Production de la 2ième approximation de la carte de pergélisol du Québec en fonction des paramètres géomorphologiques, écologiques, et des processus physiques liés au climat

Rapport final

Emmanuel L'Hérault et Michel Allard

Centre d'études nordiques, Université Laval

Rapport produit pour le compte du

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Financé par

Fonds vert Québec

mars 2018

AVANT-PROPOS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs pour la confiance et le financement accordés en vue de la réalisation de cette étude. Nous soulignons également la collaboration de l'Administration Régionale Kativik pour avoir facilité l'accès à une partie de l'information contenue dans ce rapport. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu dans les différentes communautés visitées.

Citation recommandée :

L'Hérault, E. et Allard, M. (2018). Production de la 2ième approximation de la carte de pergélisol du Québec en fonction des paramètres géomorphologiques, écologiques, et des processus physiques liés au climat. Rapport final. Réalisé pour le compte du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 61 p.

Les auteurs tiennent à remercier également les personnes suivantes pour leur participation à la présente étude :

- Jean-François Bergeron, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec.
- Claude Morneau, direction des Inventaires Forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec.
- Élisabeth Dufour, direction des Inventaires Forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec.

Les travaux réalisés dans cette étude ont été faits dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques et ont été financés par le Fonds vert.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le pergélisol constitue le principal élément d'importance de ce projet de recherche. Le pergélisol est tout sol ou roc dont la température se maintient sous 0°C depuis des années. Dans l'extrême nord du territoire québécois, il est omniprésent et très épais (≈ 630 m à la mine Raglan). À sa marge boréale, plus au sud, il apparaît dans le paysage sous forme de plaques minces isolées dont l'épaisseur est généralement inférieure à 10 m). Le pergélisol se retrouve dans toutes les formations rocheuses et dans les dépôts meubles du Quaternaire présents sur le territoire du Nunavik. Il contient de la glace sous des formes diverses (ex. interstitielle, en lentille, en coins ou massive) dont l'origine est intimement liée aux caractéristiques sédimentaires et aux conditions de drainage du terrain. Sous l'impact du réchauffement climatique ou d'activités anthropiques mal adaptées, le pergélisol se réchauffe, voire dégèle, ce qui entraine des tassements et des mouvements de terrain affectant autant les écosystèmes que les infrastructures.

Jusqu'à maintenant, la principale carte du pergélisol disponible pour le Nunavik est celle qui a été produite par Allard et Seguin (1987) et qui a légèrement été mise à jour par Allard et Lemay (2013). Cette carte, outre son obsolescence en raison du réchauffement considérable du climat au Nunavik depuis le début des années 1990, demeure une approximation sommaire fondée sur des paramètres climatiques, écologiques et géomorphologiques très généraux. De plus, cette dernière n'offre aucune représentation des propriétés géocryologiques du pergélisol ni de son régime thermique. C'est donc non seulement en vue de mettre à jour le portrait de la distribution du pergélisol, mais aussi d'apporter de nouvelles informations sur ses caractéristiques thermiques (températures et épaisseur) et géocryologiques (type de glace dans le sol et teneur en glace), qu'une cartographie des conditions de pergélisol au Nunavik a été entreprise suivant une approche encore inédite. L'objectif principal de ce projet est de dresser des cartes à une échelle suffisamment fine pour venir en appui aux professionnels concernés dans l'aménagement durable du territoire, qui doivent ainsi composer avec les contraintes techniques, environnementales et financières sévères associées au pergélisol.

Il existe une multitude de modèles numériques complexes qui permettent de simuler le régime thermique dans le sol, toutefois, malgré leur excellente performance, la complexité de certains les rend impraticables à une échelle régionale en raison du nombre trop élevé de paramètres qu'ils nécessitent pour opérer. Pour ce faire, la cartographie des conditions de pergélisol pour le Nunavik a été faite par l'application d'un modèle simple nommé TTOP (*Temperature at the Top Of Permafrost*). Le modèle TTOP est un modèle en régime permanent et unidimensionnel (i.e. opérant sur un profil vertical dans le sol) , c'est-à-dire que les conditions climatiques imposées aux calculs sont fixes à un moment dans le temps et que les conditions géothermiques sont en équilibre avec des conditions aux frontières dites stables et ne tiennent pas compte des transferts latéraux de flux de chaleur dans le terrain. Pour couvrir l'ensemble du territoire, le maillage en longitude et latitude est constitué de 9 086 723 cellules de 250 m^2. Ce sont les températures de surface, intimement liées à l'épaisseur du couvert nival et au type de surface, et quelques paramètres géothermiques qui ont permis, à l'aide du modèle TTOP, de déterminer les caractéristiques du pergélisol à savoir la température à son sommet (Figure 21) et son épaisseur probable (Figure 22). Afin de pallier à l'absence de mesures systématiques et continues des caractéristiques du couvert nival pour le Nunavik et ailleurs dans l'Arctique, une approche indirecte d'évaluation de son épaisseur basée sur des relations avec des paramètres morphologiques du terrain et la végétation a été développée. Grâce à cette approche, des températures en surface du sol ont été dérivées du jeu de données maillées des moyennes mensuelles de l'air produit par Way *et al.* (2017) pour la période de référence 2000-2016, puis utilisées comme intrant dans le modèle.

À la lueur des résultats obtenus du modèle, on constate que le patron général des températures au sommet du pergélisol respecte le gradient latitudinal et altitudinal régional des températures moyennes annuelles de l'air observé au Nunavik. Par conséquent, outre une frange plus froide qui longe la côte de la baie d'Hudson entre Inukjuak et Umiujaq, le pergélisol le plus froid se concentre au centre-nord du Québec

et dans la section est de la pénéplaine qui longe les monts Torngat. À une échelle plus locale, ce patron de distribution est fortement influencé par la topographie et la végétation considérées ici comme étant les deux principaux facteurs qui influencent la redistribution de la neige par le vent. Sous la limite des arbres, les fonds de vallée arborent une végétation érigée et plus dense par rapport aux plateaux et aux sommets, ce qui favorise davantage les accumulations de neige. À l'opposé, les sommets et plateaux exposés favorisent le développement d'un pergélisol plus froid en raison du gradient altitudinal des températures de l'air et du couvert de neige qui y est généralement plus mince, voire absent, en raison de son érosion et de sa redistribution le vent. À l'échelle du site, la variation du type de végétation, intimement liée à la micro et méso-topographie, et l'influence de celle-ci sur le patron d'accumulation de neige, forme des mosaïques de conditions de surface où alternent les conditions thermiques propices et non propices au développement et maintien du pergélisol. Ce sont ces mosaïques qui sont à l'origine de la distribution dite discontinue du pergélisol qui marque la frange méridionale de distribution au Nunavik. Cette alternance de zones avec et sans pergélisol peut s'exercer sur une très courte distance (< 10 m). Bien qu'elle soit très élevée, la résolution actuelle de la carte des températures au sommet du pergélisol (250 m x 250 m) ne permet pas de faire ressortir dans les fins détails la variabilité spatiale réelle du pergélisol, mais donne somme toute une approximation très plausible de son étendue. À partir de la carte des températures au sommet du pergélisol, la reclassification des cellules de 250 m^2 par zone de 5 km^2 (400 cellules) selon les classes standards de distribution du pergélisol a permis de produire une nouvelle carte de sa distribution au Nunavik (Figure 23).

Telle que mentionné précédemment, les conditions géocryologiques du pergélisol sont le fruit d'une interaction entre les processus de mise en place des dépôts qui en déterminent les propriétés mécaniques, les conditions de drainage (superficielles et souterraines) et le climat (température et précipitation). Dans le cadre de ce projet, les premières évaluations des conditions géocryologiques du pergélisol (structure et volume occupé par la glace) sur l'ensemble du territoire ont été réalisées par associations entre les types de dépôt de surface et les connaissances disponibles prélevées au sein de ces mêmes unités. La carte issue de ces corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol au Québec nordique est présentée à la figure 24. Compte tenu du lien fort entre la géologie de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol, la répartition de celles-ci à l'échelle régionale est intimement liée au patron de déglaciation et de submersion marine postglaciaire de la région. On distingue ainsi deux grandes zones : les franges littorales submergées autrefois par les mers postglaciaires et les plateaux centraux et secteurs situés au-delà de la limite marine postglaciaire. Les zones submergées par les mers postglaciaires sont caractérisées par un pergélisol habituellement plus riche en glace en raison de la présence de sédiments marins fins extrêmement gélifs. C'est habituellement le cas pour les fonds de vallées où d'épaisses couches de sédiments meubles en assemblages stratigraphiques complexes s'y trouvent et dont une partie consiste en des silts argileux salins très sensibles au dégel et aux mouvements de masses. L'une de ces vallées caractéristiques est celle de Salluit, mais on en dénombre plusieurs sur l'ensemble du Nunavik comme celle de la rivière Sheldrake dans la région d'Umiujaq. À l'opposé, les secteurs surélevés qui ont seulement été englacés, donc recouverts exclusivement de dépôts glaciaires généralement plus grossiers (till, sable et gravier fluvioglaciaire), se caractérisent généralement par un pergélisol dont le contenu en glace est de faible à modéré en raison de la gélivité limitée de ces dépôts.

La susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques a été évaluée en tenant compte de deux paramètres, soit le contenu en glace et la température au sommet du pergélisol (Figure 27). En raison de l'importance des conditions géocryologiques dans la détermination de l'indice de susceptibilité, les secteurs les plus enclins aux tassements thermokarstiques correspondent majoritairement aux zones submergées lors de la déglaciation et recouvertes par des dépôts marins fins gélifs et les zones recouvertes d'un dépôt organique en couverture épaisse. Toutefois, l'ajout de la composante thermique vient légèrement modifier ce patron de distribution. Compte tenu du gradient latitudinal et altitudinal des températures de l'air et du rôle de la couverture neigeuse dans le régime thermique du pergélisol, la composante thermique permet d'atténuer l'indice de susceptibilité en présence d'un pergélisol froid. À l'échelle régionale, on parle ici du nord de la péninsule du Nunavik où malgré la présence de dépôts gélifs

et sensibles, certains secteurs où le régime thermique du pergélisol est particulièrement froid bénéficient d'une certaine résistance thermique du système ce qui atténue la susceptibilité aux affaissements thermokarstiques. C'est le cas pour la section ouest de la côte entre les communautés d'Akulivik et d'Ivujivik. À l'échelle locale, ce sont des secteurs où la couverture de neige est mince, voire absente (sommet, crête, haute de pente ou plateaux recouverts d'une végétation herbacée ou absente), qui bénéficient de cet effet atténuant qu'apporte un régime thermique plus froid sur le risque d'instabilité du pergélisol.

Il demeure important de rappeler que le modèle TTOP n'est pas un modèle transitoire, par conséquent, ce dernier simule un état d'équilibre entre les conditions aux limites du problème à savoir la température moyenne annuelle à la surface du sol pour une année spécifique ou une période donnée. Par conséquent, la cartographie des températures, des épaisseurs et de la distribution du pergélisol n'est qu'une image statique en équilibre avec les conditions frontières pour la période choisie, qui dans notre cas, est celle qui s'étend de 2000 à 2016. Malheureusement, le système pergélisol n'est pas un système statique, mais plutôt un système dynamique transitoire dont les conditions actuelles sont héritées du passé et se modifient avec un certain déphasage temporel et spatial (inertie thermique). Cette inertie attribue une certaine résilience au changement du système pergélisol. Par exemple, en présence de températures de surface non favorables à son maintien, la disparition du pergélisol ne sera pas instantanée, mais plutôt graduelle. Cette disparition se traduira par une diminution graduelle de l'épaisseur du pergélisol, s'effectuant par son sommet et par sa base, et de sa superficie. Malheureusement, cette inertie n'est pas considérée dans le modèle TTOP. Étant donné que la température de la période de référence utilisée pour alimenter le modèle TTOP est significativement plus chaude que celle du dernier siècle, le profil thermique en équilibre comporte nécessairement un biais chaud. Ce biais chaud amène une sous-estimation de l'épaisseur du pergélisol dans certains cas, particulièrement dans les secteurs où ce dernier est continu et très épais, et une sous-estimation de son étendue, notamment dans la frange méridionale du Nunavik. Dans la frange méridionale, aux endroits où les conditions de surface ne permettent plus désormais le maintien du pergélisol, il est possible que ce dernier subsiste sous forme d'îlots résiduels en déséquilibre avec le climat et portés à disparaître graduellement si la tendance au réchauffement se maintient. Afin de limiter l'influence de ce biais chaud dans l'estimation des épaisseurs du pergélisol, un décalage thermique a été appliqué aux résultats du modèle TTOP. Malgré la cohérence des résultats suite à l'application d'une telle correction, il importe de demeurer prudent dans l'interprétation des épaisseurs du pergélisol ainsi obtenues.

En ce qui concerne la cartographie des conditions du pergélisol au Nunavik, une prochaine phase du projet permettrait d'enclencher une validation intensive des cartes produites, d'initier un processus de cartographie dynamique itératif assurant l'intégration des mises à jour d'informations géoscientifiques et d'ajouter de nouvelles composantes environnementales jugées pertinentes en sciences du pergélisol. Le processus de validation pourrait s'effectuer par des visites sur le terrain selon un plan d'échantillonnage davantage élaboré que dans la phase 1 et par des analyses corrélatives approfondies entre les cartes de températures au sommet du pergélisol dérivées et les données enregistrées par les câbles à thermistances et les stations du réseau SILA du CEN et du MTQ. Dans cette seconde phase, il pourrait également s'avérer intéressant de comparer les résultats du modèle TTOP avec des modèles numériques de transfert de chaleur par conduction en régime transitoire. Même s'ils sont plus demandant en termes de temps de calcul, ces modèles numériques permettraient de mieux représenter le phénomène d'inertie thermique du système pergélisol et ainsi limiter voire éliminer les biais chauds induits par l'utilisation d'un modèle en régime permanent. L'utilisation de tels modèles permettrait également de simuler des projections de changements des conditions thermiques du pergélisol en fonction de différents scénarios climatiques. Ainsi, en utilisant les sorties des scénarios climatiques produits par le consortium OURANOS, des cartes prédictives des conditions du pergélisol pourraient être produites et par le fait même permettre une analyse fine de la sensibilité au changement climatique des écosystèmes terrestres affectés par la présence et la disparition du pergélisol.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 2
Sommaire exécutif 3
Liste des illustrations 7
Liste des tableaux 9
1 Introduction 10
2 Objectifs 11
3 Méthodologie 12
3.1 Le système pergélisol 12
3.2 Compilation et spatialisation des variables du système pergélisol 15
3.2.1 Flux géothermique (Q) 15
3.2.2 Températures de surface 17
3.2.2.1 Facteurs-n de dégel 18
3.2.2.2 Facteurs-n de gel 24
3.2.2.2.1 Relation épaisseur de neige et facteur-n de gel 24
3.2.2.2.2 Influence de la végétation et de la topographie sur les caractéristiques du couvert nival 25
3.2.2.2.1 Indice de potentiel d'accumulation de neige 30
3.2.2.3 Détermination des degrés-jours de dégel et de gel à partir des facteurs-n 38
3.2.3 Géologie de surface, caractéristiques géotechniques et propriétés thermiques inférées du pergélisol 41
4 Résultats 45
4.1 Les températures au sommet, épaisseur et distribution spatiale du pergélisol 45
4.2 Les conditions géocryologiques 51
4.3 La susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques 55
5 Conclusion 58
Références 59

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Distribution du pergélisol au Québec nordique (Modifiée de Allard *et al.,* 2012)..... 11

Figure 2 : Schématisation du système pergélisol et de ses principales composantes. Profil thermique type du pergélisol avec la température moyenne annuelle de la surface du terrain (TMAST), la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMASS) et la température annuelle moyenne au sommet du pergélisol (TMASP)..... 14

Figure 3 : Superficie du problème, géométrie du maillage et dimension des cellules du modèle TTOP utilisé pour calculer la température au sommet du pergélisol et son épaisseur..... 15

Figure 4 : Flux géothermiques de haute précision (croix) déterminés à partir de registre de températures et estimés (triangles) à partir des températures au fond de puits et une conductivité thermique moyenne des roches de 2.5 W/m K (Modifiée de Majorowicz et Minea, 2015). Exemple d'extrapolation jusqu'à 1 km de profondeur des profils de températures superficiels mesurés sur 500-600 m de profondeur dans le secteur de la mine Raglan, Nunavik, Québec (Tirée de Majorowicz et Minea, 2015)..... 16

Figure 5 : Variation de l'état d'équilibre du profil géothermique en fonction de différentes intensités de flux géothermique (*Q*). Le profil est mis en équilibre avec une température de surface ($T_{(z=0)}$) constante de -4.5 °C et une conductivité thermique (*k*) uniforme de 2.5 W/m K. 17

Figure 6 : A) La carte des types de couvertures des terres du Nord québécois complétée en 2018 par la Direction des inventaires forestiers (DIF) du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) et B) Facteurs-n de dégel (n_t) calculés pour chacune des sous-unités de la couverture des terres. 23

Figure 7 : Relation entre facteur-n de gel, épaisseur de neige et température moyenne annuelle de l'air calculé numériquement par Riseborough et Smith (1998) avec une valeur de densité de la neige de 250 kg/m^3..... 25

Figure 8 : A) Épaisseur de neige (diagramme à barres) et coefficient de transfert thermique (points) en fonction du type de végétation (Tirée de Jean et Payette, 2014), B) Épaisseur de neige (gris), épaisseur maximale du mollisol (ligne pointillée) et température du sol en été (symboles noirs) et en hiver (symboles gris) prédites en fonction de la végétation (Tirée de Jean, 2012). Les « + » indiquent une température du sol plus élevée et les « - » une température du sol plus basse. 27

Figure 9 : Orthomosaïque en couleur et à haute résolution de la vallée Tasiapik en hiver (mai 2016), Umiujaq, Nunavik (gracieuseté de Dominé, 2016). L'agrandissement de gauche montre l'influence des épinettes sur le patron de distribution de la couverture nivale (formes profilées) tandis que celui de droite confirme l'excellente capacité de rétention de la neige des taillis d'arbustes (saules principalement)..... 28

Figure 10 : Photographies aériennes obliques prises lors d'un vol entre Ivujivik et Salluit montrant la relation entre l'enneigement différentiel et la topographie où les dépressions se retrouvent généralement comblées de neige tandis que les versants et les crêtes exposés sont habituellement dépourvus de neige..... 29

Figure 11 : Images Landsat prises en 2016 le 19 février, le 9 mai, le 26 juin et le 12 juillet. 29

Figure 12 : A) Types de couverture des terres. B) Reclassification des types de couvertures des terres en classes de structure de la végétation. C) Pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation..... 31

Figure 13 : Schématisation de l'algorithme de classification des unités topographiques (adaptée de Weiss, 2001)..... 32

Figure 14: A) Grille matricielle du modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC) à une résolution de 23m x 23m. B) Classification du relief selon l'indice de position topographique (TPI). C) Pondération de la composante topographique dérivée de l'indice de position topographique. 34

Figure 15 : Indice d'enneigement potentiel pour A) la composante végétale et B) la composante topographique. C) Indice d'enneigement potentiel cumulé. 35

Figure 16 : A) Relation entre l'indice d'enneigement potentiel, les épaisseurs de neige équivalentes et les facteurs-n. B) Températures moyennes annuelles de l'air pour la période 2000-2016 calculées à partir d'un jeu de données maillées des moyennes mensuelles de l'air produites par Way *et al.* (2016). C) Facteurs-n de gel dérivés de l'indice d'enneigement potentiel et la relation épaisseur de neige et facteur-n proposée par Riseborough et Smith (1998). 37

Figure 17 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) de l'air pour l'ensemble du Nunavik calculés à partir des données mensuelles de l'air (Way *et al.,* 2017) pour la période 2000 à 2016 (17 cycles de gel et de dégel). 39

Figure 18 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) à la surface du sol pour l'ensemble du Nunavik pour la période 2000 à 2012 (13 saisons de gel et de dégel) dérivées à partir des facteurs-n de gel et dégel. 40

Figure 19 : Répartition des grandes classes de dépôts de surface au Nunavik..... 42

Figure 20 : Cartes des conductivités thermiques des matériaux à l'état A) non-gelé et B) gelé dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires 44

Figure 21 : Carte des températures au sommet du pergélisol modélisées à l'aide du modèle TTOP mis en équilibre avec les indices de gel et de dégel moyens pour la période 2000-2016. 48

Figure 22 : Carte des épaisseurs probables du pergélisol calculées à partir des températures moyennes au sommet du pergélisol pour la période 2000-2016, d'un flux géothermique constant de 40.26 mW/m^2 et d'une conductivité thermique uniforme de 2.5 W/m K. 49

Figure 23 : Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2016..... 50

Figure 24: Carte des conditions géocryologiques dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires..... 53

Figure 25 : A) Réseau polygonal de coins de glace. B) et C) Coupes frontales de coins de glace. D) Paysage thermokarstique résultant de la fonte partielle d'un réseau de coins de glace. E) et F) Glace de glacier enfouie sous des dépôts glaciaires grossiers non-gélifs..... 54

Figure 26 : Pondération différentielle des deux facteurs qui composent l'indice de susceptibilité et la matrice des résultats possibles. 55

Figure 27 : Carte de susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques. 57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les différentes classes et sous classes de la couverture des terres retrouvées au Nunavik, leurs caractéristiques générales, la superficie couverte par chacune d'elle et les facteurs-n de dégel types (n_t) tirés de la littérature..... 20

Tableau 2 : Types de couvertures des terres et leurs facteurs-n de dégel types tirés de la littérature. 22

Tableau 3 : Formules descriptives utilisées dans les descriptions des sous-unités et leurs coefficients de proportion d'occupation (*P).* 22

Tableau 4 : Pondération des différentes structures végétales en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée. 30

Tableau 5 : Pondération des différentes unités topographiques en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée. 33

Tableau 6: Corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique. Les paramètres k_u et k_f correspondent respectivement à la conductivité thermique non gelée et gelée des matériaux. 43

1 INTRODUCTION

Le pergélisol constitue le principal élément d'importance de ce projet de recherche. Les raisons de la grande importance attribuée à ce phénomène à la fois géologique et climatique sont nombreuses. Le pergélisol est tout sol ou roc dont la température se maintient sous 0°C depuis des années. Dans l'extrême nord du territoire, il est omniprésent et très épais (≈ 630 m à la mine Raglan); on le dit continu. À sa marge boréale, plus au sud, il apparaît dans le paysage sous forme de plaques minces isolées dont l'épaisseur est généralement inférieure à 10 m); on le dit alors discontinu (Figure 1).

Le pergélisol se retrouve donc dans toutes les formations rocheuses et dépôts meubles du Quaternaire présents sur le territoire du Nunavik, qu'il s'agisse des dépôts glaciaires en couverture de till ou sous forme de moraines, de sables et graviers fluvio-glaciaires, de sédiments marins sableux ou argileux ou de dépôts organiques. Il contient de la glace sous des formes diverses (ex. interstitielle, en lentille, en coins ou massive) dont l'origine est intimement liée aux caractéristiques sédimentaires et aux conditions de drainage. Les environnements sédimentaires dans lesquels les formations géologiques en surface se développent laissent en effet des signatures géomorphologiques et granulométriques étroitement liées aux formes de terrain périglaciaires ainsi qu'au type et à la quantité de glace qui se forme dans le pergélisol. Sous l'impact du réchauffement climatique ou d'activités anthropiques mal adaptées, le pergélisol se réchauffe, voire dégèle, ce qui entraine des tassements et des mouvements de terrain. Autant les écosystèmes que les infrastructures sont alors affectés (Allard *et al.,* 2012). En conséquence, un des objectifs principaux de ce projet est de dresser une carte des conditions de pergélisol sur le territoire du Nunavik à une échelle suffisamment précise afin de supporter les professionnels concernés dans l'aménagement durable du territoire. À titre de renseignement, deux industries minières exploitent actuellement du nickel au Nunavik dans la zone de pergélisol froid et continu. Elles doivent ainsi composer avec les contraintes techniques, environnementales et financières sévères associées au pergélisol.

Actuellement, la principale carte du pergélisol disponible pour le Nunavik est celle qui a été produite par Allard et Seguin (1987) et qui a légèrement été mise à jour par Allard et Lemay (2013). Cette carte, outre son obsolescence en raison du réchauffement considérable du climat au Nunavik depuis le début des années 1990, demeure une approximation sommaire fondée sur des paramètres climatiques, écologiques et géomorphologiques très généraux. De plus, cette dernière n'offre aucune représentation des propriétés géocryologiques du pergélisol ni de son régime thermique. C'est donc non seulement en vue de mettre à jour le portrait de la distribution du pergélisol, mais aussi d'apporter de nouvelles informations sur ses caractéristiques thermiques (températures et épaisseur) et géocryologiques (type et teneur en glace), qu'une cartographie des conditions de pergélisol au Nunavik a été entreprise suivant une approche encore inédite. Une telle cartographie d'un territoire comme le Nunavik intègre la géologie de surface, les températures atmosphériques, les températures en surface du sol, la couverture végétale et l'épaisseur de la neige au sol. L'objectif ultime est de produire une cartographie du pergélisol à une échelle ou résolution spatiale (superficie minimale représentée de 250 m^2) utile pour appuyer un développement en représentant les conditions géologiques et thermiques du pergélisol de même que sa sensibilité au dégel. Une telle cartographie constitue un travail de synthèse important supporté par une solide base de connaissances sur le plan climatique, géologique, hydrologique et écologique obtenue grâce aux travaux récents de ministères québécois, de leurs partenaires, du Centre d'études nordiques et d'autres organismes.

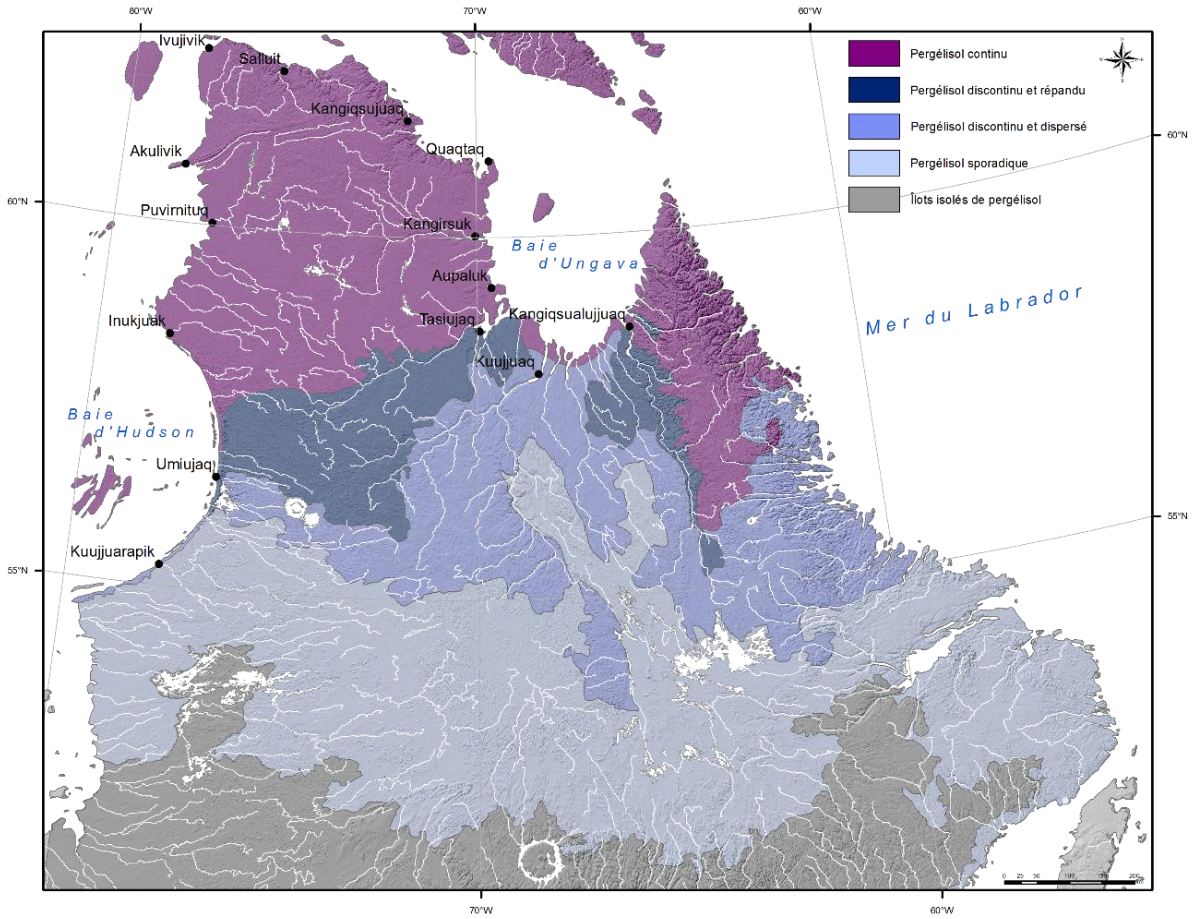

Figure 1: Distribution du pergélisol au Québec nordique (Modifiée de Allard *et al.,* 2012).

2 OBJECTIFS

Développer un algorithme d'intégration des composantes environnementales déterminantes de la distribution spatiale et des propriétés du pergélisol et produire une carte du pergélisol à haute résolution du Nunavik. Cette carte présente une première approximation des lieux sensibles à haut niveau de vulnérabilité associé à la présence du pergélisol, de ses caractéristiques thermiques et géotechniques.

Pour y arriver, les objectifs spécifiques suivants ont été réalisés :

- Compiler à l'intérieur d'un système d'information géographique les couches d'information géoscientifiques disponibles, à savoir : la topographie, l'hydrographie, le type de végétation, la nature géologique du terrain, les formes de relief associées, les températures de surface et les températures de l'air reconstituées.
- Produire des nouvelles couches d'information géographique qui seront intégrées dans l'algorithme telles que : les cartes des degrés-jours de gel et de dégel, les cartes des facteurs-n saisonniers, la carte des teneurs en glace potentielle et la carte des propriétés thermiques du pergélisol.
- Estimer les caractéristiques géothermiques du pergélisol (température, épaisseur, épaisseur de la couche active) en fonction des intrants climatiques (températures de l'air et de surface), des conditions de surface (type de végétation et couverture nivale) et des propriétés thermiques (conductivité et diffusivité thermiques) des matériaux (types de dépôts et formations géologiques).

- Cartographier les conditions de pergélisol au Nunavik selon une approche innovatrice en intégrant les différentes couches d'information géoscientifique disponibles ou nouvellement produites dans le cadre de ce projet.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 LE SYSTÈME PERGÉLISOL

Dans le système pergélisol, les interactions entre l'atmosphère et le sol sont complexes. Il est vrai que la température de l'air est la composante principale du climat qui régit le régime thermique du sol, donc qui contrôle la distribution du pergélisol, sa température et son épaisseur, toutefois, l'influence d'autres paramètres en surface complexifie cette relation. En raison du type de surface (végétale ou minérale) et des caractéristiques de la couverture nivale (épaisseur et densité), il existe une différence importante entre la température de l'air et celle à la surface du sol. Entre l'air et le sol se situe ce qu'il est convenu d'appeler « la couche tampon ». Essentiellement, cette couche est constituée du couvert organique et végétal en été auxquels s'ajoute la couverture de neige en hiver. Il existe même un lien étroit entre l'épaisseur du couvert de neige, sa densité et la structure de la végétation. Par exemple, les arbustes et les arbres retiennent davantage la neige, ce qui favorise d'importantes accumulations comparativement aux espaces ouverts et à la toundra. La cause en est essentiellement la redistribution de la neige au sol par le vent et sa rétention par les structures végétales denses au-dessus du sol. En hiver, l'effet isolant du couvert nival, variable selon son épaisseur et sa densité, limite les échanges thermiques du sol avec l'atmosphère ce qui se traduit par des températures en surface du sol plus chaudes que celles de l'air. La couche tampon module donc les transferts de chaleur entre l'atmosphère et la surface du sol; elle va jusqu'à réguler la distribution spatiale du pergélisol en zone discontinue. Dans un contexte visant à déterminer les caractéristiques du pergélisol, à savoir sa distribution spatiale, son épaisseur et sa température, il est davantage pertinent de considérer les températures à la surface que celles de l'air (French, 2007). En effet, la température de surface permet de considérer l'influence de la végétation en été et de la neige en hiver sur le bilan thermique du système pergélisol. En raison de la durée de la saison de gel et en l'occurrence de la présence d'une couverture nivale, l'influence de la neige sur le bilan thermique annuel de surface est supérieure à celle de la végétation.

Le sol n'est pas un simple solide, mais plutôt un agencement de différentes couches dont les propriétés thermiques, notamment la conductivité et la diffusivité thermiques, sont définies essentiellement par le type de matériau rencontré (roc, sable et gravier, silt, argile et tourbes, etc.), ses caractéristiques géocryologiques (structure et distribution de la glace dans le sol) et ses propriétés géotechniques (granulométrie, densité, teneur en glace, teneur en eau non gelée, salinité, etc.). Ce sont ces propriétés thermiques qui définissent la vitesse et l'amplitude à laquelle le régime géothermique répondra aux variations climatiques saisonnières, interannuelles et pluriannuelles. Une schématisation du système pergélisol et de ses principales composantes est présentée à la figure 2. Cette schématisation s'accompagne d'un profil thermique type du pergélisol sur lequel les principaux indicateurs géothermiques tels que la température moyenne annuelle de la surface du terrain (TMAST), la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMASS) et la température annuelle moyenne au sommet du pergélisol (TMASP) ont été identifiés. La condition limite du système en profondeur est définie par le flux géothermique provenant des profondeurs de la terre.

La modélisation du régime thermique permet d'estimer la distribution, la température et l'épaisseur du pergélisol en fonction des conditions climatiques passées, actuelles et futures. Dans ce contexte, le modèle utilisé se doit de faire le lien entre les conditions atmosphériques, les conditions et facteurs à la surface qui modifient l'intrant climatique dans le sol et les propriétés thermiques de ce dernier. Il existe une multitude de modèles numériques complexes qui permettent de simuler le régime thermique dans le sol, toutefois, malgré leur excellente performance, la complexité de certains les rend impraticables à une échelle régionale en raison du nombre trop élevé de paramètres qu'ils nécessitent. Pour ce faire, la cartographie préliminaire des conditions de pergélisol pour le Nunavik a été faite par l'application d'un

modèle simple nommé TTOP (*temperature at the top of permafrost*) (Smith et Riseborough, 1996; Riseborough et Smith 1998) qui se définit par l'équation 1, où *TMASP* correspond à la température au sommet du pergélisol, k_u et k_f correspondent respectivement à la conductivité thermique du sol non gelé et gelé, n_t et n_f correspondent respectivement aux facteurs-n estivaux et hivernaux, *DJD* et *DJG* correspondent respectivement aux degrés-jours de dégel et aux degrés-jours de gel et *P* correspond à la période annuelle qui est égale à 365 jours. Une fois la température au sommet du pergélisol calculée, il est possible de calculer la température du sol en équilibre pour une profondeur donnée (T_z) en utilisant une valeur de conductivité thermique type pour le socle rocheux (k) et pour le flux géothermique (Q) (équation 2). En utilisant les mêmes variables, mais en modifiant légèrement la structure de l'équation, il est également possible d'estimer l'épaisseur du pergélisol (E_p) (équation 3). À noter que le modèle TTOP est un modèle en régime permanent, c'est-à-dire que les conditions géothermiques sont en équilibre avec des conditions aux frontières dites stables. Également, ce modèle est unidimensionnel, c'est-à-dire que ce dernier ne tient pas compte des transferts latéraux de flux de chaleur avec les cellules voisines. Pour couvrir l'ensemble du territoire, le maillage en longitude et latitude est constitué de 9 086 723 cellules de 250 m^2 (Figure 3). Pour chacune des cellules, les variables nécessaires au calcul de la température au sommet du pergélisol (équation 1) et de l'épaisseur du pergélisol (équation 3) ont été dérivées des différentes couches d'information disponibles qui seront abordées dans les sections suivantes.

À partir de la carte des températures au sommet du pergélisol, la reclassification des cellules de 250 m x 250 m par tuiles de 5 km x 5 km (400 cellules) selon les classes standards de distribution du pergélisol a permis de produire une nouvelle carte de sa distribution au Nunavik. Les classes utilisées sont les suivantes : le pergélisol continu (occupe plus de 90% de la zone), le pergélisol discontinu et abondant (occupe entre 50 et 90 % de la zone), le pergélisol discontinu et dispersé (occupe entre 10 et 50 % de la zone), le pergélisol sporadique (occupe entre 1 et 10 % de la zone) et le pergélisol sporadique résiduel (occupe moins 1 % de la zone).

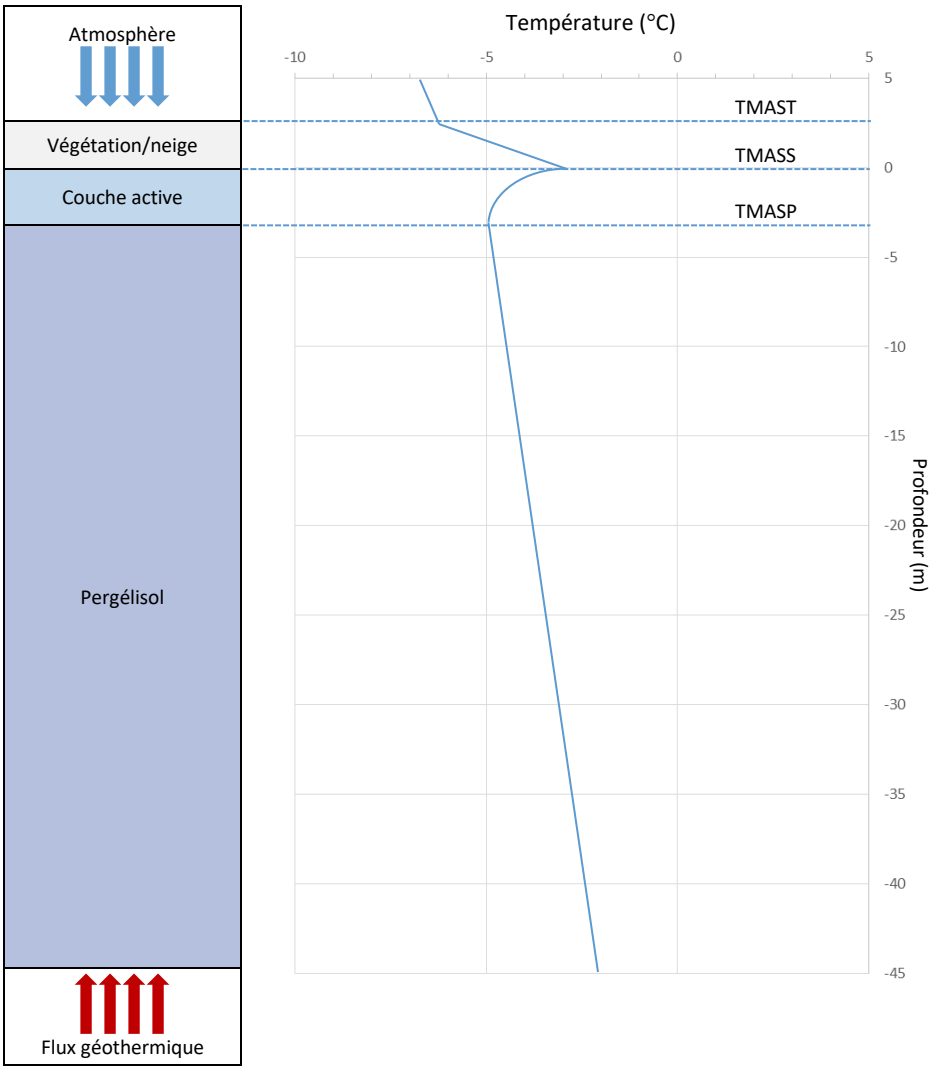

Figure 2 : Schématisation du système pergélisol et de ses principales composantes. Profil thermique type du pergélisol avec la température moyenne annuelle de la surface du terrain (TMAST), la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMASS) et la température annuelle moyenne au sommet du pergélisol (TMASP).

$$TMASP = \frac{\frac{k_t}{k_f}\left(n_t \cdot DJD - n_f \cdot DJG\right)}{\mathrm{P}} \qquad \text{Équation 1}$$

$$T_z = \frac{Q}{k} \cdot z + TMASP \qquad \text{Équation 2}$$

$$E_p = \frac{0 - TMASP}{Q/k} \qquad \text{Équation 3}$$

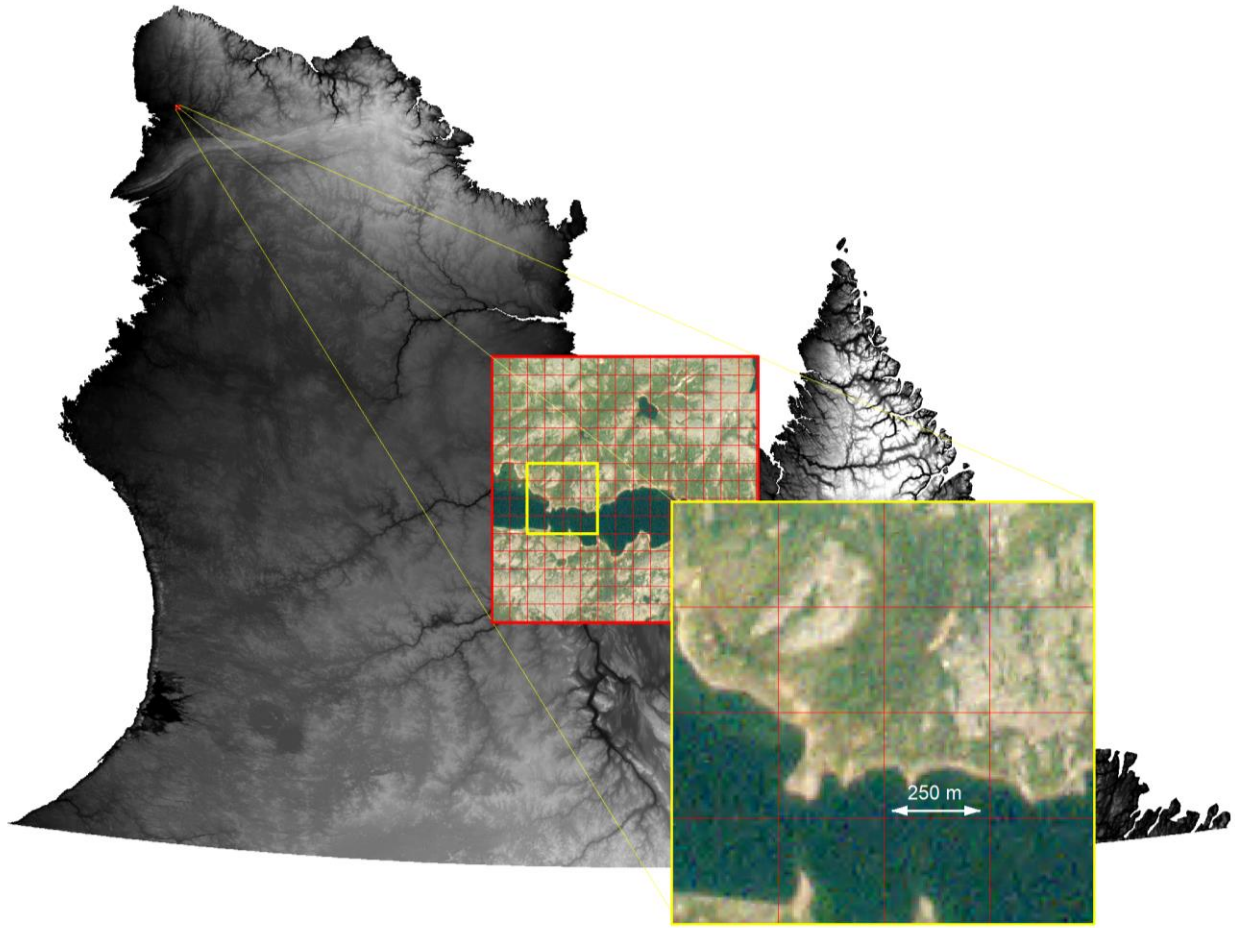

Figure 3 : Superficie du problème, géométrie du maillage et dimension des cellules du modèle TTOP utilisé pour calculer la température au sommet du pergélisol et son épaisseur.

3.2 COMPILATION ET SPATIALISATION DES VARIABLES DU SYSTÈME PERGÉLISOL

3.2.1 FLUX GÉOTHERMIQUE (Q)

Dans l'est du Canada, le flux géothermique varie généralement entre 30 et 80 mW/m^2 avec une valeur moyenne de 60.4 ± 9.38 mW/m^2. Dans la province de Québec, les valeurs les plus élevées se situent dans la zone de la plate-forme du St-Laurent. Une étude récente de Majorowicz et Minea (2015) vient préciser l'intensité moyenne du flux géothermique pour le nord du Québec. Calculé à partir du gradient géothermique et la conductivité thermique mesurée dans 67 puits localisés dans le Nord-du-Québec et ses environs, ces derniers obtiennent ainsi une valeur moyenne de flux géothermique de 40.26 ± 9.38 mW/m^2. Une carte de la densité du flux géothermique produite par krigeage est présentée à figure 4. Malgré une certaine variation de la densité du flux géothermique sur le territoire du Nunavik, la valeur moyenne de 40.26 mW/m^2 a été retenue. Dans une phase ultérieure, l'extraction de la valeur de la densité du flux par point de grille pourrait être réalisée. Ainsi, la détermination de l'épaisseur maximale du pergélisol tiendrait plus fidèlement compte des variations locales. Telle qu'illustrée à la figure 5 , une variation de la densité du flux de 0,030 à 0,050 W/m^2 se traduit par une diminution de l'épaisseur du pergélisol de 337.5 à 202.5 m respectivement.

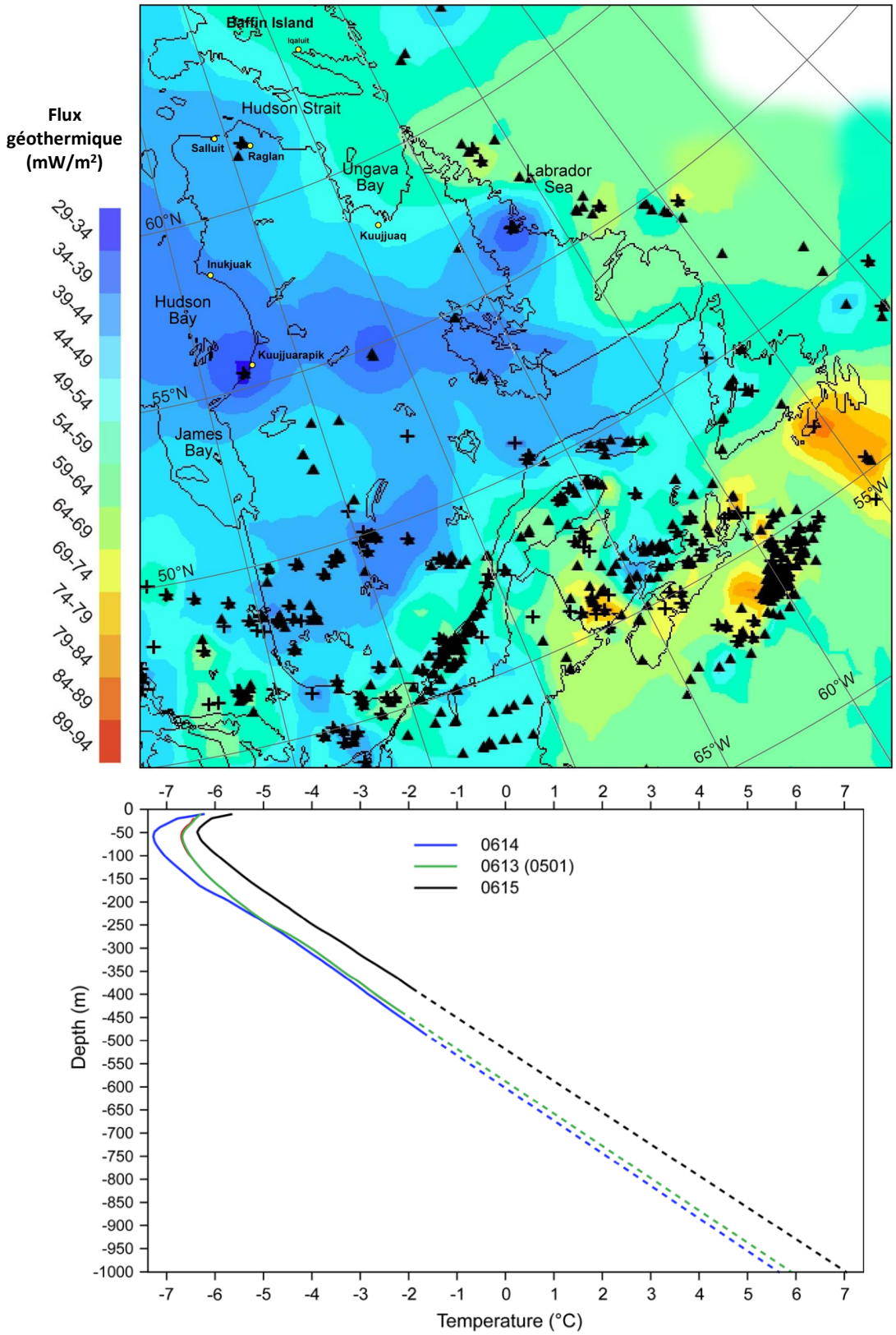

Figure 4 : Flux géothermiques de haute précision (croix) déterminés à partir de registre de températures et estimés (triangles) à partir des températures au fond de puits et une conductivité thermique moyenne des roches de 2.5 W/m K (Modifiée de Majorowicz et Minea, 2015). Exemple d'extrapolation jusqu'à 1 km de profondeur des profils de températures superficiels mesurés sur 500-600 m de profondeur dans le secteur de la mine Raglan, Nunavik, Québec (Tirée de Majorowicz et Minea, 2015).

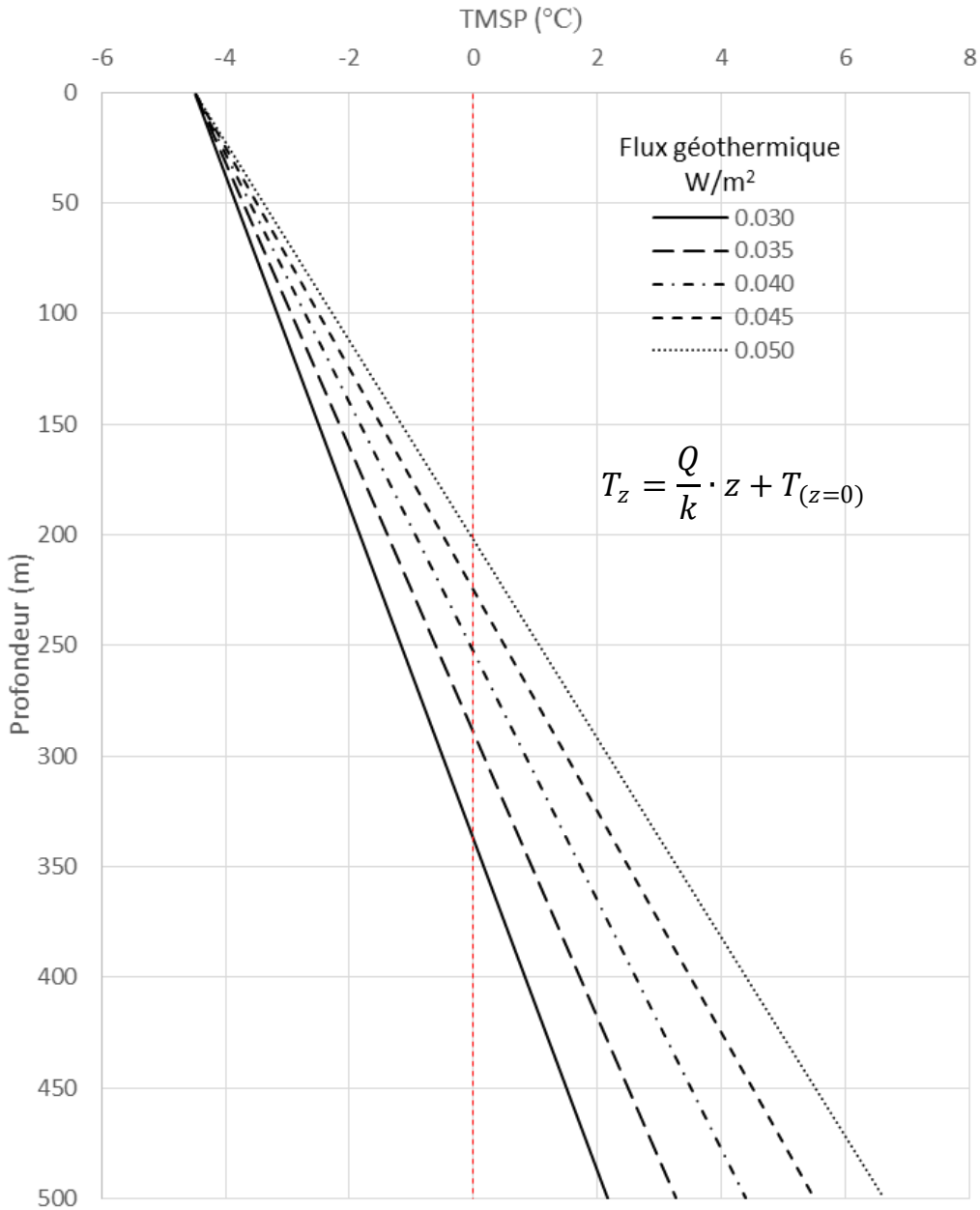

Figure 5 : Variation de l'état d'équilibre du profil géothermique en fonction de différentes intensités de flux géothermique (*Q*). Le profil est mis en équilibre avec une température de surface ($T_{(z=0)}$) constante de -4.5 °C et une conductivité thermique (*k*) uniforme de 2.5 W/m K.

3.2.2 TEMPÉRATURES DE SURFACE

L'utilisation de la température de surface du sol de préférence à celle de l'air permet d'intégrer l'influence de la radiation nette, de la végétation, du couvert nival, du relief et des propriétés thermiques du sol sur la transmission de la chaleur entre l'atmosphère et la surface du sol. Toutefois, la température à la surface du sol présente une variabilité spatiale beaucoup plus élevée que celle de l'air en raison de la variation dans le temps et dans l'espace des conditions en surface. En effet, dépendamment des conditions de surface, la différence entre la température de l'air et celle à la surface du sol est parfois très importante. Cette différence justifie la détermination et l'intégration de ces conditions dites « limites » dans les exercices de modélisation du régime thermique du pergélisol. La schématisation et l'intégration de ces conditions représentent un défi considérable en raison de leur variabilité spatiale et temporelle ainsi que du peu de mesures *in situ* disponibles (type de végétation et épaisseur de l'enneigement). Une approche

simplifiée pour estimer la température de surface à partir des températures de l'air a été proposée par Lunardini (1978). Cette approche utilise des facteurs-n, définis comme étant le ratio des températures de surface sur les températures de l'air pour des conditions de surface données. À des fins de conception ou de simulations numériques, l'utilisation d'un tel coefficient englobe de façon simple les transferts complexes de chaleur entre l'air et la surface du sol en fonction des conditions de surface rencontrées. En multipliant la température de l'air par les valeurs saisonnières des facteurs-n pour un territoire, il est possible d'obtenir une estimation de la température de surface. Par exemple, plus ce coefficient se rapproche de 0, plus l'influence des températures de l'air est atténuée par les conditions de surface (ex. couvert végétal). À l'inverse, s'il est supérieur à l'unité, les conditions de surface amplifient la température de l'air (ex. revêtement d'asphalte noir, surface non-végétalisée).

Pour un site spécifique, les facteurs-n sont généralement calculés sur une base saisonnière afin d'obtenir un facteur-n pour la saison de gel (n_f) et pour la saison de dégel (n_t). Afin de déterminer la valeur des facteurs-n saisonniers, il est nécessaire de mesurer simultanément la température de l'air et la température à la surface du sol durant plusieurs cycles hivernaux et estivaux. Toutefois, en raison de l'importante superficie du territoire à couvrir et de la disponibilité limitée de telles mesures, des facteurs-n de dégel tirés de la littérature ont été utilisés tandis que pour les facteurs-n de gel, une relation empirique a été développée afin d'estimer le potentiel d'enneigement basée sur la végétation et la topographie.

3.2.2.1 FACTEURS-N DE DÉGEL

Les facteurs-n de dégel, c'est-à-dire ceux qui reflètent le mieux les échanges complexes entre l'atmosphère et le sol au cours de la saison de dégel, sont fonction essentiellement du type de surface. Par exemple, les températures de surface du sol estivales sont généralement plus basses sous un couvert forestier en raison de l'ombrage et plus élevées sous une canopée arbustive ou une clairière. En réduisant la radiation solaire et la vitesse des vents à la surface du sol et en favorisant la colonisation du sol par une strate muscinale, la canopée forestière aide au maintien de températures estivales fraîches (Zoltai et Tarnocai, 1971; O'Donnell *et al.,* 2009). Pelletier (2015) avait d'ailleurs calculé des facteur-n de dégel généralement plus élevés pour les sites couverts de lichen et d'arbustes prostrés que pour les sites recouverts d'arbustes ou d'arbres. Une étude récente réalisée par Way *et al.* (2016) dans la région Labrador-Ungava confirme également cette tendance avec des facteurs-n de dégel calculés allant de 0.66 pour les sites forestiers très ombragés à 1.11 pour les clairières ou sol dénudé. De manière générale, la variation des facteurs-n de dégel est relativement petite, typiquement entre 0.75 et 0.9 en milieu végétalisé et supérieur à l'unité en absence de végétation avec des valeurs pouvant atteindre plus de 2 en présence de minéraux foncés.

Afin d'attribuer un facteur-n de dégel basé sur le type de surface pour chacune des cellules du modèle TTOP, la carte écologique de la végétation du Nord québécois complétée en 2018 par la Direction des inventaires forestiers (DIF) du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) a été utilisée (Figure 6A). La qualité de cette couche d'information, tant en terme de résolution spatiale que dans la discrétisation des différentes types d'unités de végétation offre un potentiel inouï. Ce produit cartographique unique réunit des connaissances de base sur ce territoire qui n'avait encore jamais fait l'objet d'une cartographie complète et détaillée de son couvert végétal et de ses milieux physiques. Pour réaliser ce travail d'envergure, le MFFP a mis au point une nouvelle approche basée sur des techniques de télédétection par images satellites utilisant les images Landsat et RapidEye (Leboeuf et Fournier, 2015). La cartographie écologique de la végétation du Nord québécois, qui couvre un territoire de 680 000 km² au nord du 53e parallèle, repose sur l'application de critères rigoureux de stratification de la végétation et du milieu physique afin de discrétiser le territoire d'une part selon le type de couverture des terres et d'autres part, si applicable, selon des paramètres de stratification écologique (lorsque plus de 20 % de couverture végétale). Dans la présente classification, le territoire a été discrétisé en cinq grands types de couverture des terres :

1. Les terres forestières (plus de 20 % de couverture végétale dont plus de 10 % par les arbres);
2. Les terres avec végétation non forestière avec perturbation récente;
3. Les terres avec végétation non forestière ancienne (plus de 40 ans) ou sans perturbation
4. Les terres ou les milieux sans végétation (moins de 20 % de couverture végétale);
5. Les plans d'eau

En terme de résolution, l'aire minimale de cartographie de la classification de la couverture des terres est de 16 ha dans le cas des terres avec végétation (Grand types de couverture des terres 1, 2 et 3) et de 3 ha pour les milieux humides et les plans d'eau (Grand types de couverture des terres 4 et 5) dont les contours de ces derniers proviennent de la Base nationale de données topographiques (BNDT) de Ressources naturelles Canada.

Ces 5 grands types de couvertures des terres ont été par la suite subdivisés en sous-unités selon certains paramètres de stratification de la végétation pour les terres forestières (Type de couvert, essence dominante, végétation dominante du sous-bois, classe de densité, perturbation d'origine et année de la perturbation d'origine, etc.) et selon les codes de terrain comme paramètre de stratification de la végétation pour les terres non forestières, les milieux sans végétation et les plans d'eau. Cette discrétisation en sous-unités de la couverture des terres donne ainsi naissance à des assemblages écologiques uniques représentés par un code combiné. Les unités et sous-unités des types de couverture des terres, leurs codes combinés et leurs caractéristiques sont présentées au tableau 1.

Afin d'obtenir des valeurs significatives de facteurs-n de dégel pour chacune des sous-unités de couverture des terres cartographiées, des valeurs de facteur-n de dégel type tirées de la littérature ont été utilisées (Tableau 2). Dans le cas où la couverture des terres d'une sous-unité consiste en un assemblage de plus d'un type de couverture (ex. sous-classe Msa.TDA caractérisée par une cohabitation d'une végétation herbacée et d'une végétation arbustive occupant entre 30 et 70 % de la superficie), la valeur du facteur-n a été déterminée en faisant une moyenne pondérée tenant compte de la proportion d'occupation des deux principaux types de couvertures (C1 et C2) qui caractérisent la surface. C'est à partir des différentes formules descriptives des sous-unités qu'une appréciation de la proportion d'occupation de chacune des composantes a été déterminée en utilisant un coefficient de proportion d'occupation (*P*) (tableau 3). À partir des valeurs de facteur-n de dégel type tirées de la littérature, les différents types de couvertures retrouvés dans une sous-unité et leur proportion d'occupation respectives, le facteur-n de dégel a été calculé à partir de l'équation suivante :

$$n_t = (P_{(c1)} * n_{t(c1)}) + (P_{(c2)} * n_{t(c2)})$$ Équation 4

Où $P_{(c1)}$ et $P_{(c2)}$ sont respectivement les proportions d'occupation pour les deux principaux types de couverture identifiées et leurs facteurs-n de dégel respectifs $n_{t(c1)}$ et $n_{t(c2)}$. Par exemple, en utilisant l'équation présentée ci-haut, les valeurs types de facteurs-n (Tableau 2) et les coefficients de proportion appropriés pour chacune des composantes (Tableau 1), une sous-unités caractérisée par une couverture de végétation herbacée et une végétation arbustive inférieure à 30 % aura un facteur-n de dégel égal à 0.885 (0.7*0.9) + (0.3*0.85). Dans le cas d'une toundra dominée par le substrat rocheux (50 à 80 % de roc), le facteur-n de dégel calculé sera de 1.25 (0.7*1.4) + (0.3*0.9).

À noter que pour chacune des sous-unités de couverture des terres, les agencements des types de couvertures et leurs proportions d'occupation ont été utilisées pour déterminer les conditions d'enneigement probables. La relation épaisseur de neige et type de couverture développée et utilisée dans ce projet sera abordée plus en détails dans la section portant sur les facteurs-n de gel.

Tableau 1 : Les différentes classes et sous classes de la couverture des terres retrouvées au Nunavik, leurs caractéristiques générales, la superficie couverte par chacune d'elle et les facteurs-n de dégel types (n_t) tirés de la littérature.

Classification de la couverture des terres					Caractéristique	Code combiné	Composante 1				Composante 2				Moyenne pondérée	
		Type de couverture		Densité			C1	P_{C1}	n_{tC1}	Cv1	C2	P_{C2}	n_{tC2}	Cv2	n_t	Cv
Avec végétation	Forêt (plus 10 % couvert par arbre)	Feuillu		Plus de 80%	Pourcentage de surface foliaire occupée par des résineux est inférieur à 25%	F.A	Feuillu	1.00	1.00	0.20	na	0.00	0.00	0.00	1.00	0.20
				61 à 80%		F.B	Feuillu	0.80	1.00	0.20	Herbacée	0.20	0.90	0.00	0.98	0.16
				41 à 60%		F.C	Feuillu	0.60	1.00	0.20	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.96	0.12
				26 à 40%		F.D	Feuillu	0.40	1.00	0.20	Herbacée	0.60	0.90	0.00	0.94	0.08
				10 à 25%		F.L	Feuillu	0.20	1.00	0.20	Herbacée	0.80	0.90	0.00	0.92	0.04
		Mixte		Plus de 80%	Pourcentage de surface foliaire occupée par des résineux est compris entre 25% et 75%	M.A	Mixte	1.00	0.85	0.30	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.30
				61 à 80%		M.B	Mixte	0.80	0.85	0.30	Herbacée	0.20	0.90	0.00	0.86	0.24
				41 à 60%		M.C	Mixte	0.60	0.85	0.30	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.87	0.18
				26 à 40%		M.D	Mixte	0.40	0.85	0.30	Herbacée	0.60	0.90	0.00	0.88	0.12
				10 à 25%		M.L	Mixte	0.20	0.85	0.30	Herbacée	0.80	0.90	0.00	0.89	0.06
		Résineux	Arbustes décidus	41 à 60%	Plus de 50 % de bouleau glanduleux, d'aulnes ou de saules	R.a.C	Résineux	0.60	0.75	0.50	Arbustive	0.40	0.85	0.40	0.79	0.46
				26 à 40%		R.a.D	Résineux	0.40	0.75	0.50	Arbustive	0.60	0.85	0.40	0.81	0.44
				10 à 25%		R.a.L	Résineux	0.20	0.75	0.50	Arbustive	0.80	0.85	0.40	0.83	0.42
			Lichens	41 à 60%	Plus de 60 % de couverture de lichens sur la superficie végétalisée qui n'est pas sous le feuillage des arbres	R.c.C	Résineux	0.60	0.75	0.50	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.81	0.30
				26 à 40%		R.c.D	Résineux	0.40	0.75	0.50	Herbacée	0.60	0.90	0.00	0.84	0.20
				10 à 25%		R.c.L	Résineux	0.20	0.75	0.50	Herbacée	0.80	0.90	0.00	0.87	0.10
			Lichens et mousses	61 à 80%	Entre 40 et 60 % de lichens sur la superficie végétalisée qui n'est pas sous le feuillage des arbres	R.cm.B	Résineux	0.80	0.75	0.50	Herbacée	0.20	0.90	0.00	0.78	0.40
				41 à 60%		R.cm.C	Résineux	0.60	0.75	0.50	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.81	0.30
				26 à 40%		R.cm.D	Résineux	0.40	0.75	0.50	Herbacée	0.60	0.90	0.00	0.84	0.20
				10 à 25%		R.cm.L	Résineux	0.20	0.75	0.50	Herbacée	0.80	0.90	0.00	0.87	0.10
			Mousses et éricacées	Plus de 80%	Moins de 40 % de couverture de lichens sur la superficie végétalisée qui n'est pas sous le feuillage des arbres	R.m.A	Résineux	1.00	0.75	0.50	na	0.00	0.00	0.00	0.75	0.50
				61 à 80%		R.m.B	Résineux	0.80	0.75	0.50	Herbacée	0.20	0.90	0.00	0.78	0.40
				41 à 60%		R.m.C	Résineux	0.60	0.75	0.50	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.81	0.30
				26 à 40%		R.m.D	Résineux	0.40	0.75	0.50	Herbacée	0.60	0.90	0.00	0.84	0.20
				10 à 25%		R.m.L	Résineux	0.20	0.75	0.50	Herbacée	0.80	0.90	0.00	0.87	0.10
	Non forestière (moins 10% couvert par arbre)	Milieux humides	Marais et marécage d'eau douce		Herbaçaie ou arbustaie submergée lors des hautes eaux printanières.*	Mh.MR	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Arbustive	0.50	0.85	0.40	0.88	0.20
			Marais d'eau salé		Herbaçaie sous influence tidale d'eau salée ou saumâtre.*	Mh.MS	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
			Tourbière ombrotrophe uniforme		Végétation homogène (platières et plateaux) dominée par des herbaçaies ou des arbustaies. En milieu boréal et subarctique.*	Mh.TOU	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Arbustive	0.50	0.85	0.40	0.88	0.20
			Tourbière ombrotrophe structurée		Alternance de lanières arbustives et de mares allongées et arquées.*	Mh.TOS	Arbustive	0.50	0.85	0.40	Eau	0.50	1.00	0.00	0.93	0.20
			Tourbière ombrotrophe ridée		Alternance de lanières arbustives et de dépressions herbacées.*	Mh.TOR	Arbustive	0.50	0.85	0.40	Herbacée	0.50	0.90	0.00	0.88	0.20
			Tourbière ombrotrophe à mares		Présence de grandes mares. Tourbière généralement de grande superficie.*	Mh.TOM	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Eau	0.50	1.00	0.00	0.95	0.00
			Tourbière minérotrophe uniforme		Végétation homogène (platières) composée principalement de plantes herbacées.*	Mh.TMU	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
			Tourbière minérotrophe structurée		Alternance de lanières herbacées et de mares allongées et linéaires.*	Mh.TMS	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Eau	0.50	1.00	0.00	0.95	0.00
			Tourbière minérotrophe Riveraine		Tourbière bordant un cours d'eau ou un plan d'eau et inondée lors de la crue printanière.*	Mh.TMR	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
			Tourbière à palses		Tourbière dont les palses et les mares sont nombreuses.	Mh.TOP	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Eau	0.50	1.00	0.00	0.95	0.00
			Tourbière arctique ou toundra humide		Tourbière située dans la toundra ou toundra sur sol minéral montrant de grandes zones de ruissellement superficiel. Les tourbières sont minérotrophes et l'accumulation de tourbe est réduite en raison des conditions arctiques. Plus de 50 % de couverture par les sites humides.	Mh.TAR	Herbacée	0.50	0.90	0.00	Eau	0.50	1.00	0.00	0.95	0.00
			Tourbière arctique avec 30 à 70 % d'arbustes dressés		Tourbière arctique ayant de 30 à 70 % d'arbustes dressés (> 30 cm; bouleau glanduleux, aulnes, saules).	Mh.TAA	Arbustive	0.60	0.85	0.40	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.87	0.24
		Milieux secs à subhumides en forêt boréale ou en milieu subarctique	Arbustaie haute (> 2 m)		Plus de 70 % d'arbustes* en milieu boréal ou subarctique. Les arbustes hauts (> 2 m) constituent plus de 50 % du couvert arbustif. Toujours en bordure de cours d'eau.	Msb.AH	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Arbustaie basse (0,3 à 2 m)		Plus de 70 % d'arbustes* en milieu boréal ou subarctique. Les arbustes bas (0,3 à 2 m) constituent plus de 50 % du couvert arbustif.	Msb.AB	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Arbustaie basse et mares de thermokarst		Plus de 70 % d'arbustes* et mares de thermokarst nombreuses, en milieu boréal ou subarctique.	Msb.ABM	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Lande à lichens		Plus de 30 % de lichens et moins de 30 % d'arbustes*. Correspond à une lande boisée (< 10 % d'arbres) ou à un stade de développement après feu vers une forêt ouverte à lichens.	Msb.LL	Herbacée	0.70	0.90	0.00	Arbustive	0.30	0.85	0.40	0.89	0.12
			Lande à lichens et arbustes		Entre 30 et 70 % d'arbustes* parmi une végétation de lichens, d'éricacées, de mousses et de conifères. Correspond généralement à un stade de développement après feu vers une forêt ouverte.	Msb.LLA	Arbustive	0.60	0.85	0.40	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.87	0.24
			Lande à lichens avec > 10 % de substrat rocheux		Entre 10 et 50 % de roc, de fragments rocheux et de sol minéral à nu, parmi une végétation de lichens, d'éricacées, d'arbustes, de mousses et de conifères.	Msb.LLR	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Lande subarctique		Agencement de végétation de toundra (c.-à-d. sans arbres et composée d'un mélange de lichens, d'éricacées, d'arbustes, d'herbacées et de mousses) et de petits peuplements forestiers ou de landes boisées. Moins de 10 % d'arbres et moins de 30 % d'arbustes*. Généralement dominée par les lichens.	Msb.LS	Herbacée	0.70	0.90	0.00	Arbustive	0.30	0.85	0.40	0.89	0.12
			Lande subarctique avec 30 à 70 % d'arbustes		Lande subarctique ayant entre 30 et 70 % d'arbustes*.	Msb.LSA	Arbustive	0.60	0.85	0.40	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.87	0.24
			Lande subarctique avec 10 à 50 % de substrat rocheux		Lande subarctique ayant moins de 30 % d'arbustes* et entre 10 et 50 % de roc, de fragments rocheux ou de sol minéral à nu.	Msb.LSR	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Lande subarctique dominée par le substrat rocheux		Entre 50 et 80 % de roc, de fragments rocheux ou de sol minéral à nu, avec une végétation éparse de lichens, d'éricacées, d'arbustes, de mousses et de conifères arborescents.	Msb.RLS	Sol nu	0.70	1.40	0.00	Herbacée	0.30	0.90	0.00	1.25	0.00

			Lande subarctique et mares de thermokarst	Lande subarctique ayant de nombreuses mares de thermokarst. Les arbustes* sont généralement assez abondants. Associée aux dépôts marins.	Msb.LSM	Arbustive	0.50	0.85	0.40	Herbacée	0.50	0.90	0.00	0.88	0.23
			Lande subarctique de combe à neige	Lande subarctique en position topographique de forte accumulation de neige où la composition végétale se distingue des sites adjacents à cause d'un retard dans la saison de croissance.	Msb.LSC	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
		Milieux secs à subhumides en milieu arctique	**Arbustaie arctique haute (> 1 m)**	Plus de 70 % d'arbustes* en milieu arctique (toundra). Les arbustes hauts (> 1 m) constituent plus de 50 % du couvert arbustif. Toujours en bordure de cours d'eau.	Msa.AAH	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Arbustaie arctique basse (0,3 à 1 m)	Plus de 70 % d'arbustes* en milieu arctique (toundra). Les arbustes bas (0,3 à 1 m) constituent plus de 50 % du couvert arbustif.	Msa.AAB	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Arbustaie arctique basse et mares de thermokarst	Plus de 70 % d'arbustes* en milieu arctique (toundra) et mares de thermokarst nombreuses.	Msa.AAM	Arbustive	1.00	0.85	0.40	na	0.00	0.00	0.00	0.85	0.40
			Toundra à arbustes dressés	Végétation composée d'un mélange d'arbustes dressés*, d'arbustes prostrés ou rampants, d'herbacées, de lichens et de mousses. Moins de 30 % d'arbustes dressés*.	Msa.TD	Herbacée	0.70	0.90	0.00	Arbustive	0.30	0.85	0.40	0.89	0.12
			Toundra à arbustes dressés avec 30 à 70 % d'arbustes dressés	Toundra ayant entre 30 et 70 % d'arbustes dressés*.	Msa.TDA	Arbustive	0.60	0.85	0.40	Herbacée	0.40	0.90	0.00	0.87	0.24
			Toundra à arbustes dressés de combe à neige	Toundra à arbustes dressés en position topographique de forte accumulation de neige où la composition végétale se distingue des sites adjacents à cause d'un retard dans la saison de croissance.	Msa.TDC	Herbacée	0.70	0.90	0.00	Arbustive	0.30	0.85	0.40	0.89	0.12
			Toundra à arbustes dressés avec ostioles	Toundra ayant moins de 30 % d'arbustes dressés* et des ostioles en grand nombre (couvrant entre 10 et 50 % de la surface). Les plantes vasculaires sont plus abondantes que dans la classe TD. En terrain plat ou peu incliné.	Msa.TDO	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Toundra à arbustes dressés avec ostioles et 30 à 70 % d'arbustes	Toundra ayant entre 30 et 70 % d'arbustes dressés* et des ostioles en grand nombre (couvrant entre 10 et 50 % de la surface). Les plantes vasculaires sont plus abondantes que dans la classe TDA. En terrain plat ou peu incliné.	Msa.TAO	Arbustive	0.60	0.85	0.40	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.07	0.24
			Toundra à arbustes dressés avec mares de thermokarst	Toundra ayant de nombreuses mares de thermokarst et un assez grand couvert d'arbustes dressés*. Associée aux dépôts marins.	Msa.TDM	Arbustive	0.50	0.85	0.40	Eau	0.50	1.00	0.00	0.93	0.20
			Toundra à arbustes dressés avec 10 à 50 % de substrat rocheux	Toundra ayant moins de 30 % d'arbustes dressés et entre 10 et 50 % de roc, de fragments rocheux et de sol minéral à nu.	Msa.TDR	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Toundra à arbustes dresses dominée par le substrat rocheux	Toundra ayant entre 50 et 90 % de roc, de fragments rocheux et de sol minéral à nu.	Msa.RTD	Sol nu	0.70	1.40	0.00	Herbacée	0.30	0.90	0.00	1.25	0.00
			Toundra à arbustes prostrés	Toundra sans arbustes dressés. La végétation dépasse difficilement 20 cm de haut et le substrat minéral affleure régulièrement à la surface (jusqu'à 50 % de roc, de fragments rocheux et de sol minéral à nu).	Msa.TP	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Toundra à arbustes prostrés avec ostioles	Toundra à arbustes prostrés ayant un grand nombre d'ostioles ou autres formes périglaciaires apparentées (couvrant entre 10 et 50 % de la surface). Les plantes vasculaires sont plus abondantes que dans la classe TP. En terrain plat ou peu incliné.	Msa.TPO	Herbacée	0.60	0.90	0.00	Sol nu	0.40	1.40	0.00	1.10	0.00
			Toundra herbacée avec arbustes prostrés	Toundra à arbustes prostrés ayant plus de 10 % d'herbacées. Associée aux versants avec ruissellement nival.	Msa.TH	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
			Toundra à arbustes prostrés dominée par le substrat rocheux	Toundra à arbustes prostrés ayant entre 50 et 80 % de roc, de fragments rocheux et de sol minéral à nu.	Msa.RTP	Sol nu	0.70	1.40	0.00	Herbacée	0.30	0.90	0.00	1.25	0.00
Sans végétation	**Terre**	**Affleurements et fragments rocheux**		Roc à nu ou fragments rocheux, incluant de vastes champs de blocs sur collines dans l'extrême nord. Moins de 20 % de végétation.	AR	Sol nu	1.00	1.40	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00
		Champs de blocs		Plus de 50 % de couverture par des champs de blocs. Dans des sites propices au délavage du matériel dans les plaines et les dépressions topographiques. Moins de 20 % de végétation.	CB	Sol nu	1.00	1.40	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00
		Surface dénudée		Sable, plages et autres surfaces sans végétation. Moins de 20 % de végétation.	SD	Sol nu	1.00	1.40	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00
		Neige		Neige accumulée dans des dépressions topographiques aux latitudes et aux altitudes les plus élevées. Observée en juillet ou en août.	NE	Neige	1.00	1.00	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Infrastructure humaine		Habitations, rues, routes, barrage, poste hydroélectrique, etc.	IH	Sol nu	1.00	1.40	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00
		Ligne de transport d'énergie			LTE	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
		Île de moins de 8 ha		Île présente dans la BNDT*, inférieure à l'aire minimale de cartographie.	ILE	na									
		Brûlis			BR	Herbacée	1.00	0.90	0.00	na	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
	eau	**Plan d'eau**		Lac, cours d'eau, site inondé	EAU	Eau	1.00	1.00	0.00	na	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tableau 2 : Types de couvertures des terres et leurs facteurs-n de dégel types tirés de la littérature.

types de couverture des terres	**n_t**	**Sources**
Eau	1	
Neige	1	
Sol nu	1.4	1
Végétation basse (herbacée)	0.9	3
Végétation arborescente (Feuillu)	1.0	2
Végétation arborescente (mixte)	0.85	2
Végétation arbustive	0.85	2
Végétation arborescente (résineux)	0.75	2 et 3
1: Department of the army and the air force, 1983. 2: Jorgenson and Kreig, 1988. 3: Way et Lewkowicz, 2016.		

Tableau 3 : Formules descriptives utilisées dans les descriptions des sous-unités et leurs coefficients de proportion d'occupation (*P).*

Formule descriptive	**Coefficient de proportion d'occupation (*P*)**
Moins de 30%	0.3
Entre 30 et 50 %	0.4
Plus de 50 %	0.5
Entre 30 et 70 %	0.6
Entre 50 et 80 %	0.7
Plus de 70 %	1.0

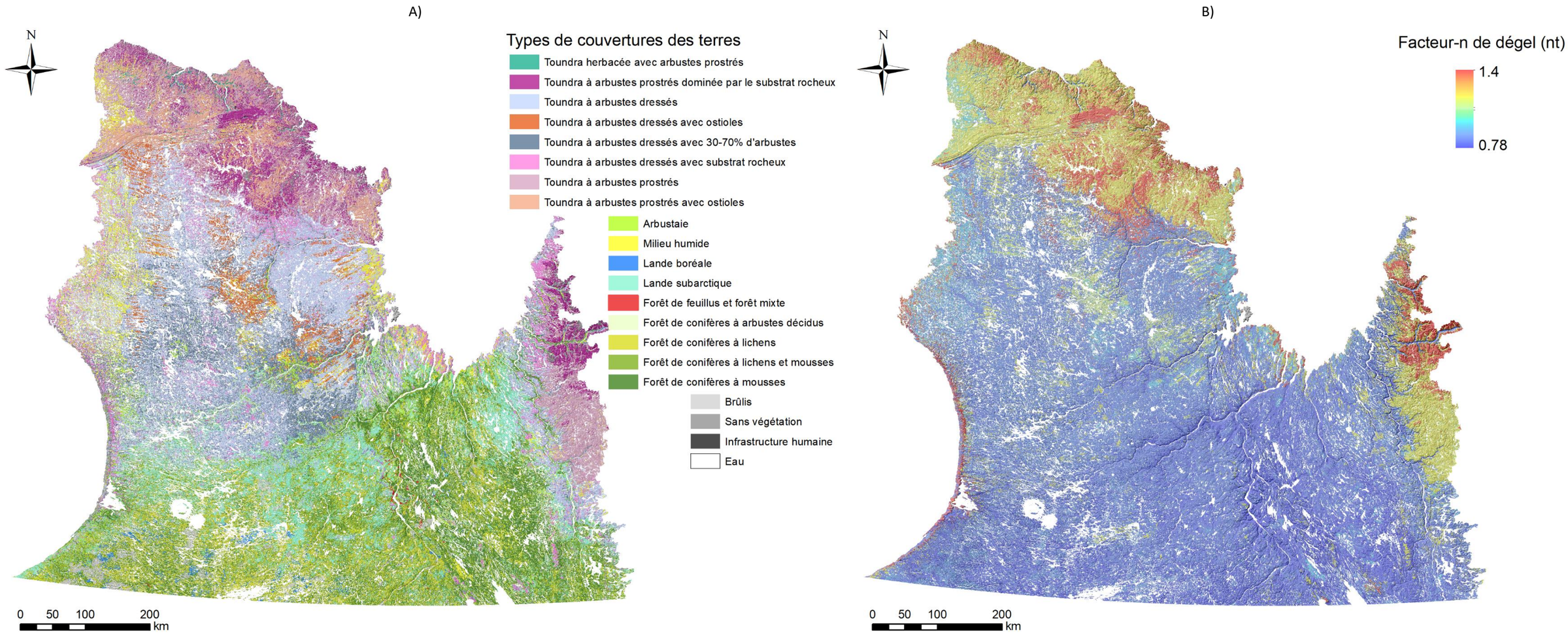

Figure 6 : A) La carte des types de couvertures des terres du Nord québécois complétée en 2018 par la Direction des inventaires forestiers (DIF) du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) et B) Facteurs-n de dégel (n_t) calculés pour chacune des sous-unités de la couverture des terres.

3.2.2.2 FACTEURS-N DE GEL

3.2.2.2.1 RELATION ÉPAISSEUR DE NEIGE ET FACTEUR-N DE GEL

L'épaisseur du couvert nival, limitant l'extraction de la chaleur du sol en hiver (Goodrich, 1982), est un facteur déterminant qui influence fortement les températures à la surface du sol en hiver (Zhang 2005). William et Smith (1989) ont démontré numériquement que la perte de chaleur du sol pour un site sous une épaisse couche de neige était de 80 à 90 % inférieure à celle pour un site avec moins de 25 cm de neige. Karunaratne et Burn (2003) ont identifié l'épaisseur de neige comme étant le principal facteur responsable de la variation temporelle et spatiale du facteur-n de gel. Malheureusement, le manque d'observations fiables et fréquentes des précipitations et de la distribution de la neige au sol rend très difficiles l'estimation de l'épaisseur du couvert nival et sa cartographie.

Les paramètres du couvert de neige au sol qui composent la « couche tampon » en surface du terrain sont l'épaisseur, la densité, le rythme saisonnier d'accumulation et la durée. La durée a fait l'objet de plusieurs publications basées sur des observations par télédétection satellitaire. L'épaisseur moyenne sur le territoire est souvent estimée au moyen du calcul de l'équivalent en eau (SWE, Snow Water Equivalent) à l'aide d'algorithmes appliqués à des mesures de télédétection. La densité fait présentement l'objet d'études de terrain afin d'améliorer la représentation du couvert de neige dans les modèles climatiques globaux (Gouttevin *et al.,* 2012). En matière de conditions pour le pergélisol cependant, il fut démontré dès les années 1970 que l'épaisseur, souvent simplement mesurée vers la fin de l'hiver, est le principal facteur effectif dans l'effet de couche tampon (Nicholson et Granberg, 1973; Goodrich, 1982). Or, ce paramètre ne se mesure pas encore avec confiance par télédétection. Étant donné que les senseurs MODIS des satellites AQUA et TERRA mesurent la température à la surface de la neige, celles-ci sont généralement plus froides en hiver que celles à la surface du sol (biais froid). Par conséquent, la simple différence entre les températures de l'air et celles à la surface du couvert de neige en hiver (LST) ne permettra pas de calculer des facteurs-n hivernaux permettant de simplifier l'influence de l'épaisseur du couvert nival sur les températures à la surface du sol.

Pour combler le manque d'observations de l'épaisseur de neige, il existe pour le Canada, des données sur grilles produites par Brown et Brasnett (2015). Toutefois, ces données ne tiennent pas compte du processus de redistribution de la neige par le vent durant et après les précipitations qui est typique des milieux ouverts comme c'est le cas pour la toundra qui occupe une fraction importante du territoire à l'étude. Roche et Allard (1996) confirment d'ailleurs qu'au Nunavik, la neige à l'échelle locale est en grande partie redistribuée par le vent. En régions arctiques, dans les prairies ou les régions montagneuses, la combinaison du vent et des précipitations joue un rôle important dans la redistribution de la neige dont la variabilité en épaisseur peut varier d'un facteur de 10 (Liston et Sturm, 1998). De manière générale, la couverture de neige est érodée aux endroits où la végétation est basse et clairsemée et ceux exposés aux vents pour ensuite s'accumuler dans les secteurs protégés (végétation plus dense, plus haute, dépressions topographiques, etc.). En milieu de forêts subarctiques ou de toundra, le patron de distribution spatiale du couvert nival est sensiblement similaire d'une année à l'autre (Mackay et MacKay 1974; Filion et Payette, 1982; Zhang et al. 1997; Ménard et al. 1998; Kershaw, 2003; Morse *et al.,* 2012). Cette faible variabilité interannuelle s'explique par l'interaction du régime éolien avec des éléments statiques du milieu comme la végétation et la topographie qui confère des conditions aérodynamiques relativement stables. Pour ces raisons, malgré la qualité des données sur grille, celles-ci ne sont pas d'une grande utilité pour modéliser localement le régime thermique du pergélisol.

Dans la littérature, une épaisseur de neige supérieure à 70 cm a été identifiée comme étant un seuil au-delà duquel l'isolation du sol est telle que les fluctuations majeures de température de l'air y sont pratiquement imperceptibles et limitent la formation voire le maintien du pergélisol au Québec subarctique (Thom, 1969; Nicholson et Grandberg, 1973; Filion et Payette, 1976 et 1978; Nicholson, 1978; Desrochers et Granberg, 1988; Roche et Allard, 1996). Dans le secteur de Kangiqsualujjuaq, toujours en zone de pergélisol discontinu, Séguin et *al.* (1988) et Ben-Miloud et Séguin (1990) avaient observé qu'un couvert de plus de 80 cm de neige suffisait pour empêcher le développement du pergélisol dans les dépôts meubles. C'est également cette valeur critique d'enneigement parfois accumulé en bordure de certains

remblais de pistes d'atterrissage et de route d'accès au Nunavik qui est responsable de la dégradation accélérée du pergélisol aux abords des infrastructures (Allard et *al.,* 2007; L'Hérault et *al.*, 2012). D'après May (2011), l'effet isolant de la neige semble maximal lorsque l'épaisseur du couvert atteint une épaisseur de 150 cm et plus.

Riseborough et Smith (1998) ont démontré numériquement que le facteur-n de gel varie systématiquement en fonction de l'épaisseur moyenne de la neige et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) en suivant une fonction exponentielle. Cette relation est présentée à la figure 7. Dans cette relation, l'utilisation d'une valeur de densité unique pour la neige ne permet pas de tenir compte de la variabilité qui existe entre les différents environnements (milieu forestier fermé ou ouvert, taiga, toundra, milieu alpin, prairie, etc.). Par conséquent, pour une même épaisseur, une neige plus dense aura une conductivité thermique plus élevée, donc un facteur-n plus élevé qu'une neige moins dense. Way *et al.* (2016), dans leurs travaux visant à cartographier le pergélisol, avaient appliqué un facteur de normalisation tenant compte de la densité de la neige selon les principales classes de neige proposées par Sturm *et al.* (2010) afin d'obtenir une épaisseur équivalente. À ce stade-ci de l'étude, une telle normalisation ne sera pas appliquée, mais pourrait être testée dans une phase ultérieure.

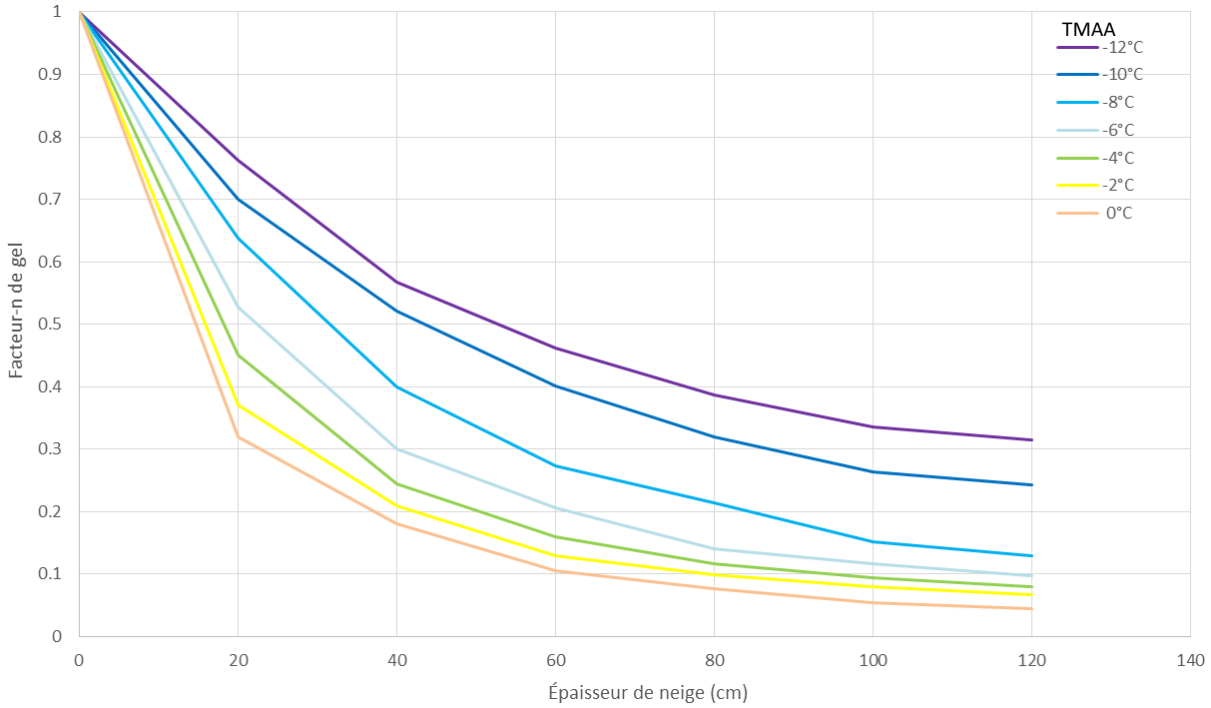

Figure 7 : Relation entre facteur-n de gel, épaisseur de neige et température moyenne annuelle de l'air calculé numériquement par Riseborough et Smith (1998) avec une valeur de densité de la neige de 250 kg/m^3.

3.2.2.2.2 INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION ET DE LA TOPOGRAPHIE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU COUVERT NIVAL

Le patron de distribution de la couverture nivale, ses propriétés mécaniques et thermiques sont intimement liées à l'interaction entre plusieurs facteurs de contrôle qui sont : la topographie, la direction des vents dominants, et le type de végétation et de couvert forestier (Filion et Payette, 1982; Essery et Pomeroy, 2004). Les liens entre le couvert végétal, la topographie locale, l'épaisseur de neige et l'atténuation des températures de l'air à l'interface neige-sol sont très bien documentés empiriquement (Nicholson et Grandberg, 1973; Ménard *et al.,* 1998; Allard *et al.* 2007; Allard *et al.,* 2003). De manière générale, les structures végétales érigées (arbres et arbustes), en réduisant la vélocité du vent, contribuent à piéger la neige. Par conséquent, l'épaisseur de neige dans ces secteurs est généralement plus élevée comparativement aux secteurs de basse végétation où la neige est plus susceptible d'être mobilisée et redistribuée par le vent (Sturm, 1992; Pomeroy et Gray, 1995; Kershaw et McCulloch, 2007; Jean et Payette, 2014;). Selon Payette *et al* (1973), le patron de distribution de la couverture nivale montre une

certaine zonation à l'intérieur de la toundra forestière qui se résume essentiellement à des épaisseurs plus importantes dans les forêts et les krummholz élevés de la sous-zone arbustive et une diminution dans les formations basses arbustives et de la toundra arbustive. Une telle zonation souligne, enfin, que l'enneigement reflète assez fidèlement le patron de distribution des formations conifériennes dont l'origine et la nature sont principalement climatiques. Ces derniers suggèrent également que le patron d'enneigement est relativement constant d'une année à l'autre, du moins, dans la toundra forestière hudsonienne; cette observation est aussi applicable aux secteurs plus continentaux du Québec-Labrador (Matthews 1962; Thom et Granberg 1970).

Pour le Nunavik, l'influence de la végétation sur le patron de distribution de la couverture de neige a été abordée directement ou indirectement dans plusieurs études (Roche et Allard, 1996; Ménard *et al.,* 1998; May, 2011; Jean, 2012, Fortin *et al.,* 2015; Pelletier, 2015). Par exemple, l'étude détaillée de l'enneigement autour du plateau de pergélisol de Manitounuk réalisée par Roche et Allard (1996) confirme le rôle dominant de la végétation, surtout arbustive, sur la répartition du couvert nival. Des travaux réalisés par Michaud *et al.* (1994) ont démontré également une très bonne relation entre l'épaisseur du couvert de neige et la physionomie végétale. Par exemple, ces derniers ont mesuré des épaisseurs de neige plus élevées pour les arbustaies ce qui indique que non seulement la hauteur des espèces est à considérer, mais qu'également la densité des tiges et des branches joue un rôle très important dans la rétention de la neige au sol. D'ailleurs, dans le secteur d'Umiujaq, May (2011) avait obtenu de meilleures corrélations entre l'épaisseur de la neige et la végétation en considérant non seulement sa hauteur, mais également sa structure et sa stabilité. Ses résultats ont d'ailleurs identifié clairement les arbustes d'une hauteur comprise entre 50 et 100 cm comme étant la classe de végétation qui favorise le plus les accumulations de neige. Pour le même secteur, l'étude récente réalisée par Pelletier (2015) arrive aux mêmes conclusions. Dans les environs de Churchill au Manitoba, Kershaw (2003) avait mesuré des épaisseurs de neige légèrement supérieures à 60 cm en zone forestière, de moins de 5 cm sur des plateaux de tourbe avec polygones et d'environ 10 cm dans la toundra. En général, les structures végétales basses ne permettent pas d'éviter que le vent érode puis redistribue la neige ce qui se traduit habituellement par un couvert nival mince dans ces secteurs (Pomeroy et Gray, 1995; Pomeroy *et al.,* 1995). À mesure que la structure de la végétation augmente en hauteur, sa capacité à retenir la neige augmente, limitant ainsi l'érosion et favorisant par le fait même le développement d'une épaisse couverture nivale. Des essais de simulation réalisés par Essery et Pomeroy (2004) ont démontré que l'augmentation de la hauteur des arbustes augmente l'épaisseur de la couverture nivale jusqu'à ce que la quantité de neige tombée et mobilisable disponible soit atteinte. Les mêmes auteurs ont également observé qu'une augmentation de la densité du couvert arbustif se traduit par une diminution de l'épaisseur de neige en raison de l'apport réduit de neige soufflée provenant des clairières environnantes. Payette *et al.* (1973) abondent en ce sens en stipulant qu'une forêt de plus en plus fermée, en limitant l'exposition éolienne donc la quantité de neige pouvant être mobilisée par le vent, entraîne une diminution de la profondeur et de la densité de la neige.

Outre que sur le patron de distribution, le type de végétation semble avoir également un impact sur la densité de la neige. Par exemple, les résultats de Michaud *et al.* (1994) indiquent que le couvert de neige a tendance à être plus dense dans les muscinaies que dans les autres formations végétales. En ce sens, Jean et Payette (2014) confirment que la couverture nivale est habituellement plus importante et également plus isolante sur les palses boisées que sur les palses non boisées (Figure 8A). D'après Payette *et al.* (1973), l'augmentation de la densité du tapis nival en toundra serait associée aux conditions climatiques plus rigoureuses (basses températures, exposition éolienne) et à une plus grande turbulence au contact de la surface de neige en raison de l'absence d'arbres.

Les caractéristiques du couvert végétal et leur distribution spatiale étant influencées en partie par la topographie, il est parfois difficile de dissocier la contribution de chacune de ces variables dans la distribution du couvert nival. Par exemple, l'influence de la topographie semble être la cause de corrélations moins significatives obtenues entre les structures de végétation et les épaisseurs de neige dans les études de May (2011) et de Jean et Payette (2014) (Figure 8B). Dans le paysage, cette relation

intime entre la topographie et la végétation s'exprime par l'occurrence des structures érigées (arbustes et arbres) dans les endroits protégés où l'érosion nivéo-éolienne est réduite en raison de la couverture de neige qui protège la végétation, tandis que les sommets sont généralement découverts avec une végétation de type herbacée ou arbustive prostrée. Sturm et al (2001) suggèrent également que l'effet isolant que procure une épaisse couche de neige favorise la croissance des arbustes. Plusieurs études révèlent que ce sont souvent dans les dépressions colonisées par une végétation arbustive ou arborescente que l'épaisseur de la couverture nivale est plus importante en raison du potentiel à piéger la neige mobilisée par le vent (Morse *et al.,* 2012). Ainsi, on assiste à l'établissement d'un mécanisme à rétroaction positive qui favorise le développement du thermokarst, lequel contribue à son tour au creusement des dépressions qui vont favoriser davantage l'enneigement et ainsi maintenir un milieu propice à la croissance des structures végétales érigées (arbustes et arbres). Selon Roche et Allard (1996), ce mécanisme est vraisemblablement déclenché par une colonisation progressive du terrain par la végétation arbustive, facilitée par des conditions microtopographiques et microclimatiques dont l'effet catalyseur peut être déterminant.

À mesure que l'on se déplace vers le nord et que la taïga laisse place à la toundra, la diminution et la disparition du couvert forestier et le passage d'une végétation érigée à prostrée entraîne une substitution graduelle du relief à la structure de végétation comme facteur de contrôle de l'enneigement (Filion et Payette, 1976). Suite à de nombreuses observations visuelles, May (2011) a établi une corrélation claire entre la topographie et le patron de distribution du couvert de neige sur son site d'étude. Par exemple, cette dernière confirme que presque tous les sommets des palses et autres points hauts étaient dépourvus ou à peine couverts de neige tandis que des accumulations pouvant atteindre 2 m d'épaisseur étaient typiques dans les points bas entre les collines. Pelletier (2015), dans le même secteur, rapporte sensiblement les mêmes faits confirmant que l'absence de neige sur les sommets de montagne et des palses contraste avec les importantes accumulations sur les pentes et dans les dépressions. Plus au nord, ce patron de distribution de la neige a également été observé et est mis en évidence par les photographies aériennes obliques prises au mois de mai 2016 (Figure 10). La comparaison d'images satellites Landsat multidates pour les mois de février, mai, juin et juillet 2016 (Figure 11) permet, pour un territoire plus large, de confirmer la récurrence de combes à neige dans les pieds de pente et les dépressions. En comparaison, la couverture de neige sur les sommets et les crêtes exposés est soit absente ou éphémère. Les travaux de Morse *et al.* (2012), en comparant l'épaisseur de la couverture nivale entre différents écotopes, montrent clairement qu'en milieu de toundra, les pieds de versants et les pentes inférieures sont les endroits où s'accumule le plus de neige (valeur médiane supérieure à 70 cm de neige), tandis que les hauts de pentes et les plaines sont ceux où la couverture nivale est la moins épaisse (valeur médiane inférieure à 40 cm de neige).

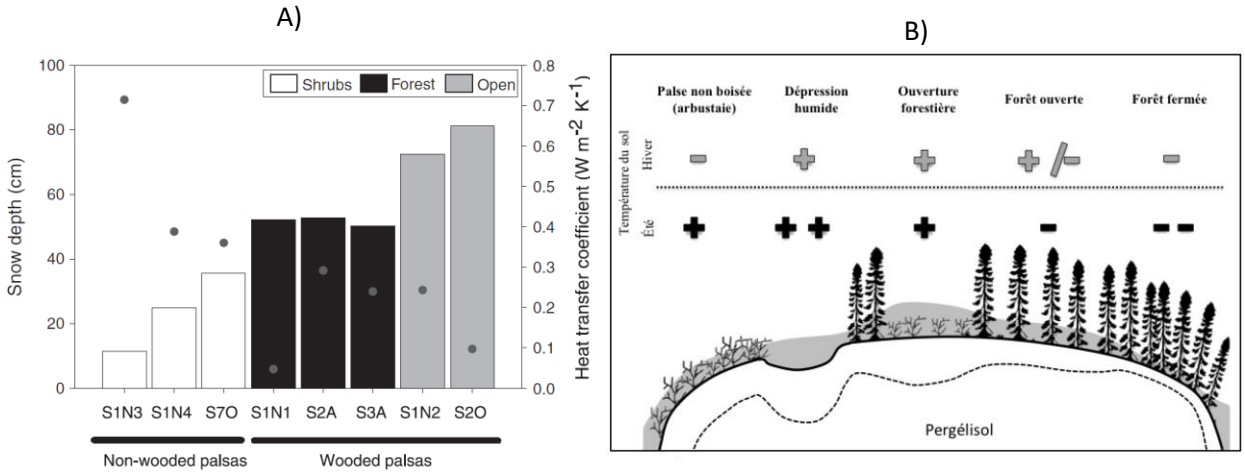

Figure 8 : A) Épaisseur de neige (diagramme à barres) et coefficient de transfert thermique (points) en fonction du type de végétation (Tirée de Jean et Payette, 2014), B) Épaisseur de neige (gris), épaisseur maximale du mollisol (ligne pointillée) et

température du sol en été (symboles noirs) et en hiver (symboles gris) prédites en fonction de la végétation (Tirée de Jean, 2012). Les « + » indiquent une température du sol plus élevée et les « - » une température du sol plus basse.

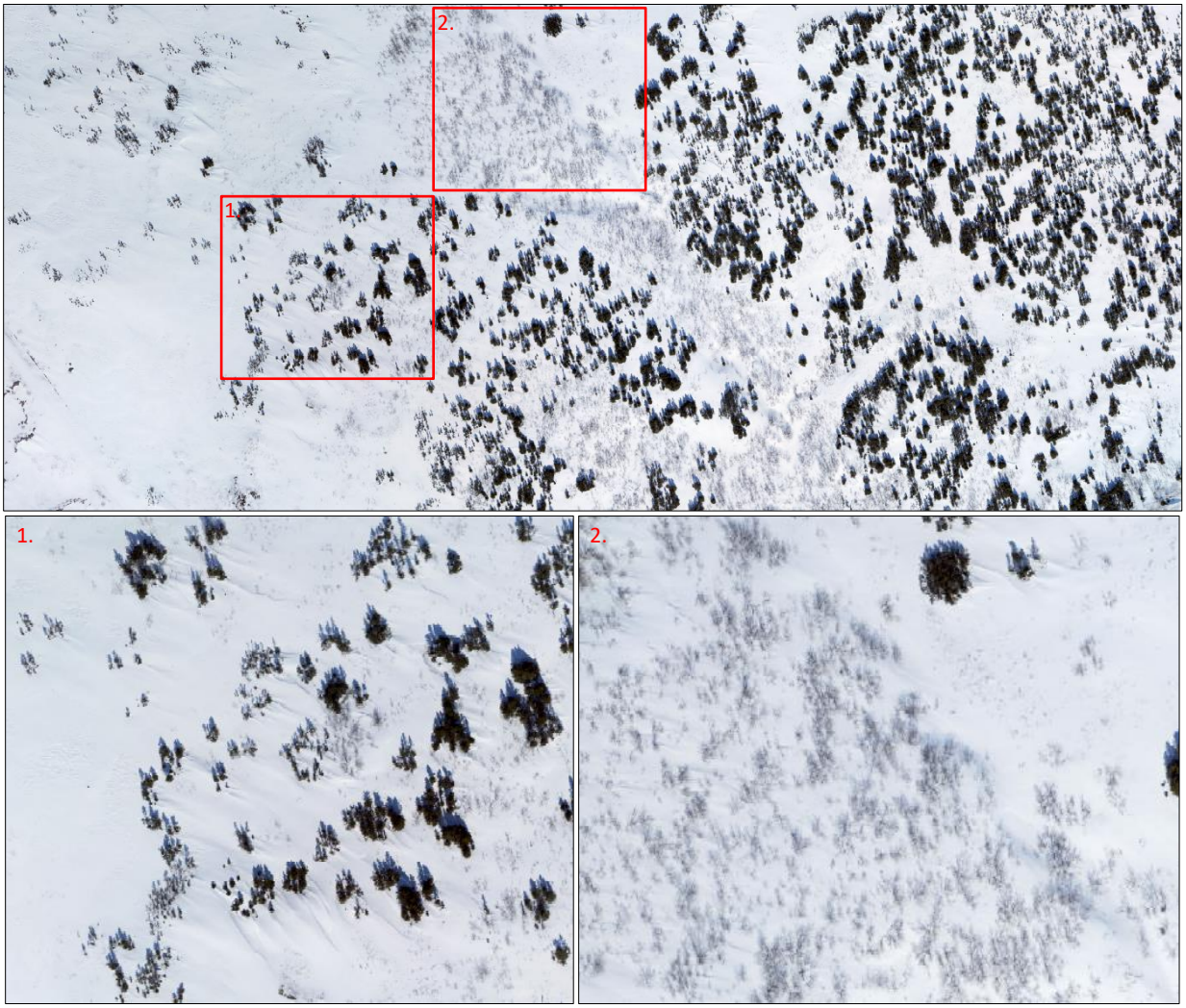

Figure 9 : Orthomosaïque en couleur et à haute résolution de la vallée Tasiapik en hiver (mai 2016), Umiujaq, Nunavik (gracieuseté de Dominé, 2016). L'agrandissement de gauche montre l'influence des épinettes sur le patron de distribution de la couverture nivale (formes profilées) tandis que celui de droite confirme l'excellente capacité de rétention de la neige des taillis d'arbustes (saules principalement).

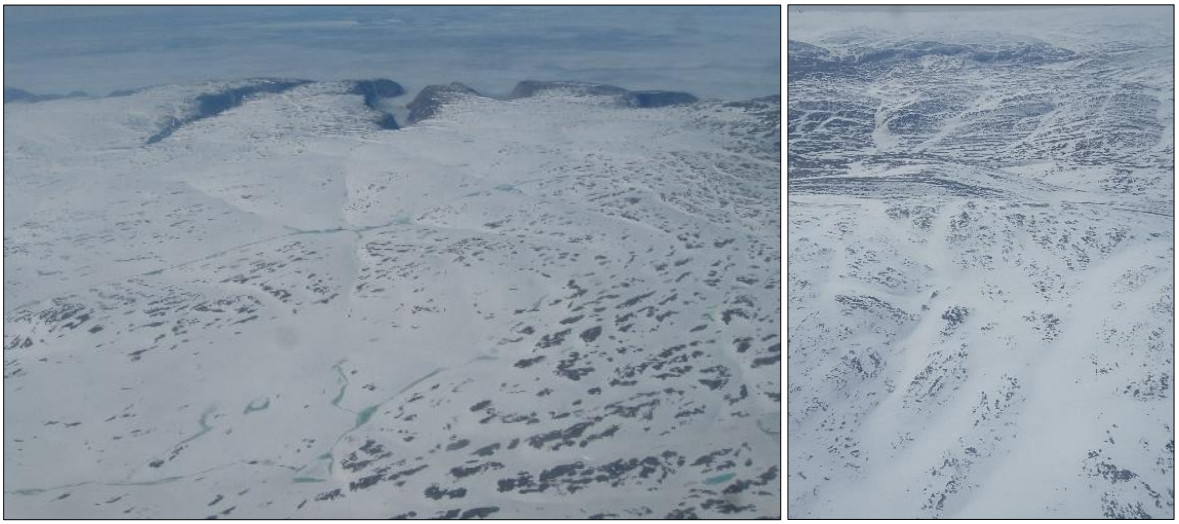

Figure 10 : Photographies aériennes obliques prises lors d'un vol entre Ivujivik et Salluit montrant la relation entre l'enneigement différentiel et la topographie où les dépressions se retrouvent généralement comblées de neige tandis que les versants et les crêtes exposés sont habituellement dépourvus de neige.

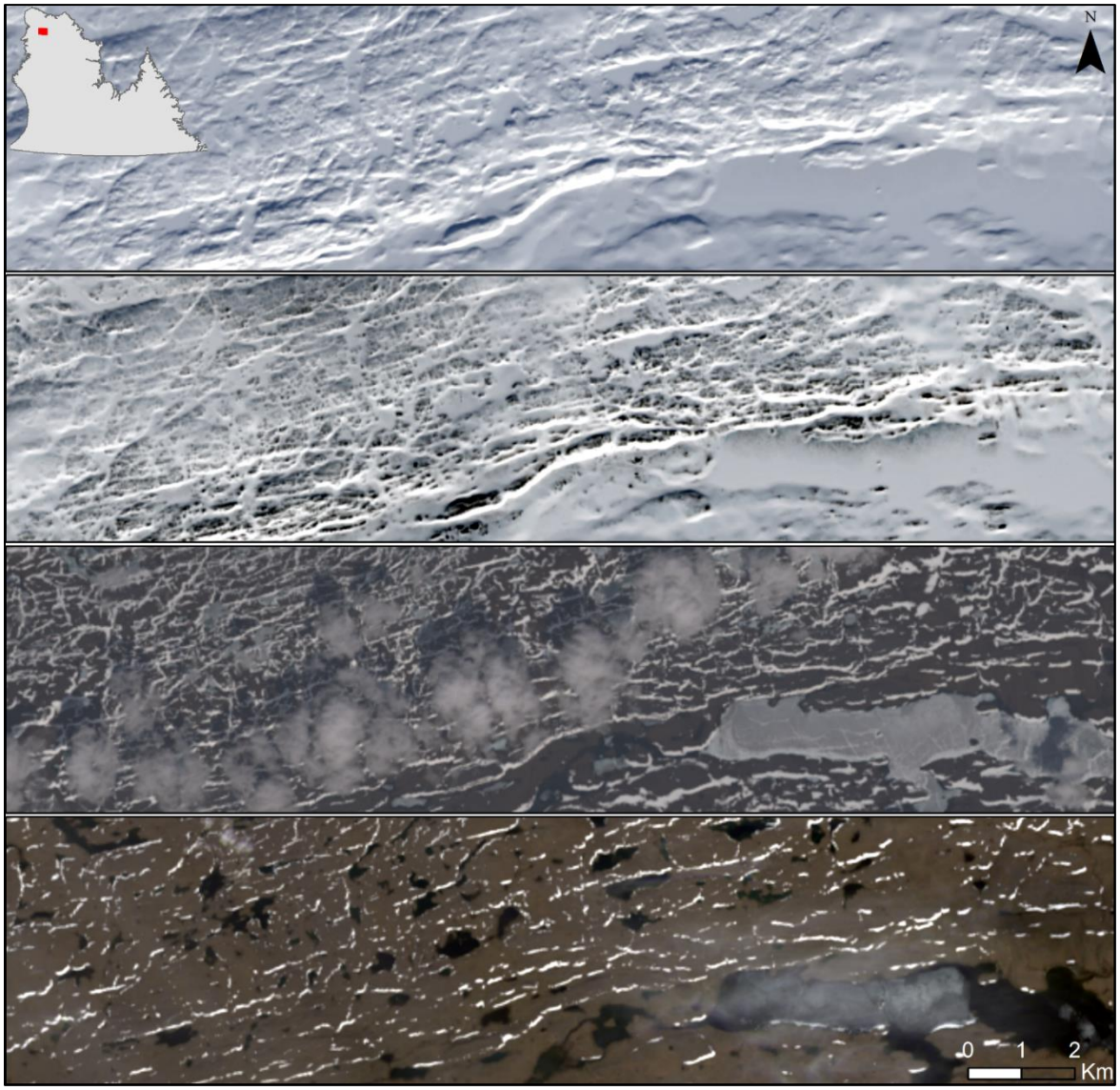

Figure 11 : Images Landsat prises en 2016 le 19 février, le 9 mai, le 26 juin et le 12 juillet.

3.2.2.2.1 INDICE DE POTENTIEL D'ACCUMULATION DE NEIGE

Telle que présenté dans les sections précédentes, de nombreuses études ont démontré qu'il existe bel et bien un lien en milieu subarctique et arctique entre les caractéristiques du couvert nival (épaisseur et densité) et l'interaction du vent avec les structures de la végétation et la topographie. Dans ces milieux, ce lien se confirme là où une faible modification dans la structure de la végétation ou la topographie se traduit habituellement par une variation de la couverture nivale. Par exemple, la redistribution de la neige par le vent dans certains secteurs, particulièrement dans les dépressions colonisées par une végétation arbustive, permet des accumulations de neige de loin supérieures à la quantité de précipitations reçues (Essery et Pomeroy, 2004; Hirashima *et al.,* 2004).

Compte tenu du peu de données de précipitations disponibles et de l'extrême variabilité spatiale de la couverture nivale qui découle de l'importance du vent dans la redistribution de la neige, un indice d'enneigement potentiel (*IEP*) a été développé. L'indice développé ne considère pas la quantité totale de neige tombée, mais tente plutôt d'évaluer le potentiel d'accumulation de neige en fonction des caractéristiques de la structure végétale et de la topographie. La valeur de l'indice d'enneigement potentiel (*IEP*) calculée à partir de l'équation 5 se chiffre entre 0 et 1 et se fractionne en deux composantes, une composante végétale (C_v) et une composante topographique (C_t), qui occupe chacune un poids égal de 0.5. La pondération des deux composantes de l'indice d'enneigement potentiel (C_v et C_t) s'appuie sur des corrélations entre les épaisseurs de neige, les structures végétales et la topographie établies par de nombreuses recherches/observations de terrain réalisées au Nunavik et ailleurs dans des environnements subarctiques et arctiques similaires.

$$IEP = C_v + C_t \qquad \text{Équation 5}$$

La composante végétale (C_v) de l'indice d'enneigement potentiel attribue une valeur de propension des différentes structures végétales à favoriser l'accumulation de neige mobilisée par le vent. Les valeurs de la composante végétale pour chacune des classes de structures de végétation utilisée sont présentées au tableau 4. Cette pondération s'appuie en partie sur les travaux de Ménard *et al.,* (1997) qui avaient distingué trois paliers d'épaisseur de neige en fonction des différentes structures végétales se résumant ainsi: moins de 40 cm (sol nu, muscinaie et herbaçaie), 60 à 100 cm (arbustaie, arboraie ouverte et arboraie moyennement dense) et plus de 100 cm (arboraie dense). C'est à partir des types de couvertures des terres (Figure 12A) et plus spécifiquement les sous-unités qui composent la carte écologique de la végétation du Nord québécois (Tableau 1) que les classes de structures végétales dominante ont été dérivées (Figure 12B).

Tableau 4 : Pondération des différentes structures végétales en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée.

Classes des structures végétales	C_v	Épaisseur de neige (cm)
Sol dénudé	0.0	-
Végétation basse (herbacée)	0.0	
Végétation arborescente (feuillu))	0.2	
Végétation arborescente (mixte)	0.3	
Végétation arbustive	0.4	
Végétation arborescente (conifère)	0.5	+

Pour les sous-unités caractérisées par la cohabitation de plus d'un type de structure de végétation, une moyenne pondérée en fonction de la proportion d'occupation (*P*) des différentes structures rencontrées a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$C_v = (P_{(c1)} * C_{v(c1)}) + (P_{(c2)} * C_{v(c2)}) \qquad \text{Équation 6}$$

Où $P_{(c1)}$ et $P_{(c2)}$ sont respectivement les coefficients de proportion d'occupations pour les deux principales structures de végétation identifiées dans la sous-unités et la valeur de leur composante végétale respectives $C_{v(c1)}$ et $C_{v(c2)}$. Une carte de la pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation est présentée à la figure 12C.

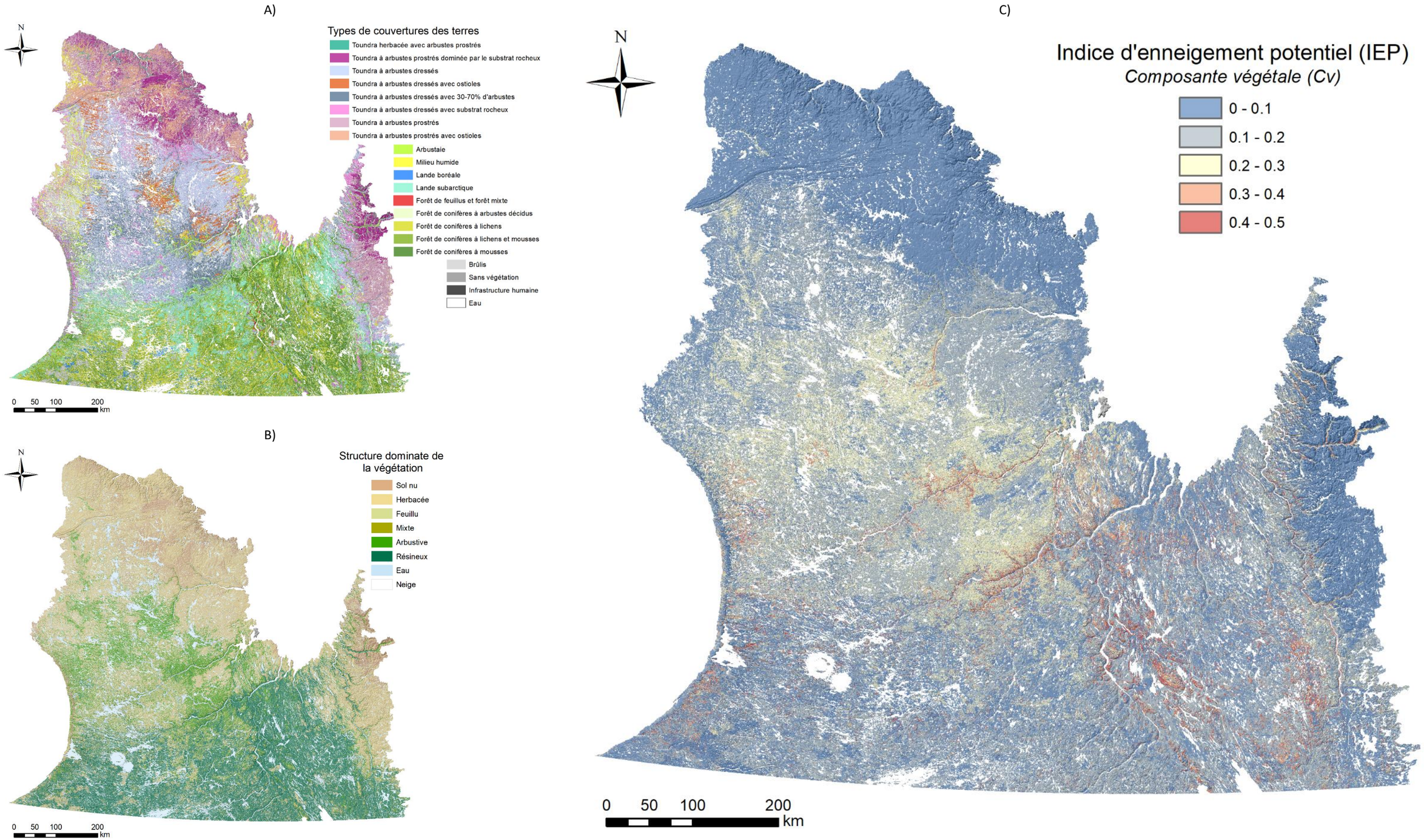

Figure 12 : A) Types de couverture des terres. B) Reclassification des types de couvertures des terres en classes de structure de la végétation. C) Pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation.

Pour la topographie, les travaux de Morse *et al.* (2012), des observations sur le terrain et également l'analyse d'images satellites permettent de confirmer qu'en milieu de toundra, les pieds de versants et les pentes inférieures sont les endroits où s'accumule le plus de neige, tandis que les hauts de pentes et les plaines sont ceux où la couverture nivale est généralement la moins épaisse. Afin de procéder à une discrétisation des unités topographiques à savoir s'il s'agit d'une crête, d'un plateau, d'une dépression, d'un haut, d'un milieu ou d'un bas de versant, un indice de positon topographique a été utilisé. Cet indice compare l'élévation de chacune des cellules d'un modèle numérique d'élévation à l'élévation moyenne pour un certain nombre de cellules voisines à l'intérieur d'un rayon déterminé (Figure 13). Concrètement, une valeur positive représente une cellule dont l'élévation est plus haute que les cellules voisines (sommet, crêtes, etc.) et inversement, une valeur négative signifie que la cellule est plus basse que son voisinage (dépression, vallée, etc.). Une valeur nulle ou près de zéro indique qu'il s'agit d'un endroit plat ou que la pente est constante. Pour procéder à la classification de la topographie, les données d'élévation du modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC) conçu par Ressources naturelles Canada ont été utilisées. Ce modèle offre une couverture continue de données d'élévation pour l'ensemble du territoire à l'étude avec une résolution de base du quadrillage en coordonnées géographiques de 23.2 x 23.2 m pour le Nunavik. La pondération des différentes unités topographiques en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige est présentée au tableau 5. Il est important de mentionner que la détermination de l'indice de position topographique est fortement influencée par la dimension du voisinage (échelle). Par conséquent, certaines particularités locales du relief peuvent ne pas ressortir si l'indice est calculé à une échelle plus petite (Figure 13). Dans le cadre de la présente recherche, une échelle intermédiaire qui permet l'observation du voisinage dans un rayon de 250 m a été utilisée et présente un niveau de détails suffisant pour bien distinguer les principales unités topographiques. La carte de classification du relief selon l'indice de position topographique (TPI) et la carte de pondération de la composante topographique sont présentées à la figure 14. La carte des indices d'enneigement potentiel cumulés obtenue suite à la sommation de la composante végétale et topographique est présentée à la figure 15.

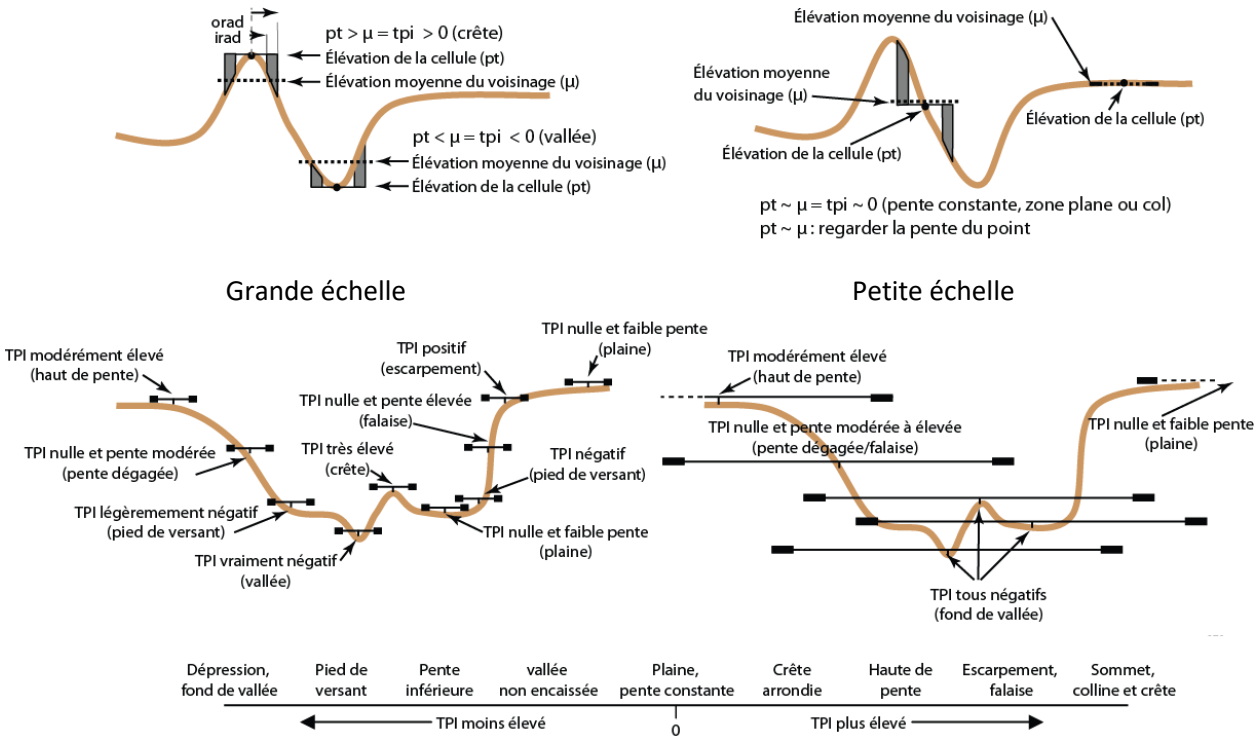

Figure 13 : Schématisation de l'algorithme de classification des unités topographiques (adaptée de Weiss, 2001).

Tableau 5 : Pondération des différentes unités topographiques en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée.

Composante topographique	valeur	Épaisseur de neige (cm)
Sommet et crête	0.0	-
Haut de pente	0.1	
Plaine et plateau	0.2	
Pente dégagée	0.2	
Dépression et fond de vallée	0.3	
Pente inférieure et pied de versant	0.5	+

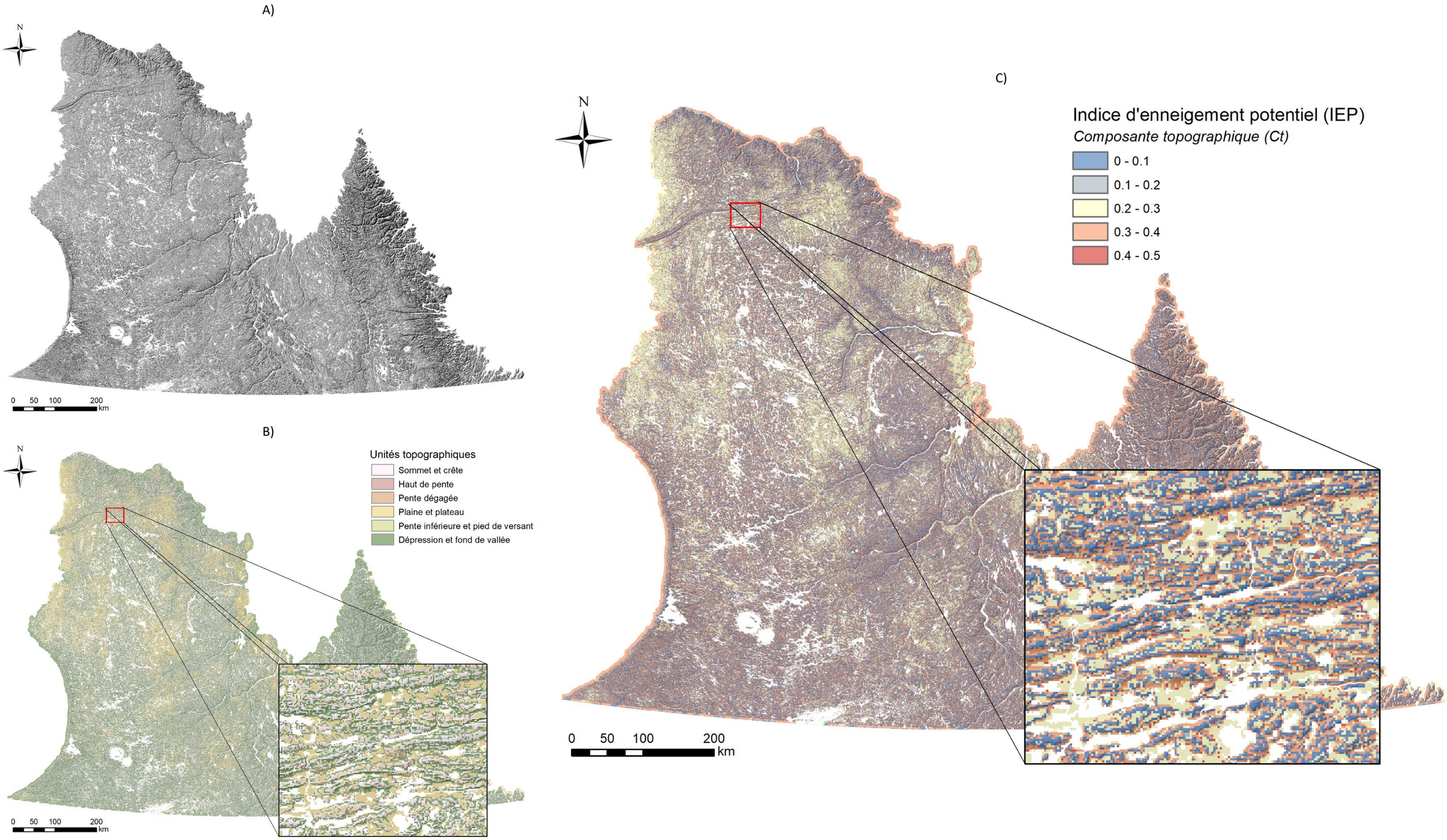

Figure 14: A) Grille matricielle du modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC) à une résolution de 23m x 23m. B) Classification du relief selon l'indice de position topographique (TPI). C) Pondération de la composante topographique dérivée de l'indice de position topographique.

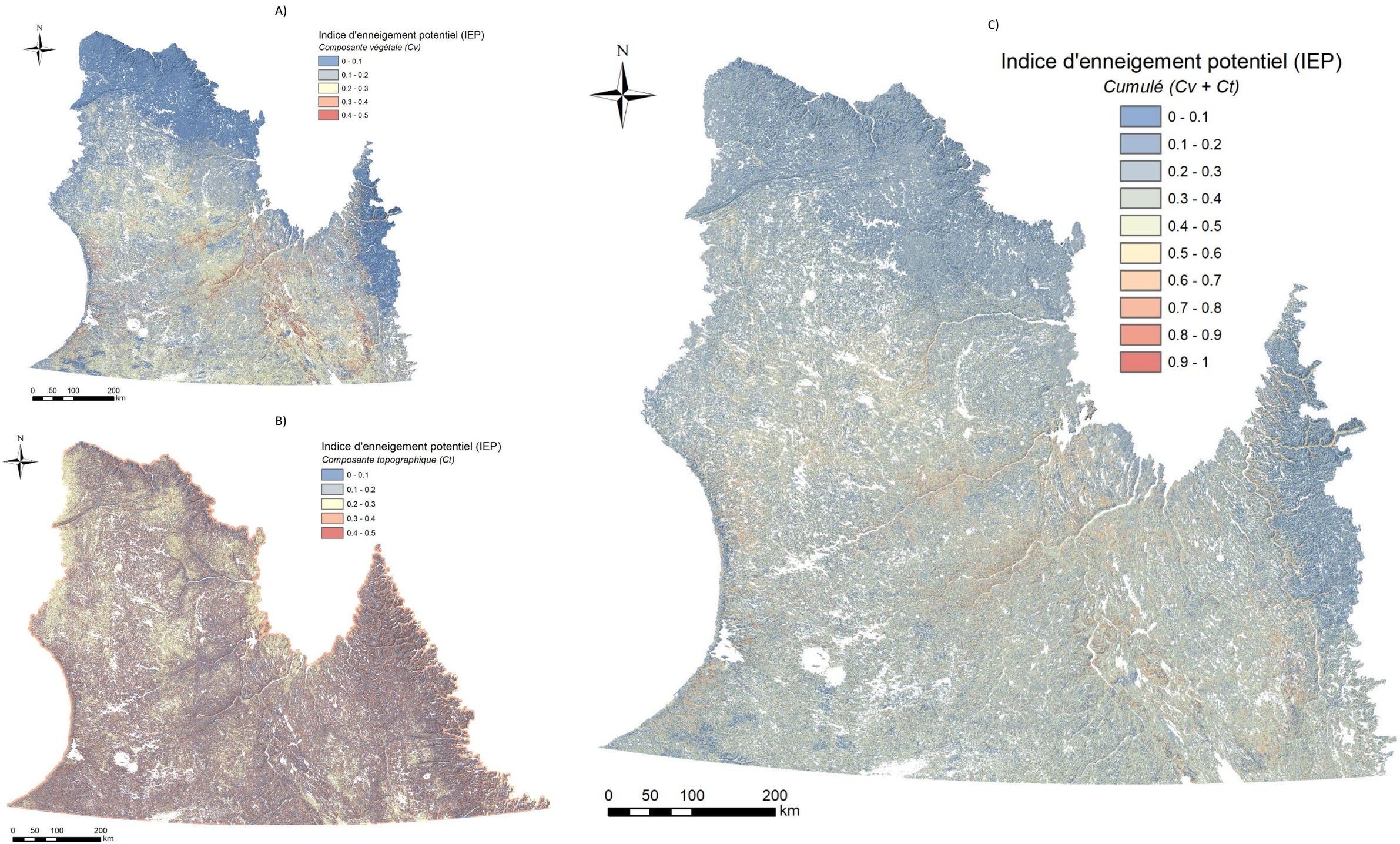

Figure 15 : Indice d'enneigement potentiel pour A) la composante végétale et B) la composante topographique. C) Indice d'enneigement potentiel cumulé.

Étant donné que la végétation favorise l'accumulation d'importantes quantités de neige indépendamment de la topographie et inversement, la pondération de chacune de ces deux composantes doit permettre à chacune d'elle d'atteindre leur potentiel d'accumulation de neige maximale respectif. Pour ce faire, la relation entre le potentiel d'enneigement et les facteurs-n associés se base sur celle proposée par Riseborough et Smith (1998) qui se rapproche plutôt d'une fonction exponentielle inverse (Figure 16A). Par conséquent, la majorité de l'influence sur la valeur du facteur-n se produit dans la première section de la courbe, soit entre les valeurs comprises entre 0 et 0.5. De cette manière, nonobstant la présence ou l'absence de l'une ou l'autre des composantes, il est possible pour une seule composante d'atteindre son influence maximale, ce qui n'aurait pas été possible par l'utilisation d'une relation linéaire.

À titre d'exemple, un secteur colonisé par une strate arbustive (Cv = 0.5) et déprimé (Ct = 0.5), contexte dans lequel l'épaisseur de neige est susceptible d'atteindre des valeurs qui surpasse la valeur charnière de 70 cm, un IEP de 1 est attribué suite à l'addition des deux composantes. Cet indice, en fonction de la courbe moyenne utilisée, correspond à une valeur de facteur-n inférieur à 0.1. À l'opposé, pour un sommet dénudé de toute végétation (Cv = 0) et exposé au vent (Ct = 0), un IEP de 0 sera attribué selon la pondération respective et correspond à un facteur-n qui se rapproche de l'unité. Entre ces deux cas extrêmes, l'addition des valeurs des différentes composantes permet une certaine gradation qui tente de refléter le mieux possible le potentiel d'enneigement en fonction des caractéristiques des composantes du milieu et leurs propensions à favoriser les accumulations de neige. Par exemple, les crêtes ou les sommets qui sont colonisés par des arbustes ou des arbres se verront attribuer un IEP entre 0.4 et 0.5 pour lequel seule la végétation agit comme facteur favorable à l'accumulation de neige.

C'est donc principalement par la cartographie associative entre le couvert végétal, le relief et le couvert nival ainsi que la relation proposée par Riseborough et Smith (1998) entre le facteur-n de gel, l'épaisseur moyenne de la neige et la température moyenne annuelle de l'air (Figure 16B), que les facteurs-n hivernaux ont été estimés dans le présent travail (Figure 16C). Quoique basé sur une corrélation largement documentée dans la littérature, l'indice développé est fondé sur des facteurs locaux, statiques, et il ne tient pas compte des processus aérodynamiques propres aux vents au ras du sol et aux changements de la morphologie de surface durant l'hiver liés à l'enneigement lui-même. Par exemple, un effet limitrophe (*Edge effects*) (Morse *et al.,* 2012) associé à un changement rapide des conditions de surface (ex. secteur végétalisé à non végétalisé) peut favoriser la formation de congères de neige dans les secteurs sous le vent et non végétalisés qui sont généralement peu propices aux accumulations. Dans une phase ultérieure, la considération des vents dominants et l'utilisation d'une résolution plus fine que 250 m^2 dans la détermination d'un indice d'enneigement potentiel permettraient de représenter plus fidèlement la dynamique d'enneigement à l'échelle locale et en l'occurrence la variation spatiale des températures de surface et la distribution du pergélisol.

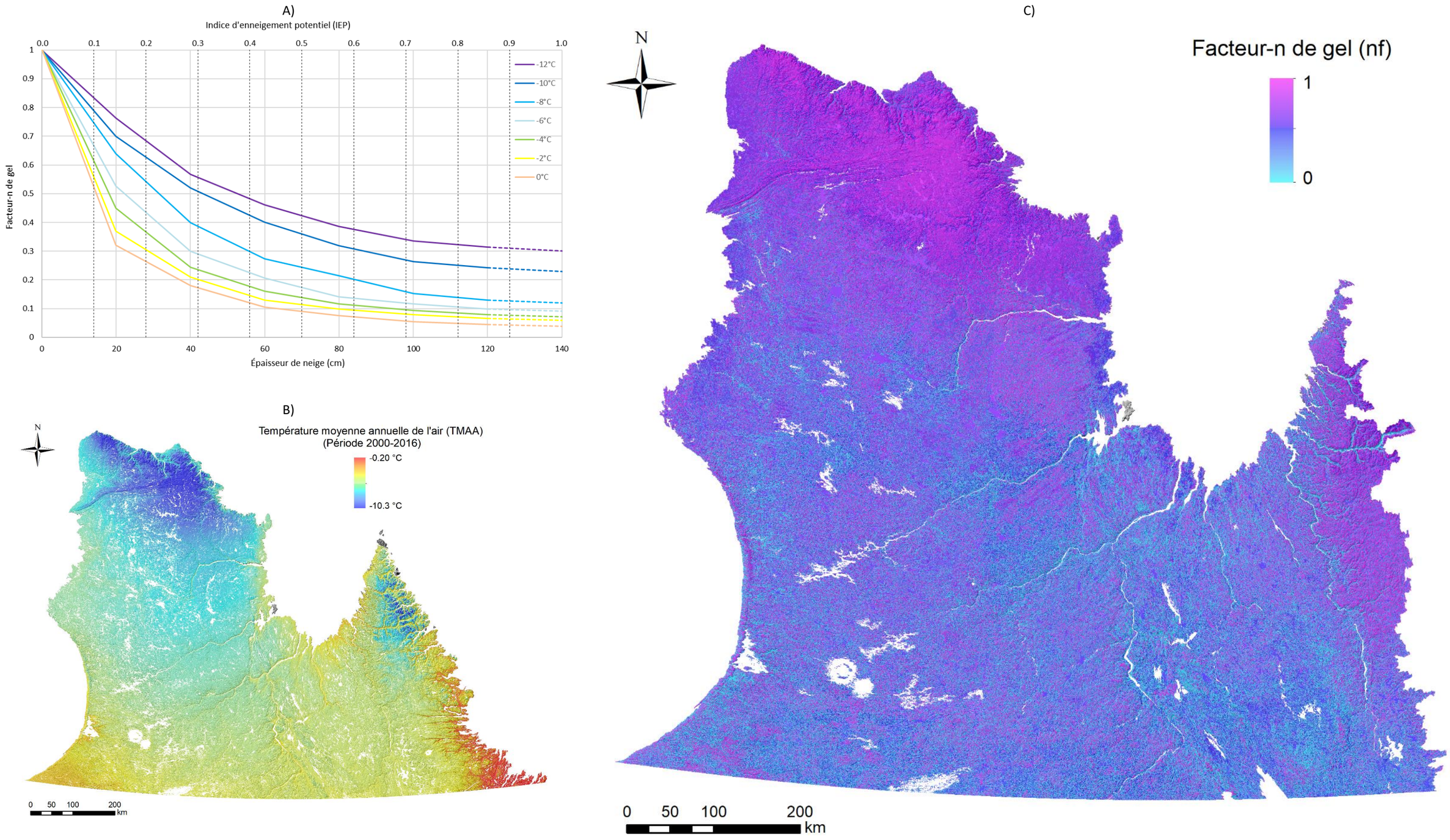

Figure 16 : A) Relation entre l'indice d'enneigement potentiel, les épaisseurs de neige équivalentes et les facteurs-n. B) Températures moyennes annuelles de l'air pour la période 2000-2016 calculées à partir d'un jeu de données maillées des moyennes mensuelles de l'air produites par Way *et al.* (2016). C) Facteurs-n de gel dérivés de l'indice d'enneigement potentiel et la relation épaisseur de neige et facteur-n proposée par Riseborough et Smith (1998).

3.2.2.3 DÉTERMINATION DES DEGRÉS-JOURS DE DÉGEL ET DE GEL À PARTIR DES FACTEURS-N

Afin de calculer la moyenne des degrés-jours de gel et dégel pour la période 2000-2016, un jeu de données maillées des moyennes mensuelles de l'air produites par Way *et al.* (2017) a été utilisé. Ce jeu de données couvre l'ensemble du nord du Québec et le Labrador à une résolution de 1 km^2 et pour la période 1948 à 2016. Les degrés-jours de gel (DJG_a) et de dégel (DJD_a) de l'air ont été calculés sur un total de 204 mois, soit 17 cycles de gel et de dégel entre le mois de janvier 2000 et celui de décembre 2016. Les moyennes ainsi calculées sont présentées respectivement à la figure 17A et B. Par la suite, les températures de surface du sol (Figure 18 A et B) ont ensuite été dérivées par l'utilisation de facteurs-n de gel (n_f) et de dégel (n_t) appliqués à la somme des degrés-jours de gel et de dégel respectivement. Les facteurs-n ont été déterminés par cellule de 250 m^2 afin de produire un maillage coïncidant géométriquement et spatialement à celui du modèle. Les équations pour calculer les degrés-jours de gel (DJG_s) et de dégel (DJD_s) pour la surface du sol à partir des degrés-jour de gel (DJG_a), et de dégel (DJD_a) des températures de l'air pour une maille donnée (*i, j*) sont les suivantes :

$$DJG_{a(i,j)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{gel}} Tmoy_{k(i,j)} \cdot n_k \text{ , pour } Tmoy_{k(i,j)} < 0°\text{C})}{N} \qquad \text{Équation 7}$$

$$DJD_{a(i,j)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{degel}} Tmoy_{k(i,j)} \cdot n_k \text{ , pour } Tmoy_{k(i,j)} > 0°\text{C})}{N} \qquad \text{Équation 8}$$

$$DJG_{s(i,j)} = n_{f(i,j)} \cdot DJG_{a(i,j)} \qquad \text{Équation 9}$$

$$DJD_{s(i,j)} = n_{t(i,j)} \cdot DJD_{a(i,j)} \qquad \text{Équation 10}$$

$$TMAS_{(i,j)} = \frac{DJG_{s(i,j)} + DJD_{s(i,j)}}{365} \qquad \text{Équation 11}$$

Où :

DJG = Degrés-jours de gel,

DJD = Degrés-jours de dégel,

N_{gel} = Nombre de mois de gel,

N_{degel} = Nombre de mois de dégel,

K = Un mois donné,

Tmoy = Température de l'air mensuelle,

n = Nombre de jours dans le mois et

(i,j) = Coordonnées du point de grille.

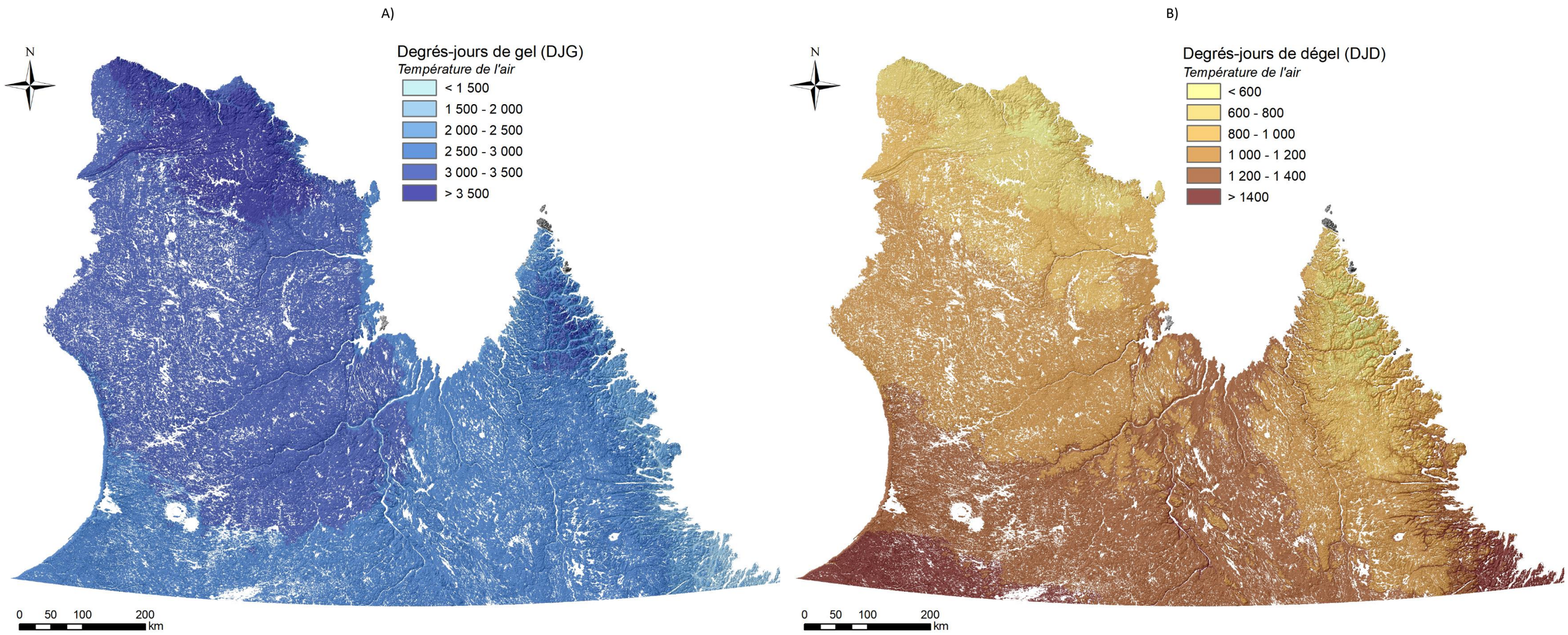

Figure 17 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) de l'air pour l'ensemble du Nunavik calculés à partir des données mensuelles de l'air (Way *et al.,* 2017) pour la période 2000 à 2016 (17 cycles de gel et de dégel).

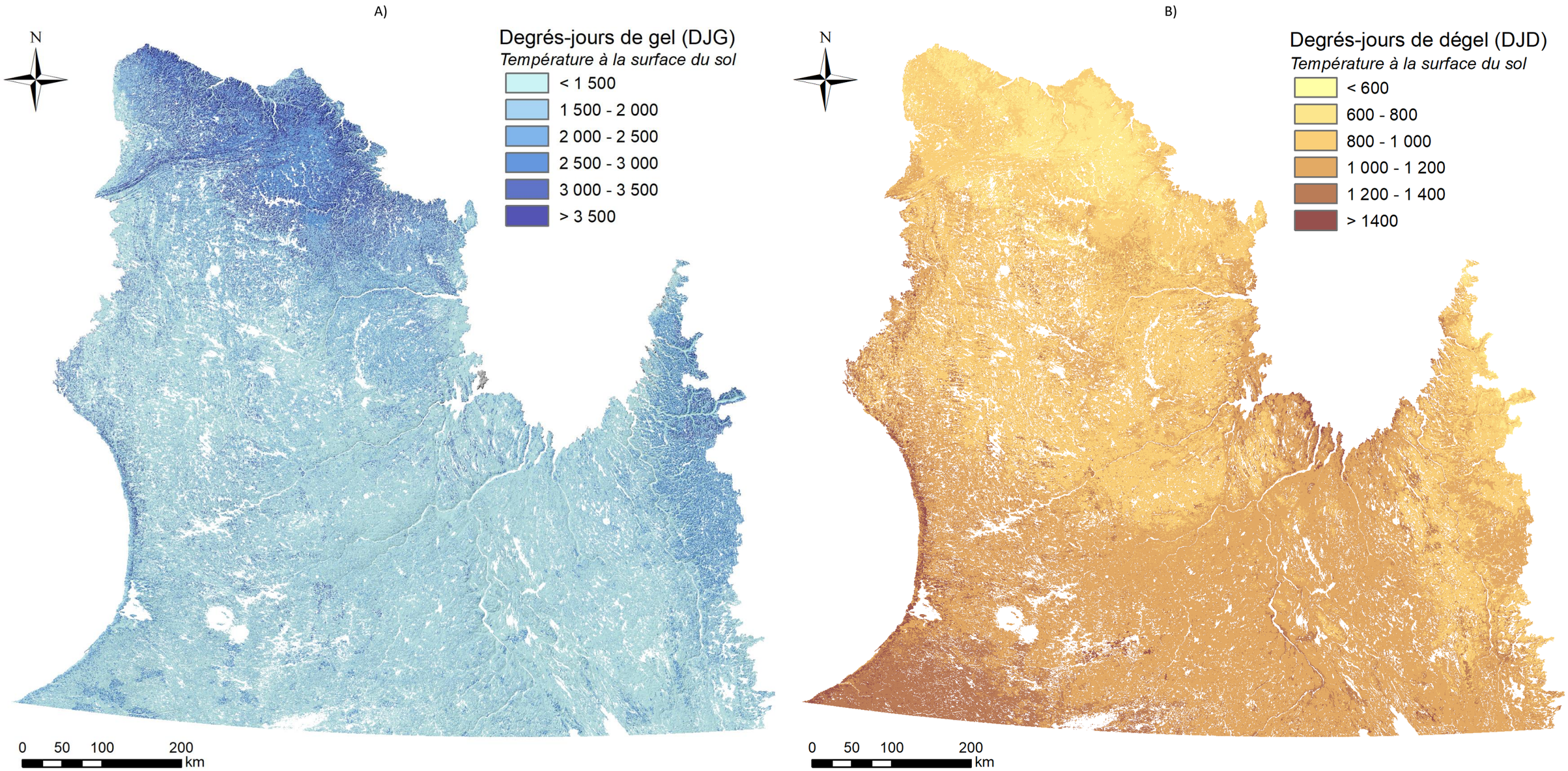

Figure 18 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) à la surface du sol pour l'ensemble du Nunavik pour la période 2000 à 2012 (13 saisons de gel et de dégel) dérivées à partir des facteurs-n de gel et dégel.

3.2.3 GÉOLOGIE DE SURFACE, CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES ET PROPRIÉTÉS THERMIQUES INFÉRÉES DU PERGÉLISOL

Des limitations logistiques, méthodologiques et financières ne permettent pas la réalisation de forages en nombre suffisant pour assurer une couverture uniforme et diversifiée du territoire afin d'en cartographier les conditions du pergélisol. Toutefois, étant intimement liées aux caractéristiques sédimentaires et aux conditions de drainage, les caractéristiques géocryologiques du pergélisol peuvent être déduites à partir des unités géologiques de surface cartographiées, puis validées et précisées par échantillonnage.

Les unités géologiques de surface ne sont pas que de simples solides, mais des assemblages complexes de particules de compositions, de formes et de grosseurs variées. Les environnements sédimentaires dans lesquels elles se développent laissent des signatures géomorphologiques et granulométriques étroitement liées au mode de transport des particules (glace, eau, vent,) ainsi qu'au niveau d'énergie au sein du bassin sédimentaire (élevée, modéré et faible). La cartographie des unités géologiques de surface permet de discrétiser les différentes unités de terrain selon leurs caractéristiques sédimentaires propres (granulométrie, composition lithologique, structures, couleur, épaisseur, etc.) et leurs expressions géomorphologiques (plage, levée alluviale, delta, esker, drumlins, moraine, etc.), héritage géologique qui a un effet non négligeable sur le comportement géotechnique du dépôt, les caractéristiques structurales et propriétés du pergélisol. De nombreuses formes de terrain et structures en surface du sol (polygones, ostioles, thufurs, palses, lithalses, etc.) permettent également de préciser la nature du dépôt meuble pergélisolé et la structure ainsi que l'abondance relative de glace qu'il contient (Allard *et al.,* 1990).

L' évaluation des conditions géocryologiques du pergélisol (structure et volume occupé par la glace) sur l'ensemble du territoire a été réalisée par associations entre : les types de dépôts de surface cartographiés pour la Direction des inventaires forestiers (DIF) du MFFP dont l'aire minimale de cartographie a été fixée à 100 ha (Figure 19) (Dufour *et al.,* 2016) , les connaissances disponibles prélevées au sein de ces mêmes unités lors de travaux de recherche fondamentale (Calmels, 2005; L'Hérault, 2009; Fouché, 2014; Ducharme, 2015) et les connaissances acquises lors de projets de recherche appliquée réalisés dans les différentes communautés du Nunavik (Allard et al., 2007; L'Hérault et al., 2012 : 2013 : 2014 et 2015; Carbonneau et al., 2015). Les corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol au Québec nordique sont présentées au tableau 6. En résumé, les conditions géocryologiques se résument en deux principales classes à savoir : les dépôts stables au dégel (classe 1a : Roc et classe 1b : Dépôts contenant très peu ou pas de glace) et les dépôts instables au dégel (classe 2a : Dépôts glaciaires (till), classe 2b : Dépôts à granulométrie fine d'origine marine ou lacustre et classe 2c : Dépôts organiques). C'est à partir des caractéristiques granulométriques et géocryologiques propres aux différentes unités géologiques de surface qu'il a été possible d'attribuer des valeurs de conductivités thermiques (k_u et k_f) types à chacune de ces unités cartographiées (Tableau 6). Les variations spatiales des valeurs de conductivités thermiques à l'échelle du Nunavik sont illustrées à la figure 20.

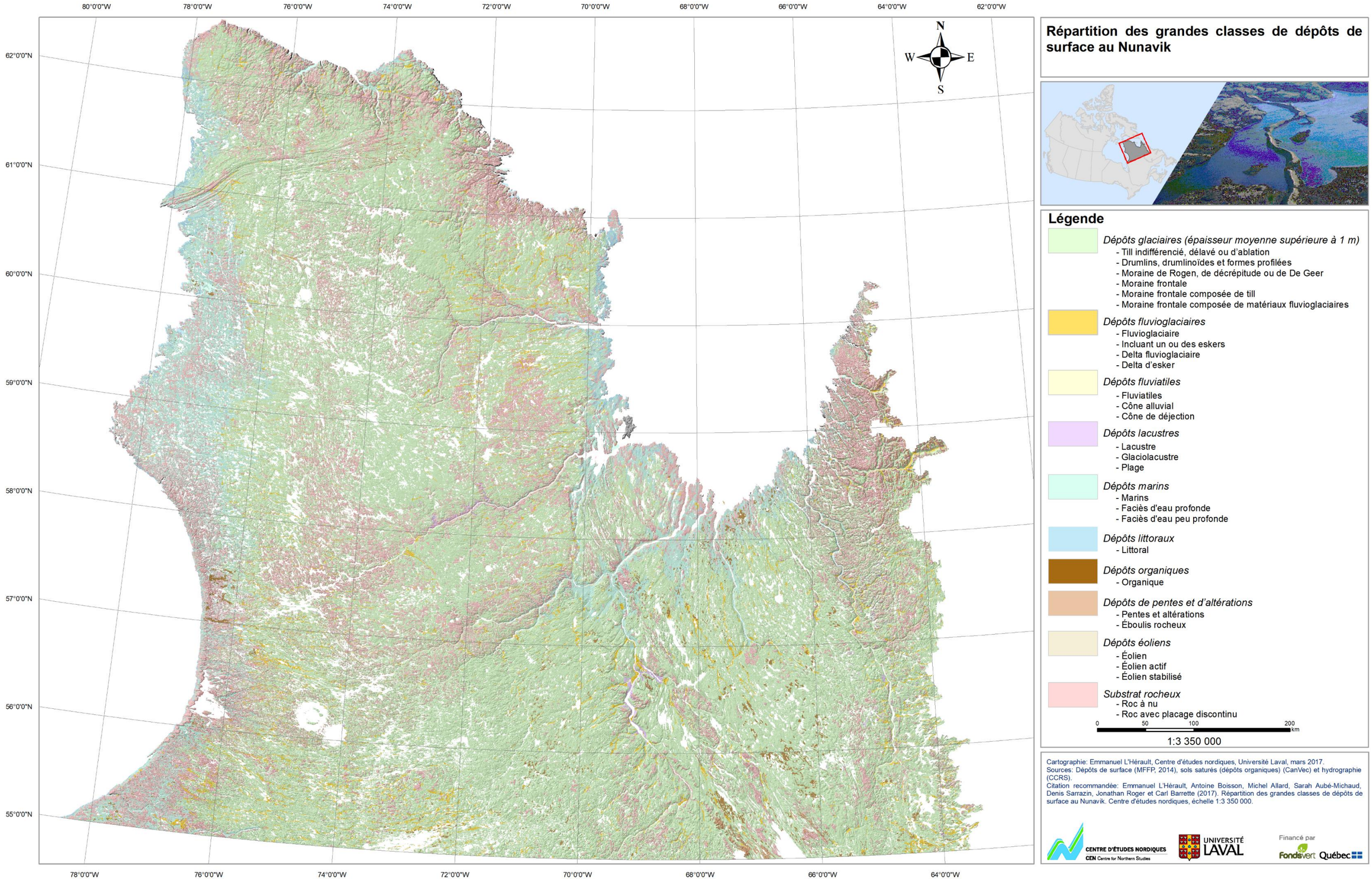

Figure 19 : Répartition des grandes classes de dépôts de surface au Nunavik.

Tableau 6: Corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique. Les paramètres k_u et k_f correspondent respectivement à la conductivité thermique non gelée et gelée des matériaux.

Classe de dépôts	Type de dépôt	Description générale	Composition granulométrique	Codes DIF	Code d'équivalence Comm. géologique du Canada	Condition géocryologique	k_u (W/m °C)	k_f (W/m °C)
1. Dépôts glaciaires (épaisseur moyenne supérieure à 1 m)	Till indifférencié	Lâche ou compact, sans triage, constitué d'une farine de roche et d'éléments allant d'anguleux à sub-anguleux. La granulométrie des sédiments peut varier de l'argile au bloc, selon les régions.	Matériau diamictique Sable et gravier avec silt	1A	T	2a	1.84[1]	2,28[1]
	Till délavé	Till dont la matrice pauvre en matières fines se caractérise par une forte concentration d'éléments grossiers (cailloux, pierres, blocs). Les blocs sont souvent sub-anguleux à anguleux mais peuvent être sub-arrondis à arrondis.		1AD	Tx	2a		
	Till d'ablation	Till dont la matrice pauvre en matières fines se caractérise par une forte concentration de sable. Ce till comprend aussi une proportion élevée de gravier, cailloux, pierres et blocs.		1BA	Th	2a		
	Moraine de Rogen (incluant les moraines ondulées)	Crêtes composées de till riche en blocs, peuvent renfermer des couches de sédiments triés par l'eau		1BC	Tr	2a		
	Drumlins, drumlinoïdes et toutes les formes profilées	Crêtes composées de till, peuvent comporter un noyau rocheux.		1BD	Ts	2a		
	Moraine de décrépitude	Constituée de till lâche, délavé et souvent mince par rapport au till sous-jacent. Renferme une forte proportion d'éléments grossiers (beaucoup de blocs en surface) et peut aussi comporter des poches sédiments stratifiés.		1P	Th	2a		
	Moraine de De Geer	La petite crête qui forme la moraine de De Geer se compose de till, parfois délavé en surface, généralement pierreux et parfois recouverte de blocs ou de gravier.		1BG	Tx	2a		
	Moraine frontale	Comporte une accumulation importante de sédiments glaciaires: sable, gravier et blocs. Dépôts stratifiés à certains endroits et sans structure sédimentaire apparente ailleurs.		1BF	Tm	2a		
	Moraine frontale composée de till	Comporte une accumulation importante de sédiments glaciaires: sable, gravier et blocs. Dépôts stratifiés à certains endroits et sans structure sédimentaire apparente ailleurs. Composée de till.		1BF_1	Tm	2a		
	Moraine frontale composée de matériaux fluvioglaciaires	Comporte une accumulation importante de sédiments glaciaires: sable, gravier et blocs. Dépôts stratifiés à certains endroits et sans structure sédimentaire apparente ailleurs. Composée de sédiments fluvioglaciaires.	Sable et gravier	1BF_2	GF	1b	1.63[1]	2.18[1]
2. Dépôts fluvioglaciaires	Fluvioglaciaire	Composés de sédiments hétérométriques, dont la forme va de subarrondie à arrondie. Ils sont stratifiés et peuvent renfermer des poches de till (till flué).	Sable et gravier	2	GF	1b	1.63[1]	2.18[1]
	Incluant un ou des eskers	Esker: Constitués de sable, de gravier, de cailloux, de pierres et, parfois, de blocs allant d'arrondis à subarrondis. Leur stratification est souvent déformée et forme une faille. La granulométrie des éléments varie considérablement selon les strates.		2_2AE	GFr	1b		
	Delta fluvioglaciaire	Principalement composé de sable et de gravier, triés et déposés en couches bien distinctes. Les accumulations peuvent mesurer plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.		2BD	GFt	1b		
	Delta d'esker	Principalement composé de sable et de gravier, triés et déposés en couches bien distinctes. Les accumulations peuvent mesurer plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.		2BP	GF	1b		
3. Dépôts fluviatiles	Fluviatiles	Bien stratifiés. Ils se composent généralement de gravier et de sable ainsi que d'une faible proportion de limon et d'argile. Ils peuvent aussi renfermer de la matière organique.	Sable et gravier	3	A	1b	1.63[1]	2.18[1]
	Cône alluvial	Mal trié et grossièrement stratifié, composé de limon, de sable et de gravier.	Sable et silt	3DA	Af	1b	1.10[1]	1.50[1]
	Cône de déjection	Mal trié et grossièrement stratifié, composé de sable et de gravier plus grossiers que ceux du cône alluvial.	Sable et gravier	3DE	Cf	1b	1.63[1]	2.18[1]
4. Dépôts lacustres	Lacustre	Constitués de matière organique, de sable fin, de limon et d'argile stratifiée, ou de sédiments plus grossiers (sable et gravier).	Sable fin et silt	4	L	2b	1.10[1]	1.50[1]
	Glaciolacustre	Le faciès d'eau profonde est constitué de sable fin, de limon et d'argile, rythmés (varvés). Le faciès d'eau peu profonde est constitué de sable et parfois de gravier.		4G	GLb	2b		
	Plage	Composé de sable et de gravier triés. Dans certains cas, il peut renfermer une proportion de limon.	Sable et gravier	4P	GLr	1b	1.63[1]	2.18[1]
5. Dépôts marins	Marins	Composé d'argile, limon, sable et gravier.	Argile, limon, sable et gravier	5	M	2b	1,45[1]	2,20[1]
	faciès d'eau profonde	Constitué d'argile et de limon, qui renferme parfois des pierres et des blocs glaciels.	Argile et de limon	5A	Mb	2b	1,45[1]	2,20[1]
	faciès d'eau peu profonde	Constitué de sable et parfois de gravier, généralement bien triés.	Sable et parfois de gravier	5S	Mn	1b	1.63[1]	2.18[1]
6. Dépôts littoraux (anciens et actuels)	Littoral	Constitués d'argile, de sable, de gravier, de cailloux, de pierres et de blocs généralement émoussés.	Argile, de sable, de gravier, de cailloux, de pierres et de blocs.	6	Mr	2b	1.63[1]	2.18[1]
7. Dépôts organiques	Organique	Constitué de matière organique plus ou moins décomposée, provenant de sphaignes, de mousses, de litière forestière, etc.	Matière organique	7	O	2c	0.49	1.38
8. Dépôts de pentes et d'altérations	Pentes et altérations	Constitué de sédiments, généralement anguleux, dont la granulométrie est très variée.	Blocs et cailloux anguleux	8	C	1b	1.08	1.15
	Éboulis rocheux	Constitué de pierres et de blocs anguleux. Sédiments plus grossiers au pied du talus.		8E	Ca	1b	2.15	2.16
9. Dépôts éoliens	Éolien	Lité et bien trié, généralement composé de sable dont la granulométrie varie de fine à moyenne	Sable moyen à fin bien trié	9	E	1b	1.47	1.63
	Éolien actif	Lité et bien trié, généralement composé de sable dont la granulométrie varie de fine à moyenne		9A	E	1b		
	Éolien stabilisé	Lité et bien trié, généralement composé de sable dont la granulométrie varie de fine à moyenne		9S	E	1b		
10. Substrat rocheux	Roc à nu	Formation de roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques, parfois recouverte d'une mince ouche de matériel minéral ou organique. Roc occupe plus de 50 % de la surface. Roc peut avoir été désagrégé par gélifraction.	n.a	RR	R	1a	2,28[1 et 2]	2,28[1 et 2]
	Roc avec placage discontinu.	Formation de roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques, parfois recouverte d'une mince couche de matériel minéral ou organique. Roc peut supporter des placages non continus de dépôts, mais doit affleurer régulièrement au total sur la plus grande par		R	R	1a		
11. Anthropique	Anthropique	Remanié par les activités anthropiques	n.a	AN	H	n.a	n.a	n.a

1. Leblanc 2013; 2. Allard *et al* 1995; 3 Fortier *et al.,* 2011; 4 Ducharme 2016; 5. Calculée selon la méthode proposée par Côté et Konrad, 2005

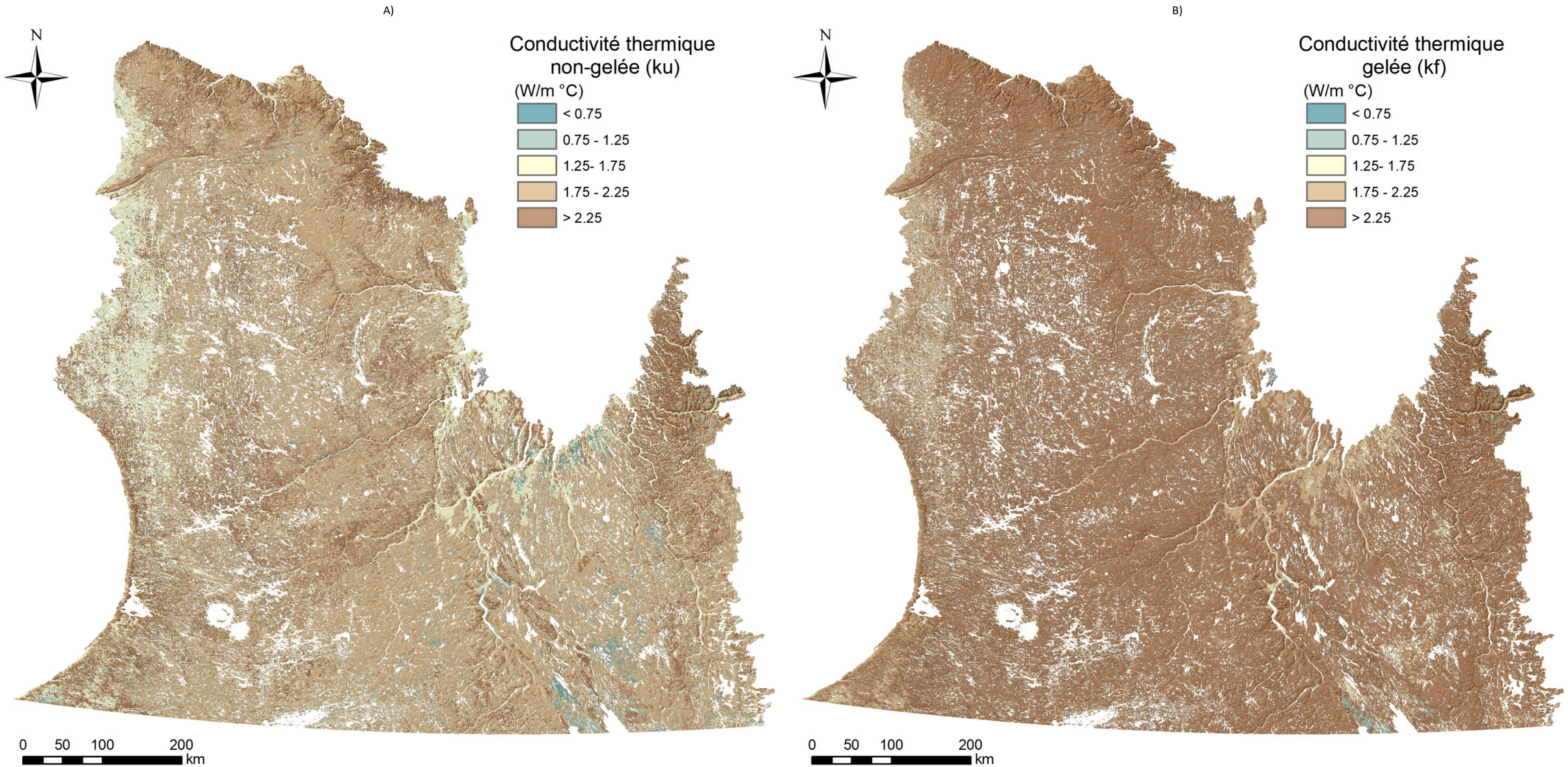

Figure 20 : Cartes des conductivités thermiques des matériaux à l'état A) non-gelé et B) gelé dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires

4 RÉSULTATS

4.1 LES TEMPÉRATURES AU SOMMET, ÉPAISSEUR ET DISTRIBUTION SPATIALE DU PERGÉLISOL

Les cartes des conditions de surfaces et des épaisseurs de neige estimées à partir des caractéristiques de la végétation et du relief ont permis d'appliquer sur le territoire aux températures atmosphériques des facteurs adéquats de transfert (facteurs-n) pour l'hiver et pour l'été et ainsi dériver des températures à la surface du sol. Ce sont ces températures de surface et quelques paramètres géothermiques qui ont permis, à l'aide du modèle TTOP, de déterminer les caractéristiques du pergélisol à savoir la température à son sommet ainsi que son épaisseur pour l'ensemble du Nunavik, et ce, à une résolution de 250 m^2. Les cartes de la température au sommet du pergélisol et de son épaisseur sont présentées respectivement à la figure 21 et à la figure 22.

À la lueur de ces résultats, on constate que le patron général des températures au sommet du pergélisol respecte le gradient latitudinal et altitudinal régional des températures moyennes annuelles de l'air observé au Nunavik. Par conséquent, outre une frange plus froide qui longe la côte de la baie d'Hudson entre Inukjuak et Umiujaq, le pergélisol le plus froid se concentre au centre-nord du Québec et dans la section est de la pénéplaine qui longe les monts Torngat. À une échelle plus locale, ce patron de distribution est fortement influencé par la topographie et la végétation considérées ici comme étant les deux principaux facteurs qui influencent la redistribution de la neige par le vent. Par exemple, le pergélisol présent dans les fonds de vallées est généralement plus chaud et moins épais en raison des températures plus clémentes et d'une couverture de neige plus importante. Sous la limite des arbres, les fonds de vallée arborent une végétation érigée et plus dense par rapport aux plateaux et aux sommets, ce qui favorise davantage les accumulations de neige. À l'opposé, les sommets et plateaux exposés favorisent le développement d'un pergélisol plus froid en raison du gradient altitudinal des températures de l'air et le couvert de neige qui y est généralement plus mince voir absent en raison de son remaniement par le vent. Dans la région de Schefferville, c'est d'ailleurs les sommets dénudés de la région qui présentent le pergélisol le plus profond et le plus froid, tandis qu'il est absent dans les secteurs végétalisés qui se limitent essentiellement aux fonds de vallée (Nicholson, 1979).

Plus on se rapproche de la frange méridionale du Nunavik, la transition d'une végétation basse prostrée à une végétation haute érigée de plus en plus dense se rajoute à titre de facteur dans la redistribution de la neige par le vent. À l'échelle du site, la variation du type de végétation, intimement liée à la micro et méso-topographie, et l'influence de celle-ci sur le patron d'accumulation de neige, forme des mosaïques de conditions de surface où alternent les conditions thermiques propices et non propices au développement et maintien du pergélisol. Ce sont ces mosaïques qui sont à l'origine de la distribution dite discontinue du pergélisol qui marque la frange méridionale du Nunavik. Cette alternance de zones avec et sans pergélisol peut s'exercer sur une très courte distance (< 10 m). Des exemples flagrants de cette alternance de zones avec et sans pergélisol sont les vallées de la région d'Umiujaq où alternent mares de thermokarst et buttes de pergélisol (palses). Malheureusement, la résolution actuelle de la carte des températures au sommet du pergélisol (250 m x 250 m) ne permet pas de faire ressortir, avec toute la finesse souhaitée, la variabilité spatiale du pergélisol à si fine échelle, mais donne somme toute une approximation plausible de son étendue. En raison de l'approche utilisée pour générer la carte de distribution du pergélisol, il est difficile de la comparer avec celle produite par Allard et Séguin (1987), d'autant plus que cette dernière a été produite dans un contexte climatique différent où les températures mesurées dans le pergélisol affichaient une tendance au refroidissement. Récemment, des tentatives de cartographie du pergélisol utilisant une approche similaire à celle employée dans la présente étude ont été réalisées (Way et Lewkowicz, 2016). Dans une phase ultérieure, des analyses comparatives entre la carte produite dans cette étude et celles nouvellement disponibles pourraient être réalisées.

Il demeure important de rappeler que le modèle TTOP n'est pas un modèle transitoire, par conséquent, ce dernier simule un état d'équilibre entre les conditions aux limites du problème à savoir la température

moyenne annuelle à la surface du sol pour une année spécifique ou une période donnée. Par conséquent, la cartographie des températures, des épaisseurs et de la distribution du pergélisol est une image statique en équilibre avec les conditions climatiques et écologiques moyennes de 2000 à 2016. Or, le système pergélisol n'est pas un système statique, mais plutôt un système dynamique transitoire dont les conditions actuelles sont héritées du passé et se modifient avec un certain déphasage temporel et spatial. Par exemple, un changement de température à la surface peut prendre plusieurs années, voire dizaine d'années, à modifier le profil thermique en profondeur. Cette inertie attribue une certaine résilience au changement du système pergélisol à savoir que ce dernier ne disparaitra pas immédiatement même si les températures de surface n'y sont plus favorables, mais cela se fera plutôt de manière graduelle. Malheureusement, cette inertie n'est pas considérée dans le modèle TTOP. Néanmoins, compte tenu de la faible profondeur du plafond du pergélisol, le modèle TTOP s'avère assez performant et juste, de par sa simplicité, pour estimer la température au sommet du pergélisol. Toutefois, il importe de demeurer prudent dans l'interprétation de la carte des épaisseurs du pergélisol et celle de sa distribution. Étant donné que la température de la période de référence utilisée pour alimenter le modèle TTOP est significativement plus chaude que celle du dernier siècle, le profil thermique présenté en équilibre comporte un biais chaud. Ce biais chaud amène une sous-estimation de l'épaisseur du pergélisol, particulièrement dans les secteurs où ce dernier est continu et très épais, et une sous-estimation de son étendue, notamment dans la frange méridionale du Nunavik. Dans la frange méridionale, aux endroits où les conditions de surface ne permettent plus désormais le maintien du pergélisol, il est possible que ce dernier subsiste sous forme d'îlots résiduels en déséquilibre avec le climat et portés à disparaître graduellement si la tendance au réchauffement se maintient. Afin de limiter l'influence de ce biais chaud dans l'estimation des épaisseurs du pergélisol, un décalage thermique a été appliqué aux résultats du modèle TTOP. Les valeurs de décalage thermique spécifiques à utiliser pour chaque cellule ont été déterminées en calculant la différence des températures de l'air annuelles moyennes pour la période de simulation (2000-2016) à celles calculées pour la période 1970-2000. Malgré la cohérence des résultats suite à l'application d'une telle correction, il importe de demeurer prudent dans l'interprétation des épaisseurs du pergélisol ainsi obtenues.

De plus, le modèle TTOP est unidimensionnel, c'est-à-dire qu'il n'est pas influencé par les flux thermiques latéraux. Par conséquent, même si la température à la surface du sol ne permet pas le maintien d'un pergélisol pour une cellule de 250 m^2, les cellules environnantes dont la température au sommet du pergélisol est plus froide vont, par l'entremise de flux de chaleur latéraux entre le corps le plus chaud vers le corps le plus froid, contribuer à l'uniformisation des températures ce qui se traduira par un refroidissement. Par exemple, en zone de pergélisol continu, la température à la surface du sol sous les congères de neige peut être supérieure à 0 °C (Bouchard, 2005) ce qui ne signifie pas l'absence de pergélisol pour autant, mais suggère certes la possibilité d'y retrouver une couche active plus épaisse voire même des taliks de quelques mètres d'épaisseur. À l'inverse, en zone de pergélisol discontinu, une cellule pour laquelle la température au sommet du pergélisol simulée par TTOP est anormalement froide par rapport aux cellules voisines est susceptible d'avoir un régime thermique plus chaud.

En raison de l'absence de mesures systématiques et continues des caractéristiques du couvert de neige pour le Nunavik et ailleurs dans l'Arctique, l'évaluation de cette variable a représenté un défi en soi. Dans ce projet, une approche indirecte d'évaluation de l'épaisseur du couvert de neige basée sur des relations avec des paramètres morphologiques du terrain et la végétation a été développée. Malgré l'utilisation de la nouvelle carte de classification écologique de la Direction des inventaires forestiers qui a permis d'améliorer l'estimation de l'épaisseur de neige potentielle au sol en tenant compte de la densité et de la structure de la végétation, la relation entre les caractéristiques de la végétation, du relief et l'enneigement potentiel demande encore des ajustements. En effet, la pondération des composantes de l'indice d'enneigement potentiel semble favoriser une sous-estimation des facteurs-n de gel, donc entrainer un biais chaud pour ce qui est des températures de surface hivernales. La présence d'un tel biais se doit d'être validée, mais l'absence de câbles à thermistances sur une bonne partie du territoire limite notre capacité à procéder à une telle analyse. Également, en raison de la résolution du modèle choisie (250 m x 250 m), plusieurs couches d'information ont été agrégées pour atteindre une résolution plus grossière ce qui

entraîne une certaine généralisation dans la représentation des données, donc une perte de précision. L'utilisation des couches d'information avec leur résolution d'origine permettrait de raffiner les résultats. Ce raffinement apporterait certaines précisions sur les conditions du pergélisol, particulièrement dans la frange sud du Nunavik où le pergélisol est discontinu, voire sporadique, mais nécessiterait un temps de traitement et de calcul considérable.

Il sera également intéressant dans le futur d'explorer la possibilité d'utiliser les districts écologiques afin de cartographier les conditions de pergélisol. Dans une phase ultérieure, il pourrait également s'avérer intéressant de comparer les résultats du modèle TTOP avec un modèle transitoire basé sur une équation de transfert de chaleur par conduction (ex. le modèle unidimensionnel TONE (Goodrich, 1978)). Même s'ils sont plus demandant au niveau du calcul, ces derniers permettraient de mieux considérer l'inertie thermique qui subsiste au sein du système pergélisol. Par conséquent, contrairement au modèle TTOP qui ne donne qu'une estimation statique et en équilibre du profil thermique avec les conditions limites, un modèle transitoire permettrait de mieux illustrer les mutations thermiques récentes au sein du pergélisol, particulièrement dans les zones de transition entre le pergélisol isolé, sporadique et discontinu. L'utilisation de tels modèles permettrait également de projeter, à partir des différents scénarios de changements climatiques proposés, les modifications dans la température, l'épaisseur et la distribution du pergélisol.

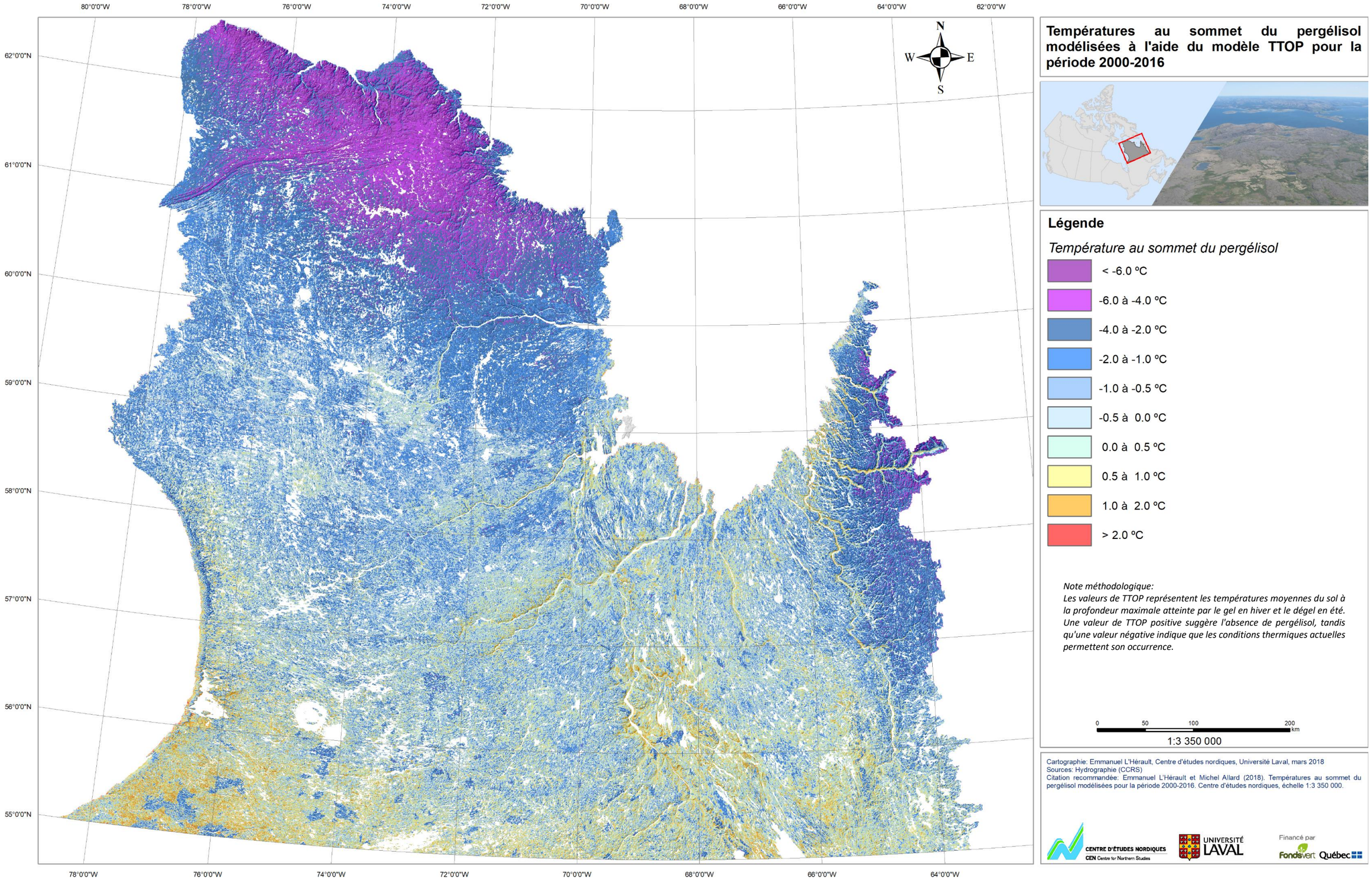

Figure 21 : Carte des températures au sommet du pergélisol modélisées à l'aide du modèle TTOP mis en équilibre avec les indices de gel et de dégel moyens pour la période 2000-2016.

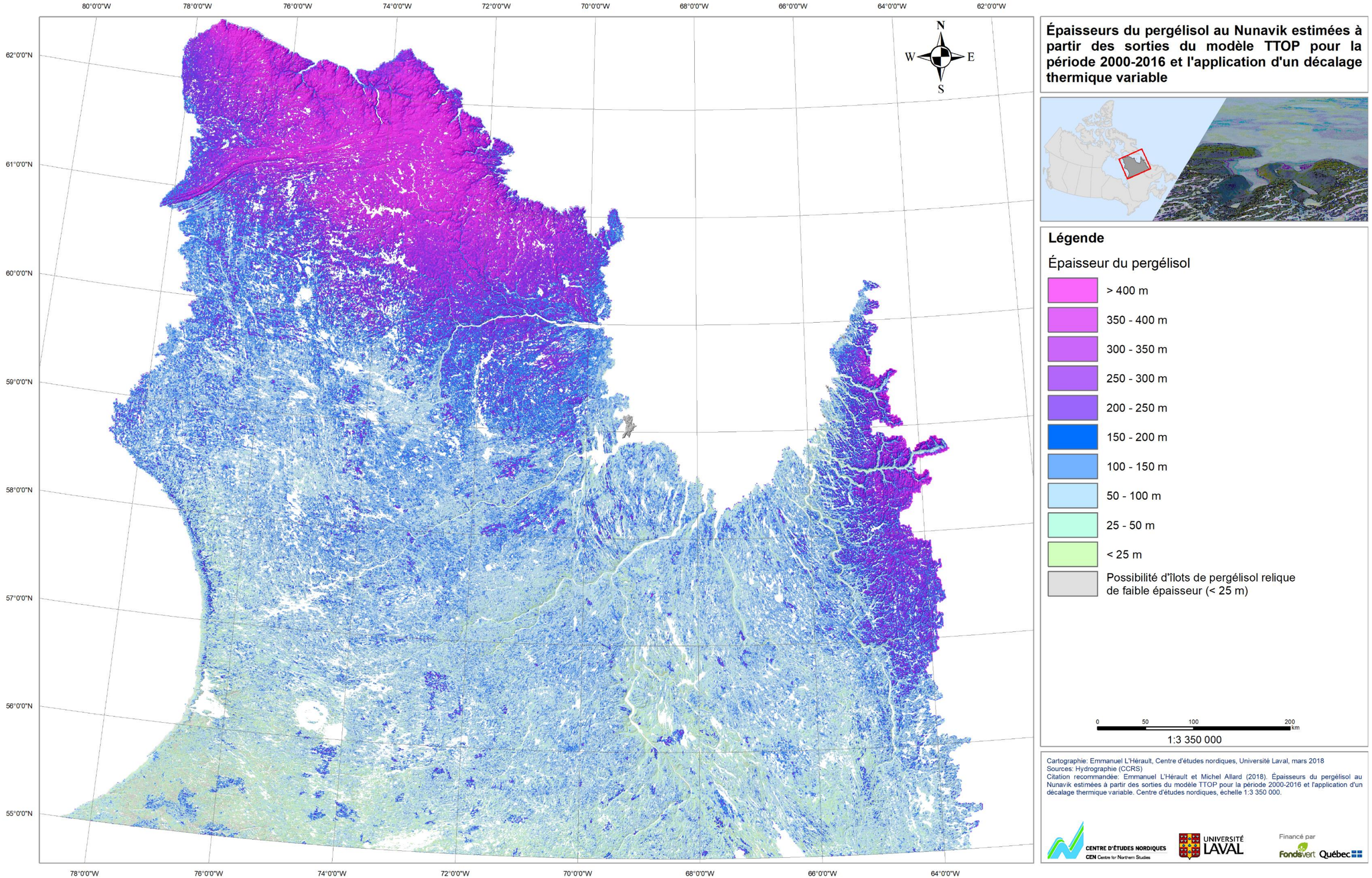

Figure 22 : Carte des épaisseurs probables du pergélisol calculées à partir des températures moyennes au sommet du pergélisol pour la période 2000-2016, d'un flux géothermique constant de 40.26 mW/m² et d'une conductivité thermique uniforme de 2.5 W/m K.

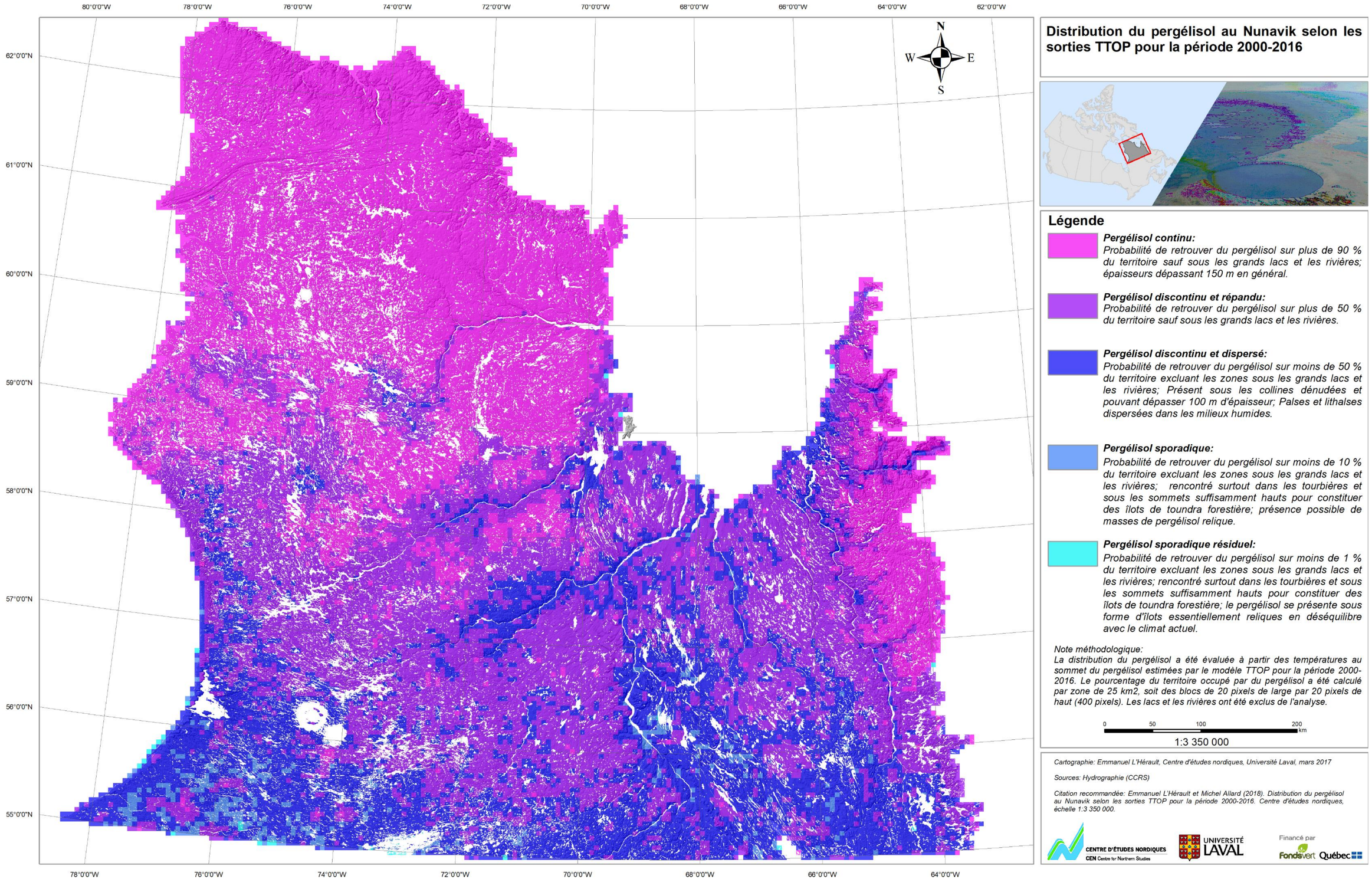

Figure 23 : Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2016.

4.2 LES CONDITIONS GÉOCRYOLOGIQUES

Telle que mentionné précédemment, les conditions géocryologiques du pergélisol sont le fruit d'une interaction entre les processus de mise en place des dépôts qui en déterminent les propriétés mécaniques, les conditions de drainage (superficielles et souterraines) et le climat (température et précipitation). Dans le cadre de ce projet, les premières évaluations des conditions géocryologiques du pergélisol (structure et volume occupé par la glace) sur l'ensemble du territoire ont été réalisées par associations entre les types de dépôt de surface (Figure 19) et les connaissances disponibles prélevées au sein de ces mêmes unités. La carte issue de ces corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol au Québec nordique est présentée à la figure 24.

Sur la carte des conditions géocryologiques du pergélisol, seules les zones où le roc affleure ou est recouvert d'une mince couverture de dépôt meuble (unité 1a) ainsi que les zones d'accumulation de dépôts de sable et gravier épais (unité 1b) ont été identifiées comme contenant très peu ou pas de glace, donc stables au dégel. Les autres types de dépôt meubles, qu'ils soient d'origine glaciaire (unité 2a) ou marine (unité 2b), contiennent tous une proportion considérable de particules fines (silt et argile) qui permet le développement de lentilles de glace; ils sont donc instables au dégel. Par exemple, il est fréquent d'observer dans les dépôts de sédiments marins, de colluvions ou de till une concentration importante de lentilles de glace dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centimètres. Ces concentrations en glace très élevées se retrouvent fréquemment sous l'épaisseur maximale atteinte par la couche active, plus précisément dans la partie supérieure du pergélisol.

Compte tenu du lien fort entre la géologie de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol, la réparation de celles-ci à l'échelle régionale est intimement liée au patron de déglaciation et de submersion marine postglaciaire de la région. On distingue ainsi deux grandes zones : les franges littorales submergées par les mers postglaciaires et les plateaux centraux et secteurs situés au-delà de la limite marine postglaciaire maximale. Les zones submergées par les mers postglaciaires sont caractérisées par un pergélisol habituellement plus riche en glace en raison de la présence de sédiments marins fins extrêmement gélifs. C'est habituellement le cas pour les fonds de vallées où se trouvent d'épaisses couches de sédiments meubles en assemblages stratigraphiques complexes et dont une partie consiste en des silts argileux salins très sensibles au dégel et aux mouvements de masses. L'une de ces vallées caractéristiques est celle de Salluit, mais on en dénombre plusieurs sur l'ensemble du Nunavik comme celle de la rivière Sheldrake dans la région d'Umiujaq. À l'opposé, les secteurs surélevés qui ont seulement été englacés, donc recouverts exclusivement de dépôts glaciaires généralement plus grossiers (till, sable et gravier fluvioglaciaire), se caractérisent généralement par un pergélisol dont le contenu en glace est de faible à modéré en raison de la gélivité limitée de ces dépôts.

Même si le contenu en glace des dépôts glaciaires est généralement moins élevé, il est possible de rencontrer d'importantes masses de glace d'origine épigénétique dans ces dépôts jugés à priori stables au dégel. Selon l'origine, ces masses de glace peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et plusieurs dizaines de mètres de largeur. L'une des plus fréquemment observées au Nunavik est la glace en coin. De par sa genèse, cette dernière s'organise en réseaux polygonaux facilement visibles à la surface du terrain (Figure 25A) dont la densité dépend d'une multitude de paramètres, mais est davantage intrinsèque au dépôt géologique à l'intérieur duquel il se développe (propriétés mécaniques et homogénéité du dépôt). La grosseur des coins glace est variable d'un endroit à l'autre sur le territoire et est influencée, quant à elle, par de nombreux facteurs (fréquence de fissuration, durée de la période active, type de dépôts, disponibilité en eau, etc.). Chose certaine, les coins de glace au Nunavik peuvent atteindre plus d'un mètre de largeur, pour rarement excéder deux mètres, et plusieurs mètres de profondeur (Figure 25B et C). En terme de volume, les coins de glace peuvent représenter une quantité considérable de glace qui s'ajoute au volume de glace intrinsèque au dépôt. Par conséquent, un dépôt pauvre en glace, mais à l'intérieur duquel on retrouve un réseau de coins de glace dense et bien développé constitue un terrain sensible dont une fonte éventuelle viendrait modifier considérablement le paysage (Figure 25D).

Outre les coins de glace, la présence de glace de glacier enfouie constitue également des masses de glace dont l'occurrence est difficile à prévoir. Lors de la déglaciation, quelques culots de glace de glacier résiduels peuvent avoir été recouverts puis fossilisés dans les unités fluvioglaciaires les rendant ainsi indétectables en surface (Figure 25E). Par exemple, de telles masses de glace enfouies ont été observées dans les dépôts fluvio-glaciaires dans le secteur de la mine Raglan (Figure 25F). La fonte de ces importantes masses de glace de glacier laisse d'importantes dépressions thermokarstiques dans le paysage dont les analogues actuels en milieu non-pergélisolé sont les kettles. À noter que les masses de glace telles que les coins de glace et la glace de glacier enfouie non pas été considérées dans la cartographie des conditions géocryologiques du pergélisol, mais pourrait l'être dans une cartographie ultérieure, du moins pour ce qui est des coins glace dont la présence peut généralement être identifiée par photo-interprétation.

Il est important de mentionner que la carte des conditions géocryologiques présentée dans ce rapport est une généralisation des caractéristiques cryologiques spécifiques observées dans les différents matériaux meubles qui recouvrent la région. Par conséquent, cette dernière ne tient pas compte des variabilités locales tant horizontales que verticales le long du profil de sol des teneurs en glace à l'intérieur d'une même unité géologique de surface. À l'échelle locale, cette variabilité s'explique en partie par la disponibilité en eau lors du développement du pergélisol et les processus périglaciaires en place. En général, les secteurs moins bien drainés (vallées, dépressions, etc.) sont habituellement plus riches en glace que les secteurs mieux drainés (sommet, crêtes et versants). Les pieds de versant sont, quant à eux, des endroits critiques extrêmement riches en glace là où la charge de sédiment apportée par les processus de versants (gélifraction, fluages, glissement, colluvionnement, etc.) est suffisante pour permettre une accumulation et ainsi permettre le développement d'un pergélisol syngénétique très riche en glace. Par conséquent, il importe de considérer la carte des conditions géocryologiques du pergélisol comme un outil général d'aide à la planification comportant un certain degré d'incertitude. Il demeure ainsi nécessaire de procéder à des analyses approfondies des sols dans les secteurs qui accueilleront un développement spécifique en vue d'en adapter la conception au besoin et ainsi d'atténuer sa vulnérabilité au dégel du pergélisol.

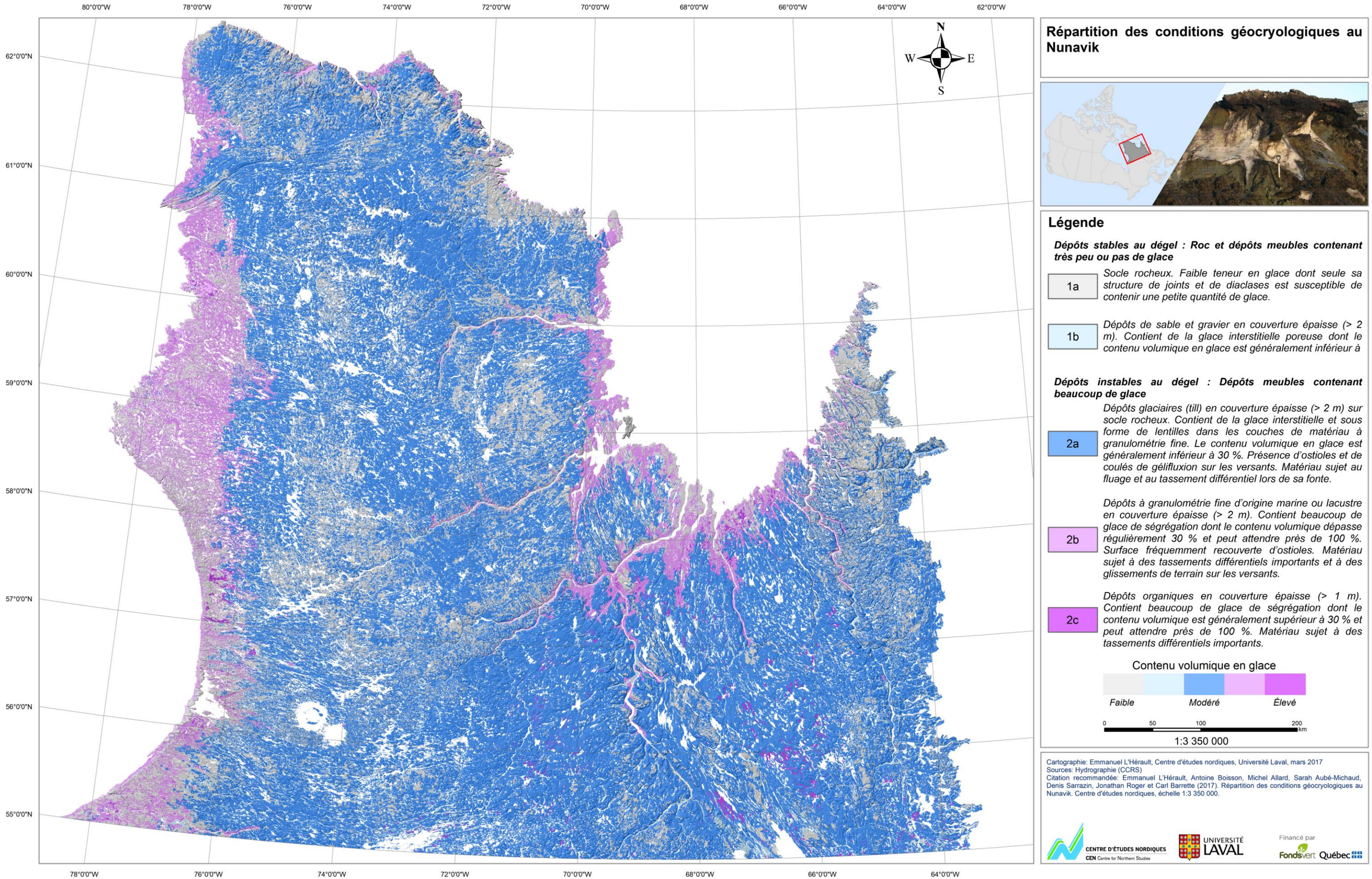

Figure 24: Carte des conditions géocryologiques dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires.

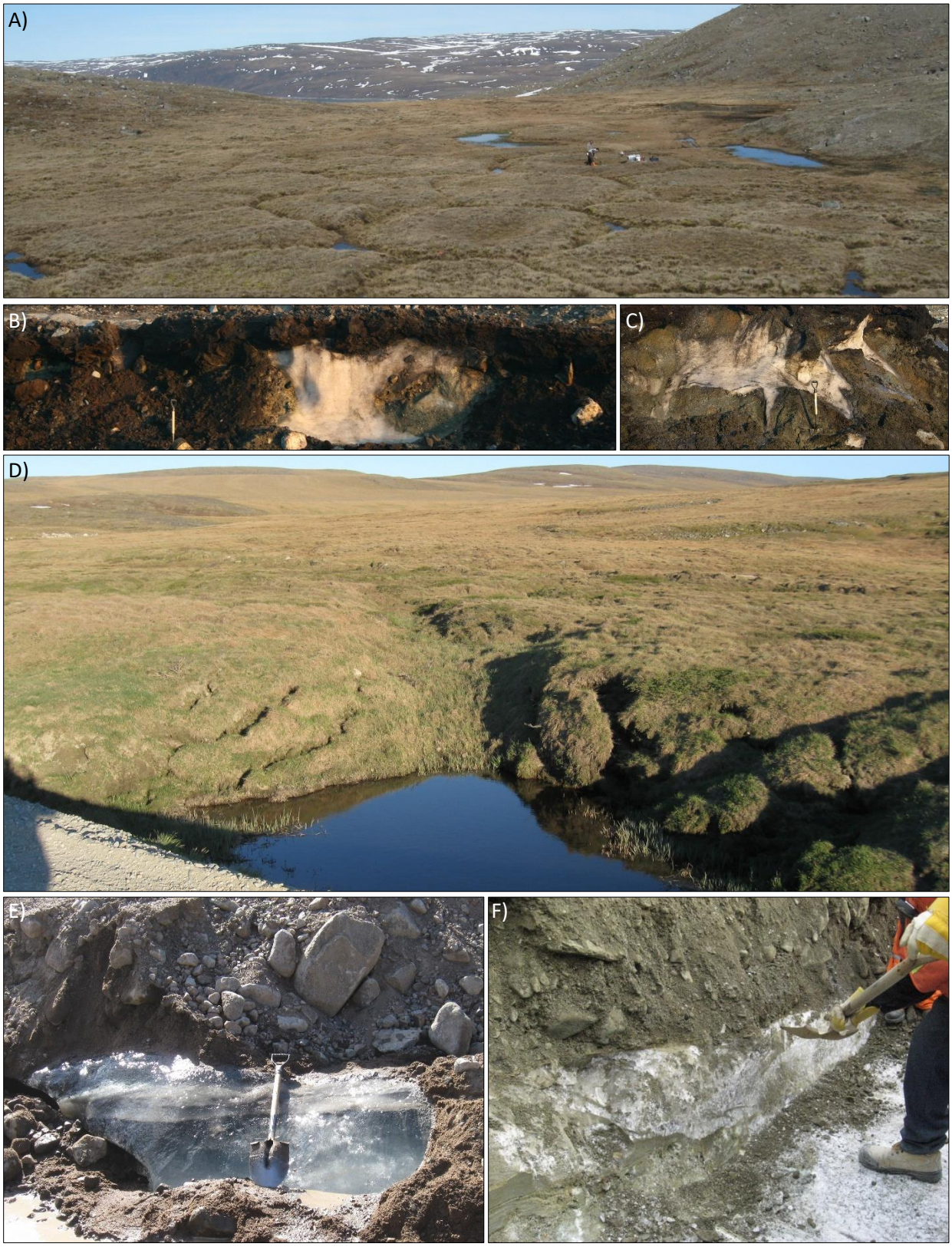

Figure 25 : A) Réseau polygonal de coins de glace. B) et C) Coupes frontales de coins de glace. D) Paysage thermokarstique résultant de la fonte partielle d'un réseau de coins de glace. E) et F) Glace de glacier enfouie sous des dépôts glaciaires grossiers non-gélifs.

4.3 LA SUSCEPTIBILITÉ DU TERRITOIRE AUX AFFAISSEMENTS THERMOKARSTIQUES

La susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques a été évaluée en tenant compte de deux paramètres, soit le contenu en glace et la température au sommet du pergélisol. C'est donc à partir des cartes des conditions géocryologiques et des températures modélisées au sommet du pergélisol, que l'indice de susceptibilités aux tassements thermokarstiques a été produit. Pour y arriver, les valeurs de températures au sommet du pergélisol ont été discrétisées en trois classes à savoir les températures faibles comprises entre -4 et -2 °C, les températures modérées comprises entre -4 et -2 °C et les températures élevées supérieures à -2 °C. Pour ce qui est des contenus en glace, les valeurs ont été discrétisées en trois classes soit : les dépôts ayant un contenu en glace faible (inférieur à 15 %), modéré (compris entre 15 et 30 %) ou élevé (supérieur à 30 %). Par la suite, la pondération des variables a été réalisée en attribuant un poids deux fois supérieur aux contenus en glace afin d'accentuer son influence, jugée ici déterminante, dans l'évaluation adéquate de la susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques. Pour ce qui est de la température, son poids dans la détermination de l'indice est deux fois moindre que le volume en glace, car il s'agit ici davantage d'un facteur d'atténuation basée sur la prémisse qu'un pergélisol froid est plus résistant aux perturbations thermiques susceptibles d'entrainer la fonte du pergélisol. Cette pondération différentielle des deux facteurs qui composent l'indice de susceptibilité est présentée sous forme de matrice à la figure 26. Une fois l'indice de susceptibilité calculé par cellule de 250 m^2 pour l'ensemble du territoire, les résultats ont été classifiés à l'intérieur de trois classes de susceptibilité : faible, modérée et élevée. Cet exercice a permis de produire la carte de susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques présentée à la figure 27.

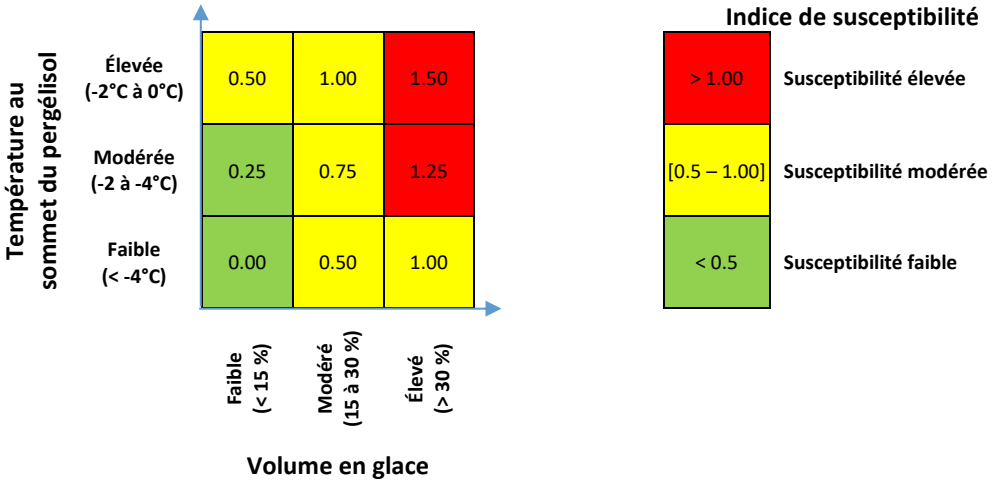

Figure 26 : Pondération différentielle des deux facteurs qui composent l'indice de susceptibilité et la matrice des résultats possibles.

En raison de l'importance des conditions géocryologiques dans la détermination de l'indice de susceptibilité, les secteurs les plus enclins aux tassements thermokarstiques correspondent essentiellement aux zones submergées lors de la déglaciation et recouvertes par des dépôts marins fins gélifs (classe géocryologique 2b) ou les zones recouvertes d'un dépôt organique en couverture épaisse (classe géocryologique 2c). Toutefois, l'ajout de la composante thermique vient légèrement modifier ce patron de distribution. Compte tenu du gradient latitudinal et altitudinal des températures de l'air et du rôle de la neige dans le régime thermique du pergélisol, la composante thermique permet d'atténuer l'indice de susceptibilité en présence d'un pergélisol froid. À l'échelle régionale, on parle ici du nord de la péninsule du Nunavik où malgré la présence de dépôts gélifs et sensibles, certains secteurs où le régime thermique du pergélisol est particulièrement froid bénéficient d'une certaine résilience du système ce qui atténue la susceptibilité aux affaissements thermokarstiques à court et moyen termes. C'est le cas pour la section ouest de la côte entre la communauté d'Akulivik et d'Ivujivik. À l'échelle locale, ce sont des secteurs où la couverture de neige est mince, voire absente (sommet, crête, haute de pente ou plateau recouverts

d’une végétation herbacée ou absente), qui bénéficient de cet effet atténuant qu’apporte un régime thermique plus froid sur le risque d’instabilité du pergélisol.

Dans une étape ultérieure, l’évaluation de la susceptibilité du territoire pourrait également tenir compte du réchauffement des températures projetées étant donné que d’après les projections de changements proposées, ce réchauffement ne sera pas uniforme sur l’ensemble du territoire. Par exemple, la côte de la baie d’Hudson et le l’extrême nord du Nunavik connaîtront les taux d’augmentation les plus importants. Également, la glace massive d’origine épigénétique à la formation du dépôt à savoir les coins de glace et la glace de glacier enfouie a été exclue de l’analyse de susceptibilité. Dans une analyse ultérieure, il serait profitable de la considérer en raison de sa fréquence dans certains types de dépôts comme c’est le cas de la glace en coins dans les dépôts quaternaires grossiers ou la glace de glacier enfouie dans les dépôts glaciaires.

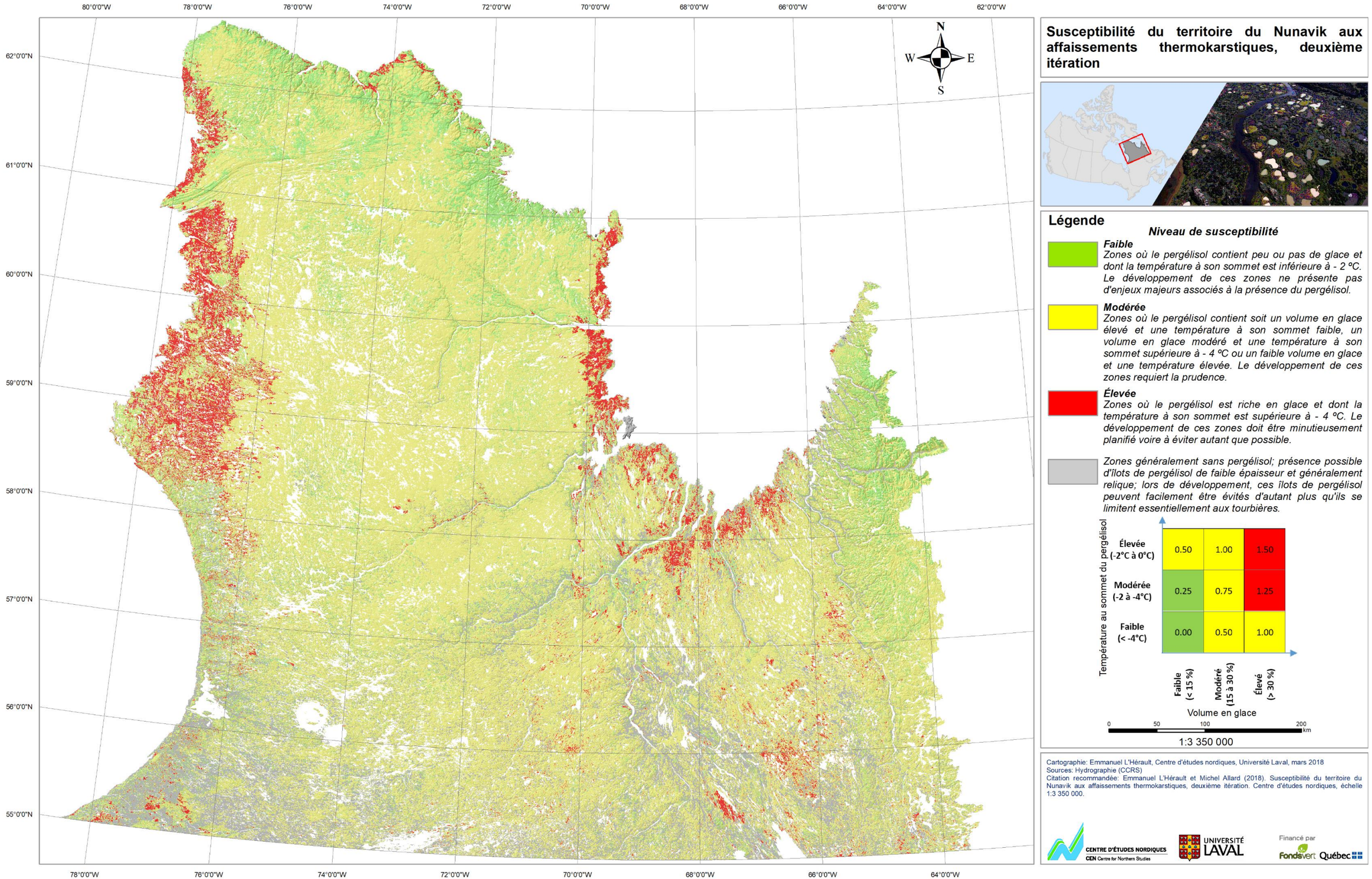

Figure 27 : Carte de susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques.

5 CONCLUSION

Les cartes des conditions de surfaces et des épaisseurs de neige estimées à partir des caractéristiques de la végétation et du relief ont permis d'ajuster les températures atmosphériques des hivers et des étés pour dériver des températures à la surface du sol. Ce sont ces températures de surface et quelques paramètres géothermiques qui ont permis, à l'aide du modèle TTOP, de déterminer les caractéristiques du pergélisol à savoir sa température à son sommet et son épaisseur probable. Une nouvelle version de la carte des conditions du pergélisol a ainsi été produite apportant une information nouvelle non seulement sur la distribution spatiale, mais aussi sur la température du pergélisol à travers le territoire. Dans le processus, une carte des caractéristiques cryologiques (type et quantité de glace) des sols, basée sur la nature des formations géologiques de surface, a également été produite. Actuellement, la pondération des composantes de l'indice d'enneigement potentiel semble favoriser une sous-estimation des facteurs-n de gel, donc entrainer un biais chaud pour ce qui est des températures de surface hivernales. La présence d'un tel biais devra être vérifiée. Il faut noter que les régions de haute sensibilité à la dégradation du pergélisol ont pu être cartographiées par cet exercice; il s'agit sans contredit d'un des impacts majeurs du changement climatique sur le territoire.

Dans une phase ultérieure, une validation intensive de la carte du pergélisol du Nunavik devrait être réalisée. Le processus de validation sera effectué par des visites sur le terrain selon un plan d'échantillonnage élaboré pour mieux évaluer les conditions de pergélisol *in situ.* Également, une analyse corrélative approfondie entre les cartes de températures de surface dérivées et les données enregistrées par les câbles à thermistances et les stations du réseau SILA du CEN et du MTQ devrait être entreprise.

Il serait possible également d'enclencher un processus de cartographie dynamique itératif permettant d'assurer l'intégration des mises à jour d'informations géoscientifiques et également l'ajout de nouvelles composantes environnementales jugées pertinentes en science du pergélisol comme, par exemple, les différentes formes de terrain associés à la présence d'un pergélisol riche en glace (ex. : palses, polygones à coins de glace, etc.). Également, l'amélioration de la relation entre les facteurs-n de gel et de dégel par type de végétation pourrait être réalisé en intégrant des données mesurées sur le territoire. Le même effort pourrait être appliqué dans une étude plus exhaustive de la distribution de la neige par le vent et l'influence de l'effet de la végétation sur celle-ci. Par exemple, dans cette étude, la densité de la végétation n'a pas été considéré, mais elle apparait, en milieu ouvert où le vent contribue à la redistribution du couvert nival, comme un facteur limitatif du potentiel de mobilisation du couvert nival. La précision de la carte des températures du pergélisol en sera grandement améliorée.

Dans une phase ultérieure, il pourrait également s'avérer intéressant de comparer les résultats du modèle TTOP avec un modèle transitoire basé sur une équation de transfert de chaleur par conduction. Même s'ils sont plus demandant en termes de temps de calcul, ces derniers permettraient de simuler des projections de changements des conditions thermiques du pergélisol en fonction de différents scénarios climatiques. Ainsi, en utilisant les sorties des scénarios climatiques produits par le consortium OURANOS, des cartes prédictives des conditions du pergélisol pourraient être produites et par le fait même permettre l'identification des points chauds qui nécessiteront des précautions supplémentaires afin d'assurer un développement durable et sécuritaire du Nord québécois.

RÉFÉRENCES

Allard M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Hérault, E. et Vinet, F. (2007). Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Réalisé pour le compte d'Ouranos, Ressources Naturelles Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 42 p.

Allard M., Fournier A., Gahé E. et Seguin M.K. (1989). Le Quaternaire de la côte sud-est de la baie d'Ungava, Québec nordique, Géographie physique et Quaternaire, 43(3) : 325-336

Allard, M., Fortier, R. et Gagnon, O. (2003). Problématique de développement du village de Salluit, Nunavik. Avancements des travaux, caractérisation climatique, carte de la répartition de la glace dans le pergélisol, besoin en espaces et commentaires. Rapport d'étape 3, Centre d'études nordiques, Université Laval. Produit pour le Ministère de la sécurité publique du Québec, 97 p.

Allard, M. et Lemay, M. (2013) (éditeurs). Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact des changements climatiques et de la mondialisation. ArcticNet Inc., Québec, Qc, Canada, 318 p.

Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E., Sarrazin, D. *et al*. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In: Allard, M. and M. Lemay (Eds), Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, p. 171-197.

Allard, M., Lévesque, R., K.-Seguin, M. et Pilon, A. (1993). Les caractéristiques du pergélisol et les études préliminaires aux travaux de génie au Québec nordique (texte préliminaire). Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 94 p.

Allard, M., L'Hérault, E., Doyon, J. et Sarrazin, D. (2010). L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport final. Centre d'études nordiques, Université Laval, 38 p.

Allard, M. et K.-Séguin, M. (1987). Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives. Géographie Physique et Quaternaire, vol. 41(1) : 141-152.

Allard M., Seguin M.K. et Fortier R. (1992). The thermal regime of intertidal permafrost in George River Estuary, Ungava, Quebec. Canadian Journal of Earth Sciences, 29(2) : 249-259.

Blackwell, D. D. et Richards, M. (2004). Geothermal map of North America: Explanation of resources and applications: Geothermal Resources Council Transactions, 28 : 317–320.

Brown, Ross D. et Bruce Brasnett. (2015). Mise à jour annuellement. *Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data*. © Environment Canada, 2010. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center.

Calmels, F. (2005). Genèse et structure du pergélisol : étude de formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada. Thèse de doctorat en Sciences Géographiques, Département de Géographie, Québec, Université Laval, 169 p.

Calmels, F. et Allard, M. (2008). Segregation Ice Structures in Various Heaved Permafrost Landforms Through CT Scan. Earth Surface Processes and Landforms, 33 : 209-223.

Carbonneau A-S., L'Hérault E., Aubé-Michaud S., Taillefer M., Ducharme M-A., Pelletier M. et Allard M. (2015). Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour huit communautés du Nunavik. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 127 p.

Ducharme, M.-A., Allard, M., Côté, J. et L'Hérault, E. (2015). Measurements of permafrost thermal conductivity throught CT-scan analysis. GEOQuébec 2015, 7 p.

Dufour, E., A. Robitaille et A. Leboeuf, 2016. Norme de cartographie des dépôts de surface du Nord québécois. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers, 13 p.

Filion, L. et Payette, S. (1982). Régime nival et végétation chionophile à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. Naturaliste Canadien, 109 : 557–571.

Filion, L. et Payette, S. (1976). La dynamique de l'enneigement en région hémi-arctique, Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. Cahiers de géographie du Québec, 20 : 275–302.

Fouché, J. (2014). Effets du réchauffement climatique sur le fonctionnement biogéochimique de deux cryosols arctiques dans la région de Salluit, Nunavik, Canada. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec, 253 p.

French, H. (2007). The Periglacial Environment: Third Edition, Éditions Wiley, 478 p.

Gisnås, K., Westermann, S., Schuler, T. V., Melvold, K. et Etzelmüller, B. (2016). Small-scale variation of snow in a regional permafrost model, The Cryosphere, 10 : 1201-1215, doi:10.5194/tc-10-1201-2016.

Goodrich, L.E., 1978. Efficient numerical technique for one-dimensional thermal problems with phase change. International Journal of Heat and Mass Transfer, 21: 615-621.

Goodrich, L.E. (1982). The influence of snow cover on the ground thermal regime. Canadian Geotechnical Journal, 19 : 421-432.

Gouttevin, I., Menegoz, M., Dominé, F., Krinner, G., Koven, C., Ciais, P., Tarnocai, C. et Boike, J. (2012). How the insulating properties of snow affect soil carbon distribution in the continental pan-Arctic area, J. Geophys. Res., 117 : G02020, doi:10.1029/2011JG001916.

Leboeuf, A. et R. A. Fournier, 2015. A multisensor multiresolution method for mapping vegetation status, surficial deposits, and historical fires over very large areas in northern boreal forests of Quebec, Canada. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 5199-5211.

Lewkowicz, A. (1992). Factors influencing the distribution and initiation of active-layer detachment slides on Ellesmere Island, Arctic Canada. Dans Periglacial Geomorphology, Proceedings of the 22nd Annual Binghamton Symposium in Geomorphology. Wiley, Chichester, 223-250.

Lewkowicz, A.G. et Harris, C. (2005). Frequency and magnitude of active-layer detachment failures in discontinuous and continuous permafrost, northern Canada. Permafrost and Periglacial Processes, 16(1) : 115-130.

L'Hérault E., Allard M., Barrette C., Doré G. et Sarrazin D. (2012). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 252 p.

L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M-P., Ducharme, M-A., Larrivée, K., Grandmont, K. et Lemieux, C. (2013). Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 90 p.

L'Hérault, E., Allard, M., Lemay, M., Barrette, C. et Carbonneau, A.-S. (2014). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégies d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujjuaq. Rapport final, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 78 p.

L'Hérault, E., Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., Carbonneau, A.-S. et Ducharme, M.-A. (2015). Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq : Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques. Rapport final, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 89 p.

L'Hérault, E. (2009). Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Département de Géographie. Québec, Université Laval. Maîtrise en Sciences Géographiques: 149 p.

Lunardini, V.J. (1978). Theory of n-factors and correlation of data. In Proceedings, 3rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, July 10–13, 1978. National Research Council of Canada. Ottawa, ON, 1 : 40–46.

Mackay, J.R. et MacKay, D.K. (1974). Snow cover and ground temperatures. Arctic, 27 : 287–296.

Matthews, B. (1962). Snow conditions at Schefferville, wlnter 1960-1961: with special reference to the effects of wind on the pattern of snow accumulation in a muskeg area. M.S.A.R.P., No. 12, 65-75.

Ménard, É., Allard, M. et Michaud, Y. (1998). Field data of ground surface temperatures in various biophysical micro-environments near Umiujaq, eastern shore of Hudson Bay, Canada. *In* A.G. Lewkowicz and M. Allard (editors) Permafrost, Seventh

International Conference, Proceedings, Yellowknife, Canada. Université Laval, Centre d'études nordiques, Collection Nordicana, 57 : 723-730.

Morse P. D., Burn C. R., Kokelj S.V. (2012) Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories. Canadian Journal of Earth Sciences, 49 : 895-913.

Nicholson, F.H. et Grandberg, H.B. (1973). Permafrost and snow cover relationships near Scheffervil1e. Pages 151-158. In Permafrost, Proceedings Sec. Inter. Conf. (Yakutsk. U.S.S.R.), National Academy of Science. Washington, D.C.

Payette S., Ouzilleau J. et Filion L. (1975). Zonation des conditions d'enneigement en toundra forestière, Baie d' Hudson, Nouveau-Québec. Can. J. Bot. 53 : 1021-1030.

Riseborough, D.W., et Smith. M.W. (1998). Exploring the limits of permafrost. Proceedings, Seventh International Conference on Permafrost, 23-27 June 1998, Yellowknife, NWT. Quebec City: Centre d'études nordiques, Nordicana 57: 935-941.

Seguin M.K. et Allard M. (1984). La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manitounuk, côte est de la mer d'Hudson, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 21(3) : 354-364.

Smith, M.W. et Riseborough, D.W. (1996). Permafrost monitoring and detection of climate change. Permafrost and Periglacial Processes 7: 301–309.

Thom, B. G., et Granberg, H. (1970). Patterns of snow accumulation in a forest-tundra environment, central Labrador-Ungava. East. Snow Conf. Proc, 76-86.

Wang J., Mysak L.A. et Ingram R.G. (1994). Interannual Variability of Sea-Ice Cover in Hudson Bay, Baffin Bay and the Labrador Sea. Atmosphere-Ocean, 32(2) : 421-447.

Way, R.G. et Lewkowicz, A.G. (2016). Modelling the spatial distribution of permafrost in Labrador-Ungava using TTOP. Canadian Journal of Earth Sciences, 53(10): 1010-1028. DOI: 10.1139/cjes-2016-0034

Way R.G., Lewkowicz A.G., Bonnaventure, P.P. (2017). Development of moderate-resolution gridded monthly air temperature and degree-day maps for the Labrador-Ungava region of northern Canada. International Journal of Climatology, 37(1), 493-508,

Washburn, A.L. 1979. Geocryology : a survey of periglacial processes and environments. E. Arnold, London.

Weiss, A. D. (2001). Topographic position and landform analysis. In ESRI International User Conference (2001), Poster. http://mfkp.org/INRMM/article/13930813; http://www.webcitation.org/6fCNvBDBM,

Wolfe S.A., Dallimore S.R. et Solomon S.M. (1998). Coastal permafrost investigations along a rapidly eroding shoreline, Tuktoyaktuk, N.W.T. Permafrost. Seventh International Conference (Proceedings), Yellowknife (Canada), Collection Nordissant, 55 : 1125-1131.

Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. Reviews of Geophysics, 43(4).

Sites internet

NRCan. (2012). National topographic data base (NTDB) of Canada, Toporama. ftp://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/bndt/50k_shp_en/