sherbrooke, 52 p.
- Rinke, A., et Dethloff, K. (2008). Simulated circum-Arctic climate changes by the end of the 21st century. Global and Planetary Change, vol. 62 (1), p. 173-186.
- Romanovsky, V. E., Smith, S. L., et Christiansen, H. H. (2010). Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the international polar year 2007-2009: A synthesis. Permafrost and Periglacial Processes, vol. 21 (2), p. 106-116.
- Screen, J. A., et Simmonds, I. (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. Nature, vol. 464 (7293), p. 1334-1337.
- Serreze, M. C., et Barry, R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and Planetary Change, vol. 77 (1), p. 85-96.
- Solberg, E. J., Jordhøy, P., Strand, O., Aanes, R., Loison, A., Sæther, B.-E., et Linnell, J.D.C. (2001). Effects of density-dependence and climate on the dynamics of a Svalbard reindeer population. Ecography, vol. 24 (4), p. 441-451.

Tyler, N. J. C. (2010). Climate, snow, ice, crashes, and declines in populations of reindeer and caribou (*Rangifer tarandus* L.). *Ecological Monographs*, vol. 80 (2), p. 197-219.



## Annexe 1 : Exemple d'en-tête du fichier de couche de SNOWPACK (\*.sno)

```
SMET 1.1 ASCII
[HEADER]
station_id      = NARR_169_221_2013
station_name    = NARR
latitude        = 72.0318
longitude       = -111.7429
altitude        = 0
nodata          = -999
tz              = -7
source          = NOAA Narr, http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.monolevel.html
ProfileDate     = 2012-07-01T00:00:00
HS_Last         = 0.0000
SlopeAngle     = 0.0
SlopeAzi        = 0
nSoilLayerData  = 1
nSnowLayerData  = 0
SoilAlbedo      = 0.17
BareSoil_z0     = 0.02
CanopyHeight    = 0.00
CanopyLeafAreaIndex = 0.00
CanopyDirectThroughfall = 1.00
WindScalingFactor = 1.00
ErosionLevel    = 0
TimeCountDeltaHS = 0.000000
fields          = timestamp Layer_Thick T Vol_Frac_I Vol_Frac_W Vol_Frac_V Vol_Frac_S Rho_S Conduc_S HeatCapac_S
[DATA]
2012-07-01T00:00 20 290 0.001 0.000 0.000 0.999 2800.0 2.6 1100.00 10000 0.00 0.0 0.0 0 0.0 1 0 0
```

## Annexe 2 : Exemple d'en-tête du fichier météorologique de SNOWPACK (\*.smet)

```

SMET 1.1 ASCII
[HEADER]
station_id      =NARR_169_221_2013
station_name    = NARR
latitude        =72.0318
longitude       =-111.7429
altitude        = 0
nodata          = -999
tz              =-7
source          = NOAA Narr, http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.monolevel.html
fields          =timestamp TA ILWR OLWR ISWR OSWR VW DW RH PSUM
units_offset    = 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
units_multiplier = 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

[DATA]
2012-07-01T00:00    287.131    272.000    324.200    385.100    282.600    4.890 221.559    0.627    -0.000
2012-07-01T03:00    277.795    258.200    323.900    172.300    110.800    4.282 221.678    0.853    -0.000
2012-07-01T06:00    277.240    259.100    323.500    77.200    53.600    4.071 228.951    0.855    -0.000
2012-07-01T09:00    276.936    258.600    326.200    151.100    106.200    3.852 233.539    0.860    -0.000
2012-07-01T12:00    277.765    262.400    341.100    376.900    169.200    3.191 231.837    0.802    -0.000
2012-07-01T15:00    279.923    269.100    362.200    601.200    182.600    3.119 217.206    0.701    -0.000
2012-07-01T18:00    282.526    281.700    404.600    694.700    163.400    4.020 228.663    0.580    -0.000
2012-07-01T21:00    287.055    291.500    414.400    603.200    145.200    4.540 243.314    0.608    -0.000
2012-07-02T00:00    288.054    273.900    327.000    393.100    278.900    5.181 236.048    0.628    -0.000
2012-07-02T03:00    278.506    258.400    328.100    171.200    101.800    4.259 241.544    0.841    -0.000
2012-07-02T06:00    277.909    258.100    325.600    63.700    63.400    3.666 251.354    0.835    -0.000
2012-07-02T09:00    277.510    256.700    328.600    150.100    101.300    3.546 254.373    0.846    -0.000
2012-07-02T12:00    278.167    259.700    344.400    376.700    159.400    2.951 248.903    0.788    -0.000
2012-07-02T15:00    280.299    266.200    367.600    602.700    176.100    2.989 240.320    0.691    -0.000
2012-07-02T18:00    284.004    282.300    410.300    697.100    157.800    3.515 239.872    0.622    -0.000
2012-07-02T21:00    287.314    289.200    417.400    605.100    145.600    4.039 243.764    0.596    -0.000
2012-07-03T00:00    288.328    273.600    328.200    393.100    275.900    4.428 247.766    0.594    -0.000
2012-07-03T03:00    279.003    258.500    329.700    164.100    106.300    4.277 242.685    0.817    -0.000
2012-07-03T06:00    278.285    258.200    327.100    62.500    61.800    3.790 251.988    0.817    -0.000
2012-07-03T09:00    277.749    257.600    330.400    148.700    98.500    3.549 250.038    0.836    -0.000
2012-07-03T12:00    278.764    259.900    346.600    375.900    153.900    2.959 249.977    0.767    -0.000

```

**Annexe 3 : Tableau détaillé des types d'occupation du sol (Adapté de RNCan (2007, p. 2-5))**

Code	Nom de l'occupation du sol	Description	Albédo du sol
0	Pas de données	Pas de données	N.A.
12	ombre	Ombre	plus proche voisin
20	Eau	Lacs, réservoirs, fleuves, rivières, ruisseaux, étendues d'eau salée.	N.A.
30	Stérile/non végétalisé	Principalement des étendues non végétalisées et non mises en valeur. Incluant : glaciers, roche, sédiments, brûlis, blocaille, mines, autres surfaces naturellement non végétalisées. Commentaires : Les mines ou d'autres étendues similaires modifiées par l'activité humaine peuvent être représentées dans cette classe ou dans la classe des zones urbaines. Excluant les étendues agricoles en jachère.	0.17
35	Substrat rocheux à végétation épars	Surfaces stériles, avec 2 à 10 % de couverture végétalisée sur un substratum acide, igneux et en grande partie consolidé. La couverture végétalisée consiste généralement en des graminoides et des arbustes nains prostrés.	0.17
36	Till-colluvion à végétation épars	Surfaces stériles, avec 2 à 10 % de couverture végétalisée sur un substratum non acide et calcaire et du colluvion. La couverture végétalisée consiste généralement en des graminoides et en des arbustes nains prostrés.	0.16
37	Sol à nu avec croûte de cryptogames - éminences dues au gel	Surfaces stériles non consolidées ayant subi une importante géliturbation avec 2 à 10 % de couverture végétalisée consistant en des graminoides et en des plantes cryptogames.	0.17
80	Terres humides	Étendues où la surface de saturation se situe au niveau, à proximité ou au-dessus de la surface du sol pendant un intervalle d'assez longue durée pour que s'y manifestent des processus aquatiques ou de milieux humides (végétation palustre semi-permanente ou permanente, incluant tourbières basses, tourbières hautes, marais, etc.). Commentaires : La cartographie de cette classe s'effectue d'après les propriétés de la couverture correspondant aux conditions à la (aux) date(s) d'acquisition des images.	0.13
101	Toundra de graminoides parsemée de buttes de gazon	Toundra humide parsemée de buttes de gazon plus de 25 % d'arbustes nains de plus de 40 cm de hauteur et mousse. Peut aussi comprendre du lichen.	0.20
102	Carex humide	Graminoides et bryoides. Le carex humide comprend le lin des marais saturé pendant une bonne partie de la saison de croissance, ainsi que la mousse, et peut comprendre plus de 10 % d'arbustes nains de plus de 40 cm de hauteur.	0.18
103	Toundra de graminoides et d'arbustes nains, humide à sèche sans butte de gazon	Toundra humide à sèche sans butte de gazon avec 50 à 70 % de couverture végétale. La végétation comprend un mélange de graminoides, d'arbustes nains dressés de plus de 40 cm et d'arbustes nains prostrés. Peut également comprendre des quantités minimales de lichen et de mousse.	0.20
104	Toundra d'arbustes nains prostrés et de graminoides	Toundra de graminoides bien drainée ou en milieu sec, sans butte de gazon, avec des landes d'arbustes nains prostrés dont la couverture est supérieure à 70 %.	0.20