

Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat : Phase 1

Rapport final

Emmanuel L'Hérault, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin,
Jonathan Roger et Carl Barrette

Centre d'études nordiques, Université Laval



Rapport produit pour le compte du

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Financé par



mars 2017

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.

Auteurs :

- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Antoine Boisson, étudiant au doctorat, Département de géographie, Université Laval
- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Sarah Aubé-Michaud, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Denis Sarrazin, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Jonathan Roger, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Carl Barrette, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

Citation recommandée :

E. L'Hérault, A. Boisson, M. Allard, S. Aubé-Michaud, D. Sarrazin, J. Roger et C. Barrette (2016). Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels 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, 160 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.
- Philippe Raymond, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec.
- Maxime Bélanger, ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, gouvernement du Québec.
- Yvon Jodoin, ministère de la Sécurité publique, gouvernement du Québec.
- Éric Larrivée, ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques, gouvernement du Québec.
- Anick Guimond, ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, gouvernement du Québec.
- Jean-François Gravel, Société d'habitation du Québec, gouvernement du Québec.
- Michael Barrett, Administration régionale Kativik.
- Frédéric Brassard, Administration régionale Kativik.
- Marie-Pierre McDonald, Administration régionale Kativik.
- Diane Chaumont, Consortium Ouranos.
- Isabelle Charron, Consortium Ouranos.
- Sergent Marc Ladouceur, instructeur et responsable de la formation de secourisme au 2^e Groupe de patrouilles des Rangers canadiens (GPRC).
- Lieutenant-colonel Bruno Plourde, commandant du 2^e Groupe de patrouilles des Rangers canadiens (GPRC).

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

Les conditions climatiques, le relief, la géologie de surface et les processus dynamiques qui transforment le territoire du Nunavik sont susceptibles de poser des difficultés ou d'engendrer des risques techniques, environnementaux et financiers pour les activités liées au développement économique. Or, les composantes environnementales et les processus de terrain en milieu arctique répondent directement au rythme du climat et des événements météorologiques. On parle ici du pergélisol, de l'érosion des sols et la sédimentation sur les versants, dans les lacs et dans les cours d'eau, de la glace saisonnière sur les bras de mer, les baies, les lacs et les rivières, ainsi que de l'enneigement et des événements violents comme les blizzards, les éboulements et les crues fluviales. Dans ces milieux froids, le dégel printanier s'accompagne souvent de débâcles de grande ampleur le long des cours d'eau; les accumulations de neige sur les reliefs accidentés augmentent les risques d'avalanches et la présence de glace dans le pergélisol rend le terrain sensible aux perturbations d'origine anthropique et naturelle. L'occurrence de ces processus, certains catastrophiques comme les glissements de terrain, les inondations et les avalanches, est souvent commandée par des événements météorologiques. Ces processus propres aux milieux arctiques constituent des aléas naturels à prévoir pour la planification sécuritaire du développement et l'entretien subséquent des infrastructures.

Comme c'est le cas pour la plupart des régions arctiques, la répartition spatiale et la dynamique des composantes environnementales demeurent très mal connues sur ce vaste territoire. Afin de fournir les connaissances géomorphologiques essentielles aux professionnels qui s'activeront à développer ou protéger de façon sécuritaire les ressources du Nunavik, les paramètres géomorphologiques propres au territoire doivent donc être bien connus. Dans cette optique, l'objectif principal du présent projet est de fournir aux intervenants concernés les connaissances de base essentielles en rapport avec la nature du terrain, les aléas naturels et les vulnérabilités des milieux naturels pour orienter la prise de décision pour le développement du territoire du Nunavik. Compte tenu de la vastitude du territoire à couvrir et du nombre important de paramètres physiques à intégrer, le présent projet se segmente en quatre axes de recherches qui se résument à : documenter et recenser les aléas naturels au Nunavik (axe 1), cartographier les conditions de pergélisol au Québec (axe 2), effectuer une classification géomorphologique des côtes (axe 3) et renforcer le réseau de suivi climatique (axe 4). Il s'agit ici de la première phase du projet qui s'étale de septembre 2014 à mars 2017. Dans le présent rapport, un état d'avancement détaillé en date du 31 mars 2017 est présenté afin de faire compte-rendu des travaux accomplis et d'identifier ceux à venir dans une éventuelle seconde phase, de 2017 à 2020.

Axe 1

Les aléas naturels sont le résultat de la déstabilisation d'un milieu physique en réponse à un ou des éléments déclencheurs pouvant être d'origine météorologique (précipitation, vent, température élevée), hydrologique (crue, surcote, hautes vagues), géologique (tremblement de terre) ou autres. Chaque milieu physique se définit par des composantes dont les caractéristiques régissent la sensibilité de celui-ci face aux différents types d'aléas naturels. Par exemple, la sensibilité d'un milieu aux mouvements de masse dépendra fortement de la pente, des caractéristiques des dépôts de surface ou du roc en place et de la présence ou non d'un cours d'eau qui incise les versants. Ainsi, chaque milieu présente une sensibilité variable selon l'aléa. Une sensibilité élevée d'un milieu face à un aléa peut se traduire par une fréquence, une intensité, une étendue ou un risque de récurrence plus élevé pour ce dernier. À ce jour, 39 % (26 633 photos) des levés photographiques réalisés par la DIF ont été analysés ce qui a permis de porter à 2647 le nombre aléas naturels répertoriés sur le territoire d'étude. Les aléas naturels les plus fréquents sont les mouvements de masse, suivi de ceux d'ordre météorologique et ceux d'érosion. En ce qui concerne le patron de distribution spatiale des aléas naturels répertoriés, on constate que ces derniers sont principalement localisés près de la côte, le long des grandes rivières et dans les secteurs montagneux ou aux versants escarpés. Cette répartition s'explique d'une part par le contexte géologique, hydrologique, topographique et biologique de ces milieux. Par exemple, le littoral, de par la nature des dépôts meubles et son exposition aux vagues et aux surcotes, est un milieu sensible aux inondations et à l'érosion. La frange

du territoire submergée lors de la transgression marine postglaciaire et qui longe la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, par la nature des dépôts que l'on retrouve (dépôts marins à granulométrie fine), se caractérise fréquemment par un pergélisol extrêmement riche en glace et sensible aux processus thermokarstiques (tassements, thermoérosion, etc.) et aux mouvements de masse (glissement de terrain, gélifluxion, coulée de débris, éboulement rocheux, etc.). Également, entre Kuujuarapik et Inukjuak, le relief en cuesta ainsi que les formations rocheuses fracturées favorisent l'occurrence de mouvements de masse de types éboulis. Les mouvements de masse sont également très nombreux et particulièrement actifs sur la pointe du Nunavik, sur les versants des fjords entre Ivujivik et Baie Déception. On retrouve également des concentrations de mouvements de masse dans les vallées principales de la péninsule d'Ungava et les régions montagneuses à l'ouest de la péninsule du Labrador. Pour l'ensemble du Nunavik, l'action de la cryoclastie (gélifraction), favorisée par l'amplitude des contraintes liées à l'alternance des cycles de gel/dégel et l'intensité des variations thermiques journalières propres au milieu périglaciaire, contribue significativement à la récurrence d'éboulis le long des escarpements rocheux. Il est également fréquent qu'un aléa primaire donne lieu à des aléas secondaires (effet domino) issus de couplage entre les processus. Par exemple, un tremblement de terre peut favoriser le déclenchement de mouvements de masse alors que les crues fluviales peuvent provoquer l'érosion des berges.

Basée sur une approche classique combinant plusieurs sources d'information (documents, articles, rapports, cartes, témoignages, photographies aériennes à haute résolution, images satellites à moyenne résolution et photographies aériennes obliques), l'approche utilisée pour le recensement permet difficilement de recenser objectivement les aléas d'ordre météorologique tels que les blizzards, les tempêtes et les épisodes de verglas et ceux d'ordre hydrologique comme les inondations, les crues, les embâcles, les poussées glacielles, etc. Cette difficulté relève du fait que ces aléas ne laissent que très peu d'évidences géomorphologiques dans le paysage, ce qui rend difficile, voire impossible, leur recensement par photo-interprétation. Bien que l'approche multi-échelle intégrée employée dans la présente étude se soit avérée assez satisfaisante pour le recensement des aléas naturels, la sous-représentation dans la fréquence de certains types d'aléas semble découler davantage d'une limitation méthodologique que d'une faible occurrence voire absence de ces derniers. Il est important également de mentionner que la faible résolution de l'orthomosaïque RapidEye rend très difficile le recensement des aléas naturels, particulièrement ceux de petite envergure, et entraîne également une grande incertitude lors de la délimitation de ceux-ci. Toutefois, les photos aériennes obliques prises lors de levées aéroportées de la DIF et du CEN se sont avérées très utiles et ont contribué significativement à accroître le nombre d'aléas recensés. Il demeure somme toute important de considérer l'influence du tracé linéaire de ces levés dans la répartition spatiale des aléas recensés.

Axe2

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, 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 donc 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 entraîne 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 cet axe 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, 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 avec les cellules voisines. Pour couvrir l'ensemble du territoire, le maillage en longitude et latitude est constitué de 9 087 906 cellules de 250 m². 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 38) et son épaisseur probable (Figure 39). 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.* (2016) pour la période de référence 2000-2012, 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 voir absent en raison de son remaniement 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 de distribution au Nunavik. Cette alternance de zones avec et sans pergélisol peut s'exercer sur une très courte distance (< 10 m). 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 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 m² par zone de 5 km² (400 cellules) selon les classes

standards de distribution du pergélisol a permis de produire une nouvelle carte de sa distribution au Nunavik (Figure 40).

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 41. 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 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 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 44). 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 ou 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 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.

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 2012. 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 à savoir que ce dernier ne disparaîtra pas

immédiatement même si les températures de surface n’y sont plus favorables, mais ce fera plutôt de manière graduelle. 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 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.

Axe 3

Énigmatiques, vastes, diverses, nordiques, inhospitaliers. À eux seuls, ces qualificatifs décrivent les littoraux du Nunavik qui est entouré par trois façades maritimes aux caractéristiques assurément différentes à savoir la baie d’Hudson, le détroit d’Hudson et la baie d’Ungava. Ce littoral périglaciaire se dessine sur environ 10 000 km entre Kuujuarapik (55°16’N, 77°45’O) et l’île de Killiniq (60°21’N, 64°51’O). Labyrinthique, ce littoral se décompose en une mosaïque de systèmes côtiers tels que les baies, les plages, les hauts promontoires, les fjords et les larges estuaires. Le littoral du Nunavik comporte également une diversité de marnages : microtidal (< 2m) pour la baie d’Hudson; mésotidal (2 à 4 m) à macrotidal (> 4 m) pour le détroit d’Hudson; macrotidal pour la baie d’Ungava. La dynamique glacielle est également partie intégrante de ce littoral. Aussi, le pergélisol, qu’il soit continu, discontinu ou sporadique, se réchauffe et dégèle, modifiant les processus et les environnements côtiers. Ces différentes caractéristiques sont importantes dans la compréhension de la composition granulométrique, la morphologie et les tendances évolutives des littoraux du Nunavik. La dynamique érosive et sédimentaire des littoraux est conditionnée par l’impact de ces événements météorologiques et hydrodynamiques. La compréhension des réponses possibles des littoraux face aux modifications environnementales, particulièrement dans le contexte de réchauffement climatique, est l’un des enjeux majeurs des recherches scientifiques actuelles. Ces littoraux arctiques/subarctiques sont confrontés notamment à la variation du niveau marin relatif, l’allongement de la période d’eau libre, l’exposition aux vagues et aux crues de tempête, les surcotes, les décotes, les poussées glacielles, etc. Peu documentés à ce jour, ces changements récents et en cours ont besoin d’être mieux connus si on envisage d’en évaluer les impacts.

Pour le Nunavik, les études portant sur la géomorphologie littorale et les risques qui y sont associés sont fragmentaires dans le temps et l’espace. Jusqu’à maintenant, seul le programme CanCoast de Ressources Naturelles Canada avait produit des résultats de cartographie sur une partie des littoraux du Nunavik, d’une résolution assez grossière. Il était donc opportun d’acquérir de solides connaissances sur les systèmes et processus côtiers du Nunavik, afin d’évaluer la sensibilité de ces environnements dans un contexte de changements climatiques et de développement économique. Afin de fournir les connaissances de base essentielles en rapport avec la nature du littoral du Nunavik, le troisième axe de ce projet de recherche vise en premier lieu à réaliser une classification en segments des côtes du Nunavik à partir d’images aériennes obliques et planimétriques selon des critères géomorphologiques et hydrodynamiques. Cette classification est complétée avec les données géologiques côtières des sources fédérales et les analyses hydroclimatiques déjà produites au Québec par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l’Électrification des transports et Ouranos. En second lieu, le projet vise à identifier les secteurs fragiles et sensibles, notamment face à l’érosion côtière, aux variations du niveau marin relatif, aux mouvements de versant (terrestres et subaquatiques) et procéder à une première identification des aléas géotechniques côtiers (ex. les zones d’argiles sensibles en milieu littoral).

Pour l’analyse de ce littoral, long d’environ 10 000 km, le choix s’est porté sur l’utilisation de la vidéographie et de la photographie par hélicoptère; une technologie rapide ayant une résolution spatiale élevée, laquelle permet d’obtenir une information précise et uniforme pour l’intégralité de la région. Avec en supplément la contribution financière du réseau de centres d’excellence du Canada ArcticNet et du

Centre d'Études Nordiques (CEN), deux survols vidéographiques et photographiques ont donc été réalisés en août 2015 et 2016. Une collaboration avec Environnement Canada (Ottawa) nous a permis de bénéficier de l'équipement nécessaire aux levés photographiques et vidéographiques du littoral ainsi que de la méthodologie du programme eSPACE pour la segmentation de ce dernier (Wynja *et al.*, 2015). Ainsi, près de 45 heures de vidéos et 37 000 photographies géoréférencées ont été prises le long du littoral. La segmentation est le processus utilisé pour découper le littoral en segments homogènes selon le type de côte. Pour chaque segment, des attributs descriptifs (substrat, pente, type de côte, exposition, accessibilité, etc.) sont intégrés dans une base de données géospatiales qui décrit à la fois le vecteur sur sa longueur (longshore) et sur un profil cross-shore (zone intertidale, zone supratidale, arrière-plage). Malgré un travail de longue haleine, en raison d'une méthodologie très précise (méticuleuse) et d'un si long linéaire côtier, plus de la moitié du littoral du Nunavik a été segmenté à ce jour. La classification côtière détaillée a donc été réalisée pour le détroit de Manitounuk, la région d'Akulivik et le détroit d'Hudson entre Ivujivik et Baie Déception. En complément à cette classification, les caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques à l'échelle régionale le long de la côte ont été bien cernées et décrites et il a été possible de procéder à une évaluation des géorisques pour l'ensemble du littoral du Nunavik. À noter que le littoral de la côte est de la baie d'Ungava entre Kangiqsualujuaq et Killiniq et celui entre la pointe Louis XIV et Kuujuarapik n'ont pas été vidéographiés faute de budgets suffisants.

Plusieurs faits saillants de l'aperçu géomorphologique des côtes du Nunavik sont notables. Un littoral émergent, principalement rocheux (cuestas, fjords, fjards, côtes basses) qui se décompose aussi en une mosaïque de systèmes côtiers (vasières, marais, différents types de plages) aux caractéristiques hydrodynamiques très variées. Plusieurs façades maritimes ayant des caractéristiques différentes en termes de conditions hydrodynamiques (marées, houles), de types de côtes et de conditions de pergélisol sont alors distinctes : (1) Baie d'Hudson entre Kuujuarapik et Inukjuak : cuestas entrecoupées par un riche environnement sédimentaire (dunes, flèches littorales, deltas), faible amplitude des marées (microtidal); (2) Baie d'Hudson entre Inukjuak et Ivujivik : affleurements peu élevés, reliefs glaciaires et fluvioglaciaires (eskers, moraines de De Geer), skjärs (petites îles), plages de poche, faible amplitude des marées (microtidal); (3) Détroit d'Hudson : hauts promontoires, fjords (vallées glaciaires submergées) et talus d'éboulis, moyenne à forte amplitude des marées (mésotidal à hypertidal); (4) Baie d'Ungava : fjords, côtes basses rocheuses, larges estuaires et marais, forte amplitude des marées (hypertidal).

L'évolution des côtes du Nunavik se manifeste actuellement par une tendance à l'aggradation et à la progradation du trait de côte en raison du relèvement glacio-isostatique qui contre l'accélération contemporaine de la remontée du niveau marin en lien avec les changements climatiques. Autrement dit, le littoral du Nunavik évolue encore sous l'influence d'une baisse du niveau marin relatif. À l'échelle mondiale, rares sont les côtes qui subissent encore un fort relèvement glacio-isostatique comme celles du Nunavik. On observe une migration des composantes du marais (slikke, schorre) vers la mer. On dit alors que les marais progradent. De manière générale, les côtes sableuses et les formes littorales qui y sont associées (flèches, dunes, tombolos, deltas) sont en aggradation. La construction et l'évolution des flèches littorales et des systèmes dunaires sont liées aux conditions hydrodynamiques régionales (houles, dérives littorales) et à la disponibilité sédimentaire. Les côtes sableuses sont présentes davantage en baie d'Hudson que dans la baie d'Ungava. Dans le sud-est de la baie d'Hudson, de nombreux tombolos sont en formation et vont se raccrocher à des petites îles rocheuses qui appartiennent actuellement au Nunavut, déplaçant ainsi la frontière nordique du Québec. Cuestas, fjords, côtes basses, fjards, skjärs, autant d'environnements rocheux qui caractérisent le littoral du Nunavik. Ces côtes rocheuses subissent continuellement un démantèlement structural par l'érosion (gélifraction, vagues de tempête, poussées par les glaces flottantes). Les photographies prises en 2015 et 2016 sont formelles ; sur les côtes rocheuses, la gélifraction associée au gel/dégel est importante. Les affleurements rocheux sont ainsi quadrillés et ces blocs sont sapés par les houles et la marée. Par ailleurs, de très nombreuses plages de blocs rocheux (*boulder beaches*) et des plages de cailloux/galets (*Pebble/Cobble Beaches*), constituent le littoral du Nunavik.

Les houles et les marées sont communément les deux principaux forçages hydrodynamiques qui commandent les littoraux. Toutefois, pour les régions arctiques et subarctiques, il est opportun d'évoquer le rôle majeur de la glace de mer. Dictée par les mouvements des houles et des marées, la glace de mer constitue un forçage hydrodynamique en tant que tel, et ses différents effets aussi bien positifs que négatifs sur la stabilité de la côte sont considérables. Accolée pendant 7 à 8 mois aux littoraux du Nunavik, la glace de mer permet d'entraver et de stopper le développement des houles. Par conséquent, l'érosion est arrêtée en hiver, mais au printemps et surtout à l'automne, les vents poussent la glace sur la côte (poussées glacielles), érodant la surface de la plage et de l'arrière-plage, y compris les dunes; ces poussées ont la force suffisante pour endommager les infrastructures portuaires.

Ce sont les deux ou trois dernières tempêtes automnales avant l'englacement de la mer qui commandent 80-90 % des changements côtiers (Wolfe *et al.*, 1998). Les villages de la côte orientale de la baie d'Hudson sont sujets à une « saison des tempêtes » qui correspond généralement à la saison pendant laquelle la baie est libre de glaces (Savard *et al.*, 2014). Dans un contexte de réchauffement climatique, l'allongement de la période d'eau libre, consécutif à la diminution de l'étendue de la glace de mer, va induire des changements dans la longueur du fetch et permettre une augmentation et une intensification des événements tempétueux en été, mais surtout en automne (Jones *et al.*, 2009) en provoquant de fortes surcotes (Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014). Appartenant au Nunavut (Nunavut Act S.C, 1993), les chapelets d'îles (Manitounuk, Nastapoka, Hopewell) entre Kuujuarapik et Inukjuak, les *skjärs* (petites îles rocheuses situées à moins de 5 km du rivage) entre Inukjuak et Puvirnituk, l'île Smith qui fait face à Akulivik ou les moraines de De Geer en émergence dans la baie de Kovik, sont autant d'entités géomorphologiques qui permettent d'atténuer l'énergie des houles sur la côte québécoise. Par conséquent, ces littoraux du Nunavik sont davantage « protégés » contre l'érosion côtière, car le fetch y est limité. Par contre, les littoraux ouverts sur la baie d'Hudson et non protégés par ces îles ont un fetch très important (plusieurs centaines de kilomètres) qui les expose à de plus fortes vagues.

Les risques associés aux aléas qui peuvent toucher le littoral du Nunavik sont quasi exclusivement concentrés là où sont localisées les populations et les infrastructures vulnérables, c'est-à-dire aux abords des quatorze villages inuits. La vulnérabilité s'accroît en raison de la combinaison de dynamiques « naturelles » (modifiées par le réchauffement climatique qui s'opère depuis 1993) et sociales complexes. Certains aléas rencontrés en milieu côtier (tempêtes, surcotes, décotes, dynamiques glacielles, glissements de terrain en zone littorale) pourraient avoir des impacts sur les infrastructures maritimes, domestiques ou économiques, mais pourraient également présenter un risque pour la navigation ou la pratique de certaines activités traditionnelles. Les surcotes extrêmes en baie d'Hudson varient entre 1 m pour Ivujivik et 1,5 m pour Umiujaq (Massé et Gallant, 2016). Pour cette façade maritime, il faut également noter l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des décotes, c'est-à-dire des bas niveaux extrêmes (Massé et Gallant, 2016). En effet, les décotes seront plus fréquentes et intenses sur la façade orientale de la baie d'Hudson que le long de la côte sud du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava. D'ailleurs, elles devraient être suffisamment prises en compte dans la sélection d'un futur site pour un éventuel port en eau profonde. Elles auront plusieurs impacts : (i) diminution de la profondeur d'eau dans les bassins ; (ii) certains bateaux peuvent être endommagés ; (iii) ensablement à l'embouchure des grandes rivières (Ex. delta de la Grande Rivière de la Baleine), qui pourrait amener des futurs besoins de dragage ; (iv) affouillement au pied des infrastructures maritimes.

Axe 4

Alors que le climat est une composante dominante en cause dans plusieurs processus physiques et aléas naturels, le suivi, la quantification et la caractérisation des variables climatiques sont essentiels afin d'accroître la compréhension de ces processus propres aux milieux subarctiques et arctiques. Au Nunavik, il n'existe qu'un faible nombre de stations météorologiques distribuées essentiellement le long du littoral laissant un vaste territoire sans sources de données régionales. Afin de combler au moins partiellement cette lacune sur le plan du suivi météorologique à l'intérieur des terres pour le Nunavik, l'objectif de cet axe du projet consistait à installer et mettre en marche deux nouvelles stations afin de renforcer la

couverture géographique du réseau de surveillance actuel du climat au Nunavik. Ces deux nouvelles stations s'ajoutent maintenant à un important réseau de suivi météorologique (SILA) opéré et entretenu par le Centre d'études nordiques (CEN) et sont, grâce à un accord avec le MDDELCC, aussi directement intégrées au réseau de stations du MDDELCC. Les critères de fréquence de saisie et de qualité des données sont ceux du MDDELCC.

Le choix des sites d'implantation des stations météorologiques a été effectué afin de respecter plusieurs critères géographiques et physiographiques afin que les stations soient représentatives du climat propre aux différentes divisions physiographiques qui caractérisent le Nunavik, mais également assez loin des côtes afin de sonder la dynamique climatique au centre de la péninsule d'Ungava. Outre les spécifications géographiques requises, de nombreuses contraintes logistiques relatives à l'accessibilité des sites pour l'installation et l'entretien ultérieur des stations ont dû être considérées. Ces contraintes logistiques, compte tenu de l'isolement des sites choisis, portaient sur leur accessibilité par voie aérienne, à savoir la présence ou non d'une piste d'atterrissage à proximité du site (accessibilité par avion) ou de la distance de celui-ci par rapport à la communauté la plus près (accessibilité par hélicoptère).

Les deux sites retenus se retrouvent dans la région physiographique de James qui englobe les bassins versants des Baies James, d'Hudson et d'Ungava (Figure 78). La première station (Station du Lac Payne; 59°32.713N, 74°37.874W) se retrouve plus précisément dans la division physiographique du Plateau de Larch à proximité du lac Payne tandis que la seconde (Station des Monts de Puvirnituk (Camp Bélanger); 61°21.276N, 75°02.536W) se retrouve dans la division des collines de Povungnituk (Figure 78). La mobilisation de l'équipement et du personnel nécessaire à l'installation de la station météorologique au lac Payne s'est faite par hélicoptère. La mise en place de la station s'est échelonnée entre le 6 et le 9 août 2015. Concernant la station des Monts Puvirnituk, une mobilisation par avion (Twin Otter) a été possible en raison de la présence d'une piste d'atterrissage à proximité du site (Camp Bélanger).

Pour les stations, le modèle d'enregistreur utilisé est le CR1000 de Campbell Scientific avec un module CFM100 (2GIG) pour une mémoire étendue. Le système de charge des stations consiste en une batterie, un chargeur régulateur et un panneau solaire. Les stations sont équipées d'un transmetteur GOES TX320 muni d'une antenne YAGI et une balise GPS qui permet la transmission satellite des données lues sur une base horaire via la plateforme GOES. Les stations ont des systèmes d'alimentation indépendants pour l'acquisition de données et la transmission en temps réel. Les données transmises sont acheminées vers les serveurs du MDDELCC et en partie diffusées sur le portail WEB (surveillance du climat) du Gouvernement du Québec.

Après quelques semaines de bon fonctionnement, le capteur de température de l'air a fait défaut à la station du lac Payne entre le 23 et le 29 septembre 2015 puis a arrêté définitivement de fonctionner le 20 octobre 2015. Toutefois, cette station est dotée comme mesure de sécurité d'une deuxième sonde de température de l'air dont les données mesurées ne sont pas transmises en temps réel, mais sont enregistrées. Les manques dans la série de températures atmosphériques et de hauteur de neige ont donc été comblés a posteriori. La mission de terrain pour l'entretien de la station en 2016 a permis de découvrir qu'un ours avait sectionné des fils à trois reprises au cours de l'année, dont les fils pour l'alimentation électrique aux panneaux solaires. Pour l'été 2017, il faudra prévoir un remplacement du panneau solaire endommagé, 2 nouvelles batteries puisque les batteries de la station ont enregistré plus de 157 épisodes de bas voltage. Il faudra aussi prévoir quelques panneaux cloutés pour le sol à proximité de la station afin de limiter le risque de bris par les animaux. La station des Monts Puvirnituk fonctionne, quant à elle, parfaitement. Les données enregistrées dans le premier mois suivant son installation ne montrent aucune anomalie. Toutefois, une vérification devra être faite afin de valider si l'augmentation très importante de la hauteur de neige survenue entre le 10 et 13 janvier 2016 est réelle ou le résultat d'un bris ou du déplacement du capteur. À cet effet, une caméra a été installée à l'été 2016 afin de mieux comprendre la dynamique d'enneigement au site. L'installation étant complétée et les stations opérationnelles, un budget annuel sera nécessaire pour les entretenir dans le futur.

Phase 2

Après consultation avec le ministère des Forêts, de la faune et des parcs et des partenaires gouvernementaux, il faudra s'attendre à ce que la phase 2, s'il y a, comporte une forte composante de communication envers les parties prenantes au développement du nord par la publication des versions avancées des produits cartographiques, la présentation de conférences, des échanges avec les agents économiques, tant privés que publics, et la diffusion de l'information au grand public en général.

Il s'avérerait pertinent d'approfondir l'enquête sur les aléas naturels auprès des populations concernées et de poursuivre l'analyse des secteurs identifiés comme étant particulièrement susceptibles aux aléas naturels. En effet, malgré l'exercice de recensement accompli jusqu'à maintenant, une dichotomie en terme d'abondance de données demeure entre l'intérieur des terres et les côtes ainsi qu'entre les zones d'occupation et celles peu fréquentées. Cette différence s'explique en partie par l'inoccupation et la couverture photographique dispersée et discontinue de l'intérieur des terres. Cette inoccupation limite la probabilité que l'aléa soit observé par des témoins ou que ce dernier impacte le système humain (pertes humaines, matérielles et économiques). Par conséquent, avant de tirer des conclusions sur la sensibilité du territoire aux différents aléas naturels, l'analyse complète des photos obliques disponibles et l'ajout d'autres sources de données permettraient d'accroître la couverture spatiale et temporelle tout en facilitant la détection d'aléas difficilement perceptibles avec les méthodes actuellement utilisées. Dans une phase ultérieure du projet, l'analyse des photos obliques de la DIF qui n'ont pas été visionnées (61 %; 41 721 photos), la contribution de levés photographiques obliques supplémentaires effectués lors de récents inventaires écologiques complétés par le MDDELCC et l'ajout de collaborateurs provenant de différents organismes qui œuvrent dans le Nord, permettra de renforcer la couverture spatiale et temporelle du territoire et ainsi permettre de recenser davantage d'aléas. Malgré la complémentarité des différentes méthodes pour recenser les aléas, ceux d'origine météorologique sont pratiquement impossibles à identifier par photo-interprétation et laissent place à la subjectivité lorsque recensés par des témoignages. Afin de contrer ce manque, une analyse plus physique des variables climatiques impliquées dans les tempêtes de vents, blizzard et sécheresse pourrait être appuyée par les travaux d'Ouranos (Savard *et al.*, 2014; Charron, 2015).

En ce qui concerne la cartographie des conditions du pergélisol au Nunavik, une phase 2 du projet permettrait d'enclencher une validation intensive des cartes produites au cours de la phase 1, 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 MTMDET. 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 une analyse fine de la sensibilité au changement climatique des écosystèmes terrestres affectés par la présence et la disparition du pergélisol.

Pour ce qui est de la classification côtière, une phase 2 au projet permettrait de compléter et de perfectionner la classification côtière. En effet, deux sections du littoral n'ont pas encore été survolées : entre Kangiqsualujjuaq et l'île de Killiniq (~ 1 600 km) et entre Pointe Louis XIV et Kuujuarapik (~ 150 km). Depuis quelques années, certains aléas côtiers (surcote, décote, événements tempétueux) ont été évalués aux abords des infrastructures maritimes (Massé et Villeneuve, 2013 ; Massé et Gallant, 2016). Toutefois, certains aléas nécessiteraient des études approfondies. C'est le cas notamment des poussées glacielles

(*ice push*), dont les conséquences sur la morphologie et sur les infrastructures maritimes sont encore méconnues. Il serait utile de procéder à des levés de cartographie sous-marine dans les estuaires, les baies et les fjords qui sont des lieux importants de collecte de ressources alimentaires pour les Autochtones et des sites potentiels de création ou d'expansion d'installations portuaires. Un projet d'installation d'un câble de fibre optique sous-marin pour connecter les villages du Nunavik est présentement à l'étude. Une collaboration avec les entreprises concernées permettrait de faire de nombreuses mesures *in situ* sur certaines plages, afin notamment d'évaluer plus précisément leurs susceptibilités face aux poussées glacielles. Un effort pourrait également être porté sur l'évaluation de la sensibilité au changement climatique des géosystèmes côtiers affectés par la hausse du niveau marin global, la diminution de la durée de la couverture de glace et l'augmentation probable du nombre et de l'intensité des tempêtes maritimes. Ceci permettrait d'établir, voire renforcer, les liens physiques et numériques entre ce travail et les études de climat menées parallèlement par le Consortium Ouranos. Toujours afin d'améliorer la compréhension du climat régional, des zones potentielles pour recevoir de nouvelles stations météorologiques pourrait être identifiées, ce qui viendrait renforcer le réseau de stations météorologiques encore embryonnaire.

GLOSSAIRE

Aléa : Phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (chaque aléa est entre autres caractérisé en un point donné, par une probabilité d'occurrence et une intensité données).

Coin de glace : Glace massive, généralement en forme de coin dont la pointe est dirigée vers le bas. Elle résulte du gel de l'eau dans des fentes de contraction thermique. Le gel de l'eau au niveau du pergélisol permet la croissance du coin de glace.

Conséquence : Atteinte ou dommage porté aux populations, aux biens et aux autres éléments d'un milieu touché par la manifestation d'un aléa.

Couche active : Couche de sol en surface soumise au cycle annuel de gel et de dégel. Synonyme: mollisol.

Cryofaciès : Assemblage de cryostructures. Composition et structure du pergélisol constitué de sédiments et de glace.

Cryostratigraphie : Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

Cryostructure : Patrons géométriques créés par l'assemblage tri-dimensionnel de glace et sédiments dans le pergélisol.

Cryosuccion : Processus de succion survenant lors de la congélation. L'eau interstitielle migre par capillarité vers le front de gel.

Exposition : Situation par laquelle sont mis en relation, dans un milieu donné, un aléa potentiel et les éléments pouvant être soumis à sa manifestation.

Facteur de vulnérabilité : Caractéristique sociale, économique, physique (matérielle) ou naturelle susceptible de rendre une collectivité ou un élément exposé plus vulnérable à la manifestation d'un ou de plusieurs aléas.

Facteur n : Le rapport entre l'indice de gel ou de dégel à la surface du sol et l'indice de gel ou de dégel de l'air.

Gélif : Sol dans lequel se forme de la glace de ségrégation (lentilles) causant des soulèvements lorsque les conditions d'apport d'eau et de basses températures sont suffisantes et persistantes.

Gélifluxion : Déplacement en masse d'un sol dégelé gorgé d'eau sur un sol gelé. Par exemple, la couche active qui dégèle en été flue sur les versants par gravité sur le pergélisol sous-jacent. Il s'agit d'un mouvement relativement lent qui entraîne des déplacements de l'ordre de quelques centimètres par an et en vient à constituer des formes telles que des lobes ou des nappes de gélifluxion sur les versants.

Glace interstitielle : Glace contenue dans les pores du sol.

Glace de ségrégation : Glace se formant en lentilles le long du front de gel suite à la migration de l'eau interstitielle vers celui-ci.

Glace réticulée : Glace sous forme de veines horizontales et verticales qui structurent un réseau tridimensionnel, rectangulaire ou carré.

Pergélisol : Sol (ou roche) qui demeure à une température inférieure à 0 °C pour une période d'au moins deux années consécutives.

Plafond du pergélisol : Limite supérieure du pergélisol, typiquement riche en glace.

Probabilité d'occurrence : Degré de vraisemblance associé à la manifestation d'un aléa d'une intensité donnée (la probabilité d'occurrence peut s'exprimer de façon qualitative ou quantitative).

Résilience : Aptitude d'un système, d'une collectivité ou d'une société potentiellement exposé à des aléas à s'adapter, en résistant ou en changeant, en vue d'établir et de maintenir des structures et un niveau de fonctionnement acceptables.

Risque : Combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné.

Sensibilité : Proportion dans laquelle un élément exposé, une collectivité ou une organisation est susceptible d'être affecté par la manifestation d'un aléa.

Talik : Couche ou partie de sol non gelée qui survient dans une zone de pergélisol en raison d'une anomalie locale dans les conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques.

Thermokarst : Processus aboutissant à la fonte du pergélisol et à la formation d'une topographie irrégulière caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus à la perte de volume causée par la fonte de la glace. Cette fonte peut être généralisée et avoir une cause climatique (dégel dû à un réchauffement) ou bien anthropique (impact d'une construction, déforestation). Elle peut également être locale et due à la circulation d'eau sur un sol gelé.

Vulnérabilité : Condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	2
Sommaire exécutif.....	3
Glossaire.....	13
Liste des illustrations.....	18
Liste des tableaux.....	23
Introduction.....	24
1 Documenter et recenser les aléas naturels au Nunavik.....	25
1.1 Objectifs.....	25
1.2 Méthodologie.....	25
1.2.1 Revue de littérature.....	25
1.2.2 Compilation de témoignages dans les communautés.....	26
1.2.3 Recensement des aléas naturels par photo-interprétation.....	28
1.2.4 Mise en place de collaborations.....	31
1.2.5 Base de données des aléas naturels.....	34
1.3 Résultats.....	35
1.3.1 Synthèse des types d'aléas naturels recensés au Nunavik.....	35
1.3.1.1 Mouvements de masse.....	35
1.3.1.2 Aléas hydrologiques.....	39
1.3.1.3 Aléas associés au pergélisol.....	43
1.3.1.4 Érosion côtière et fluviale.....	44
1.3.1.5 Aléas météorologiques.....	44
1.3.2 Recensement et cartographie des aléas naturels au Nunavik.....	45
2 La cartographie révisée du pergélisol du Québec.....	49
2.1 Objectifs.....	50
2.2 Méthodologie.....	51
2.2.1 Le système pergélisol.....	51
2.2.2 Compilation et spatialisation des variables du système pergélisol.....	54
2.2.2.1 Flux géothermique (Q).....	54
2.2.2.2 Températures de surface.....	56
2.2.2.2.1 Facteurs-n de dégel.....	57
2.2.2.2.2 Facteurs-n de gel.....	59
2.2.2.2.2.1 Relation épaisseur de neige et facteur-n de gel.....	59
2.2.2.2.2.2 Influence de la végétation et de la topographie sur les caractéristiques du couvert nival ⁶¹	
2.2.2.2.2.3 Indice de potentiel d'accumulation de neige.....	65

2.2.2.2.4	Détermination des degrés-jours de dégel et de gel à partir des facteurs-n	72
2.2.2.3	Géologie de surface, caractéristiques géotechniques et propriétés thermiques inférées du pergélisol.....	75
2.3	Résultats.....	79
2.3.1	Les températures au sommet, épaisseur et distribution du pergélisol	79
2.3.2	Les conditions géocryologiques	85
2.3.3	La susceptibilité du territoire aux affaissements thermokarstiques.....	89
3	Classification géomorphologique des côtes du Nunavik.....	92
3.1	Le Nunavik : une mosaïque de systèmes côtiers.....	92
3.2	Objectifs.....	94
3.3	Méthodologie.....	94
3.3.1	Vidéographie/photographie de la ligne de rivage.....	94
3.3.2	Segmentation du littoral	97
3.4	Résultats.....	100
3.4.1	La classification côtière.....	100
3.4.2	Spécificités géomorphologiques entre chaque village.....	103
3.4.2.1	La côte est de la baie d’Hudson.....	103
3.4.2.2	La côte sud du détroit d’Hudson	107
3.4.2.3	La côte de la baie d’Ungava.....	109
3.4.3	Conditions hydrodynamiques générales.....	112
3.4.3.1	La baie d’Hudson	112
3.4.3.1.1	Les marées et courants de marées.....	112
3.4.3.1.2	Les houles	115
3.4.3.2	Le détroit d’Hudson et la baie d’Ungava.....	116
3.4.3.2.1	Les marées et courants de marées.....	116
3.4.3.2.2	Les houles	118
3.4.4	La glace de mer, un forçage hydrodynamique majeur	118
3.4.5	Dans un contexte de changements climatiques... ..	118
3.4.5.1	Variations du niveau marin relatif jusqu’à la fin du XXIe siècle au Nunavik	118
3.4.5.2	Les impacts sur la géomorphologie littorale	120
3.4.5.2.1	Les marais	120
3.4.5.2.2	Les côtes sableuses.....	120
3.4.5.2.3	Les côtes rocheuses	120
3.4.6	Les risques côtiers au Nunavik.....	121
3.4.6.1	Côte est de la baie d’Hudson.....	121
3.4.6.2	Côte sud du détroit d’Hudson	122
3.4.6.3	Côte de la baie d’Ungava.....	123

4	Renforcer le réseau de suivi climatique.....	125
4.1	Objectifs.....	125
4.2	Méthodologie.....	125
4.3	Résultats préliminaires.....	129
4.3.1	Station des Monts de Puvirnituk (Camp Bélanger).....	129
4.3.2	Station lac Payne.....	131
	Conclusion.....	134
	Axe 1 : documenter et recenser les risques naturels au Nunavik.....	134
	Axe 2 : Cartographie des conditions de pergélisol au Québec.....	136
	Axe 3 : Classification des côtes.....	137
	Axe 4 : Suivi climatique.....	138
	Phase 2.....	138
	Références.....	139
	Annexe 1 : Guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik.....	147

LISTE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 : Exemple de documents (rapports techniques, articles scientifiques et journalistiques) utilisés pour le recensement et dresser une synthèse assortie des types d'aléas naturels susceptibles de se produire au Nunavik. 26
- Figure 2: A) Rencontre avec les représentants des municipalités et des corporations foncières. B) Visites sur le terrain. C) kiosque mobile installé dans les magasins de la Fédération des coopératives du Nouveau-Québec. D) Consultations publiques. 27
- Figure 3 : Formulaire utilisé pour la compilation des témoignages portant sur l'occurrence des aléas naturels dans les communautés et le territoire environnant. 27
- Figure 4 : A) Orthomosaïque RapidEye de 5 m de résolution qui couvre l'entièreté du territoire à l'étude avec une vue rapprochée qui montre les limitations de la résolution quant au recensement et à l'identification des aléas naturels. B) Exemple d'orthomosaïque haute résolution (15 cm) disponible couvrant le milieu bâti des communautés et les environs. C) Levés de photographies aériennes obliques du territoire réalisés par la Direction des Inventaires Forestiers (68 354 photos). D) Exemples d'aléas naturels recensés à partir des photographies aériennes obliques. 30
- Figure 5: Aperçu de quelques pages de la version préliminaire du guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik. 33
- Figure 6 : Aperçu général de la structure de la base de données géospatiale. La classe d'entité (FOI_POINTS) avec les champs communs, la table d'attribut permettant de joindre de l'information supplémentaire spécifique à l'aléa (FOI_Hazard). Les dictionnaires, qui consiste aux choix de réponses possible selon les champs retrouvés dans les couches d'entités et les tables d'attributs sont présentés en mauve. 34
- Figure 7: A) Glissement de type détachement de la couche active survenu à Salluit en 2005 (L'Hérault, 2009). B) Lobes de gélifluxion notés en bordure de la côte du Détroit d'Hudson et C) dans le secteur de Baie Déception. D) Cônes et talus d'éboulements rocheux en pied de versant, secteur d'Ivujivik..... 36
- Figure 8: A) Avalanche de neige sèche survenue à Kangiqsualujuaq dans la nuit du 1^{er} janvier 1999 (Santé et Services sociaux, 2013). B) Zone à risque d'avalanche de neige sèche au sud du village d'Ivujivik. Plusieurs enfants y glissent et une piste de ski-doo y passe de près. C) Avalanche de neige humide survenue sur le site de Baie Déception le 25 mai 2005, D) sa zone de départ et E) les dégâts causés (Hétu, 2014). 38
- Figure 9: A) et B) Embâcle et inondation dans la baie de Kuujuaq le 23 mai 1979 (Québec Arctique, 1979). C) Poussée glacielle (12 m d'altitude) observée dans le village de Kuujuaq en l'an 2000 (Tirée de Bleau, 2012). D) Évènements glaciels (crêtes de poussées) observés par la communauté Kuujuaq en l'an 2000 et 2005 (Tirée de Bleau, 2012; Collection personnelle d'Ingo Berendes). E) Forte poussée glacielle contre le brise-lames et la rampe suite à des niveaux d'eau élevés entre le 17 et le 21 février 2011 (Tirée de Clerc *et al.*, 2012). 41
- Figure 10 : A) L'onde de tempête ressentie entre le 8 et 11 octobre 2010 a poussé des vagues plus hautes qu'à la normale le long du littoral de Salluit et B) celles-ci ont abîmé la barrière de gravier le long du littoral de Salluit (NunatsiaqOnline, 2010). C) Inondation survenue à Inukjuak le 19 novembre 2015 (Nunatsiaq Online, 2015). D) Inondation liée à la fonte des neiges survenue le 16 mai 2016 à Quaqtuaq. 42
- Figure 11: A) Butte saisonnière à noyau de glace située le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujuaq. Le poteau électrique est courbé. B) Butte saisonnière à noyau de glace localisée le long de la paroi rocheuse au sud de la communauté de Kangiqsualujuaq. 42
- Figure 12: A) Affaissement thermokarstique visible sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujuaq. B) Phénomène de thermo-érosion initié dans les ornières d'un véhicule lourd à Salluit. C)

Phénomène de thermo-érosion dans un réseau de polygones à coins de glace, fjord de Sugluk.	43
Figure 13: Érosion côtière observée A) dans le fjord de Sugluk et B) dans le secteur de Baie Déception. C) et D) Érosion fluviale observée le long des côtes d'un cours d'eau terminant son parcours dans le fjord de Sugluk.	44
Figure 14: A) et B) Cabanon détruit et conteneur renversé lors de l'épisode de vents violents du 21 septembre 2004 (Allard <i>et al.</i> , 2010).	45
Figure 15: Fréquence des aléas naturels en fonction de leur catégorie.	47
Figure 16: Répartition spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik jusqu'à ce jour.	48
Figure 17: Distribution du pergélisol au Québec nordique (Modifiée de Allard <i>et al.</i> , 2012).	50
Figure 18 : 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 (TMA SP).	53
Figure 19 : 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.	54
Figure 20 : 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).	55
Figure 21 : 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 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une conductivité thermique (k) uniforme de 2.5 W/m K.	56
Figure 22 : A) Classification de la couverture terrestre de 2010 produite par le Centre canadien de télédétection (CCRS) et B) facteurs-n de dégel (n_t) types tirées de la littérature pour des surfaces similaires.	58
Figure 23 : 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	60
Figure 24 : 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.	63
Figure 25 : 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).	63
Figure 26 : 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.	64
Figure 27 : Images Landsat prises en 2016 le 19 février, le 9 mai, le 26 juin et le 12 juillet.	64

Figure 28 : A) Classes de couverture végétale du CCRS. B) Reclassification des classes de couverture terrestre en classes de structure de la végétation. C) Pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation.....	67
Figure 29 : Schématisation de l’algorithme de classification des unités topographiques (adaptée de Weiss, 2001).....	68
Figure 30: 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.	69
Figure 31 : Indice d’enneigement potentiel pour A) la composante végétale et B) la composante topographique. C) Indice d’enneigement potentiel cumulé.....	70
Figure 32 : Relation entre l’indice d’enneigement potentiel, les épaisseurs de neige équivalentes et les facteurs-n.	71
Figure 33 : 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).	71
Figure 34 : 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 <i>et al.</i> , 2016) pour la période 2000 à 2012 (13 saisons de gel et de dégel).	73
Figure 35 : 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.....	74
Figure 36 : Répartition des grandes classes de dépôts de surface au Nunavik.....	76
Figure 37 : 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....	78
Figure 38 : 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 2000-2012.	82
Figure 39 : Carte des épaisseurs probables du pergélisol calculées à partir des températures moyennes au sommet du pergélisol pour la période 2000-2012, d’un flux géothermique constant de 40.26 mW/m ² et d’une conductivité thermique uniforme de 2.5 W/m K.....	83
Figure 40 : Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2012.....	84
Figure 41: Carte des conditions géocryologiques dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires.	87
Figure 42 : 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.	88
Figure 43 : Pondération différentielle des deux facteurs qui composent l’indice de susceptibilité et la matrice des résultats possibles.	89
Figure 44 : Carte de susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques.	91
Figure 45 : Transgression marines postglaciaire au Québec nordique.	93
Figure 46 : A) Position de l’hélicoptère et angle de la caméra à 45° pour avoir le focus sur la zone intertidale supérieure. B) Matériel utilisé pour la vidéographie géoréférencée. C) Hélicoptère Bell 206 Long Ranger de la compagnie Canadian Helicopters et position dans l’hélicoptère pour effectuer la vidéographie du littoral.....	95
Figure 47 : A) Données vidéographiques et photographiques intégrées dans une <i>webmap</i> créée par le laboratoire de géomatique du Centre national de la recherche faunique (<i>National Wildlife Research Centre</i>). Photographies géoréférencées B) le long du littoral entre Kuujuarapik et Salluit (août 2015) et C) le long du littoral de Kangirsuk (août 2016).	96

Figure 48 : Profil <i>cross-shore</i> d'un environnement côtier et formulaire personnalisé d'Environnement Canada utilisé pour la segmentation.....	97
Figure 49 : Carte de l'avancement des travaux de segmentation.....	99
Figure 50 : Classification de la zone intertidale supérieure des environnements côtiers près de Kuujjuarapik.....	100
Figure 51 : Exemple de la classification des côtes entre Umiujaq et Inukjuak. (À gauche) Forme de la zone intertidale supérieure : plage, côte basse, rampe. (Au centre) Type de plage en zone intertidale supérieure : plage à cailloux/galets, plage sableuse. (À droite) Type d'arrière plage : falaise rocheuse, rampe rocheuse, zone herbacée, terrain d'arbrisseau.	101
Figure 52 : A) Flèche sableuse à Kuujjuarapik. B) Plages de poche sableuses entrecoupées par des affleurements rocheux entre Umiujaq et Inukjuak. C) Plateforme rocheuse entre Inukjuak et Puvirnituq. D) Batture sableuse entre Puvirnituq et Akulivik. E) Falaise rocheuse/verticale entre Ivujivik et Salluit et F) Structure anthropique solide à Baie Déception.....	102
Figure 53 : La côte est de la baie d'Hudson.....	103
Figure 54 : A) Flèche sableuse en progradation à Kuujjuarapik. B) Marais et microfalaise en érosion dans le détroit de Manitounuk. C) Un relief de cuesta. D) Plages de poche entrecoupées par des affleurements rocheux.	104
Figure 55 : A) Microfalaise en érosion à Umiujaq. B) Plage sableuse en progradation et petit système dunaire. C) Embouchure de la rivière Kongut. D) Plages à sédiments mixtes et à galets protégées par les îles Hopewell.....	104
Figure 56 : A) Plage sableuse et infrastructure maritime à Inukjuak. B) Plage sableuse entrecoupée par des affleurements rocheux. C) Plages à sédiments mixtes et à galets. D) Côte basse rocheuse en émerision.....	105
Figure 57 : A) Plages à sédiments mixtes et à galets. En arrière plage, des dizaines de lacs. B) Littoral labyrinthique avec des moraines de De Geer. C) Lagon en formation. D) Aux abords de la ceinture du Cap Smith.....	105
Figure 58 : A) Large plage sableuse et système dunaire en progradation. B) Reliques de reliefs fluvio-glaciaires (eskers) formant des flèches littorales. C) Moraines de De Geer dans la baie de Kovik. D) Plages de blocs rocheux et de galets au nord de la baie de Kovik.....	106
Figure 59 : La côte sud du détroit d'Hudson	107
Figure 60 : A) Ivujivik : un village construit sur le roc. B) Le Cap Wolstenholme : le point le plus au nord du Québec. C) Fjords et éboulis. D) Embouchure de la rivière Guichaud.	107
Figure 61 : A) Enrochements de fortune à Salluit. B) Baie Déception et ses infrastructures portuaires. C) Fjords et éboulis. D) Longue plage sableuse près du Cap de la Nouvelle France.	108
Figure 62 : A) Hauts promontoires rocheux. B) Coulées de gélifluxion. C) Rampe rocheuse exposée à de fortes houles. D) Plages soulevées dans le fond des fjords.	108
Figure 63 : La côte de la baie d'Ungava.....	109
Figure 64 : A) Cap Hopes Advance. B) Rampe rocheuse et cabanes. C) Boulder barricade et rampe rocheuse. D) Large zone intertidale jonchée de blocs rocheux.	109
Figure 65 : A) Village de Kangirsuk et son infrastructure maritime. B) Estuaire de la rivière Arnaud. C) Polygones de toundra. D) Marais et côte basse rocheuse.....	110
Figure 66 : A) Marais de la baie Ikattok. Marais dans le Lac aux Feuilles. C) Moulin de kame. D) Zone intertidale jonchée de blocs erratiques.	110
Figure 67 : A) Route et infrastructure maritime à Tasiujaq. B) Marais en progradation. C) Structure géologique de la Fosse du Labrador. D) Rares plages de sédiments mixtes entrecoupées par des plateformes rocheuses.....	111

Figure 68 : A) Côte basse rocheuse à l’embouchure de la Koksoak. B) Marais dans l’estuaire de la False. C) Marais dans l’estuaire de la rivière à-la-Baleine. D) Boulder barricades.	111
Figure 69 : Carte des caractéristiques des marées au Canada (Dohler, 1966).	113
Figure 70 : Les ondes de marées M_2 (composante lunaire semi-diurne) et K_1 (composante lunaire diurne) dans la baie d’Hudson, d’après Freeman et Murty (1976), modifié par Prinsenberg et Freeman (1986).	114
Figure 71 : Circulation cyclonique des eaux de surface déterminée par des bouées dérivantes (Hachey, 1935).....	114
Figure 72 : Schéma de la circulation des eaux de surface en été pour la baie d’Hudson (Prinsenberg, 1986)	115
Figure 73 : Circulation des eaux de surface dans la baie d’Ungava et le détroit d’Hudson (Drinkwater, 1986).	117
Figure 74 : Projections du niveau marin relatif pour quatre villages du Nunavik (James <i>et al.</i> , 2014).....	119
Figure 75 : Fort démantèlement structural par la gélifraction.	120
Figure 76 : Surcote et inondation à Salluit	122
Figure 77 : Carte synthèse sur les aléas côtiers au Nunavik.....	124
Figure 78 : Les régions et divisions physiographiques du Québec (IRDA, 2008). Les cercles rouges indiquent les secteurs à l’intérieur desquels les stations météorologiques ont été installées.....	126
Figure 79 : Distance à vol d’oiseau entre les nouvelles stations météorologiques déployées et les communautés situées à proximité.	127
Figure 80 : A) Emplacements des deux nouvelles stations météorologiques. Aperçu de l’instrumentation en place B) à la station du lac Payne et C) la station des Monts Puvirnitq.	127
Figure 81 : A) Données de la température moyenne de l’air, B) données de précipitation et C) données de températures du sol mesurées à la station des Monts de Puvirnitq (Camp Bélanger).	130
Figure 82 : A) Données de la température moyenne de l’air prise à 3m de la surface du sol dans un abri radiatif non-ventilé. La courbe bleue est issue d’une thermistance placée en renfort à la sonde d’origine n’ayant pas été vandalisée. La courbe orange présente les données disponibles suite au bris de la sonde principale. B) Données de températures du sol.	132
Figure 83 : A) Recensement et cartographie des aléas naturels aux États-Unis. Les tornades recensées sont présentées par les points rouges et les trajectoires des principaux ouragans par les lignes bleues (sources : Van Der Vink <i>et al.</i> , xxxx ; www.hazardscaucus.org). B) Carte montrant les zones susceptibles d’être affectées par des tremblements de terres (USGS : http://earthquake.usgs.gov/hazards/products).	135
Figure 84 : Projet d’installation de la fibre optique au Nunavik, Nunavut et Labrador. Source : http://wfnstrategies.com/portfolio-items/eastern-arctic-undersea-fibre-optic-network/?portfolioID=392	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Communautés visitées, date des visites et activités réalisées en 2015 pour recenser davantage d'aléas naturels dans les communautés et le territoire environnant.	28
Tableau 2 : Synthèse des aléas naturels répertoriés au Nunavik.....	47
Tableau 3 : Les différentes classes du système de classification de la couverture terrestre retrouvées au Nunavik, leurs caractéristiques générales, la superficie couverte par chacune d'elle et les facteurs-n de dégel types (n_i) tirés de la littérature.	58
Tableau 4 : Pondération des différentes structures végétales en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée.	66
Tableau 5 : Pondération des différentes unités topographiques en fonction de leur propension à favoriser l'accumulation de neige soufflée.	68
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.	77
Tableau 7 : Caractéristiques générales des campagnes de terrain.....	95
Tableau 8 : Les différents types de côtes observables dans l'Arctique canadien (SCAT classes) selon Owens et Sergy, 2004 et Owens, 2010):	98
Tableau 9 : Marnages maximaux des stations marégraphiques le long de la côte orientale de la baie d'Hudson (Pêches et Océans Canada, 2016).....	114
Tableau 10 : Marnages maximaux et moyens des stations marégraphiques de la baie d'Ungava et du détroit d'Hudson (Pêches et Océans Canada, 2016). * hypertidal ; ** macrotidal ; *** mésotidal.....	117
Tableau 11 : Vitesses maximales des courants de flot et de jusant en baie d'Ungava (CHC, 2006).....	118
Tableau 12 : Caractéristiques techniques propres à chacune des stations météorologiques nouvellement installées.....	128
Tableau 13 : Liste des paramètres enregistrés sur une base horaire depuis octobre 2015 ainsi que ceux ajoutés en 2016.....	128
Tableau 14 : Liste des paramètres retenus par le système d'acquisition de donnée suite aux différents bris.	133

INTRODUCTION

Les conditions climatiques, le relief, la géologie de surface et les processus dynamiques qui transforment les paysages sont susceptibles de poser des difficultés ou à tout le moins d'engendrer des risques techniques, environnementaux et financiers pour les activités liées au développement économique du territoire du Nunavik. Qui dit développement économique dit exploitation des ressources naturelles, qu'elles soient minérales, fauniques, paysagères ou écologiques, et dit aussi maintien de la qualité environnementale. On songe aussi aux défis posés pour la mise en place d'infrastructures sur le territoire tant pour désenclaver les populations humaines que pour accéder aux ressources. Or, les composantes environnementales et les processus de terrain en milieu arctique répondent directement au rythme et aux événements du climat. On songe ici aux sols gelés en permanence, à savoir le pergélisol et à sa couche active superficielle qui dégèle et regèle chaque année. On pense aussi à l'érosion des sols et la sédimentation sur les versants, dans les lacs et dans les cours d'eau, à la glace saisonnière sur les bras de mer, les baies, les lacs et les rivières, ainsi qu'à l'enneigement et aux événements violents comme les blizzards, les éboulements et les crues fluviales. Dans ces milieux froids, le dégel printanier s'accompagne souvent de débâcles de grande ampleur le long des cours d'eau; les accumulations de neige sur les reliefs accidentés augmentent les risques d'avalanches et la présence de glace dans le pergélisol rend le terrain sensible aux perturbations d'origine anthropique et naturelle. L'occurrence de ces processus, certains catastrophiques comme les glissements de terrain, les inondations et les avalanches, est souvent commandée par des événements météorologiques. Ces processus propres aux milieux arctiques constituent des aléas naturels à prévoir pour la planification sécuritaire du développement et l'entretien subséquent des infrastructures.

Comme c'est le cas pour la plupart des régions arctiques, la répartition spatiale et la dynamique des composantes environnementales demeurent très mal connues sur ce vaste territoire malgré des progrès indéniables en recherche au cours des années récentes (Allard et Lemay, 2013; Bhiry *et al.*, 2011). Afin de fournir les connaissances géomorphologiques essentielles aux professionnels qui s'activeront à développer ou protéger de façon sécuritaire les ressources du Nunavik, les paramètres géomorphologiques propres au territoire doivent donc être bien connus. En effet, les analyses et les interventions les plus judicieuses dans le contexte des aléas et des risques en présence doivent être considérées, notamment dans la planification et les opérations de nature géotechnique. Dans cette optique, l'objectif principal du présent projet est de fournir aux intervenants concernés (ex. : les représentants gouvernementaux, les organisations autochtones et les entreprises) les connaissances de base essentielles en rapport avec la nature du terrain, les aléas naturels et les vulnérabilités des milieux naturels pour orienter la prise de décision pour le développement du territoire du Nunavik.

Compte tenu de la vastitude du territoire à couvrir, du nombre important de paramètres physiques à intégrer et de l'ampleur des travaux, le présent projet se segmente en quatre axes de recherches qui se résument à : documenter et recenser les aléas naturels au Nunavik (axe 1), cartographier les conditions de pergélisol au Québec (axe 2), effectuer une classification géomorphologique des côtes (axe 3) et renforcer le réseau de suivi climatique (axe 4). Il s'agit ici de la première phase du projet qui s'étale de septembre 2014 à mars 2017. Dans le présent rapport, un état d'avancement détaillé en date du 31 mars 2017 est présenté afin de faire compte-rendu des travaux accomplis et d'identifier ceux à venir dans une éventuelle seconde phase, de 2017 à 2020.

1 DOCUMENTER ET RECENSER LES ALÉAS NATURELS AU NUNAVIK

Le territoire est le lieu de processus actifs tels que les crues fluviales, les submersions côtières, les embâcles, les débâcles, les inondations, les mouvements de versants (éboulements, glissements de terrain, gélifluxion, avalanche, etc.), les phénomènes périglaciaires et les phénomènes météorologiques extrêmes (tempête de vent, blizzard, sécheresse, etc.). Les connaissances quant aux types d'aléas naturels survenus ou susceptibles de se produire sur le territoire, leur contexte d'occurrence (météorologique, géologique, hydrologique, etc.) et leur localisation sont très limitées. À ce jour, peu d'efforts de recensement des aléas naturels ont été consacrés au territoire du Nunavik. Afin de dresser un portrait le plus à jour possible, un recensement des événements passés a été réalisé. Cet exercice comportait une révision exhaustive de la littérature, une compilation de témoignages de résidents de la région, une photo-interprétation des évidences géomorphologiques et la mise en place de collaboration avec les utilisateurs du territoire. En corrélant l'emplacement des aléas naturels avec les caractéristiques des composantes environnementales en place (type de sol, condition de pergélisol, type de végétation, pente, etc.) et les conditions météorologiques au moment de l'événement (Précipitation, vents, températures, etc.), il devient possible de préciser le contexte favorable à l'occurrence de certains aléas naturels et permettre d'identifier des zones potentiellement exposées à ces derniers.

1.1 OBJECTIFS

L'objectif principal de cet axe du projet de recherche consiste à produire une revue de littérature et un inventaire cartographique des aléas naturels et des vulnérabilités du territoire du Nunavik. À cette fin, les objectifs spécifiques sont :

- Fouiller et réviser la littérature scientifique et technique portant sur les événements catastrophiques documentés au Nunavik (glissements de terrain, avalanches, avalanches de neige humide, embâcles, crues, inondations, sécheresses, tempêtes côtières, blizzards, etc.) et classer ces événements selon deux critères : les processus en cause et les facteurs de déclenchement.
- Compléter la revue de littérature par une collecte de renseignements auprès des 14 communautés inuites et des entreprises publiques et privées concernées.
- En dresser une synthèse assortie d'une analyse des types d'incidents et de leur cause avec une évaluation préliminaire de la probabilité d'occurrence.
- Présenter les résultats aux représentants et leaders des communautés concernées et présenter les résultats aux organisations du Nunavik (ARK, Société Makivik, etc.)

1.2 MÉTHODOLOGIE

1.2.1 REVUE DE LITTÉRATURE

Afin d'évaluer la vulnérabilité du territoire face aux aléas naturels, l'une des premières étapes de ce projet consistait à faire une revue de littérature exhaustive afin de recenser et documenter les aléas naturels survenus sur le territoire du Nunavik jusqu'à ce jour. Parmi les sources d'information consultées, on retrouve essentiellement les rapports techniques, les articles scientifiques et les médias (Figure 1).

Quoique le nombre d'aléas naturels documentés soit limité, ce recensement exhaustif a permis d'identifier de nombreux événements survenus depuis 1935. Par exemple, l'avalanche survenue à Kangiqsualujjuaq (Hétu *et al.*, 2011; Jamieson et Stethem, 2002; Stethem *et al.*, 2003; Campbell *et al.*, 2007; Germain et Martin, 2011), les avalanches de neige humide de Baie Déception (Genivar, 2012), les glissements de terrain à Salluit (L'Hérault, 2009; Boucher *et al.*, 2012), ainsi que le tremblement de terre de 1989 (Adams *et al.*, 1991; Boatwright and Choy, 1992; Bent, 1994) sont très bien documentés, tandis que les événements de plus petite ampleur ayant eu que de très faibles conséquences ne sont guère documentés (Lied et Domaas, 2000).

Ce relevé de littérature a permis de dresser une synthèse assortie des types d'aléas naturels susceptibles de se produire sur le territoire et d'identifier, si possible, les éléments déclencheurs et la probabilité d'occurrence.



Figure 1 : Exemple de documents (rapports techniques, articles scientifiques et journalistiques) utilisés pour le recensement et dresser une synthèse assortie des types d'aléas naturels susceptibles de se produire au Nunavik.

1.2.2 COMPILATION DE TÉMOIGNAGES DANS LES COMMUNAUTÉS

Afin de compléter le recensement des aléas naturels au Nunavik, une compilation de témoignages recueillis dans les différentes communautés a été effectuée. En 2015, des visites-consultations dans les communautés d'Ivujivik, Inukjuak, Umiujaq, Quaqtaq et Kangiqsualujuaq ont eu lieu entre le 19 avril et 4 juin. Entre le 9 et 18 mai 2016, dans une seconde vague de consultations, les communautés d'Inukjuak et d'Ivujivik ont été revisitées, auxquels s'est ajoutée celle de Kangiqsujuaq. Au total, six communautés sur 14 ont été visitées. Ces consultations, organisées par l'Administration régionale Kativik afin de discuter d'aménagement et d'expansion urbaine, furent de belles occasions d'interroger les membres des communautés sur les différents aléas naturels observés sur leur territoire. Les activités réalisées lors de ces visites consistaient essentiellement en des rencontres avec la municipalité et la corporation foncière (Figure 2A), des visites sur le terrain (Figure 2B), la compilation de témoignages à notre kiosque mobile installé dans les magasins de la Fédération des coopératives du Nouveau-Québec (Figure 2C) et lors des consultations publiques tenues dans les salles communautaires (Figure 2D). Au cours de ces activités, c'est à l'aide de cartes couvrant le village et les environs, que les acteurs municipaux et citoyens étaient invités à identifier les endroits où ceux-ci ont noté auparavant l'occurrence d'aléas naturels. Afin de structurer la prise d'information, des formulaires en anglais et en français ont été préparés et sont présentés à la figure 3. Un sommaire des activités réalisées par communauté est présenté au tableau 1.

Afin de rejoindre le maximum de citoyens et assurer une visibilité accrue, des annonces à la radio ont également été véhiculées afin de signaler notre présence et résumer le projet. Dans les six communautés visitées jusqu'à présent, cette initiative a très bien été reçue et a permis de récolter plus d'une quarantaine de témoignages à partir desquels des aléas naturels ont pu être identifiés et localisés spatialement. L'information ainsi recueillie a été intégrée dans la base de données.



Figure 2: A) Rencontre avec les représentants des municipalités et des corporations foncières. B) Visites sur le terrain. C) kiosque mobile installé dans les magasins de la Fédération des coopératives du Nouveau-Québec. D) Consultations publiques.



 <p style="font-size: small;">Centre d'études nordiques Pavillon Adélis-Price 2425, rue de la Terrasse Université Laval, Local 1202 Québec (Québec) Canada, G1V 0A6 Téléphone: 418-656-3340 Courriel: cen@cen.ulaval.ca Site internet: http://www.cen.ulaval.ca</p>	 <p style="font-size: small;">ID:</p>				
Recensement des aléas naturels au Nunavik	Natural hazards inventory				
<p style="font-size: x-small;">Le présent questionnaire a comme objectif de recenser les différentes catastrophes naturelles survenues au Nunavik. Ce recensement est réalisé pour le compte du Ministère des Forêts, Faune et Parcs du Gouvernement du Québec en collaboration avec le Centre d'études nordiques.</p>	<p style="font-size: x-small;">This questionnaire aims to identify the various natural disasters occurred in Nunavik. This inventory is conducted by the Ministère des Forêts, Faune et Parcs de Québec Government in collaboration with the Centre for Northern Studies</p>				
LIEU (nom du village)	LOCATION (village name)				
Nom du village: Date:	Village name: Date:				
RENSEIGNEMENTS (facultatif)	PERSONAL INFORMATION (optional)				
Nom: Prénom:	Last Name: First Name:				
ALÉAS NATUREL OBSERVÉ	NATURAL HAZARDS				
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 40%;"> Type de catastrophe <input type="checkbox"/> Avalanche de neige <input type="checkbox"/> Avalanche de neige humide <input type="checkbox"/> Effondrement de terrain <input type="checkbox"/> Glissement de terrain <input type="checkbox"/> Éboulement rocheux <input type="checkbox"/> Érosion (côtère et berges) <input type="checkbox"/> Ravinement <input type="checkbox"/> Poussée glacielle <input type="checkbox"/> Embâcle de glace <input type="checkbox"/> Drainage rapide de lac <input type="checkbox"/> Crue et inondation </td> <td style="width: 60%;"> Date de l'événement : Localisation : Dompage matériel: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Vue personnellement: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Commentaires: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div> </td> </tr> </table>	Type de catastrophe <input type="checkbox"/> Avalanche de neige <input type="checkbox"/> Avalanche de neige humide <input type="checkbox"/> Effondrement de terrain <input type="checkbox"/> Glissement de terrain <input type="checkbox"/> Éboulement rocheux <input type="checkbox"/> Érosion (côtère et berges) <input type="checkbox"/> Ravinement <input type="checkbox"/> Poussée glacielle <input type="checkbox"/> Embâcle de glace <input type="checkbox"/> Drainage rapide de lac <input type="checkbox"/> Crue et inondation	Date de l'événement : Localisation : Dompage matériel: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Vue personnellement: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Commentaires: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 40%;"> Type of disaster <input type="checkbox"/> Snow avalanche <input type="checkbox"/> Slushflow avalanche <input type="checkbox"/> Ground subsidence <input type="checkbox"/> Landslide <input type="checkbox"/> Rockfall <input type="checkbox"/> Bank and coastal erosion <input type="checkbox"/> Gully erosion <input type="checkbox"/> Ice-push <input type="checkbox"/> Ice jam <input type="checkbox"/> Fast laje drainage <input type="checkbox"/> Flash flood and flood </td> <td style="width: 60%;"> Date of the event : Location : Material damage: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> View by itself: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Comments: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div> </td> </tr> </table>	Type of disaster <input type="checkbox"/> Snow avalanche <input type="checkbox"/> Slushflow avalanche <input type="checkbox"/> Ground subsidence <input type="checkbox"/> Landslide <input type="checkbox"/> Rockfall <input type="checkbox"/> Bank and coastal erosion <input type="checkbox"/> Gully erosion <input type="checkbox"/> Ice-push <input type="checkbox"/> Ice jam <input type="checkbox"/> Fast laje drainage <input type="checkbox"/> Flash flood and flood	Date of the event : Location : Material damage: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> View by itself: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Comments: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>
Type de catastrophe <input type="checkbox"/> Avalanche de neige <input type="checkbox"/> Avalanche de neige humide <input type="checkbox"/> Effondrement de terrain <input type="checkbox"/> Glissement de terrain <input type="checkbox"/> Éboulement rocheux <input type="checkbox"/> Érosion (côtère et berges) <input type="checkbox"/> Ravinement <input type="checkbox"/> Poussée glacielle <input type="checkbox"/> Embâcle de glace <input type="checkbox"/> Drainage rapide de lac <input type="checkbox"/> Crue et inondation	Date de l'événement : Localisation : Dompage matériel: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Vue personnellement: OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> Commentaires: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>				
Type of disaster <input type="checkbox"/> Snow avalanche <input type="checkbox"/> Slushflow avalanche <input type="checkbox"/> Ground subsidence <input type="checkbox"/> Landslide <input type="checkbox"/> Rockfall <input type="checkbox"/> Bank and coastal erosion <input type="checkbox"/> Gully erosion <input type="checkbox"/> Ice-push <input type="checkbox"/> Ice jam <input type="checkbox"/> Fast laje drainage <input type="checkbox"/> Flash flood and flood	Date of the event : Location : Material damage: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> View by itself: YES <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Comments: <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>				

Figure 3 : Formulaire utilisé pour la compilation des témoignages portant sur l'occurrence des aléas naturels dans les communautés et le territoire environnant.

Tableau 1 : Communautés visitées, date des visites et activités réalisées en 2015 pour recenser davantage d'aléas naturels dans les communautés et le territoire environnant.

Communautés visitées	Date	Activités réalisées
Ivujivik	20-21 avril 2015 11-13 mai 2016	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Kiosque mobile (coop)
Inukjuak	20-22 avril 2015 9-11 mai 2016	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Kiosque mobile (coop)
Umiujaq	22-24 avril 2015	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Kiosque mobile (coop)
Quaqtaq	27-29 mai 2015	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Consultation publique - Kiosque mobile (coop)
Kangiqsualujuaq	2-4 juin 2015	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Consultation publique - Kiosque mobile (coop)
Kangiqsujuaq	16-18 mai 2016	- Rencontre avec la corporation foncière - Rencontre avec la municipalité - Visite sur le terrain - Kiosque mobile (coop)

1.2.3 RECENSEMENT DES ALÉAS NATURELS PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

Les résultats préliminaires du recensement des aléas naturels supportés par la revue de littérature et la compilation des témoignages lors des visites dans les communautés montrent une concentration des aléas recensés à proximité des villages ou autres activités humaines. Cette distribution spatiale des observations d'aléas naturels se concentre autour des principaux centres d'occupations et d'activités humaines (communautés, camps, parcs provinciaux, mines, etc.) ainsi que le long des axes de transport qui les relie. Spatialement, l'échantillonnage par consultation est certes biaisé faute d'observations humaines sur l'ensemble du vaste territoire. En retour, en raison de l'occupation très dispersée du territoire, la probabilité qu'un aléa naturel ait des conséquences économiques et sociales immédiates sur les populations, les infrastructures et les activités humaines est faible. Ainsi, on suppose que plusieurs aléas naturels sont survenus sur le territoire, sans toutefois être documentés. Afin de combler ce manque, un exercice de photo-interprétation a été entrepris dans le cadre de ce présent projet afin d'identifier à l'aide d'images satellites et de photographies aériennes les évidences géomorphologiques spécifiques aux différents aléas naturels potentiellement observables sur le territoire du Nunavik à savoir : les cicatrices de glissement de terrain, les talus d'éboulis, les couloirs d'avalanche, les microfalaises en érosion, les lacs thermokarstiques en formation, les phénomènes et formes périglaciaires associés à un pergélisol riche en glace (pales, buttes saisonnières à noyau de glace, coins de glace, etc.), les feux de forêt, embâcles, drainage subit de lac, etc.

La mosaïque d'images satellitaires RapidEye de 5 m de résolution, acquise par la Direction de la cartographie générale et administrative du MERN, a été utilisée à titre de base cartographique pour la photo-interprétation et la numérisation des aléas naturels (Figure 4A). Lorsque possible, la photo-interprétation a été réalisée sur des images satellitaires d'une résolution de 1 m (Geoeye) disponibles sur Google Earth ou sur ArcGIS. Aux abords des communautés, la couverture de photographies aériennes d'une résolution de 15 et 30 cm (Figure 4B) et les levés LIDAR acquis à l'automne 2010 par le MTMDET, le MAMOT et le MRNF ont aussi été utilisés. La numérisation des résultats de la photo-interprétation a été

réalisée à l'aide du logiciel de cartographie ArcGIS et de stéréoscopie DATEM. Les aléas naturels identifiés par photo-interprétation se présentent soit sous forme de points, de lignes ou de zones en fonction de leur géométrie, leur dimension et la résolution de l'image qui a servi à leur identification. La sémiologie utilisée pour les cartes des aléas naturels est basée sur les catégories et couleurs thématiques définies dans le *Guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik* (voir plus bas).

Outre que par la photo-interprétation des images satellitaires et aériennes planimétriques, le recensement et l'identification des aléas naturels sur le territoire ont également été entrepris à partir de levés photographiques obliques géoréférencés acquis dans le cadre de ce projet en support à la classification côtière. À l'été 2015, les 4500 km de côte qui relient la communauté de Kuujjuarapik et la baie Déception ont été photographiés (12 000 photos). À l'été 2016, ce fut le segment d'environ 5000 km entre Kangiqsualujjuaq et Salluit qui a été photographié (25 000 photos). À ce nombre s'ajoutent 68 354 photos aériennes géoréférencées, prises lors de levés aéroportés réalisés dans le cadre des travaux de classification écologique entrepris par la Direction des Inventaires Forestiers (Figure 4C).

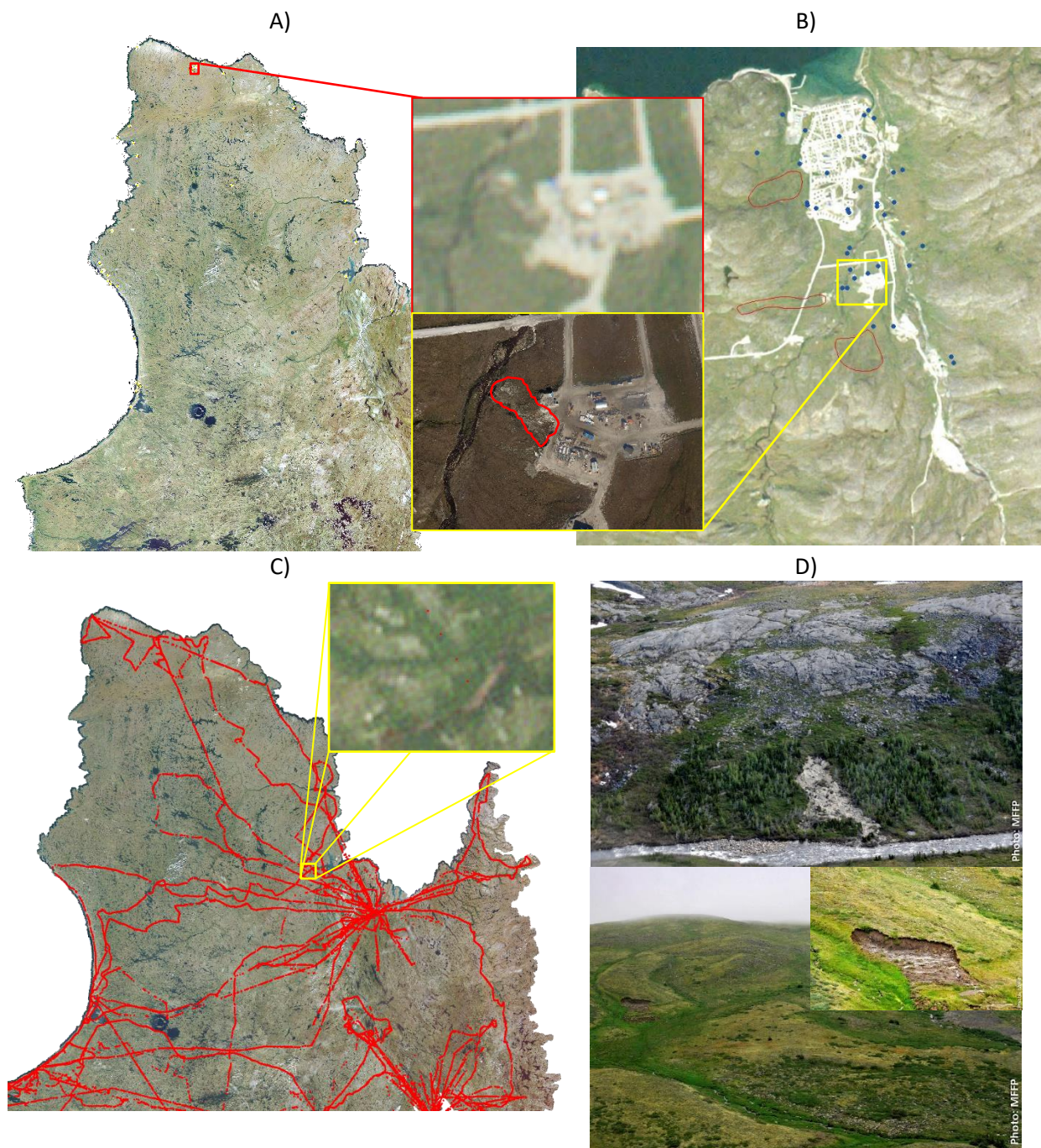


Figure 4 : A) Orthomosaique RapidEye de 5 m de résolution qui couvre l'entièreté du territoire à l'étude avec une vue rapprochée qui montre les limitations de la résolution quant au recensement et à l'identification des aléas naturels. B) Exemple d'orthomosaique haute résolution (15 cm) disponible couvrant le milieu bâti des communautés et les environs. C) Levés de photographies aériennes obliques du territoire réalisés par la Direction des Inventaires Forestiers (68 354 photos). D) Exemples d'aléas naturels recensés à partir des photographies aériennes obliques.

1.2.4 MISE EN PLACE DE COLLABORATIONS

Afin d'accroître la couverture tant spatiale que temporelle du territoire et ainsi augmenter notre capacité à recenser les aléas, des liens de collaborations ont été instaurés au sein du CEN et également entre ce dernier et différents organismes qui œuvrent sur le territoire. À ce jour, le CEN peut compter sur la participation de plusieurs chercheurs qui, dans le cadre de leurs travaux de terrain, sont susceptibles de pouvoir recueillir de l'information associée aux aléas naturels. Également, lors d'une visite-consultation à Ivujivik en avril 2015, l'équipe du CEN a rencontré le sergent Marc Ladouceur, instructeur et responsable de la formation de secourisme au 2^e Groupe de patrouilles des Rangers canadiens (GPRC). M. Ladouceur s'est montré très intéressé de collaborer avec le CEN et le MFFP. En ce sens, une demande officielle a été transmise à l'intention du lieutenant-colonel Bruno Plourde, commandant du 2^e Groupe de patrouilles des Rangers canadiens (GPRC). L'organisation des Rangers canadiens, qui garantit une présence militaire dans les régions isolées et peu peuplées du Canada, a pour rôle de signaler aux autorités toutes activités inhabituelles ou suspectes dans leur région. Les Rangers servent également de spécialistes de la géographie et de la survie afin de supporter les forces armées canadiennes lors d'opérations de recherche et sauvetage et d'opérations de routine telle que l'inspection des installations du système d'alerte du Nord. Une telle collaboration va permettre de renforcer la couverture du territoire tant dans l'espace que dans le temps afin d'assurer un recensement plus complet des aléas naturels qui surviennent sur le territoire. Cette collaboration s'est concrétisée lors de la réunion de l'organisation régionale de la sécurité civile du Nunavik tenue le 4 juin 2015 par le Ministère de la Sécurité Publique (MSP) sous la Direction régionale de la sécurité civile et de la sécurité incendie de la Capitale-Nationale, de la Chaudière-Appalaches et du Nunavik. Dans le cadre de cette collaboration, les Rangers se sont engagés, sur une base volontaire et en marge de leur mandat officiel, à identifier, photographier, localiser et classer sommairement les différents aléas naturels perceptibles sur le territoire.

Compte tenu du niveau de connaissance variable en termes d'identification et recensement d'aléas naturels aux seins des différentes organisations désirant collaborer au projet, un *Guide d'identification des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik* a été produit. Ce guide est un outil facile d'utilisation axé sur des exemples visuels concrets accompagnés de descriptions simples portant sur chaque type d'aléas susceptibles de se produire au Nunavik. Ce guide est construit de sorte que son utilisateur puisse identifier facilement et rapidement les principaux aléas naturels selon les caractéristiques propres à chacun. Afin d'assurer une conformité dans la cueillette des données, le guide contient également un protocole qui guide l'utilisateur dans la récolte d'information pertinente à l'identification et au recensement des aléas. Il s'agit d'un ouvrage de référence qui permet de fournir l'information de base sur la géomorphologie dynamique des systèmes terrestres et côtiers au Nunavik. La structure du guide se résume aux sections suivantes :

Détails et procédures : Cette section se veut un protocole visant à guider l'utilisateur dans la cueillette d'information pertinente pour le recensement des aléas naturels. Elle explique les cinq étapes à suivre lorsqu'un aléa naturel est observé lesquelles consistent à : 1) prendre une photo de l'aléa et noter son numéro de photo, 2) noter la date de l'observation, 3) noter le nom du témoin, 4) noter les coordonnées GPS ou toute autre information permettant sa localisation et 5) noter toute autre information pertinente dans la section *Note* du guide. C'est aussi dans cette section du guide que l'utilisateur trouvera les détails concernant les personnes ressources à contacter au besoin.

Les types d'aléas : Les aléas naturels ont été divisés en six catégories définies selon les processus de formation afin de faciliter la recherche dans le guide. Une couleur thématique a été assignée à chacune de ces catégories (Figure 5). De plus, des onglets sur le côté des pages permettent un accès rapide à chacune d'entre elles. Chaque aléa naturel est brièvement décrit en français [FR] et en anglais [EN] et illustré par une ou deux images au bas de la page (Figure 5). Dans une seconde version du guide, d'autres aléas naturels seront intégrés tels que les glissements de terrain rotationnels et translationnels, les coulées boueuses, les glissements pelliculaires, les ondes de tempête, les blizzards et les tempêtes de vent. Une section attribuée aux phénomènes périglaciaires sera aussi développée (ex : sols polygonaux, coins de glace, ostioles).

Glossaire : Le guide contient un glossaire en français et en anglais afin d'éclairer l'utilisateur sur certains termes.

Références : La section Références propose des articles et des livres de référence à consulter au besoin pour approfondir certaines notions abordées dans le guide.

Notes : Cette section permet à l'utilisateur de noter toute autre information jugée importante en lien avec l'aléa naturel recensé. Par exemple : un chalet a été touché par l'avalanche, l'aléa se produit lorsqu'il y a beaucoup de neige, l'érosion affecte presque toute la rive concave, etc.

Le 5 décembre 2015, le présent projet intitulé : « Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat » de même qu'une version préliminaire du guide d'identification des aléas naturels au Nunavik ont été présentés aux Rangers, sous-élément spécialisé des Forces armées canadiennes, à leur quartier général de Saint-Jean sur le Richelieu. Cette rencontre visait à présenter les objectifs de ce projet de recherche, à expliquer le concept des aléas naturels, à donner des exemples d'aléas naturels ayant affecté les communautés du Nunavik et finalement à expliquer le guide et la procédure à suivre pour le recensement des aléas. Lors de cette rencontre, le Capitaine Branco a démontré un vif intérêt envers le projet. Il a mentionné vouloir garder contact et a assuré sa collaboration. Devant un auditoire constitué majoritairement de Rangers Inuits, le Capitaine Branco a insisté sur l'importance de s'impliquer dans ce projet, sur le rôle essentiel des Rangers et sur les retombées positives d'une telle collaboration. Une version préliminaire du guide a alors été distribuée à chacun des représentants de toutes les communautés du Nunavik de même qu'au Capitaine Branco. Cette rencontre a été grandement appréciée par les Rangers présents et a permis des échanges sur leurs expériences et connaissances quant à l'occurrence d'aléas naturels dans leur village ou à proximité.

Guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik / Guide of the potentially observable natural hazards in Nunavik

Détails et procédures / Details and procedures

Lorsque vous observez un aléa présenté dans ce guide, voici les étapes à suivre / When you observe a hazard presented in this guide, here are the steps to follow :

	ÉTAPE 1	STEP 1
1	Prendre une photo de l'aléa et noter son numéro de photo.	Take a picture of the hazard and note the photo number.
2	Écrire la date (jour/mois/année).	Write the date (day/month/year).
3	Écrire votre nom complet.	Write your full name.
4	Écrire les coordonnées GPS si votre appareil photo n'a pas de GPS.	Write the GPS coordinates of the hazard if your camera does not have GPS.
5	Si vous observez d'autres détails importants, notez les dans la section Notes à la fin du guide.	Note any other important detail in the Notes section at the end of the guide.

Personnes ressource / Contact persons :
 Sarah Aubé-Michaud
 Téléphone : (418) 656-2131 ext : 4328
 Email : sarah.aube-michaud@cen.ulaval.ca
 Jonathan Roger
 Téléphone : (418) 656-2131 ext : 8298
 Email : jonathan.roger@cen.ulaval.ca

1

Aléas naturels / Natural hazards

Glissement de terrain / Landslide

[FR] Un glissement de terrain est un phénomène géologique où une masse de terre descend sur une pente sous l'influence de la gravité. Après la mise en mouvement, la masse conserve globalement sa consistance et son apparence. Parfois, la surface est caractérisée par la présence de morceaux de végétation. Les glissements de terrain surviennent lorsque la chaleur progresse rapidement dans la couche superficielle du sol et que celle-ci contient beaucoup de glace. Ils ont tendance à survenir vers la fin d'un été particulièrement chaud alors que la chaleur pénètre plus profondément que les années précédentes. Ils surviennent sur des sols très riches en glace, par exemple les argiles marines ou les tills.

[EN] A landslide is the downslope movement of a mass of soil under the influence of gravity. After setting in motion, the mass generally retains its consistency and appearance. Sometimes, the surface is characterized by the presence of vegetation pieces. Landslides occur when heat is progressing rapidly in the surface layer of the soil and the layer contains a lot of ice. They tend to occur near the end of a particularly hot summer when the heat penetrates deeper than in previous years. Landslides occur on very ice-rich soils, such as marine clays or tills.

2

Aléas naturels / Natural hazards

Thermo-érosion/ Thermal erosion

[FR] La thermo-érosion résulte principalement de la fonte des neiges, des précipitations et du dégel du pergélisol (sol gelé) en été. L'eau se concentre dans des chenaux d'écoulement et peut aussi être concentrée dans une ornière (tracé profonde formée par les roues d'un véhicule) ou dans une fissure remplie de glace (coin de glace). L'eau entre éventuellement en contact avec le pergélisol et érode le sol gelé. Rapidement, un ou des ravins peuvent se creuser. Les ravins qui en résultent sont souvent caractérisés par la forme d'un "I" inversé.

[EN] Thermal-erosion mainly results from snowmelt, precipitation and thawing permafrost (frozen soil) in summer. Water is concentrated in flow channels and can also be concentrated in a rut (deep mark formed by the wheels of a vehicle) or in a crack filled with ice (ice wedge). Running water comes in contact with permafrost and erodes the frozen soil. Quickly, ravines may widen. The gullies that result are often characterized by an inverted "I" cross-profile.

9

Figure 5: Aperçu de quelques pages de la version préliminaire du guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik.

1.2.5 BASE DE DONNÉES DES ALÉAS NATURELS

Afin de stocker efficacement les données et d'assurer leur intégralité, une structure de stockage (base de données géospatiales) a été développée sous la plateforme ArcGIS 10.4 (Figure 6). La base de données consiste en des couches d'entités géographiques (points, lignes et zones) ayant des champs communs permettant de compiler l'information liée au type d'évènement recensé, son positionnement géographique, sa date d'occurrence, la méthode de recensement utilisée (Littérature, témoignage, Photo-interprétation, etc.), la qualité de la donnée et notes diverses. À chaque élément recensé, il est également possible de joindre une table d'attribut (FOI_Hazard) permettant d'ajouter de l'information pertinente plus spécifique à l'aléa. Afin d'uniformiser l'acquisition des données nonobstant la personne qui compile l'information, des dictionnaires (liste de valeurs possibles préétablies) ont été créés par champ contenu dans les couches d'entités et tables d'attributs.

The image shows a screenshot of the ArcGIS 10.4 interface displaying the structure of the geospatial database. It consists of five main panels, each representing a different data layer or domain:

- FOI_POINTS (Feature Class):** Lists fields such as OBJECTID, SHAPE, FOI, FOI_Type, FOI_Subtype, Name, Location, Long, Lat, CoordSour, CoordPrec, Elevation, ElevSour, ElevPrec, DateofEvent, DatePrec, TimeofEvent, TimePrec, GatheringMethod, DataSource, Notes, created_user, created_date, last_edited_user, last_edited_date, UniqueId, and GlobalID. It also shows a STATUS_3_7 Coded Value Domain with values: Unspecified (297), Inactive (292), and Active (291).
- FOI_Hazard (Table):** Lists fields: OBJECTID, WitnessName, WitnessOrganization, ContactInfo, Picture, Status, Viewbyitself, MaterialDamage, Reference, Notes, and UniqueID. It includes a Boolean Coded Value Domain (yes (Y), no (N)), a Location Coded Value Domain (listing various Inuit communities like Akulivik, Aupaluk, etc.), and a DataSource Coded Value Domain (listing various data sources like Unspecified, Independent, Centre d'études nordiques, etc.).
- CoordSour (Coded Value Domain):** Lists various coordinate systems and methods: map 1:10 000 (10k), map 1:15 000 (15k), map 1:20 000 (20k), map 1:50 000 (50k), map 1:250 000 (250k), database (db), Differential Global Positioning System - benchmark (dgps), Global Positioning System (gps), DEM (dem), not applicable (na), total station (ts), orthophoto (ortho), satellite imagery (sat), benchmark - national database (nd), google earth (goo), optical level (op), laser level (ll), compass (com), clinometer (clin), and plan (pla).
- HazardType (Coded Value Domain):** Lists types of hazards: Earthquake (Ear), Erosion (Ero), Mass wasting (Maw), Thaw-related processes (Trp), Hydrological processes (Hyp), and Climatic (Cli). It also includes TimePrec (accurate (acc), fairly accurate (+- 1 hour) (fac), inaccurate (+- 4 hours) (ina), approximative (+- 12 hours) (app)) and CoordPrec (accurate (less than 1m) (acc), fairly accurate (1 to 3m) (fac), inaccurate (3 to 10m) (ina), approximative (app)).
- HazardSubtype (Coded Value Domain):** Lists specific hazard subtypes: Avalanche undifferentiated (Uav), Dry snow avalanche (Dav), Slush avalanche (Sav), Landslide undifferentiated (Ula), Active layer detachment (Ald), Rotational landslide (Rol), Translational landslide (Trl), Rockslide (Rsl), Skin slide (Ssl), Flow undifferentiated (Ufl), Mud flow (Mfl), Debris flow (Dfl), Rockfall (Rfl), Gelifluction (Gel), Thermokarst subsidence (Ths), Thermal erosion (Thr), Undifferentiated (Uer), Coastal erosion (Cer), Fluvial erosion (Fer), Wind erosion (Wer), Flood (Flo), Flash flood (Fla), Storm surge (Sts), Lake drainage (Lad), Ice-jam and break-up (Icj), Ice-push (Icp), Icing (Ici), Frostblister (Frb), Blizzard (Bli), Ice storm (Ist), Wind storm (Wis), Drought (Dro), and Wildfire (Wil).

Figure 6 : Aperçu général de la structure de la base de données géospatiale. La classe d'entité (FOI_POINTS) avec les champs communs, la table d'attribut permettant de joindre de l'information supplémentaire spécifique à l'aléa (FOI_Hazard). Les dictionnaires, qui consiste aux choix de réponses possible selon les champs retrouvés dans les couches d'entités et les tables d'attributs sont présentés en mauve.

1.3 RÉSULTATS

1.3.1 SYNTHÈSE DES TYPES D'ALÉAS NATURELS RECENSÉS AU NUNAVIK

1.3.1.1 MOUVEMENTS DE MASSE

Le terme mouvement de masse regroupe l'ensemble des processus où le matériel géologique, sous l'influence de la gravité, est mobilisé le long d'un versant vers le bas de pente. Ce terme exclut les déplacements qui résultent d'une activité tectonique ou ceux où le matériel est pris en charge par un médium de transport tel la glace, la neige, l'eau et l'air. Les mouvements de masse se divisent grossièrement en deux catégories selon la vitesse à laquelle ils se produisent soit : les mouvements de masse lents et les mouvements de masse rapides. En milieu périglaciaire, la gélifluxion est le mouvement de masse lent le plus répandu (Washburn, 1979). En ce qui concerne les mouvements de masse rapides, les plus fréquents sont : les glissements de terrain (détachement de la couche active), les coulées de débris, les éboulements rocheux et les avalanches (French, 2007). Ces différents mouvements de masse rapides se distinguent entre eux selon le mode de déplacement du matériel qui est impliqué. Par exemple, un éboulement rocheux désigne le mouvement d'une masse rocheuse dans lequel les blocs se déplacent en glissant, en tombant, en rebondissant ou en roulant, un glissement suppose un mouvement le long d'une surface de cisaillement et une coulée implique que le matériel mobilisé se comporte comme un fluide.

Les détachements de la couche active sont susceptibles de se produire sur les versants en dépôt meuble riche en glace ayant des pentes aussi faibles que 4° (L'Hérault, 2009). Les conditions météorologiques particulières (plusieurs journées chaudes consécutives) rencontrées au cours des années 1998, 2005 et 2010 ont augmenté l'instabilité des versants et favorisé le déclenchement de plusieurs détachements de la couche active dans la vallée de Salluit (Figure 7A). L'augmentation des températures moyennes annuelles de l'air de 0,3 °C/an entre 1992 et 2002 au Québec nordique a engendré un épaissement de la couche active au détriment du pergélisol riche en glace. Cette fonte d'horizons riches en glace et la quantité d'eau ainsi libérée à la base de la couche active a permis d'atteindre les conditions favorables à l'initiation de tels mouvements de masse. Pour qu'il y ait détachement de la couche active, il semble nécessaire que le front de dégel pénètre à l'intérieur du plafond du pergélisol. D'après L'Hérault (2009), une augmentation de l'épaisseur de la couche active de plus de 9 % par rapport à l'été précédent est suffisante pour atteindre les conditions géotechniques propices aux ruptures de la couche active. Les détachements de la couche active sont également susceptibles de se produire lorsque le taux de fonte à la fin de l'été est rapide et que la couche basale a une teneur en glace suffisamment élevée (Harris et Lewkowicz, 1993; Harris et Lewkowicz, 2000; Lewkowicz, 1992; Lewkowicz et Harris, 2005, L'Hérault, 2009). Même si toutes les conditions météorologiques et géothermiques sont réunies, une rupture de la couche active n'est pas nécessairement imminente. En effet, elle résulte d'une interaction complexe entre les conditions météorologiques, les facteurs de pré-conditionnement (enrichissement en glace et gélifluxion) et les facteurs environnementaux locaux (pente, orientation, épaisseur de la couverture nivale, drainage). Par exemple, selon L'Hérault (2009), il est fort probable que la gélifluxion très active dans la vallée de Salluit ait joué un rôle important dans le pré-conditionnement des versants et également dans l'occurrence et la localisation des glissements de terrain de type détachement de la couche active.

Jusqu'à présent, 60 versants affectés par la gélifluxion ont été recensés sur le territoire du Nunavik. Toutefois, ce phénomène est répandu, particulièrement sur les versants recouverts de till ou autres dépôts à granulométrie fine dont la pente excède 4 degrés comme c'est le cas dans la vallée de Salluit et celle de Kangiqsujuaq. Plusieurs lobes de gélifluxion ont aussi été observés le long de la côte du Détroit d'Hudson et dans le secteur de Baie Déception, dont plusieurs près des infrastructures (Figure 7B et C).

Lors du survol du littoral à l'été 2015, un nombre important d'éboulements rocheux en pied de versant ont été observés entre les villages d'Ivujivik et Salluit (Figure 7D).

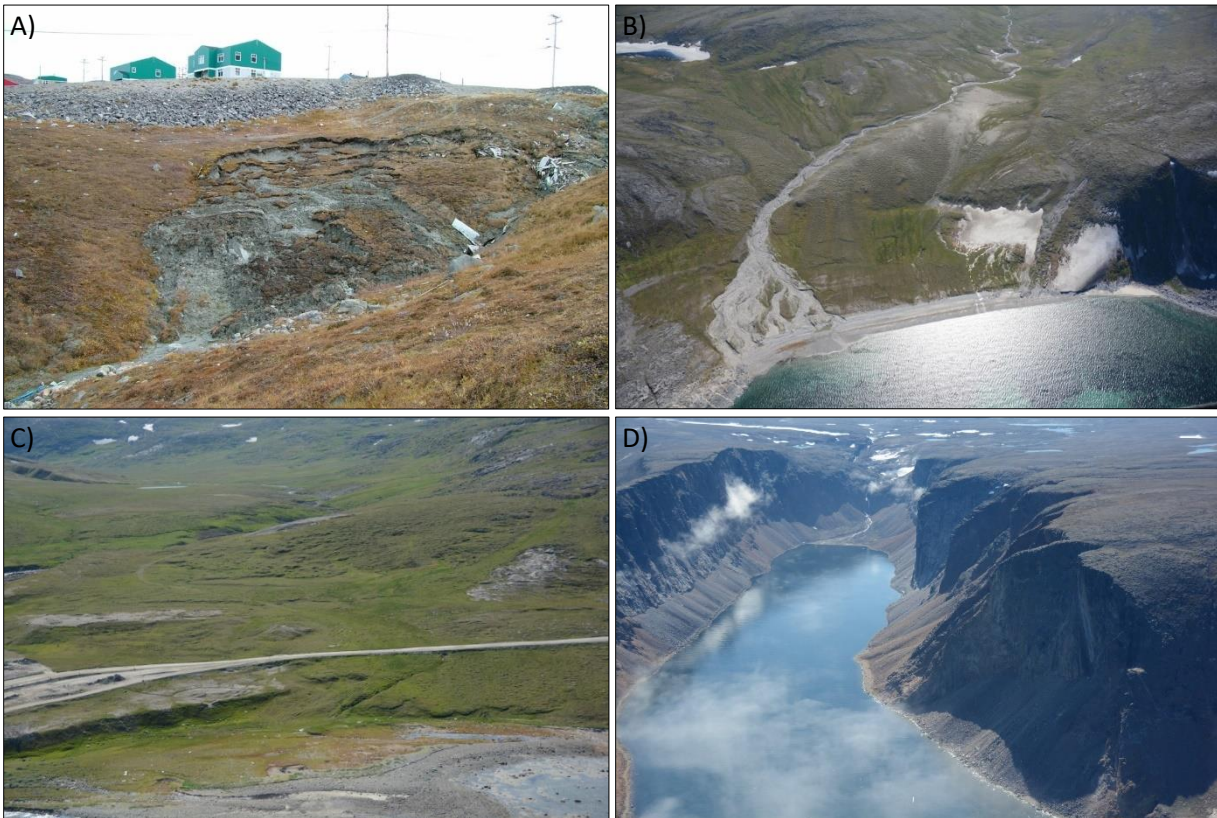


Figure 7: A) Glissement de type détachement de la couche active survenu à Salluit en 2005 (L'Hérault, 2009). B) Lobes de gélifluxion notés en bordure de la côte du Déroit d'Hudson et C) dans le secteur de Baie Déception. D) Cônes et talus d'éboulements rocheux en pied de versant, secteur d'Ivujivik.

Dans le village de Kangiqsualujjuaq, des avalanches de neige sèche se sont produites depuis la colline rocheuse à l'ouest du village à six reprises dans le passé (en 1981, 1982, 1986, 1993 et 1999) (Lied et Domass, 2000). En 1981 et 1986, le Small Store et le centre des jeunes ont été touchés par une avalanche. La Coop a été touchée par une avalanche en 1982 et 1986. En 1993, l'école a été touchée par une avalanche. Le 1^{er} janvier 1999 à 01h40 du matin, une avalanche de neige sèche a lourdement endommagé l'école Satuumavik du village où la majorité de la communauté s'était réunie pour fêter le Nouvel An (Figure 8A). L'avalanche a fait neuf morts (4 adultes et 5 enfants) et 25 blessées, dont 12 personnes suffisamment blessées pour nécessiter un transport par avion à Montréal pour leur dispenser des soins.. Il s'agit de l'avalanche de neige la plus catastrophique documentée au Québec.

Dans un environnement aussi venteux que Kangiqsualujjuaq, la présence d'un abri naturel contre le vent est souvent tenue en compte lors de l'aménagement de la communauté. Au fil des ans, plusieurs bâtiments ont été construits à la base de la colline située à l'ouest du village. La falaise possède une pente supérieure à 38°, ce qui est suffisamment abrupt pour favoriser la formation et le démarrage des avalanches de neige sèche. . Le plateau au sommet de la falaise est légèrement convexe et est dépourvu de végétation, ce qui facilite le transport et le dépôt de la neige par le vent sur le bord de la falaise. En plus de la formation de corniches de neige, l'épaisseur de la neige dépasse parfois plusieurs mètres. La nuit de la catastrophe du 1^{er} janvier 1999, des vents de 100 km/h soufflaient dans la région de Kangiqsualujjuaq, ce qui a sans doute dû fragiliser la corniche de neige et favoriser son décrochement (Germain et Martin, 2011; Héту et Dubé, 1999).

Dans le village d'Ivujivik, des avalanches de neige sèche sont à risque de se produire sur les pentes des collines au sud du village. Par ailleurs, la falaise localisée directement au sud du village est fortement achalandée par des enfants qui aiment y glisser l'hiver (Figure 8B). Une piste de motoneiges se situe également à proximité. Des avalanches ayant partiellement enseveli des enfants ont d'ailleurs été répertoriées dans des rapports techniques et observées par des témoins (Lied et Domass, 2000). Quelques

zones exposées aux avalanches de neige sèche ont aussi été rapportées plus au sud du village et à l'est du port d'Ivujivik.

D'autres cas d'avalanche de neige sèche ont été répertoriés à Umiujuaq, Salluit, Kangiqsujuaq, Quaqtac et Kangirsuk. À l'est du village d'Umiujuaq, sur les parois rocheuses des cuestas, trois avalanches de neige sèche ont été observées par des témoins. En 1998, un chalet a été touché par une avalanche près de Salluit. Une seconde aurait été observée près du poste de pompage en 2000. À Kangiqsujuaq, en 2000, une avalanche a eu lieu près des réservoirs de pétrole. Ce phénomène a été noté comme étant récurrent chaque année. Depuis, les réservoirs ont été déplacés en lieu sûr. À Quaqtac, en 1990, une avalanche s'est produite à environ 100 m au nord des infrastructures résidentielles. En 1998, à Kangirsuk, une avalanche a partiellement enseveli un enfant qui jouait derrière l'école du village (Lied et Domass, 2000).

Le site de Baie Déception a connu dans le même secteur trois épisodes d'avalanche de neige humide au courant des cinquante dernières années. La première est survenue entre le 6 et 7 juin 1970. Elle aurait été causée par la fonte rapide de la neige provoquant ainsi le décrochement du manteau neigeux saturé d'eau. Des températures de l'air élevées et un vent de haute vitesse seraient responsables du taux rapide de fonte de la neige. En effet, du 3 juin au 7 juin 1970, des températures de l'air élevées ont été observées. Aux premières heures du 6 juin 1970, la vitesse du vent a augmenté à 100 km/h avec des rafales à 140 km/h. Le 6 juin 1970, la direction du vent aurait également changé pour le nord-nord-est, devenant ainsi presque parallèle au ravin en question. L'eau de fonte issue de ces conditions particulières s'est probablement accumulée dans le ravin. La profondeur moyenne de la rupture de l'avalanche était de 3 m et celle de l'écoulement dans le ravin d'environ 8 m. Près des réservoirs d'hydrocarbures, le dépôt de neige laissé par l'avalanche était d'environ 2 m d'épaisseur. La zone de départ se trouvait à une altitude de 145 m alors que les réservoirs étaient localisés à 20 m d'altitude. Le profil suggère donc une inclinaison de la pente entre 6 et 17 degrés. L'avalanche de neige humide a frappé les réservoirs d'hydrocarbures et a fini sa course dans la baie sur la glace de mer. Quatre des six réservoirs ont été détruits et un autre a été endommagé, ce qui a provoqué un déversement de 427 000 litres d'hydrocarbures (diesel et essence). Les dommages causés aux réservoirs ainsi que les coûts de remplacement et de la perte d'hydrocarbures ont été estimés à 523 000 \$ (Ramseier *et al.*, 1973; Stethem et Schaerer, 1979).

Une seconde avalanche de neige humide est survenue le 25 mai 2005 près des infrastructures portuaires de Xstrata (Figure 8C). L'eau qui a déclenché l'avalanche provenait d'un étang temporaire retenu par un banc de neige localisé sur le plateau (Figure 8D). Lors de cet événement, une quantité importante de sédiments a été mobilisée et transportée jusqu'à la rive de la baie. Deux petits camions ont également été déplacés et abîmés par la force de l'avalanche (Figure 8E) (Hétu, 2014). Une troisième avalanche de neige humide a été reportée dans ce même secteur le 4 juin 2011.

Les avalanches de neige humide peuvent avoir des conséquences notables sur la morphologie de la zone littorale lorsque des volumes importants de sédiments sont érodés et transportés jusqu'à la mer. Jusqu'à aujourd'hui, leur fréquence n'est pas assez importante pour nécessiter des dragages d'entretiens réguliers au site de la Baie Déception. Toutefois, advenant qu'une avalanche de neige humide survienne dans ce secteur, un dragage d'urgence pourrait être requis. Une avalanche de neige humide a également été répertoriée à Salluit en 1999. Le glissement de neige fondante a traversé la rivière jusqu'à la route (Lied et Domass, 2000).



Figure 8: A) Avalanche de neige sèche survenue à Kangiqsualujuaq dans la nuit du 1^{er} janvier 1999 (Santé et Services sociaux, 2013). B) Zone à risque d’avalanche de neige sèche au sud du village d’Iluvivik. Plusieurs enfants y glissent et une piste de ski-doo y passe de près. C) Avalanche de neige humide survenue sur le site de Baie Déception le 25 mai 2005, D) sa zone de départ et E) les dégâts causés (Hétu, 2014).

1.3.1.2 ALÉAS HYDROLOGIQUES

Le 23 mai 1979, un embâcle majeur s'est produit dans la région de Kuujjuaq. Douze heures avant l'évènement, des précipitations sous forme de pluie verglaçante et de neige mouillée ont tombé abondamment (19 cm). Un goulet de congestion des glaces flottantes s'est formé à la hauteur du saillant de Whales Head. Le confinement naturel de la rivière a pu mener à l'engorgement des glaces et restreindre leurs déplacements. Au matin du 23 mai 1979, le niveau d'eau de l'estuaire a augmenté rapidement dû à des températures de près de 0 C° accompagnées de vents faibles orientés ouest-nord-ouest et au jusant d'une marée de vive-eau. Le bouchon de glace a été libéré par dynamitage quelques jours plus tard. La débâcle a causé une importante inondation dans le village de Kuujjuaq (Figure 9A et B). Des blocs de glace flottante de taille imposante ont dévasté le littoral entre le village de Kuujjuaq et l'aéroport endommageant des maisons et raclant les berges et le lit du cours d'eau sur leur passage. Une soixantaine de maisons ont été endommagées engendrant des coûts à l'époque de 179 000\$. Suite à cette catastrophe, la communauté a été réaménagée plus haut en altitude. D'après l'hydrogramme en conditions naturelles pour l'année 1979, le débit avait doublé en moins de cinq jours et atteignait son premier maximum de 17120 m³/s lorsque l'évènement s'est produit le 23 mai. Avec des débits moyens actuels estimés à 5405 m³/s, de nouvelles occurrences de cette ampleur sur la rivière Koksoak à la hauteur de Whales Head demeurent limitées (Bleau, 2012). Suite à la débâcle, une crête de poussée glacielle s'est également formée sur le littoral de la communauté de Kuujjuaq. De telles crêtes de poussées glacielles ont aussi été observées en 2000 et 2005 dans le même secteur (Figure 9C et D) (Bleau, 2012).

Pendant la nuit du 11 au 12 juin 2009, les glaces de la rivière Koksoak transportées vers l'aval se sont empilées pour former un embâcle dans le goulet amont de la baie de Kuujjuaq. Le développement de l'embâcle a été favorisé par une combinaison de caractéristiques environnementales telles que l'accumulation de glace de rive, la géomorphologie locale et la convergence des courants. L'empilement et le tassement des glaces en amont ont été commandés par l'écoulement glacial freiné par le couvert de glace plus résistant en aval (Bleau, 2012). Les lieux à fort risque d'embâcle correspondent aux resserrements géomorphologiques de la rivière Koksoak. Selon Bleau (2012), les deux types de débâcles (thermique et dynamique) ont eu lieu simultanément à différents endroits sur la rivière Koksoak. Entre le 10 et le 15 juin 2009, les paramètres atmosphériques tels que les vents chauds et secs du sud et de l'est, la température de l'air plus chaude et la pluie ont entraîné une hausse des débits. La dégradation thermique qui s'en est suivie a provoqué la détérioration de la glace dans la baie de Kuujjuaq. Le couvert de glace s'est par la suite fragilisé provoquant sa destruction mécanique. Les forces hydrauliques des marées (flot et jusant) ainsi que le courant fluvial ont contribué au mécanisme de dislocation et de destruction dynamique des glaces, au transport et au déplacement du front glacial vers l'aval. Entre le 12 et le 15 juin 2009, la quasi-totalité du couvert de glace a été évacuée. Les glaces libérées ont exercé une action érosive majeure. Elles ont tracté les blocs, raclé le fond intertidal et façonné les berges sur leur passage. Le 12 juin 2009, en face de l'immeuble du conseil municipal, une série de crêtes de poussée glacielle est apparue sur l'estran. Cette dernière, édifiée en période de morte-eau, dénote une plus grande influence de la crue printanière et du climat sur la déstructuration du couvert plus solide (Bleau, 2012). Entre le 17 et 20 février 2011, juste après l'englacement complet de la rivière en face de l'infrastructure maritime, la forte densité de glace épaissie, associée encore une fois à de très hauts niveaux d'eau, ont provoqué une forte poussée glacielle sur la rampe à proximité de l'infrastructure maritime (Figure 9^E) (Clerc *et al.*, 2012).

Pendant la période du 8 au 11 octobre 2010, une onde de tempête a été ressentie le long du Déroit d'Hudson et de la côte nord de l'Ungava. Le passage d'une dépression atmosphérique coïncidant avec les hautes mers des grandes marées a forcé la hausse exceptionnelle du niveau d'eau. Selon les témoignages des résidents, ce sont parmi les plus hauts niveaux d'eau ayant été vus jusqu'à présent dans leur localité. À Salluit, les vagues ont à cette occasion abîmé quelques remises ainsi que la barrière de gravier construite pour protéger la dizaine de maisons qui borde le rivage (Figure 10A et B) (NunatsiaqOnline, 2010). À Kangiqsujuaq, les vagues sont montées très près des conteneurs de la Coop. D'après les résidents de la communauté qui vivent le long du littoral, les eaux n'étaient jamais montées aussi près de leurs maisons. Le début du mois d'octobre est habituellement l'une des périodes de l'année durant laquelle des niveaux

d'eau extrêmes peuvent survenir. Ces niveaux anormalement hauts sont d'ailleurs plus susceptibles de se produire lors d'une période de nouvelle lune, laquelle en 2010 est survenue le 7 octobre. Selon Environnement Canada, une quantité de pluie plus importante que la moyenne serait d'ailleurs tombée entre le 8 et 11 octobre 2010 accompagnées de vents très forts en provenance du nord. Ces vents ont certainement joué un rôle dans la formation des hautes vagues observées.

Le 19 novembre 2015, des conditions météorologiques particulières (températures anormalement chaudes combinées à une longue période de précipitations et de forts vents) ont mené au débordement de la rivière Innuksuak à Inukjuak (Figure 10C). L'inondation s'est repandue autour des maisons. Selon Environnement Canada, la température de l'air à Inukjuak pour le mois de novembre oscille habituellement autour de -8 C° et -15 C°. Le 19 novembre 2015, la température était de 4 C°, un record enregistré depuis les 2 C° obtenus la même journée en 2003. Le retour des températures de l'air à des conditions plus normales a produit une couverture de glace rendant la circulation sur les routes très glissantes. De telles conditions glacées se sont également fait ressentir la même journée dans d'autres communautés au Nunavik (NunatsiaqOnline, 2015).

De manière générale, plusieurs communautés sont exposées à des inondations somme toute limitées, mais récurrentes en lien avec la fonte des neiges. Par exemple, à Quaqtuq, le blocage systématique de certains ponceaux en hiver qui sont situés en aval de zones d'accumulation de neige, favorise l'occurrence d'inondation dans certains secteurs spécifiques de la communauté. De telles inondations ont été observées en mai 2016 lors du passage de l'équipe du CEN à Quaqtuq (Figure 10D). Ces inondations sont assez limitées, mais nécessitent tout de même une intervention afin d'éviter des bris matériels.

De nombreux glaçages (icings) et buttes saisonnières à noyau de glace (frost blister) ont été observés dans plusieurs villages. Par exemple, à Quaqtuq, des glaçages se forment régulièrement près de l'ancien magasin de la COOP et empiètent sur la rue. À Kangiqsualujjuaq, ces derniers sont fréquents au pied du versant ouest de la vallée. Pour ce qui est des buttes saisonnières à noyau de glace, deux se sont récemment développées en bordure de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq causant des dommages aux poteaux électriques (Figure 11A). À Kangiqsujuaq, la formation de ces buttes est fréquente le long du ruisseau qui s'écoule à l'ouest du village et en pied de versant de part et d'autre de la vallée (Figure 11B) (Carbonneau *et al.*, 2015). D'autres buttes saisonnières à noyau de glace ont été répertoriées à Puvirnituaq, Akulivik, Salluit, Quaqtuq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiuaq, dont certaines se sont développées près des infrastructures. Par exemple, celles recensées à Quaqtuq et à Aupaluk sont situées en périphérie des pistes d'atterrissage et ont provoqué une détérioration accélérée des clôtures anti-intrusion.

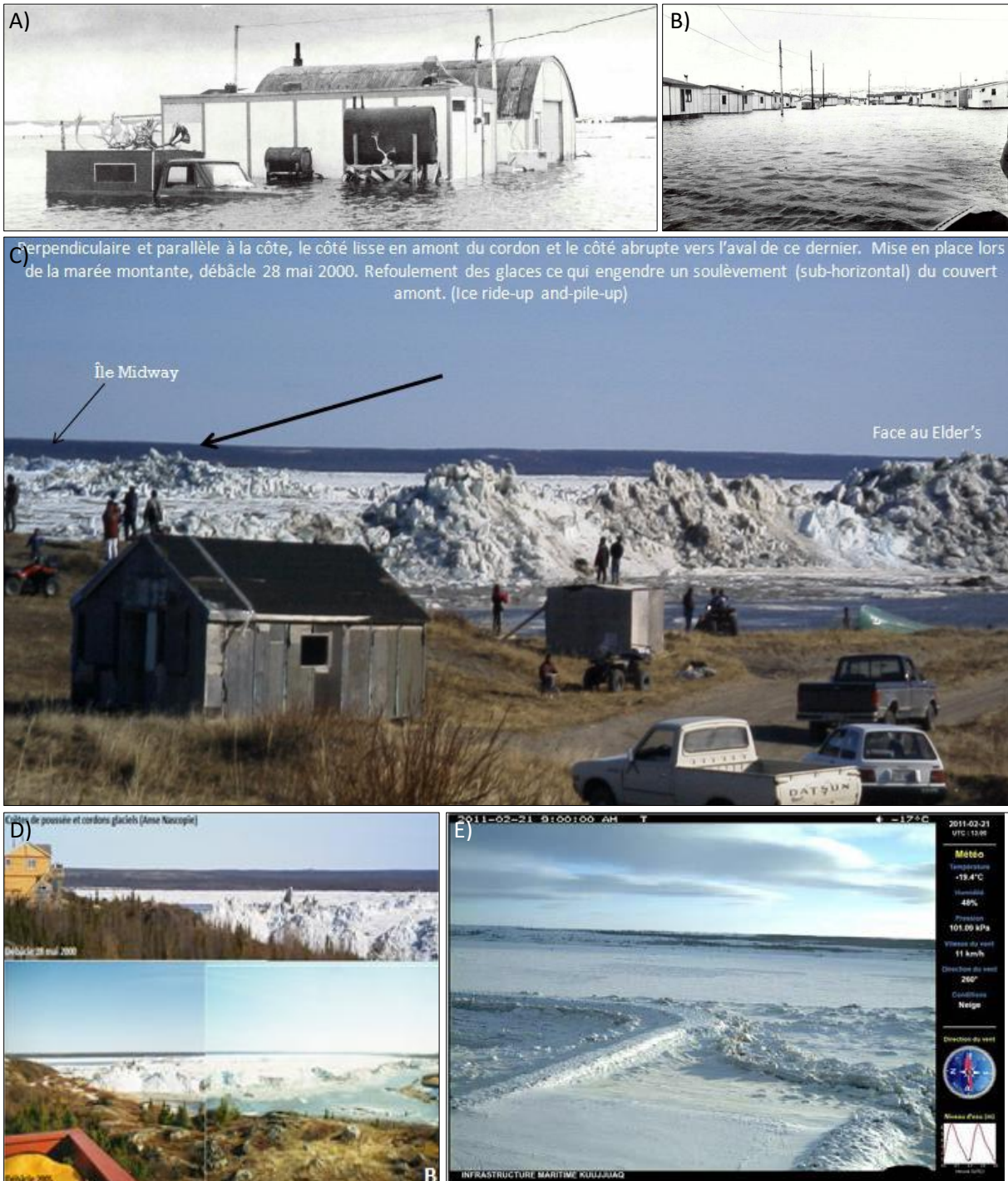


Figure 9: A) et B) Embâcle et inondation dans la baie de Kuujjuaq le 23 mai 1979 (Québec Arctique, 1979). C) Poussée glacielle (12 m d'altitude) observée dans le village de Kuujjuaq en l'an 2000 (Tirée de Bleau, 2012). D) Événements glaciels (crêtes de poussées) observés par la communauté Kuujjuaq en l'an 2000 et 2005 (Tirée de Bleau, 2012; Collection personnelle d'Ingo Berendes). E) Forte poussée glacielle contre le brise-lames et la rampe suite à des niveaux d'eau élevés entre le 17 et le 21 février 2011 (Tirée de Clerc *et al.*, 2012).



Figure 10 : A) L'onde de tempête ressentie entre le 8 et 11 octobre 2010 a poussé des vagues plus hautes qu'à la normale le long du littoral de Salluit et B) celles-ci ont abîmé la barrière de gravier le long du littoral de Salluit (NunatsiaqOnline, 2010). C) Inondation survenue à Inukjuak le 19 novembre 2015 (Nunatsiaq Online, 2015). D) Inondation liée à la fonte des neiges survenue le 16 mai 2016 à Quaqtqa.



Figure 11: A) Butte saisonnière à noyau de glace située le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq. Le poteau électrique est courbé. B) Butte saisonnière à noyau de glace localisée le long de la paroi rocheuse au sud de la communauté de Kangiqsujuaq.

1.3.1.3 ALÉAS ASSOCIÉS AU PERGÉLISOL

Plusieurs cas d'affaissements thermokarstiques, ou tassements associés au dégel du pergélisol, ont été notés sur le territoire du Nunavik. La majorité a été répertoriée à l'intérieur des limites des villages. Par exemple, à Inukjuak, les affaissements thermokarstiques ont été observés principalement sous des bâtiments et sur des routes. Une grande partie des infrastructures actuelles d'Inukjuak sont construites sur des dépôts littoraux et pré-littoraux qui reposent sur des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique fins potentiellement riches en glace et instables au dégel. Le dégel d'horizons riches en glace dans ce matériel gélif a sans doute provoqué les tassements sous les bâtiments et sur les routes. De plus, à quelques endroits, le drainage déficient a probablement favorisé le dégel du pergélisol et le développement des affaissements thermokarstiques. D'autres villages connaissent également des problèmes liés aux affaissements thermokarstiques tels qu'Umiujaq, Puvirnituq, Salluit, Aupaluk, Kuujuaq et Kangiqsualujuaq. Quelques routes et bâtiments sont d'ailleurs affectés par ces tassements (Figure 12A) (Carbonneau et al., 2015).

Des observations réalisées par l'équipe du CEN dans le village de Salluit révèlent l'existence réelle du risque de thermo-érosion. Il résulte principalement de l'écoulement de l'eau de fonte des neiges et des précipitations sur le pergélisol. Pour plusieurs des cas de thermo-érosion à Salluit, l'eau s'est concentrée à l'intérieur de chenaux d'écoulement et d'ornières laissées par le passage de véhicules lourds (Figure 12B). L'eau qui est entrée en contact avec le pergélisol a érodé rapidement le sol gelé formant des ravins caractérisés par la forme d'un « T » inversé. D'autres cas de thermo-érosion ont été notés à Kangiqsualujuaq et Aupaluk ainsi que le long des côtes des fjords du détroit d'Hudson (Figure 12C). La majorité résulte principalement de l'écoulement de l'eau le long de fentes de gel.



Figure 12: A) Affaissement thermokarstique visible sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq. B) Phénomène de thermo-érosion initié dans les ornières d'un véhicule lourd à Salluit. C) Phénomène de thermo-érosion dans un réseau de polygones à coins de glace, fjord de Sugluk.

1.3.1.4 ÉROSION CÔTIÈRE ET FLUVIALE

Quelques secteurs affectés par l'érosion côtière et fluviale ont été observés par photo-interprétation à l'aide des photos géolocalisées obtenues lors du survol du littoral à des fins de classification côtière (Figure 13). L'érosion côtière répertoriée jusqu'à aujourd'hui est principalement localisée le long de la côte du Détroit d'Hudson, dont à quelques endroits dans le fjord de Sugluk ainsi que dans le secteur de Baie Déception. Des processus d'érosion fluviale ont également été observés à la tête des fjords le long de la côte du Détroit d'Hudson. Les cas les plus importants ont été notés le long des berges de cours d'eau terminant leur parcours dans le fjord de Sugluk (Figure 13C et D).

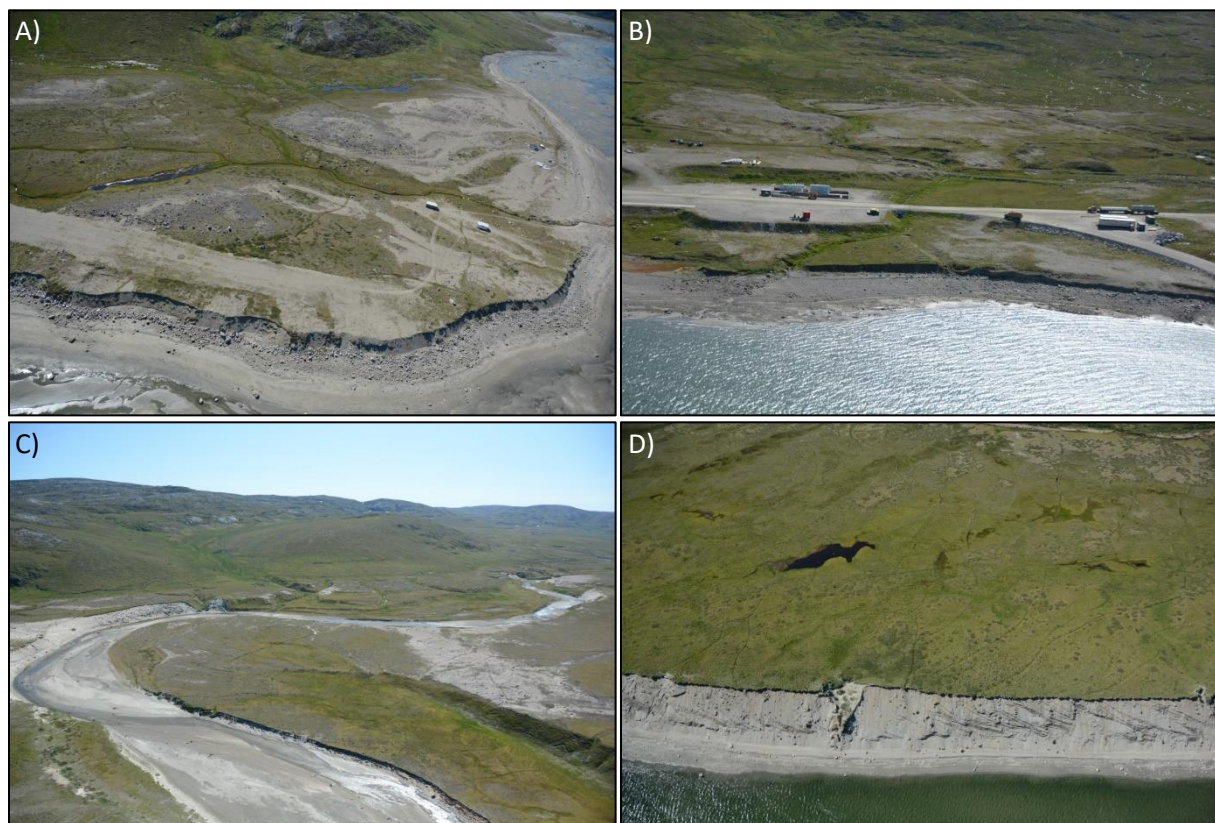


Figure 13: Érosion côtière observée A) dans le fjord de Sugluk et B) dans le secteur de Baie Déception. C) et D) Érosion fluviale observée le long des côtes d'un cours d'eau terminant son parcours dans le fjord de Sugluk.

1.3.1.5 ALÉAS MÉTÉOROLOGIQUES

Pendant la période du 29 au 31 janvier 2003, un important blizzard a paralysé la communauté de Salluit. L'épisode de vents violents associé à ce blizzard a duré 32 heures sur les hauts plateaux avec des rafales de 97 km/h et 10 heures dans la vallée avec des rafales de 77 km/h. Pendant une période de 15h, les lignes téléphoniques ont été coupées et les communications par radio et par téléphone satellite ont été gênées. Le village s'est vu dépourvu à plusieurs reprises de l'électricité, des services d'approvisionnement en eau et d'égout. Les vols à l'aéroport ont également été suspendus pendant trois jours et les garderies et les écoles ont fermé leurs portes durant deux jours (Allard *et al.*, 2010). Toujours à Salluit, le 21 septembre 2004, l'évacuation de 16 familles a été forcée dû à un épisode de vents violents d'une durée de 16 heures sur les hauts plateaux et de 11 heures à l'intérieur de la vallée. De nombreux bris matériels ont été recensés tels que des fenêtres fracassées, des cabanons détruits et des conteneurs renversés (Figure 14A et B). Quelques infrastructures ont également été endommagées telles que le garage municipal ainsi que le réservoir de carburant. Cet épisode s'est traduit par des rafales de l'ordre de 115 km/h et 94 km/h sur les hauts plateaux et dans la vallée (Allard *et al.*, 2010).

Plusieurs épisodes de vents violents ont été recensés au cours de l'année 2005. Entre le 2 et le 5 février 2005, un blizzard monstre a immobilisé les activités de la communauté. Pendant cet épisode d'une durée de 57 heures sur les hauts plateaux et de 40 heures dans la vallée, des rafales de l'ordre de 124 km/h à l'aéroport et 92 km/h au fond de la vallée ont été mesurées. Deux chasseurs se sont égarés dans la toundra et y ont trouvé la mort (leurs dépouilles ont été retrouvées en 2017). Le 28 avril de la même année, l'aéroport de Salluit a été paralysé par un blizzard forçant l'atterrissage sur le fjord glacé d'un avion pour procéder à l'évacuation médicale d'un habitant. Malgré une vitesse sous la barre des 60 km/h, les vents combinés aux conditions nivales ont provoqué une poudrière qui a réduit considérablement la visibilité lors de cet épisode. (Allard *et al.*, 2010).

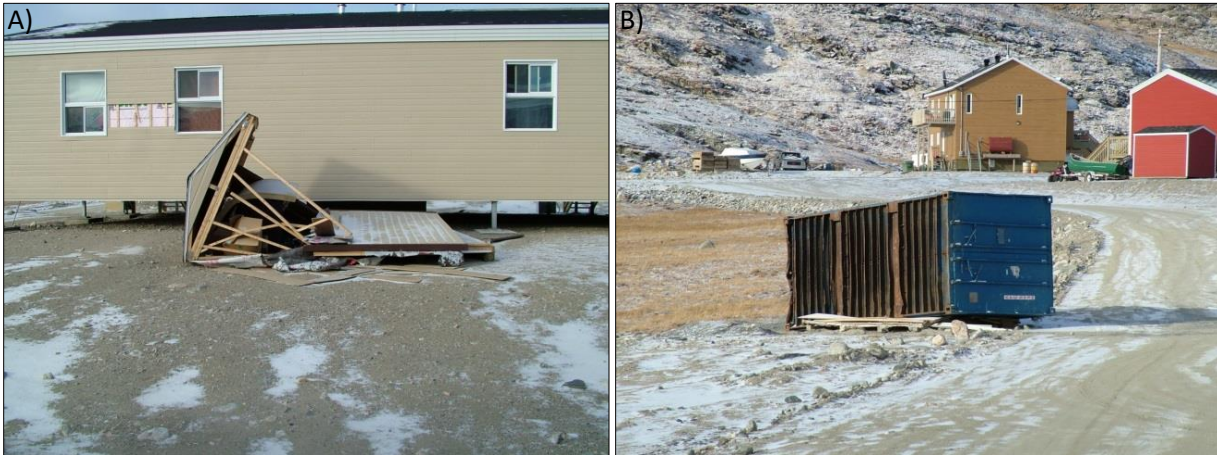


Figure 14: A) et B) Cabanon détruit et conteneur renversé lors de l'épisode de vents violents du 21 septembre 2004 (Allard *et al.*, 2010).

1.3.2 RECENSEMENT ET CARTOGRAPHIE DES ALÉAS NATURELS AU NUNAVIK

Les aléas naturels sont le résultat de la déstabilisation d'un milieu physique en réponse à un ou des éléments déclencheurs pouvant être d'origine météorologique (précipitation, vent, température élevée), hydrologique (crue, surcote, hautes vagues), géologique (tremblement de terre) ou autres. Chaque milieu physique se définit par des caractéristiques propres qui déterminent sa susceptibilité face aux différents types d'aléas naturels. Par exemple, la susceptibilité d'un milieu aux mouvements de masse dépendra fortement de la pente, des caractéristiques des dépôts ou du roc en place et de la présence ou non d'un cours d'eau qui incise les versants. Une susceptibilité élevée d'un milieu face à un aléa peut se traduire par une fréquence, une intensité, une étendue ou une probabilité d'occurrence plus élevée pour ce dernier.

À ce jour, 39 % (26 633 photos) des levés photographiques réalisés par la DIF ont été analysés ce qui a permis de porter à 2647 le nombre aléas naturels répertoriés sur le territoire d'étude (Tableau 2). Les aléas naturels les plus fréquents sont les mouvements de masse, suivi de ceux d'ordre météorologique et ceux d'érosion (Figure 15). En ce qui concerne le patron de distribution spatiale des aléas naturels répertoriés, on constate que ces derniers sont principalement localisés près de la côte (Figure 16), le long des grandes rivières et dans les secteurs montagneux ou aux versants escarpés. Cette répartition s'explique d'une part par le contexte géologique, hydrologique, topographique et biologique de ces milieux. Par exemple, le littoral, de par la nature des dépôts meubles et son exposition aux vagues et aux surcotes, est un milieu propice aux inondations et à l'érosion. La frange du territoire submergée durant la transgression marine postglaciaire et qui longe la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, par la nature des dépôts que l'on retrouve (dépôts marins à granulométrie fine), se caractérise fréquemment par la présence de pergélisol extrêmement riche en glace favorable aux processus thermokarstiques (tassements, thermo-érosion, etc.) et aux mouvements de masse (glissements de terrain, gélifluxion, coulées de débris, éboulements rocheux, etc.). Par exemple, dans la zone de pergélisol discontinu qui borde la baie d'Hudson (secteur d'Umiujaq), la présence de pergélisol riche en glace, chaud et peu profond, favorise l'occurrence de processus thermokarstiques étendus et de forte amplitude. Entre Kuujuarapik et

Inukjuak, le relief en cuesta ainsi que les formations rocheuses favorisent l'occurrence d'éboulements rocheux. Les mouvements de masse sont également très actifs sur la pointe du Nunavik, entre Ivujivik et Baie Déception. D'après Daigneault (2008), les mouvements de masse forment d'importants dépôts d'éboulis à l'intérieur des cirques (dépression de forme semi-circulaire aux versants escarpés) et certaines vallées glaciaires comme celles de la rivière Lataille ou du havre Douglas et sont généralement situés sur les pentes faisant face à l'ouest. On retrouve également des concentrations de mouvements de masse dans les vallées principales de la péninsule d'Ungava et les régions montagneuses à l'ouest de la péninsule du Labrador. Pour l'ensemble du Nunavik, l'action de la cryoclastie (gélifraction), favorisée par l'amplitude des contraintes liées à l'alternance des cycles de gel/dégel et l'intensité des variations thermiques journalières propres au milieu périglaciaire, contribue significativement à la récurrence d'éboulis le long des escarpements rocheux. Il est également fréquent qu'un aléa primaire donne lieu à des aléas secondaires (effet domino) issus de couplage entre les processus. Par exemple, un tremblement de terre peut déclencher des mouvements de masse et des inondations entraîner l'érosion des berges.

Basée sur une approche classique combinant plusieurs sources d'information (documents, articles, rapports, cartes, témoignages, photographies aériennes haute résolution, images satellites à moyenne résolution et levés photographiques obliques), l'approche utilisée pour le recensement permet difficilement de recenser objectivement les aléas d'ordre météorologique tel que les blizzards, les tempêtes et les épisodes de verglas et ceux d'ordre hydrologique comme les inondations, les crues, les embâcles, les poussées glacielles, etc. Cette difficulté relève du fait que ces aléas ne laissent que très peu d'évidences géomorphologiques dans le paysage, ce qui rend difficile voire impossible leur recensement par photo-interprétation. Bien que l'approche multi-échelle intégrée employée dans la présente étude se soit avérée assez satisfaisante pour le recensement des aléas naturels, la sous-représentation dans la fréquence de certains types d'aléas semble découler davantage d'une limitation méthodologique que d'une faible occurrence voire absences de ces derniers. Il est important également de mentionner que la faible résolution de l'orthomosaïque RapidEye rend très difficile le recensement des aléas naturels, particulièrement ceux de petite envergure, et entraîne également une grande incertitude lors de la délimitation de ceux-ci. Toutefois, les photos aériennes obliques prises lors de levées aéroportées de la DIF et du CEN se sont avérées très utiles et ont contribué significativement à accroître le nombre d'aléas recensés. Il demeure somme toute important de considérer l'influence du tracé linéaire de ces levés dans la répartition spatiale des aléas recensés.

Malgré cet exercice de recensement, une dichotomie demeure entre l'intérieur des terres et les côtes ainsi que les zones d'occupation et celles peu fréquentées. Cette différence s'explique en partie par l'inoccupation et la couverture photographique dispersée et discontinue de l'intérieur des terres. Cette inoccupation limite la probabilité que l'aléa soit observé par des témoins ou que ce dernier impacte le système humain (pertes humaines, matérielles et économiques). Par conséquent, avant de tirer des conclusions sur la vulnérabilité du territoire face aux différents aléas naturels, un recensement plus exhaustif appuyé par une meilleure couverture spatiale et temporelle doit être réalisé. Dans une seconde phase du projet, s'il y a une, l'analyse des photos obliques de la DIF qui n'ont pas été visionnées (61 %; 41 721 photos), la contribution de levés photographiques obliques supplémentaires effectués lors de récents inventaires écologiques complétés par le MDDELCC et l'implication de collaborateurs provenant de différents organismes qui œuvre dans le Nord, permettraient d'étendre cette couverture spatiale et temporelle du territoire et ainsi dresser un portrait plus juste des aléas naturels au Nunavik. Malgré la complémentarité des différentes méthodes pour recenser les aléas, ceux d'origine météorologique, outre les feux de forêts, sont pratiquement impossibles à identifier par photo-interprétation et laissent place à la subjectivité lorsqu'ils sont recensés par des témoignages. Afin de contrer ce manque, une analyse plus physique des variables climatiques impliquées dans les tempêtes de vents, blizzard et sécheresse pourrait être appuyée par les travaux d'Ouranos (Savard *et al.*, 2014; Charron, 2015).

Tableau 2 : Synthèse des aléas naturels répertoriés au Nunavik.

Catégories	Types d'aléa	Nombre
Mouvements de masse	Glissement de terrain	121
	Gélifluxion	232
	Coulée de débris	129
	Éboulement rocheux	844
	Avalanche (sèche et humide)	36
Aléas hydrologiques	Crue et inondation	10
	Submersion côtière	4
	Drainage d'un lac	11
	Embâcle et débâcle	2
	Poussée glacielle	3
	Glaçage	13
	Butte saisonnière à noyau de glace	28
Aléas associés au pergélisol	Affaissement thermokarstique	196
	Érosion thermique	77
Érosion	Côtière	33
	Fluviale	291
	Éolienne	91
Aléas météorologiques	Blizzard	3
	Tempête de vent	4
	Feu de forêt	518
	Verglas	0
Tremblement de terre	-	1
	Total :	2647

Aléas par catégorie

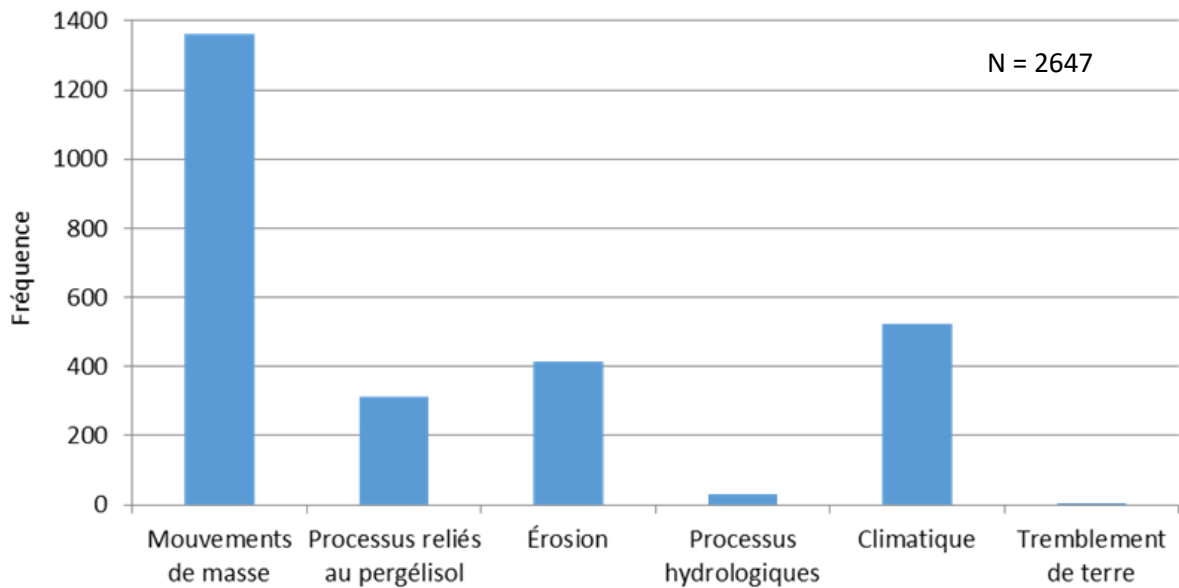
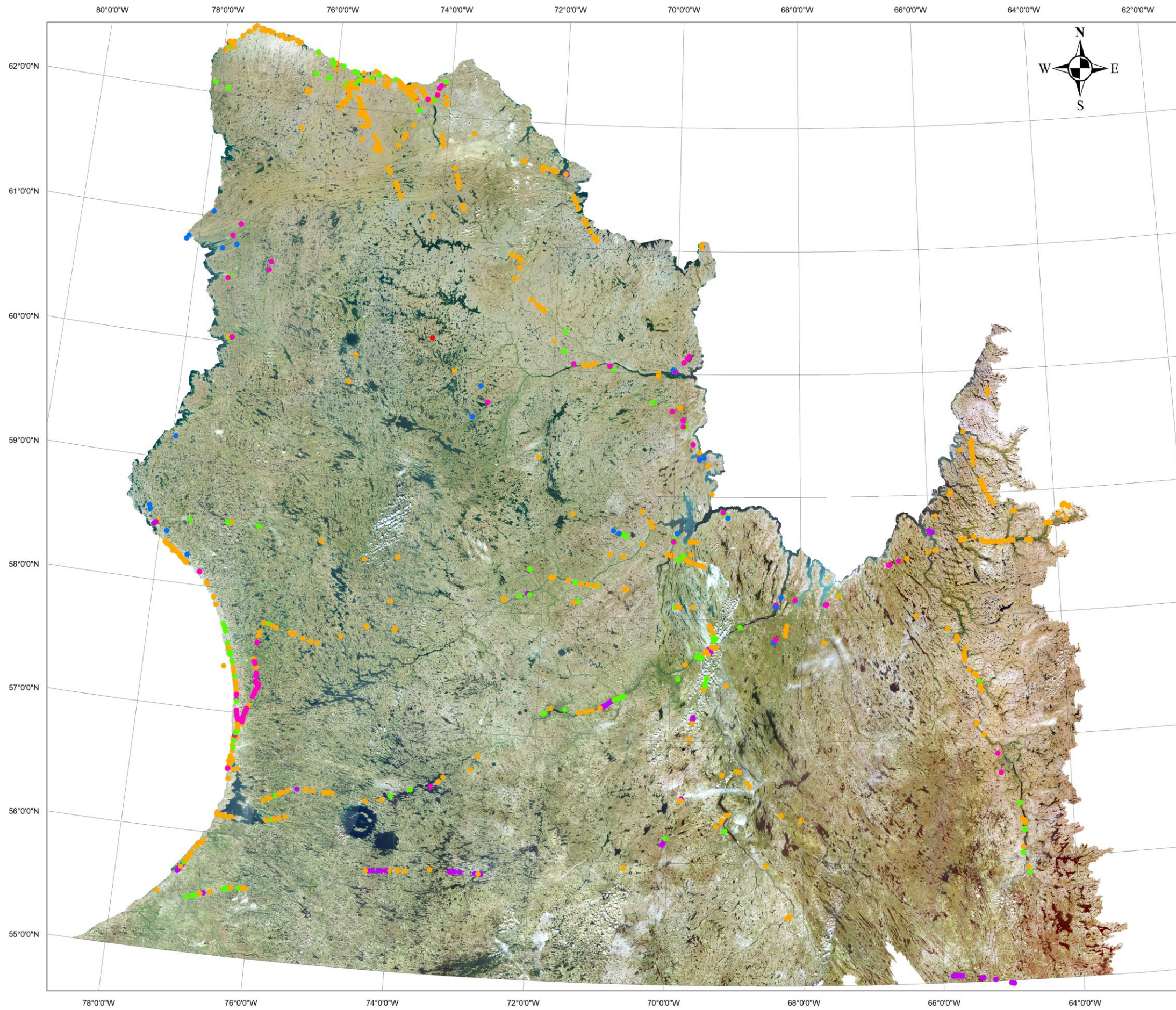


Figure 15: Fréquence des aléas naturels en fonction de leur catégorie.

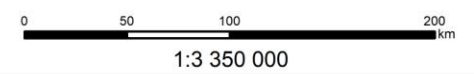


Répartition spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik



Légende

- Processus reliés au pergélisol
 - Affaissement thermokarstique
 - Glaçage
 - Érosion thermique
 - Frostblister
- Climatiques
 - Blizzard
 - Tempête de vent
 - Feu
 - Verglas
- Tremblements de terre
- Mouvements de masse
 - Glissement de terrain
 - Gélifluxion
 - Coulée de débris
 - Éboulement rocheux
 - Avalanche (sèche et humide)
- Érosion
 - Côtière
 - Fluviale
 - Éolienne
- Processus hydrologiques
 - Crue et inondation
 - Submersion côtière
 - Drainage d'un lac
 - Embâcle et débâcle
 - Poussée glacielle



Cartographie: Emmanuel L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017

Citation recommandée:
Emmanuel L'Hérault, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Répartition spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 16: Répartition spatiale des aléas naturels recensés au Nunavik jusqu'à ce jour.

2 LA CARTOGRAPHIE RÉVISÉE DU PERGÉLISOL DU QUÉBEC

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 17).

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 entraîne 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 m²) 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.

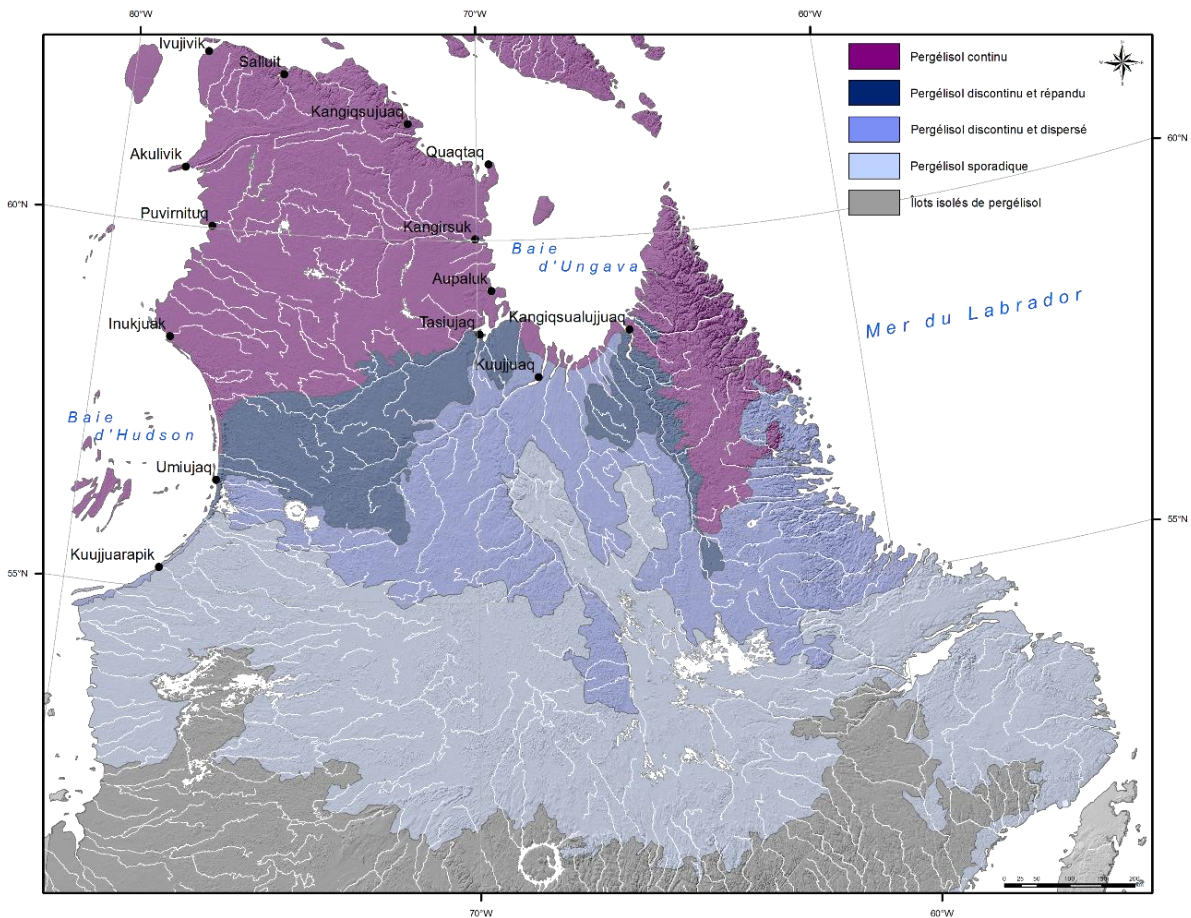


Figure 17: Distribution du pergélisol au Québec nordique (Modifiée de Allard *et al.*, 2012).

2.1 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), conditions de surface (type de végétation et couverture nivale) et propriétés thermiques (conductivité et diffusivité thermiques) des matériaux (types de dépôts 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.

2.2 MÉTHODOLOGIE

2.2.1 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 au sol, 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 thermique, 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 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 18. 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.

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 9 087 906 cellules de 250 m² (Figure 19). 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 zone 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 répandu (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).

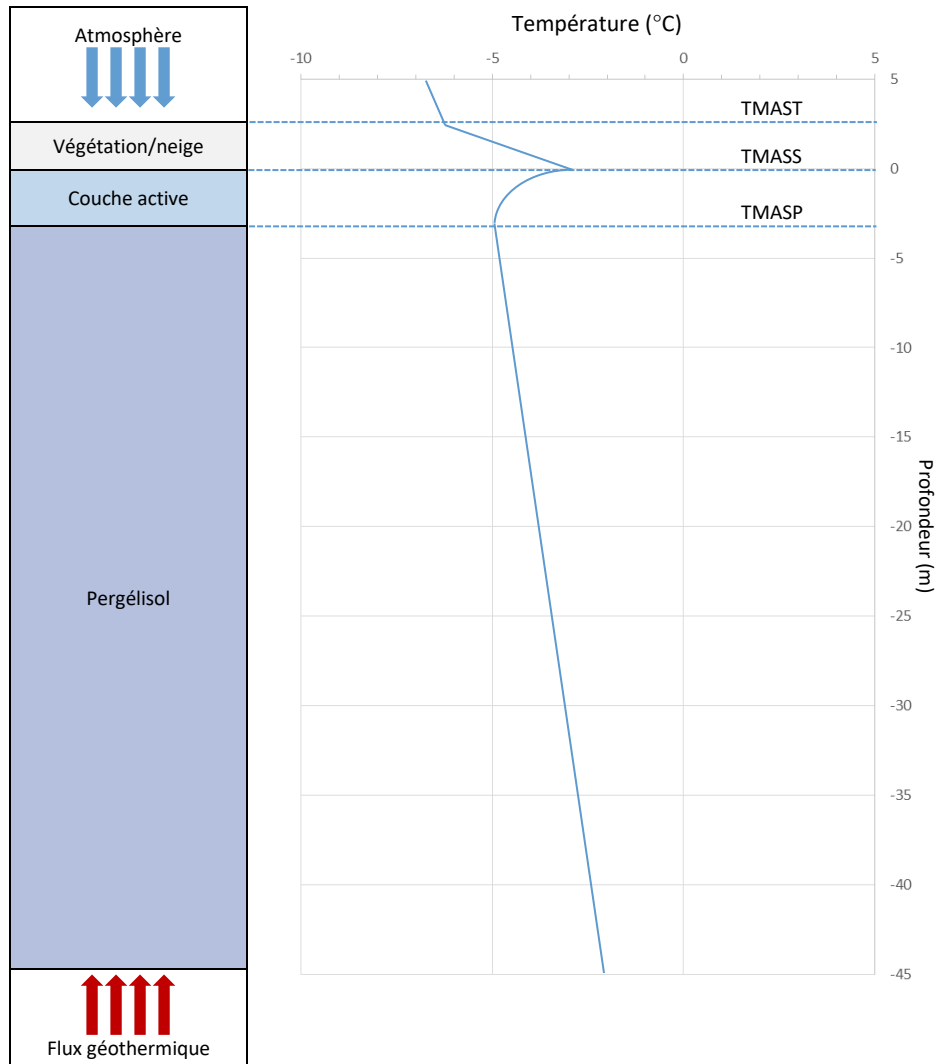


Figure 18 : Schématisation du système pergélisol et de ses principales composantes. Profil thermique type du pergélisol avec la température moyenne annuelle de la surface du terrain (TMAST), la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMASS) et la température annuelle moyenne au sommet du pergélisol (TMASP).

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

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

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

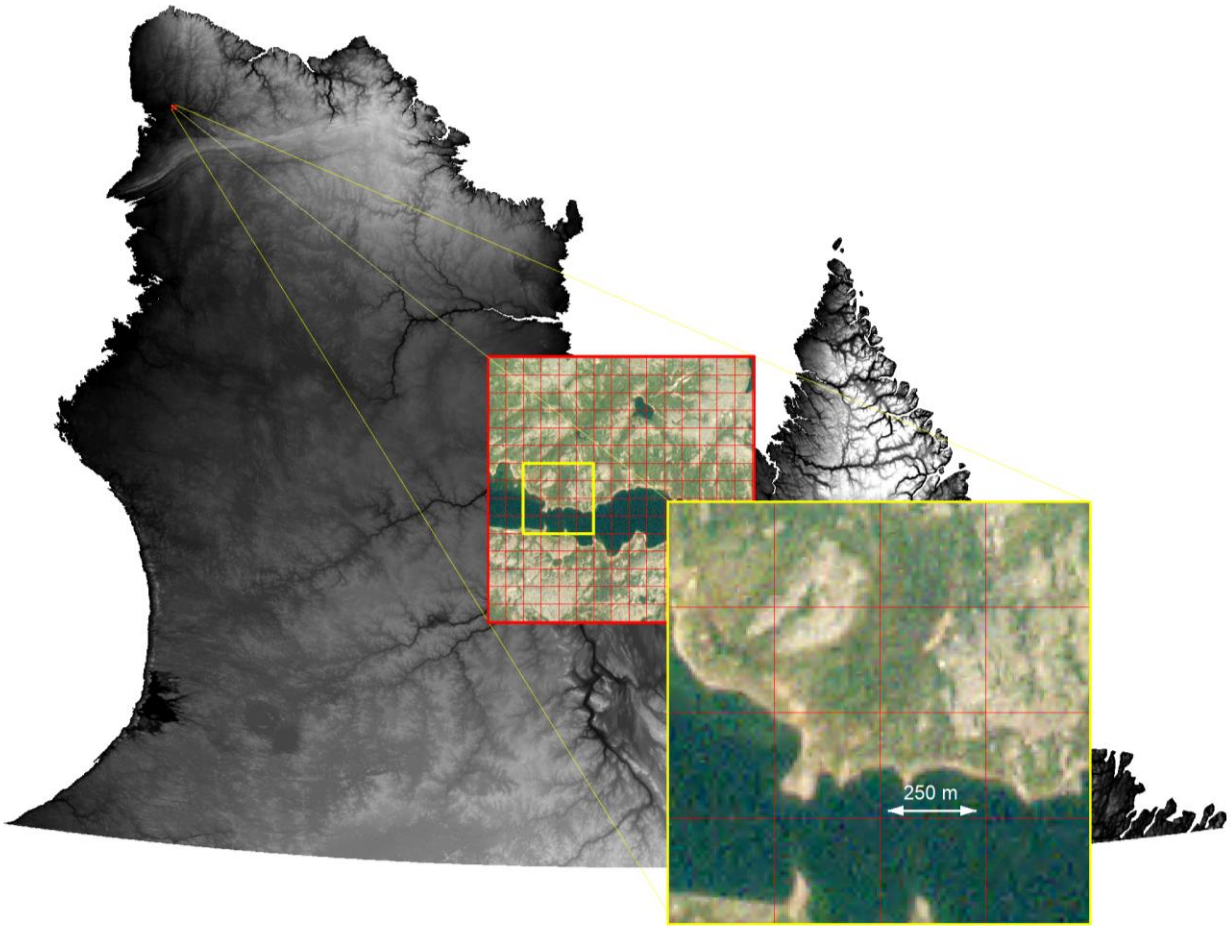


Figure 19 : Superficie du problème, géométrie du maillage et dimension des cellules du modèle TTOP utilisé pour calculer la température au sommet du pergélisol et son épaisseur.

2.2.2 COMPILATION ET SPATIALISATION DES VARIABLES DU SYSTÈME PERGÉLISOL

2.2.2.1 FLUX GÉOTHERMIQUE (Q)

Dans l'est du Canada, le flux géothermique varie généralement entre 30 et 80 mW/m² avec une valeur moyenne de 60.4 ± 9.38 mW/m². 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/m². Une carte de la densité du flux géothermique produite par krigeage est présentée à figure 20. Malgré une certaine variation de la densité du flux géothermique sur le territoire du Nunavik, la valeur moyenne de 40.26 mW/m² a été choisie. 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 21, une variation de la densité du flux de 0,030 à 0,050 W/m² se traduit par une diminution de l'épaisseur du pergélisol de 337.5 à 202.5 m respectivement.

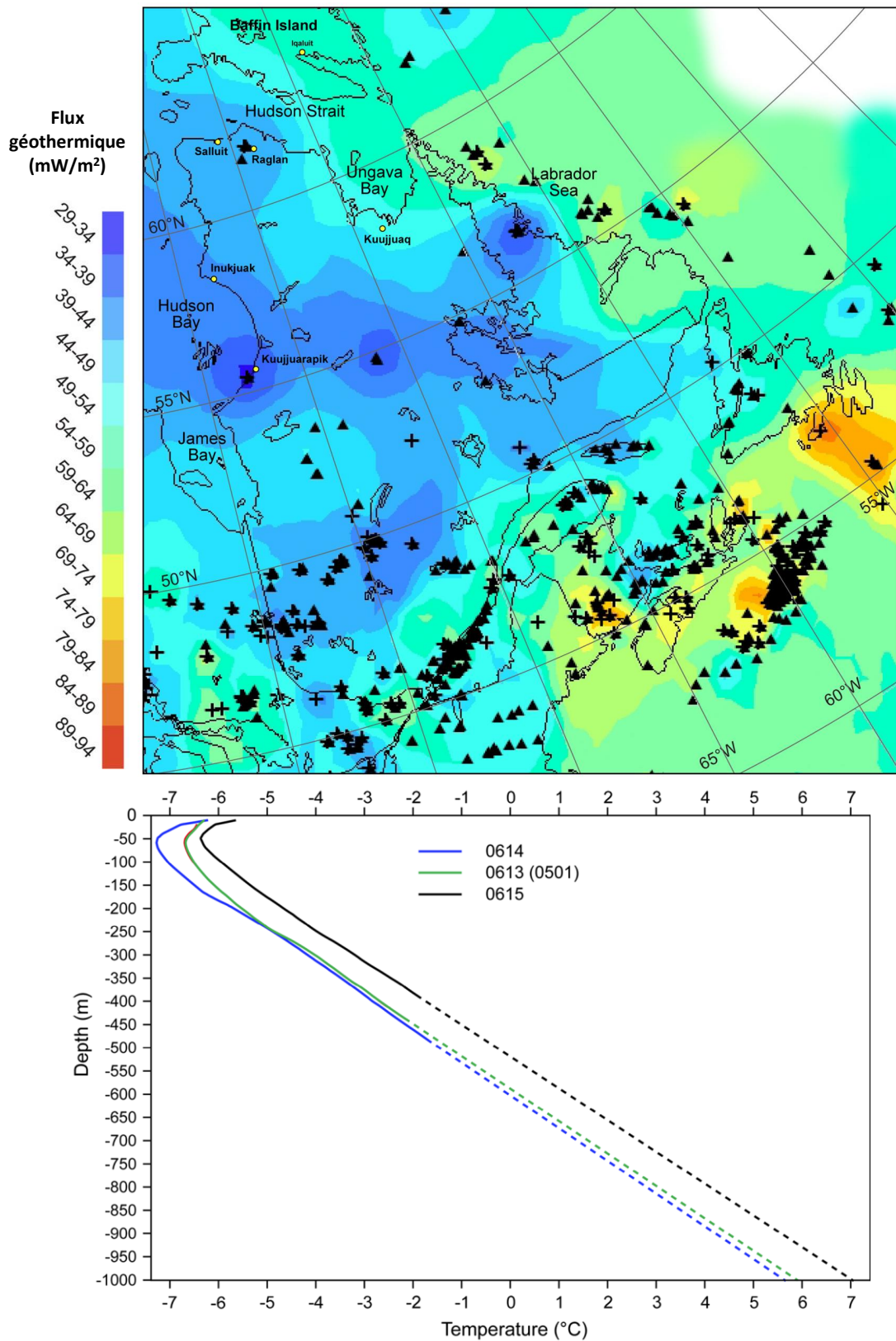


Figure 20 : Flux géothermiques de haute précision (croix) déterminés à partir de registre de températures et estimés (triangles) à partir des températures au fond de puits et une conductivité thermique moyenne des roches de 2.5 W/m K (Modifiée de Majorowicz et Minea, 2015). Exemple d'extrapolation jusqu'à 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).

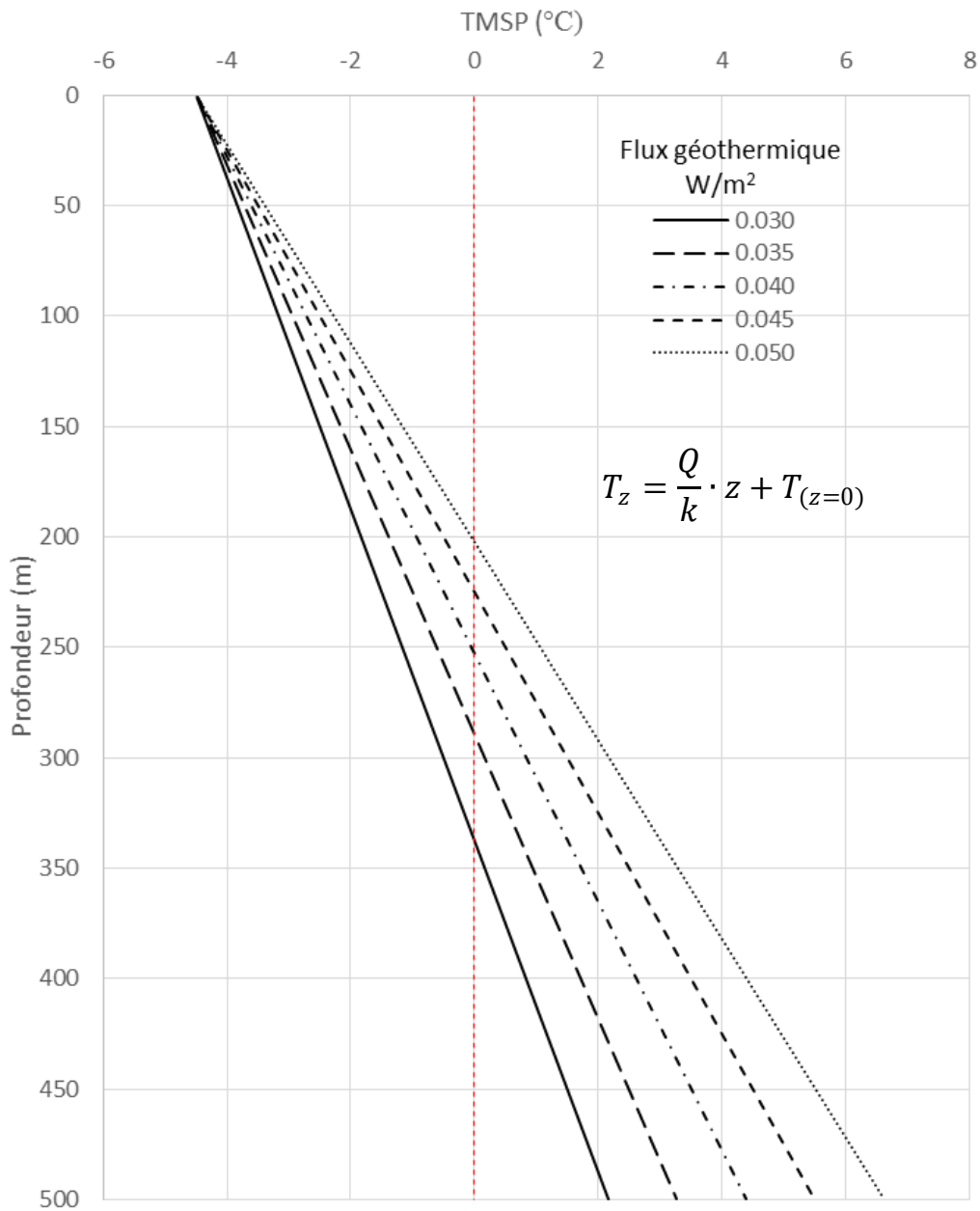


Figure 21 : Variation de l'état d'équilibre du profil géothermique en fonction de différentes intensités de flux géothermique (Q). Le profil est mis en équilibre avec une température de surface ($T_{(z=0)}$) constante de -4.5 °C et une conductivité thermique (k) uniforme de 2.5 W/m K.

2.2.2.2 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, selon les 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_g) et pour la saison de dégel (n_d). 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.

2.2.2.2.1 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 facteurs- 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 de classification de la couverture végétale terrestre de 2010 pour l'Amérique du Nord a été utilisée. Ce produit est le fruit d'une collaboration entre le Centre canadien de télédétection (CCRS), l'United States Geological Survey (USGS) et trois organisations mexicaines qui vise à surveiller la couverture terrestre et les changements qu'elle subit au fil du temps à travers un système nord-américain de surveillance des changements dans la couverture terrestre (NALCMS). Réalisée à l'aide des données MODIS, cette couche d'information matricielle à une résolution spatiale de 250 m² comprend deux couches thématiques basées sur les normes de classification de la végétation du Federal Geographic Data Committee (FGDC NVCS) modifiée pour l'utilisation au Canada et sur les classes de couverture terrestre du Programme international géosphère-biosphère (PIGB). Pour le Nunavik, 12 des 19 classes de couverture terrestre recensées sont présentes. La répartition spatiale propre à chacune de ces classes est présentée à la figure 22. Pour chacune des classes de couvertures du sol, des valeurs de facteurs- n de dégel tirées de la littérature ont été utilisées et sont présentées au tableau 3.

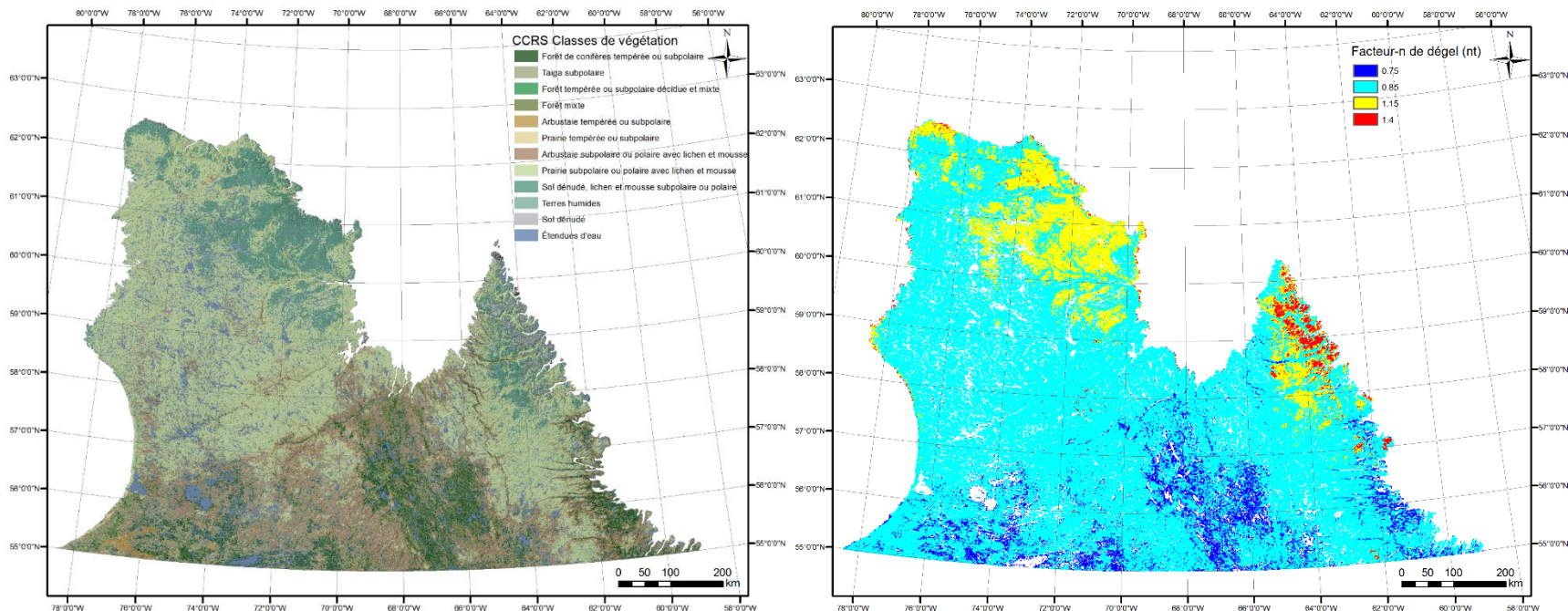


Figure 22 : A) Classification de la couverture terrestre de 2010 produite par le Centre canadien de télédétection (CCRS) et B) facteurs-n de dégel (n_t) types tirées de la littérature pour des surfaces similaires.

Tableau 3 : Les différentes classes du système de classification de la couverture terrestre 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.

No.	CCRS type de couverture terrestre	Caractéristiques générales	Superficie (km ²)	Superficie (%)	n_t
1	Forêt de conifères tempérée ou subpolaire	Végétation arborescente occupe plus de 20 % du couvert végétal; 75 % des arbres sont des conifères.	39236	6.9	0.75 ⁴
2	Taiga subpolaire	Végétation arborescente occupe plus de 5 % du couvert végétal; 75 % des arbres sont des conifères. Étage inférieur composé d'arbustes et de lichens	53577	9.4	0.85 ^{3,4}
5	Forêt décidue tempérée ou subpolaire	Végétation arborescente occupe plus de 20 % du couvert végétal; 75% des arbres sont des feuillus.	1972	0.3	0.85 ^{1,4}
6	Forêt mixte	Végétation arborescente mixte	23707	4.2	0.85 ^{1,4}
8	Arbustaie tempérée ou subpolaire	Végétation arbustive occupe plus de 20 % du couvert végétal	2804	0.5	0.85 ^{1,3}
10	Prairie tempérée ou subpolaire	Végétation herbacée occupe plus de 80 % du couvert végétal	3633	0.6	0.85 ⁵
11	Arbustaie subpolaire ou polaire	Végétation arbustive occupe plus de 20 % du couvert végétal	78491	13.8	0.85 ^{1,3}
12	Prairie subpolaire ou polaire	Végétation herbacée et muscinale occupe plus de 20 % du couvert végétal	227952	40.1	0.85 ⁵
13	Sol dénudé, lichens et mousse subpolaire ou polaire	Sol dénudé et végétation basse	54572	9.6	1.15 ⁵
14	Terres humides	Végétation herbacée et muscinale; présence d'eau stagnante	373	0.1	0.85 ^{4,5}
16	Sol dénudé	Sol dénudé	8589	1.5	1.40 ²
18	Étendues d'eau	Eau	73027	12.9	n.a.
Superficie totale :			567932	100	

2.2.2.2.2 FACTEURS-N DE GEL

2.2.2.2.2.1 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 l'estimation de l'épaisseur du couvert nival difficile.

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 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 Kangiqsualujuaq, 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 23. 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, taïga, 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, avait 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 évaluée dans une phase ultérieure.

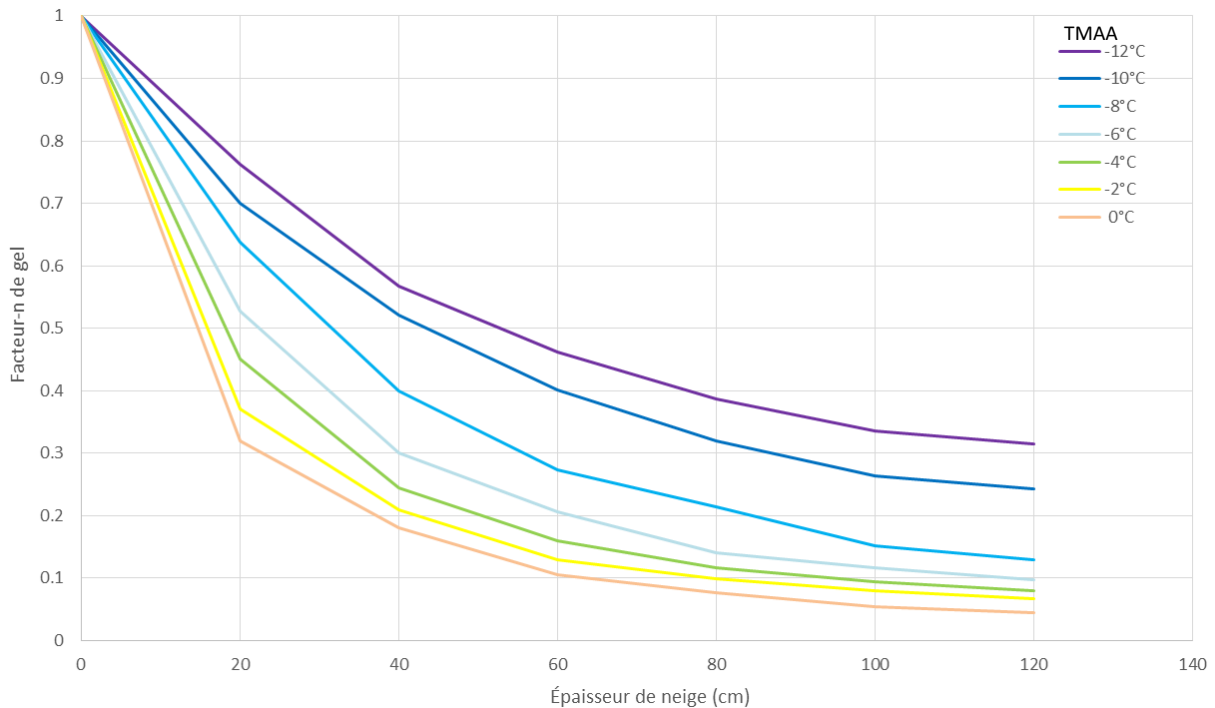


Figure 23 : Relation entre facteur-n de gel, épaisseur de neige et température moyenne annuelle de l'air calculé numériquement par Riseborough et Smith (1998) avec une valeur de densité de la neige de 250 kg/m³.

2.2.2.2.2 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 dont la topographie, la direction des vents dominants, 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 vitesse 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 arbustales 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) arborent 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 24A). 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 24B). 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, 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 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 26). La comparaison d'images satellites Landsat multitudes pour les mois de février, mai, juin et juillet 2016 (Figure 27) 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).

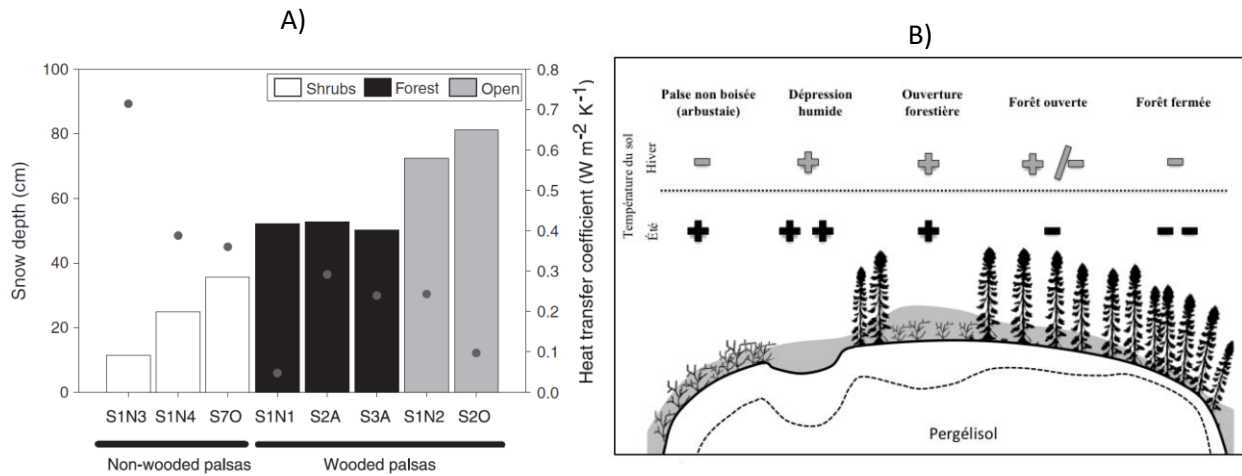


Figure 24 : A) Épaisseur de neige (diagramme à barres) et coefficient de transfert thermique (points) en fonction du type de végétation (Tirée de Jean et Payette, 2014), B) Épaisseur de neige (gris), épaisseur maximale du mollisol (ligne pointillée) et température du sol en été (symboles noirs) et en 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.

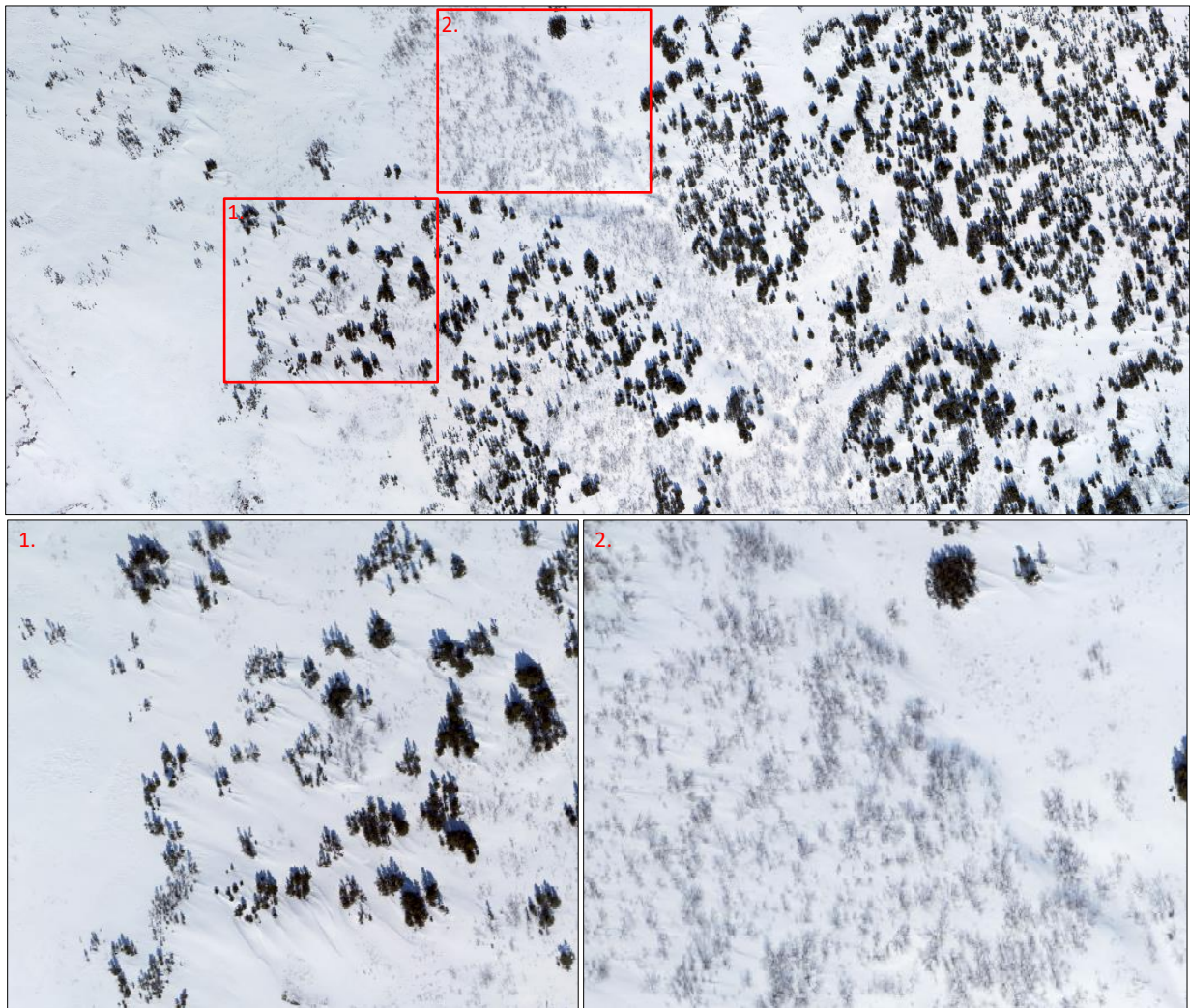


Figure 25 : Orthomosaïque en couleur et à haute résolution de la vallée Tasiapik en hiver (mai 2016), Umiujaq, Nunavik (gracieuseté de Dominé, 2016). L'agrandissement de gauche montre l'influence des épinettes sur le patron de distribution de la couverture nivale (formes profilées) tandis que celui de droite confirme l'excellente capacité de rétention de la neige des taillis d'arbustes (saules principalement).

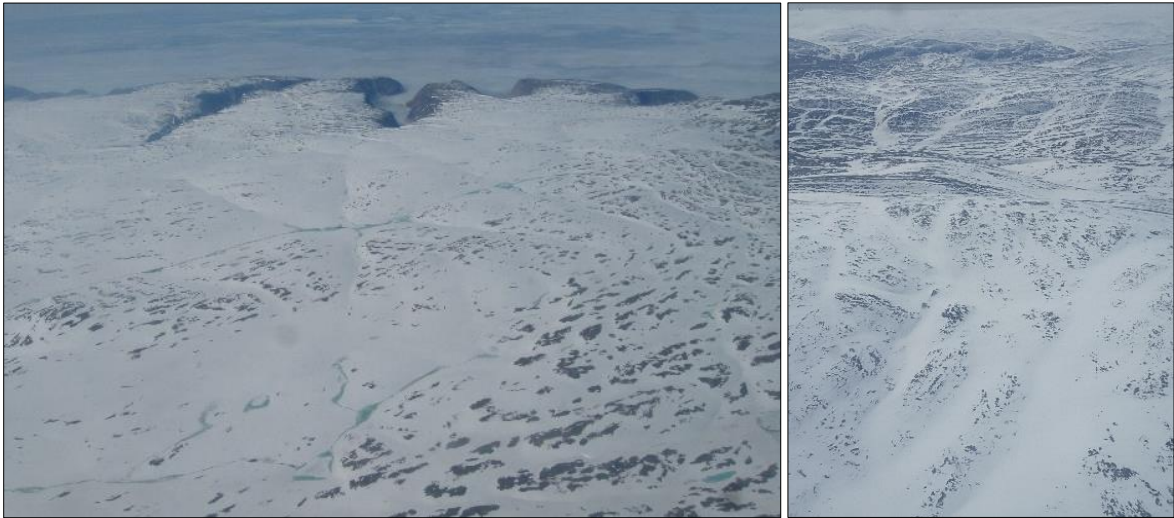


Figure 26 : Photographies aériennes obliques prises lors d'un vol entre Ivujivik et Salluit montrant la relation entre l'enneigement différentiel et la topographie où les dépressions se retrouvent généralement comblées de neige tandis que les versants et les crêtes exposés sont habituellement dépourvus de neige.

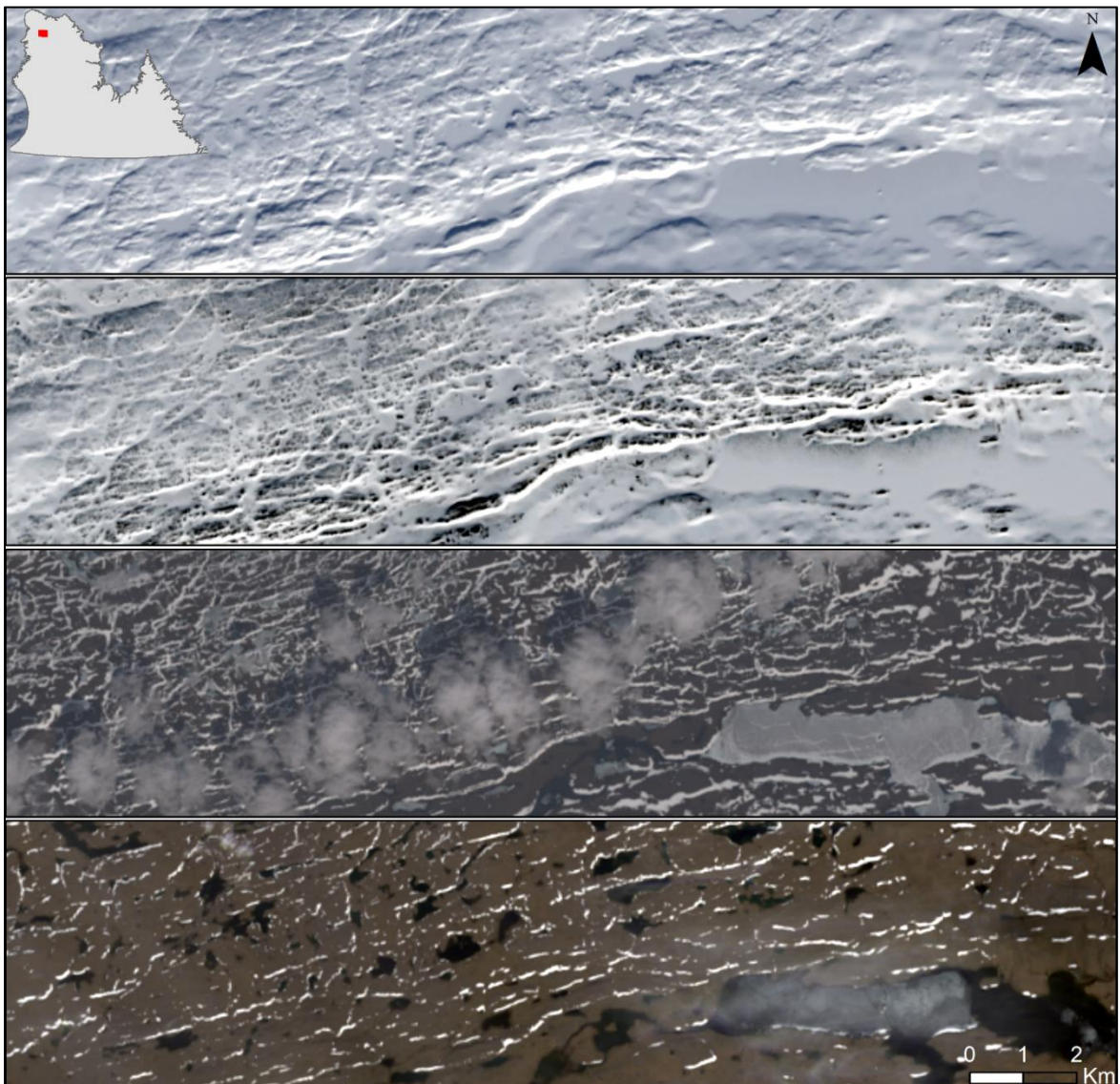


Figure 27 : Images Landsat prises en 2016 le 19 février, le 9 mai, le 26 juin et le 12 juillet.

2.2.2.2.3 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 nivale (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. L'indice d'enneigement potentiel (IEP) se chiffre entre 0 et 1 et se décompose en deux composantes, une composante végétale (Cv) et une composante topographique (Ct), qui occupent un poids égal de 0.5 chacune. La pondération de chacune des composantes (végétale et topographique) s'appuie sur de nombreuses recherches conduites au Nunavik et ailleurs dans des environnements subarctiques et arctiques similaires dans lesquelles des corrélations entre les épaisseurs de neige, les structures végétales et la topographie ont été réalisées.

Pour la composante végétale, c'est à partir de la carte de la couverture terrestre du CCRS que les structures végétales ont été dérivées. La pondération des différentes structures végétales s'appuie en partie sur les travaux de Ménard *et al.*, (1997) qui avait 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, arborale ouverte et arborale moyennement dense) et plus de 100 cm (arborale dense). Les valeurs propres à chacune des classes de structures de végétation sont présentées au tableau 4. Une carte de la pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation est présentée à la figure 28.

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 versant 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 position 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 29). 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 la 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 29). Dans le cadre de la présente recherche, une échelle intermédiaire qui permet l'observation du voisinage dans un rayon de 100 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

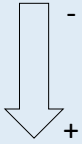
sont présentées à la figure 30. La carte des indices d'enneigement potentiel cumulés obtenue suite à la sommation de la composante végétale et topographique est présentée à la figure 31.

Étant donné que la végétation favorise l'accumulation d'importante quantité 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 32). 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 ($C_v = 0.5$) et déprimé ($C_t = 0.5$), contexte dans lequel l'épaisseur de neige est susceptible d'atteindre des valeurs qui surpassent 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 ($C_v = 0$) et exposé au vent ($C_t = 0$), 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, que les facteurs-n hivernaux ont été estimés pour l'instant (Figure 33). 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 conséquent, 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 m² 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.

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

Classes des structures végétales	Classes CCRS	valeur	Épaisseur de neige (cm)
Sol dénudé	13 et 16	0.0	 - +
Végétation basse (herbacée)	10, 12 et 14	0.0	
Végétation arborescente (mixte)	5 et 6	0.3	
Végétation arbustive	8 et 11	0.4	
Végétation arborescente (conifère)	1 et 2	0.5	

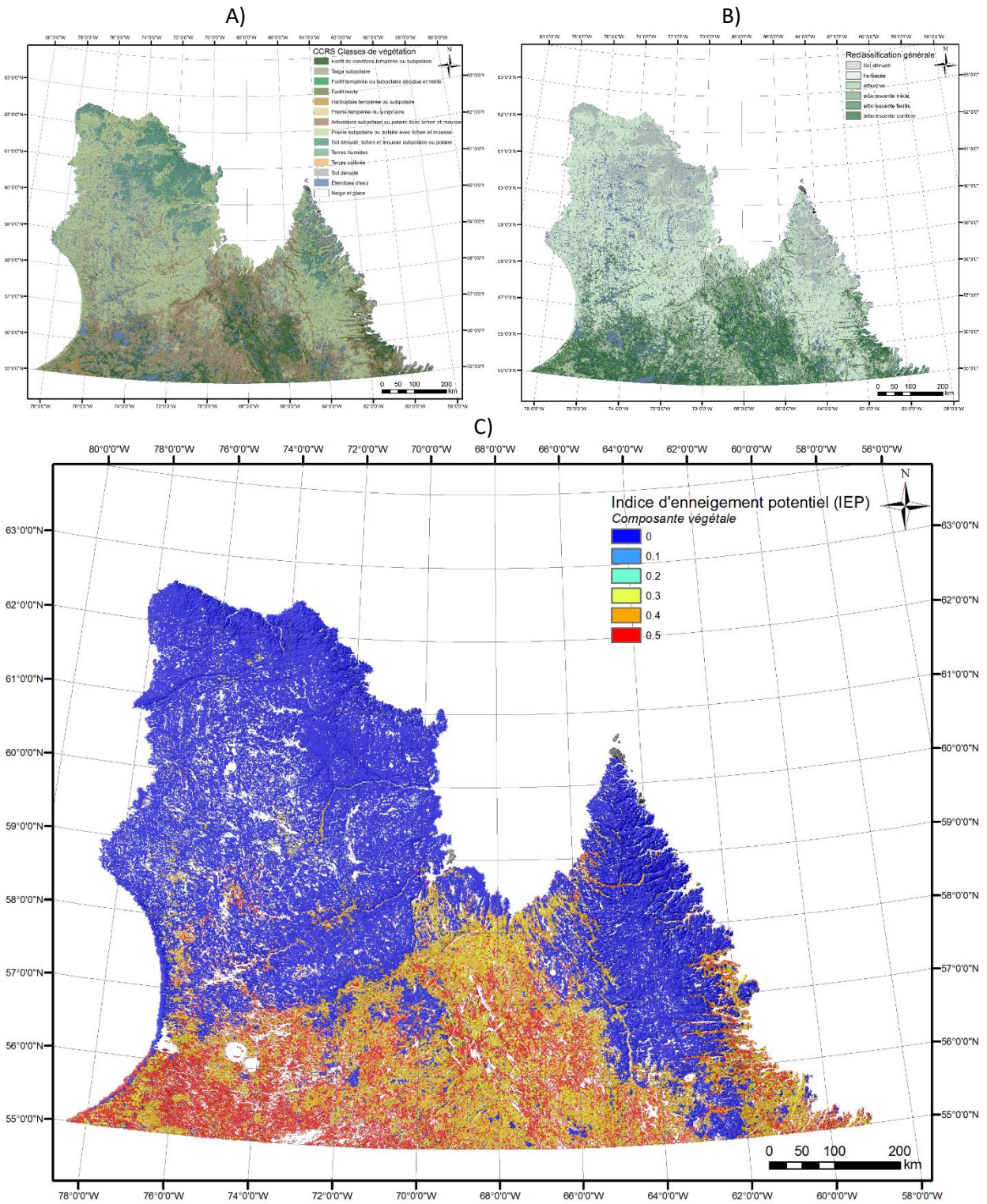


Figure 28 : A) Classes de couverture végétale du CCRS. B) Reclassification des classes de couverture terrestre en classes de structure de la végétation. C) Pondération de la composante végétale dérivée des structures de végétation.

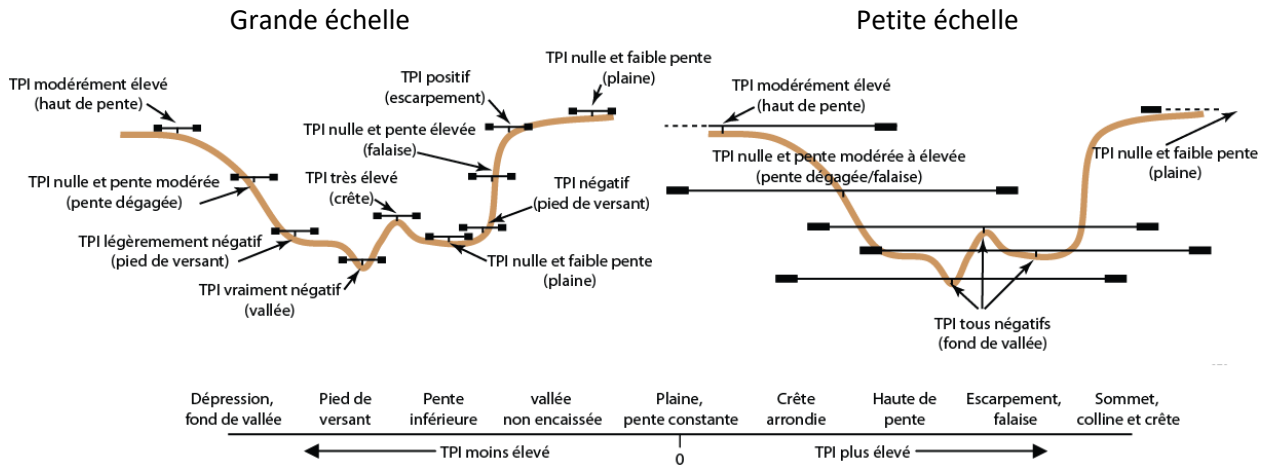
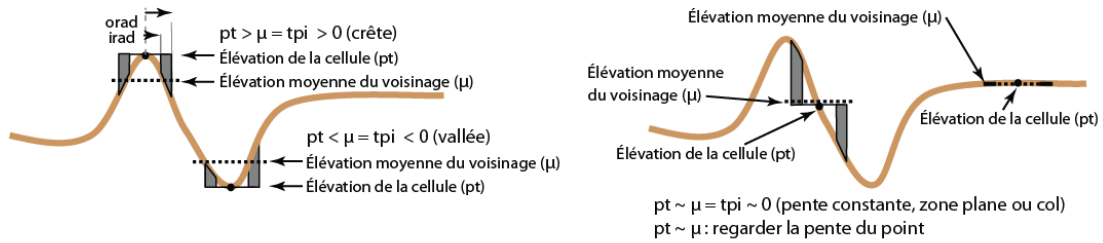


Figure 29 : Schématisation de l'algorithme de classification des unités topographiques (adaptée de Weiss, 2001).

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	0.0	
Plaine et plateau	0.1	
Pente dégagée	0.1	
Dépression et fond de vallée	0.4	
Pente inférieure et pied de versant	0.5	

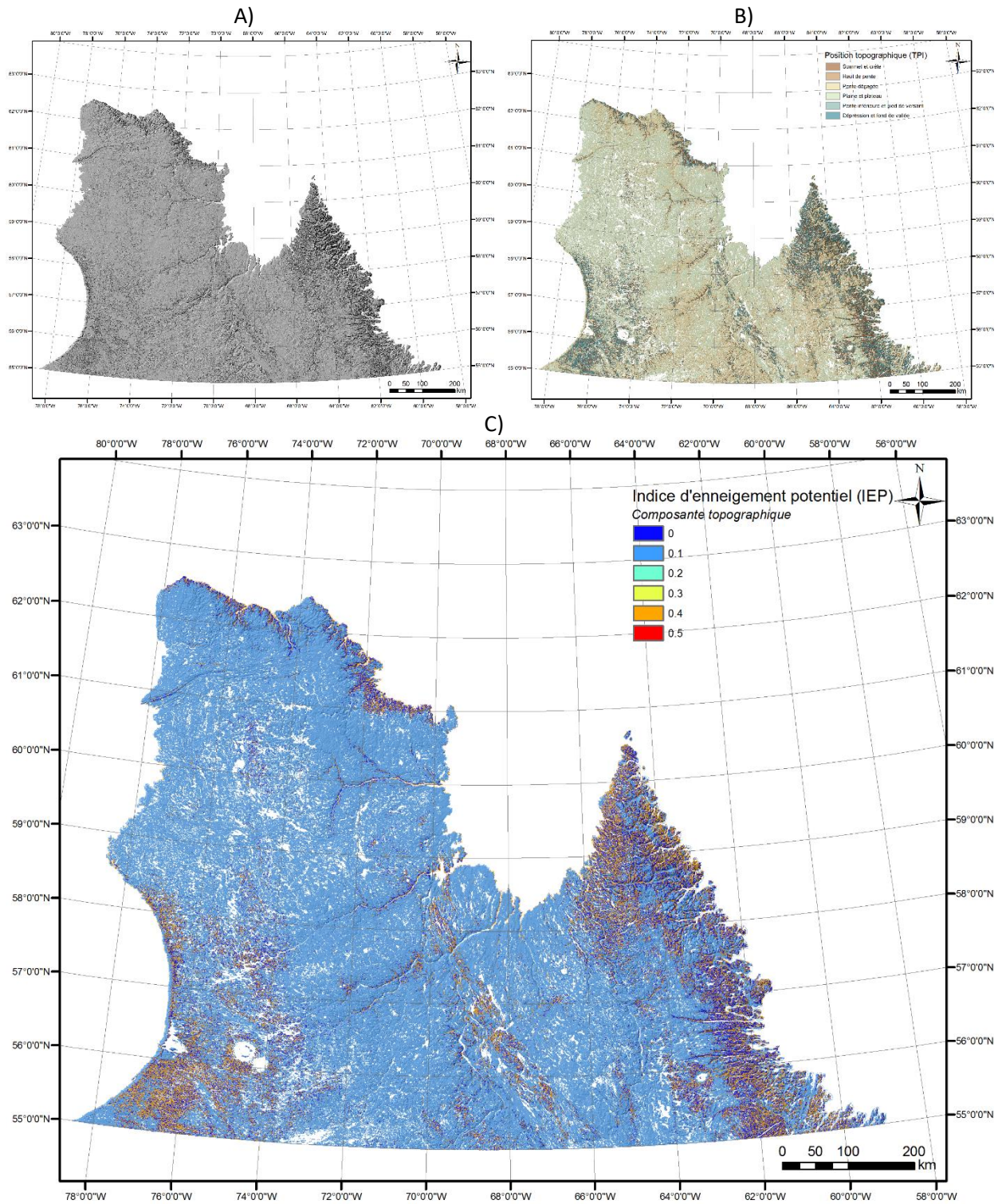


Figure 30: A) Grille matricielle du modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC) à une résolution de 23m x 23m. B) Classification du relief selon l'indice de position topographique (TPI). C) Pondération de la composante topographique dérivée de l'indice de position topographique.

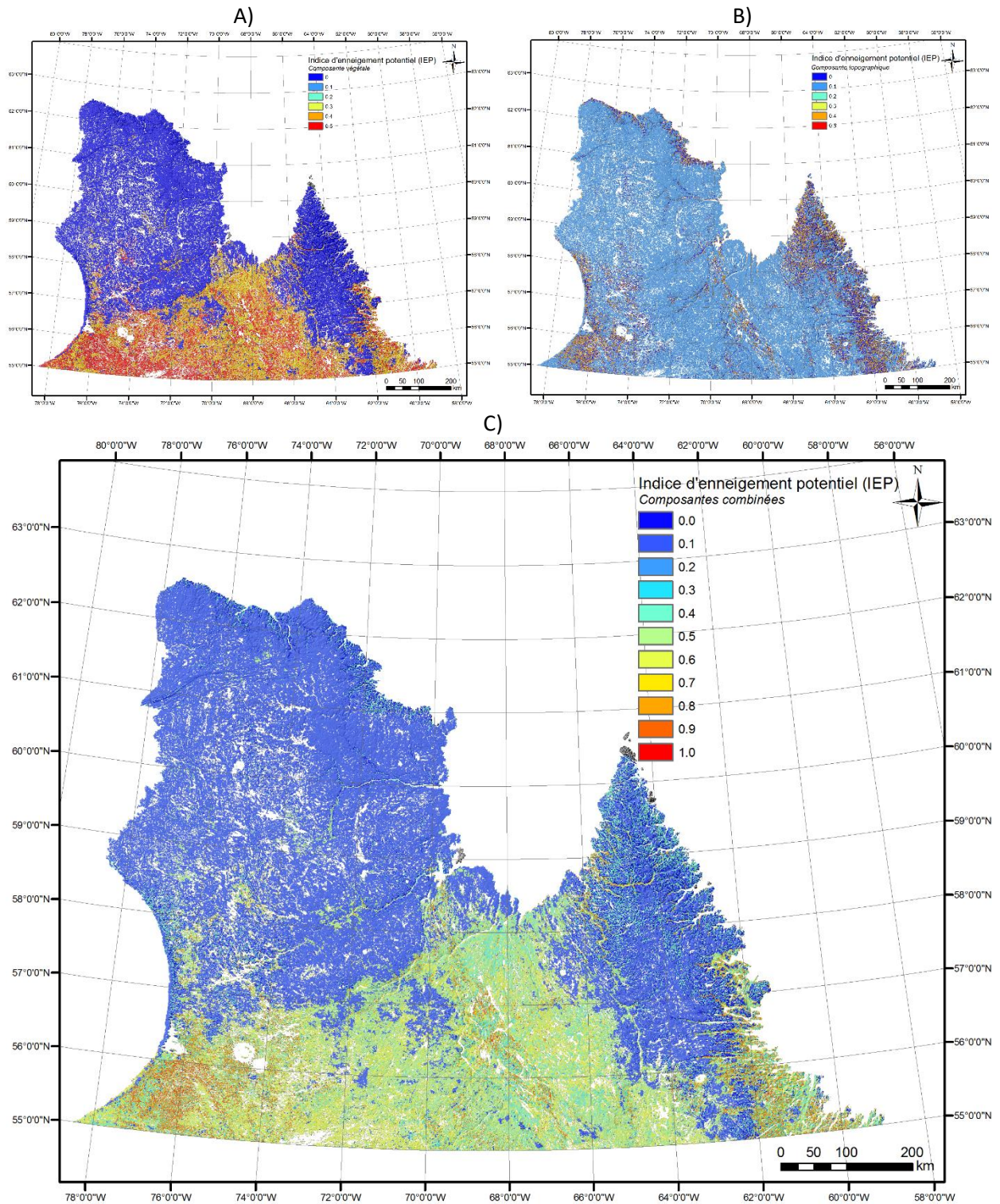


Figure 31 : Indice d'enneigement potentiel pour A) la composante végétale et B) la composante topographique. C) Indice d'enneigement potentiel cumulé.

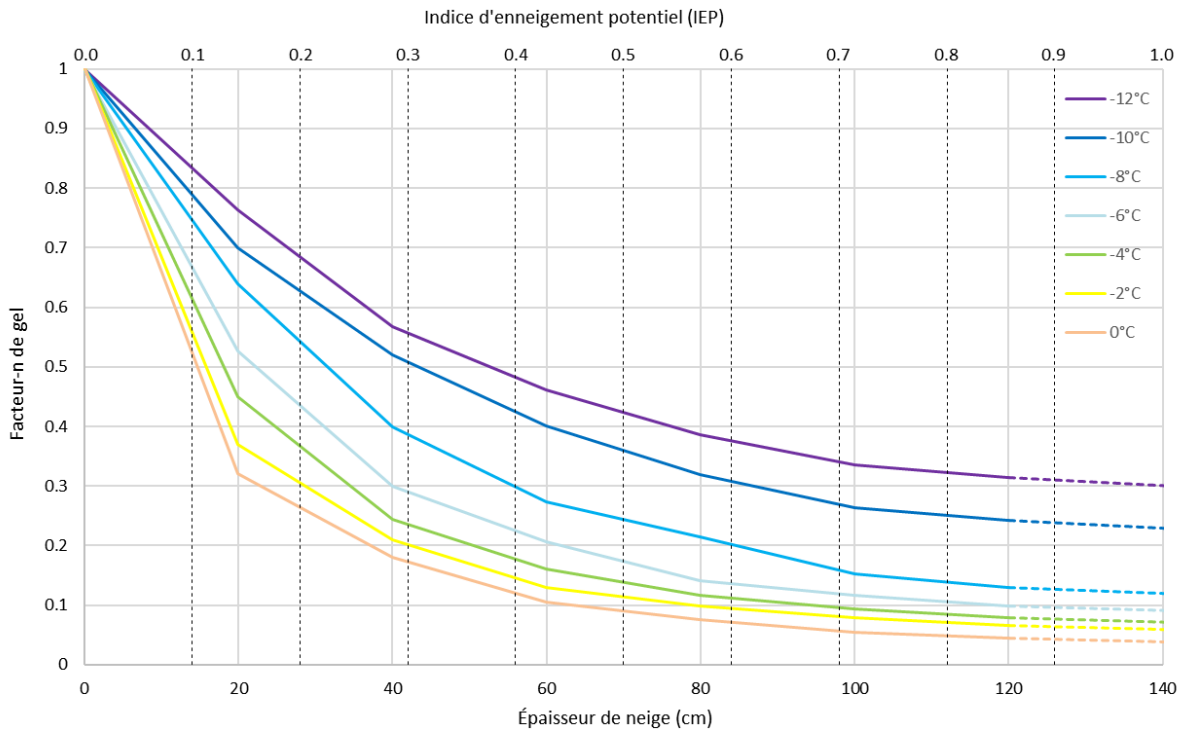


Figure 32 : Relation entre l'indice d'enneigement potentiel, les épaisseurs de neige équivalentes et les facteurs-n.

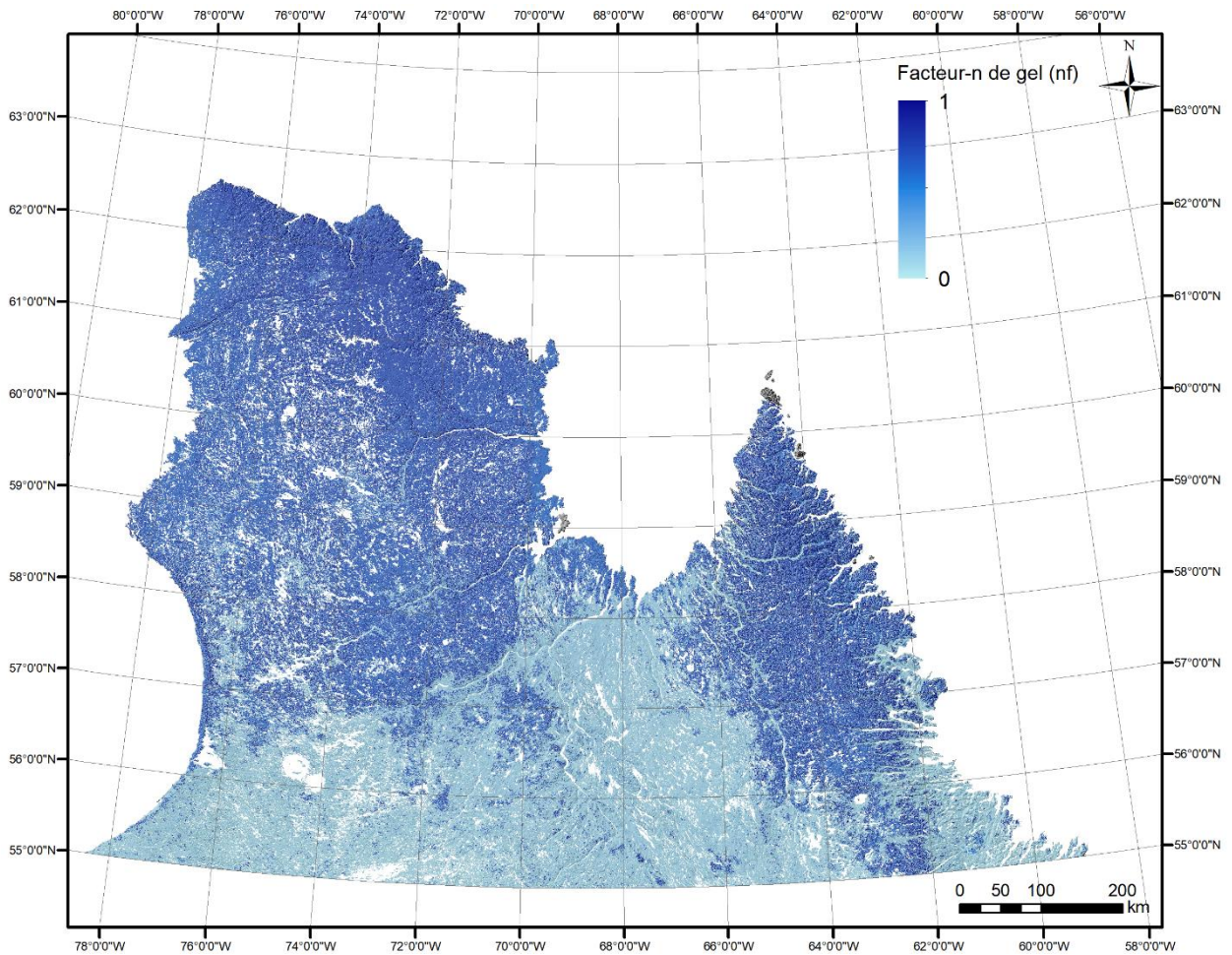


Figure 33 : Facteurs-n de gel dérivés de l'indice d'enneigement potentiel et la relation épaisseur de neige et facteur-n proposée par Riseborough et Smith (1998).

2.2.2.2.4 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 2000-2012, un jeu de données maillées des moyennes mensuelles de l'air produites par Way *et al.* (2016) a été utilisé. Ce jeu de données couvre l'ensemble du nord du Québec et le Labrador à une résolution de 1 km² et pour la période 1948 à 2014. Les degrés-jours de gel et de dégel ont été calculés sur un total de 156 mois, soit 13 cycles de gel et de dégel entre le mois de janvier 2000 et celui de décembre 2012. Les moyennes ainsi calculées sont présentées respectivement à la figure 11A et B. Par la suite, les températures de surface du sol (Figure 35A 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 pixel de 250 m² 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 :

$$DJG_{s(i,j)} = n_{f(i,j)} \cdot DJG_{a(i,j)} \quad \text{Équation 4}$$

$$DJD_{s(i,j)} = n_{t(i,j)} \cdot DJD_{a(i,j)} \quad \text{Équation 5}$$

$$TMAS_{(i,j)} = \frac{DJG_{s(i,j)} + DJD_{s(i,j)}}{365} \quad \text{Équation 6}$$

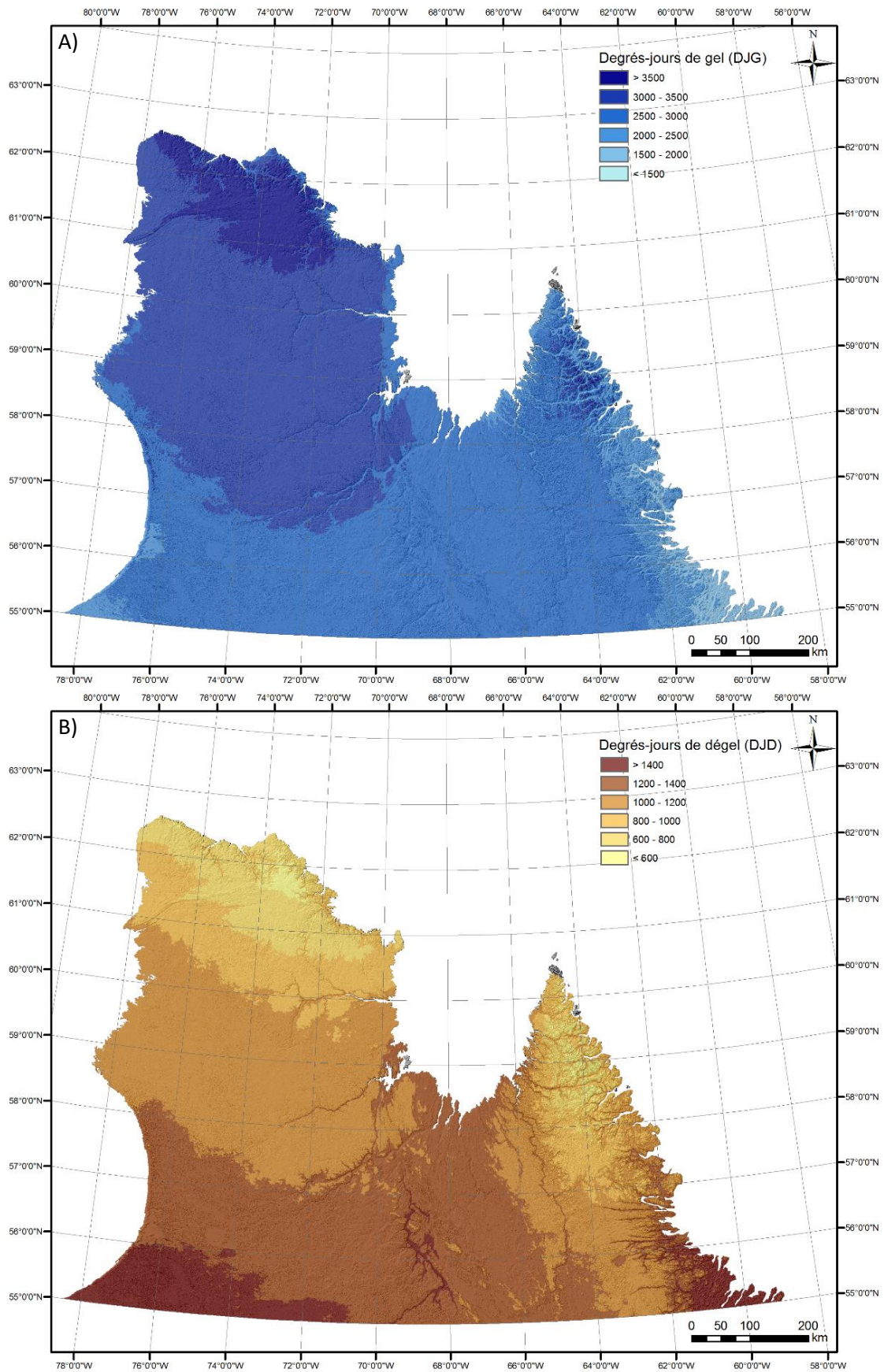


Figure 34 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) de l'air pour l'ensemble du Nunavik calculés à partir des données mensuelles de l'air (Way *et al.*, 2016) pour la période 2000 à 2012 (13 saisons de gel et de dégel).

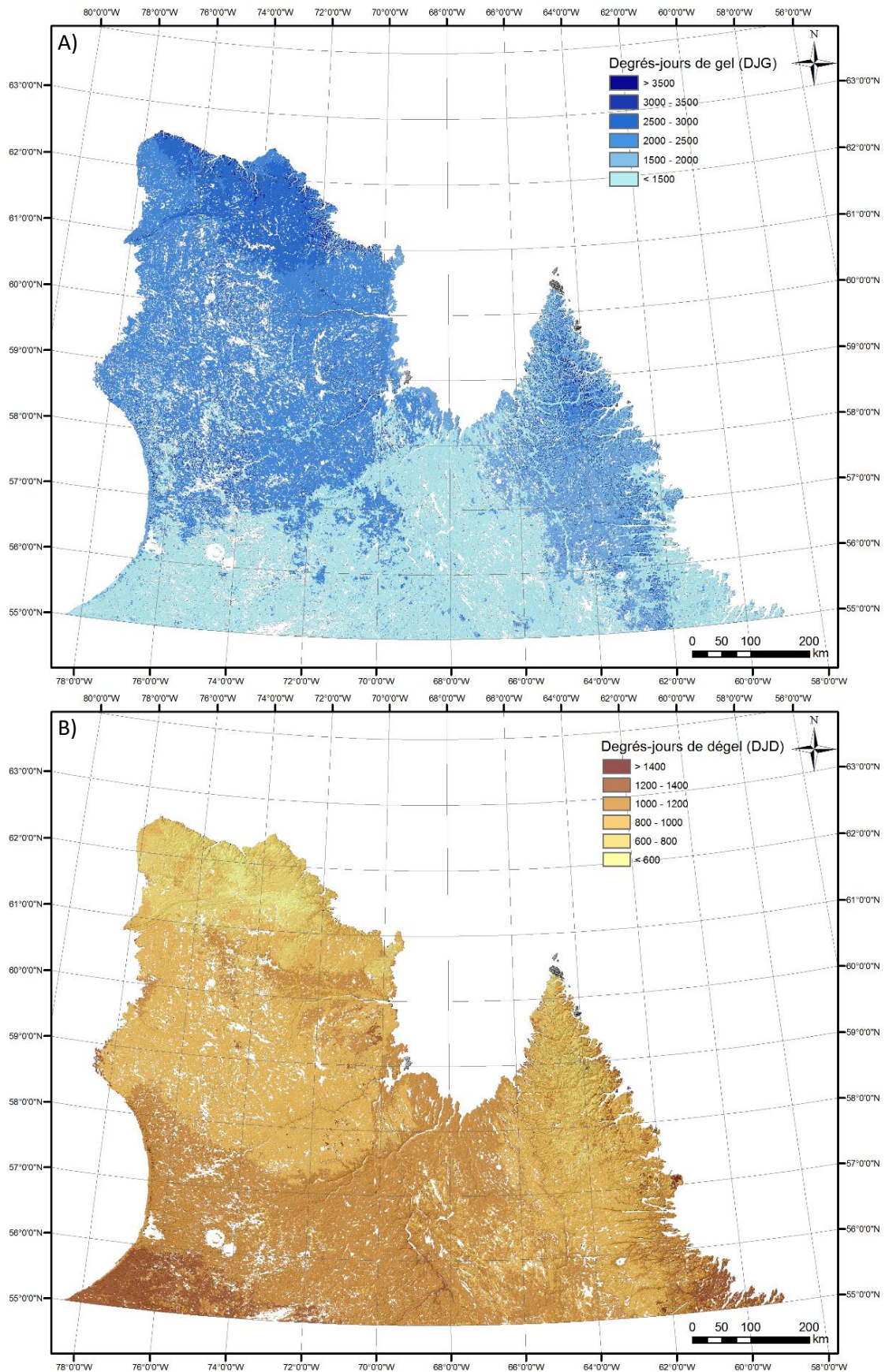


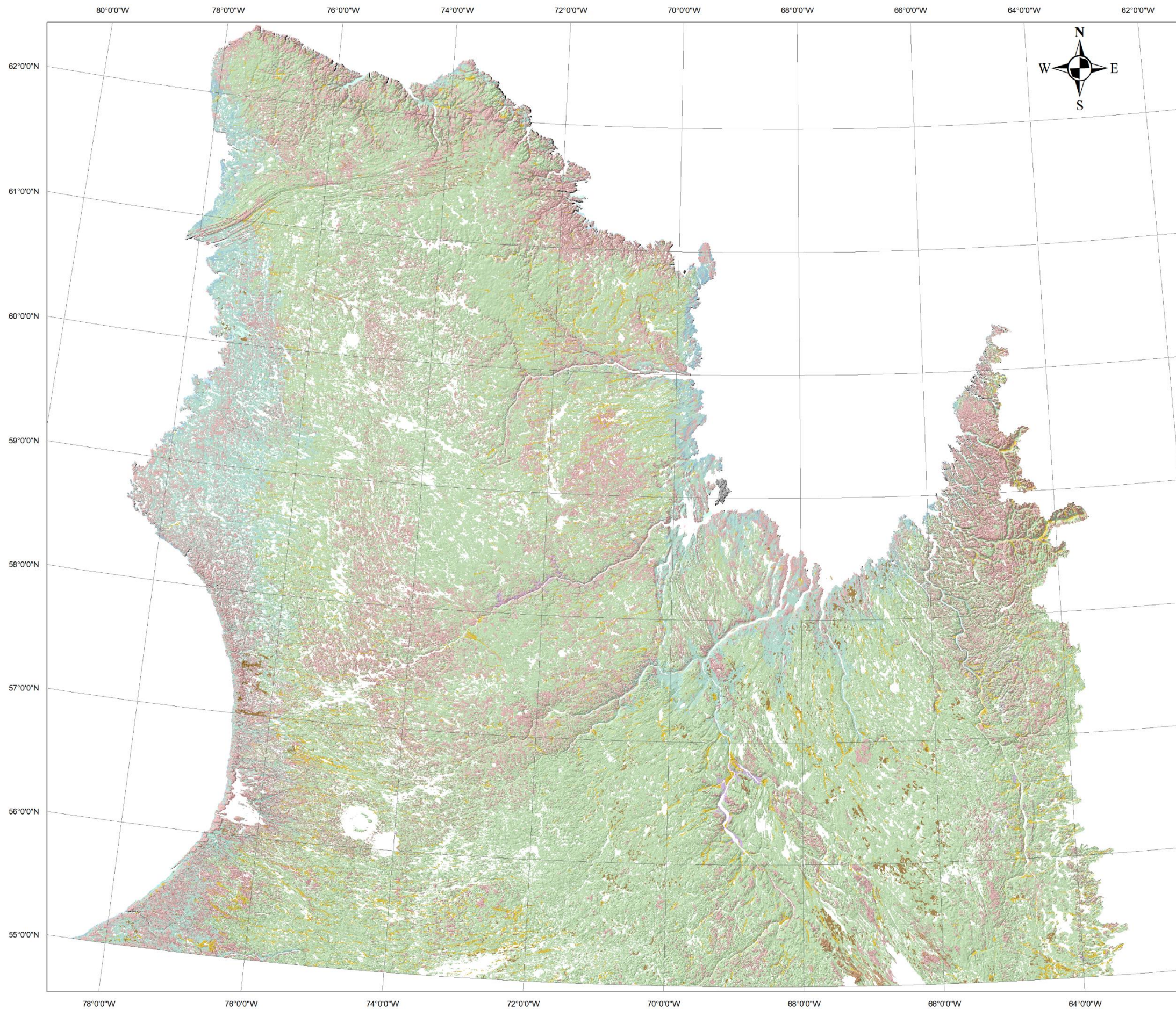
Figure 35 : A) Carte des degrés-jours de gel (DJG) et B) de dégel (DJD) à la surface du sol pour l'ensemble du Nunavut pour la période 2000 à 2012 (13 saisons de gel et de dégel) dérivées à partir des facteurs-n de gel et dégel.

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

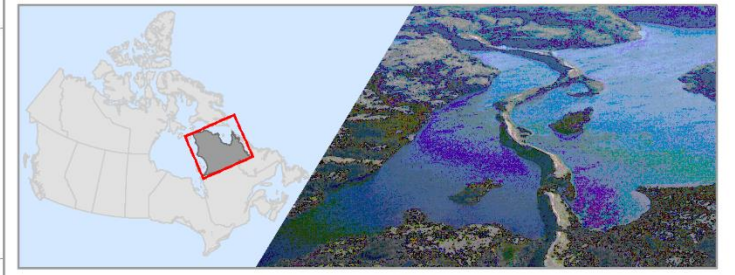
Des limitations logistiques et méthodologiques et financières ne permettent pas la réalisation de forages en nombre suffisant pour assurer une couverture uniforme et diversifiée du territoire afin d'en cartographier les conditions du pergélisol. Toutefois, étant intimement liées aux caractéristiques 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 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, paises, lithaises, 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).

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 le type de dépôt de surface cartographié pour la Direction des inventaires forestiers (DIF) du MFFP (Figure 36) et les connaissances disponibles prélevées au sein de cette même unité lors de travaux de recherche fondamentale (Calmels, 2005; L'Hérault, 2009; Fouché, 2014; Ducharme, 2015) et 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 37.



Répartition des grandes classes de dépôts de surface au Nunavik



Légende

- Dépôts glaciaires (épaisseur moyenne supérieure à 1 m)**
 - Till indifférencié, délavé ou d'ablation
 - Drumlins, drumlinoïdes et formes profilées
 - Moraine de Rogen, de décrépitude ou de De Geer
 - Moraine frontale
 - Moraine frontale composée de till
 - Moraine frontale composée de matériaux fluvioglaciaires
- Dépôts fluvioglaciaires**
 - Fluvioglacière
 - Incluant un ou des eskers
 - Delta fluvioglacière
 - Delta d'esker
- Dépôts fluviaux**
 - Fluviaux
 - Cône alluvial
 - Cône de déjection
- Dépôts lacustres**
 - Lacustre
 - Glaciolacustre
 - Plage
- Dépôts marins**
 - Marins
 - Faciès d'eau profonde
 - Faciès d'eau peu profonde
- Dépôts littoraux**
 - Littoral
- Dépôts organiques**
 - Organique
- Dépôts de pentes et d'altérations**
 - Pentes et altérations
 - Éboulis rocheux
- Dépôts éoliens**
 - Éolien
 - Éolien actif
 - Éolien stabilisé
- Substrat rocheux**
 - Roc à nu
 - Roc avec placage discontinu

0 50 100 200 km
1:3 350 000

Cartographie: Emmanuel L'Héault, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017.
 Sources: Dépôts de surface (MFFP, 2014), sols saturés (dépôts organiques) (CanVec) et hydrographie (CCRS).
 Citation recommandée: Emmanuel L'Héault, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Répartition des grandes classes de dépôts de surface au Nunavik. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 36 : 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.		8 ^E	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 couche 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

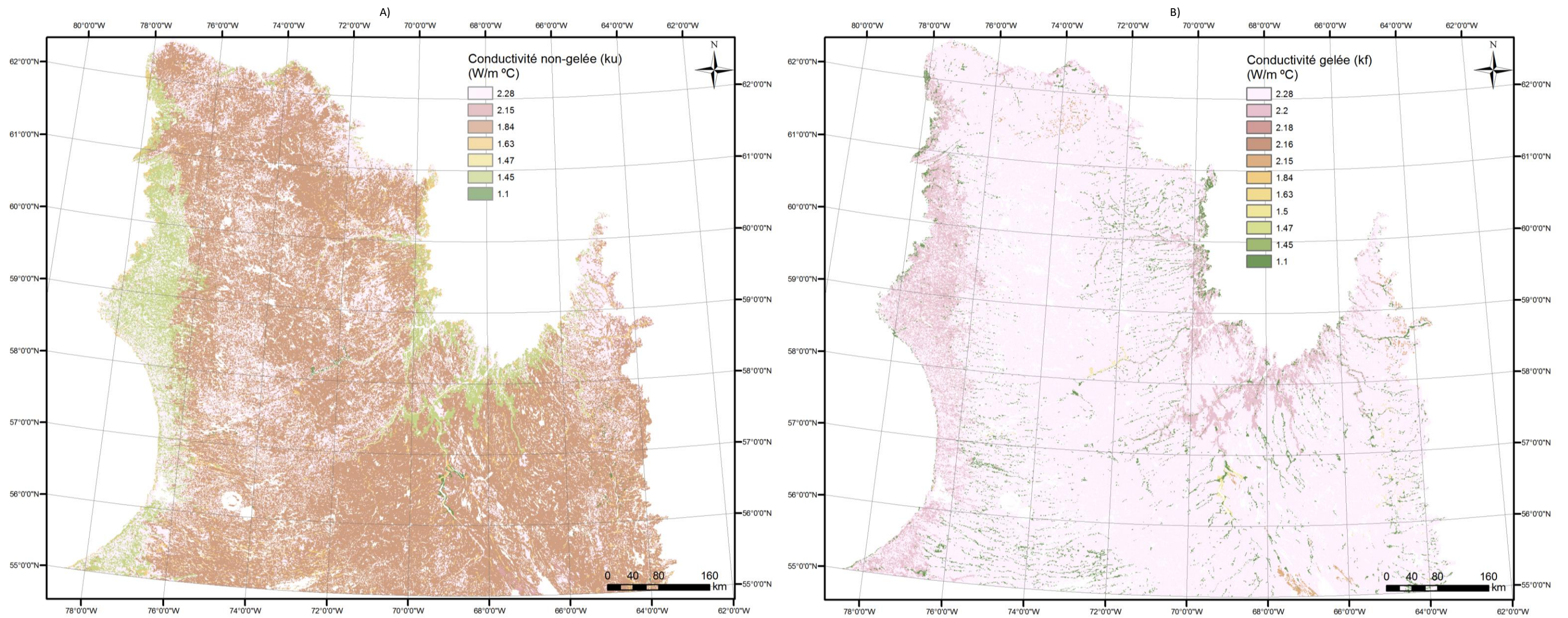


Figure 37 : Cartes des conductivités thermiques des matériaux à l'état A) non-gelée et B) gelée dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires

2.3 RÉSULTATS

2.3.1 LES TEMPÉRATURES AU SOMMET, ÉPAISSEUR ET DISTRIBUTION 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 m². Les cartes de la température au sommet du pergélisol et de son épaisseur sont présentées respectivement à la figure 38 et à la figure 39.

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 mésotopographie, 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 réelle du pergélisol, 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 mentionner 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 2012. 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). Par exemple, un changement de température à la surface, en raison de l'inertie thermique du système, peut prendre plusieurs années voire dizaine d'années à modifier l'équilibre thermique du profil en profondeur. Cette inertie attribue une certaine résilience au changement du système pergélisol à savoir que ce dernier ne disparaîtra pas immédiatement même si les températures de surface n'y sont plus favorables, mais ce 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 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.

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 un pixel de 250 m², des pixels environnants 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, un pixel pour lequel la température au sommet du pergélisol simulée par TTOP est anormalement froide par rapport aux pixels voisins 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. À la lumière des résultats, cette 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 entraîner 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 augmenterait également le temps de traitement/calcul nécessaire.

Outre la résolution des couches d'information, la disponibilité éventuelle de la nouvelle carte de classification écologique de la Direction des inventaires forestiers permettra d'intégrer davantage d'informations sur la densité et la structure de la végétation et ainsi améliorer la représentation spatiale

de la couverture neigeuse en fonction de la végétation. 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. Afin d'arriver avec une représentation encore plus juste de la réalité, ce même modèle transitoire pourrait être implémenté en trois dimensions et ainsi considérer l'influence des flux de chaleur latéraux sur la réponse thermique du pergélisol. 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.

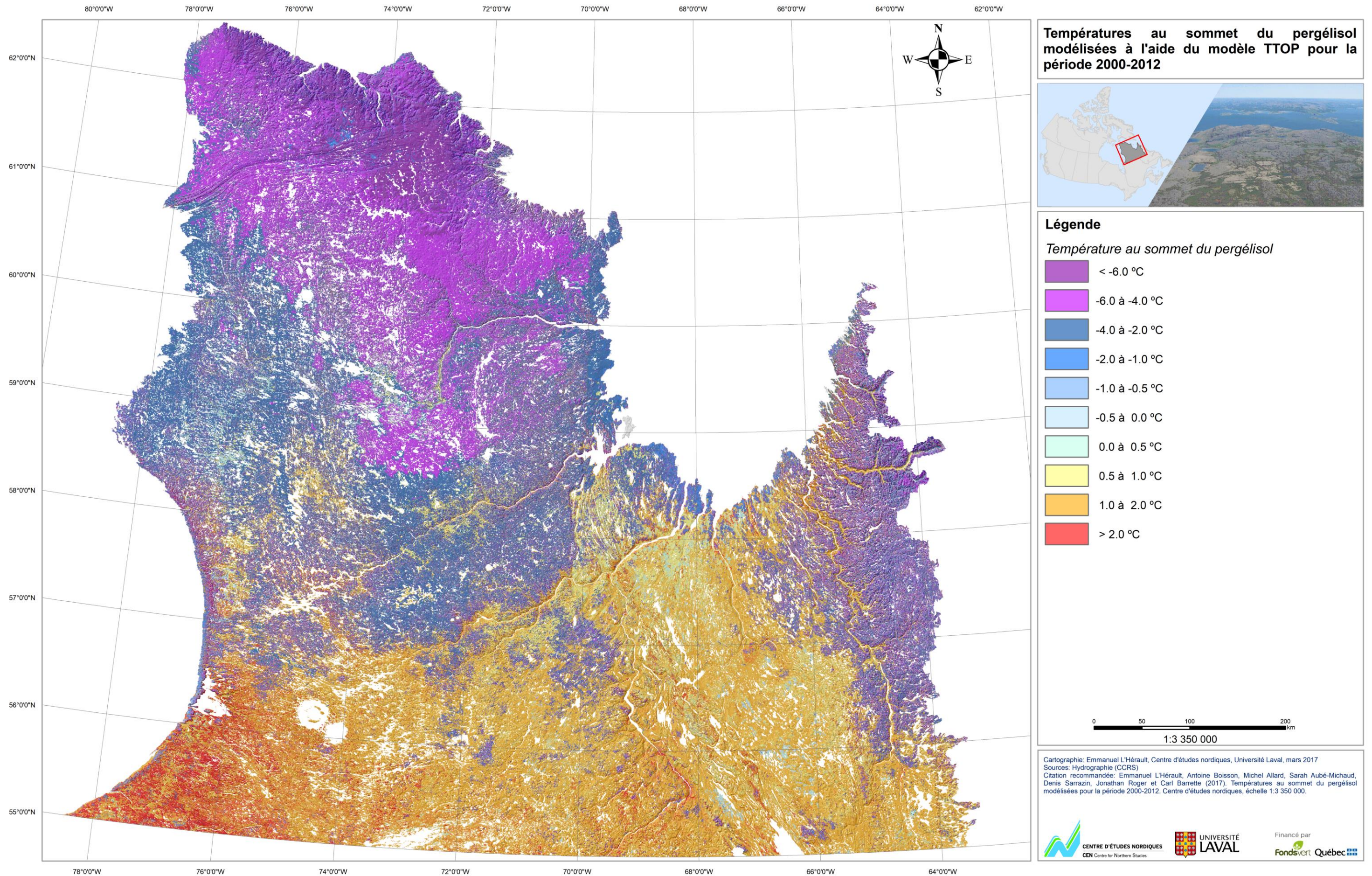


Figure 38 : Carte des températures au sommet du pergélisol modélisées à l'aide du modèle TTOP mis en équilibre avec les indices de gel et de dégel moyens pour la période 2000-2012.

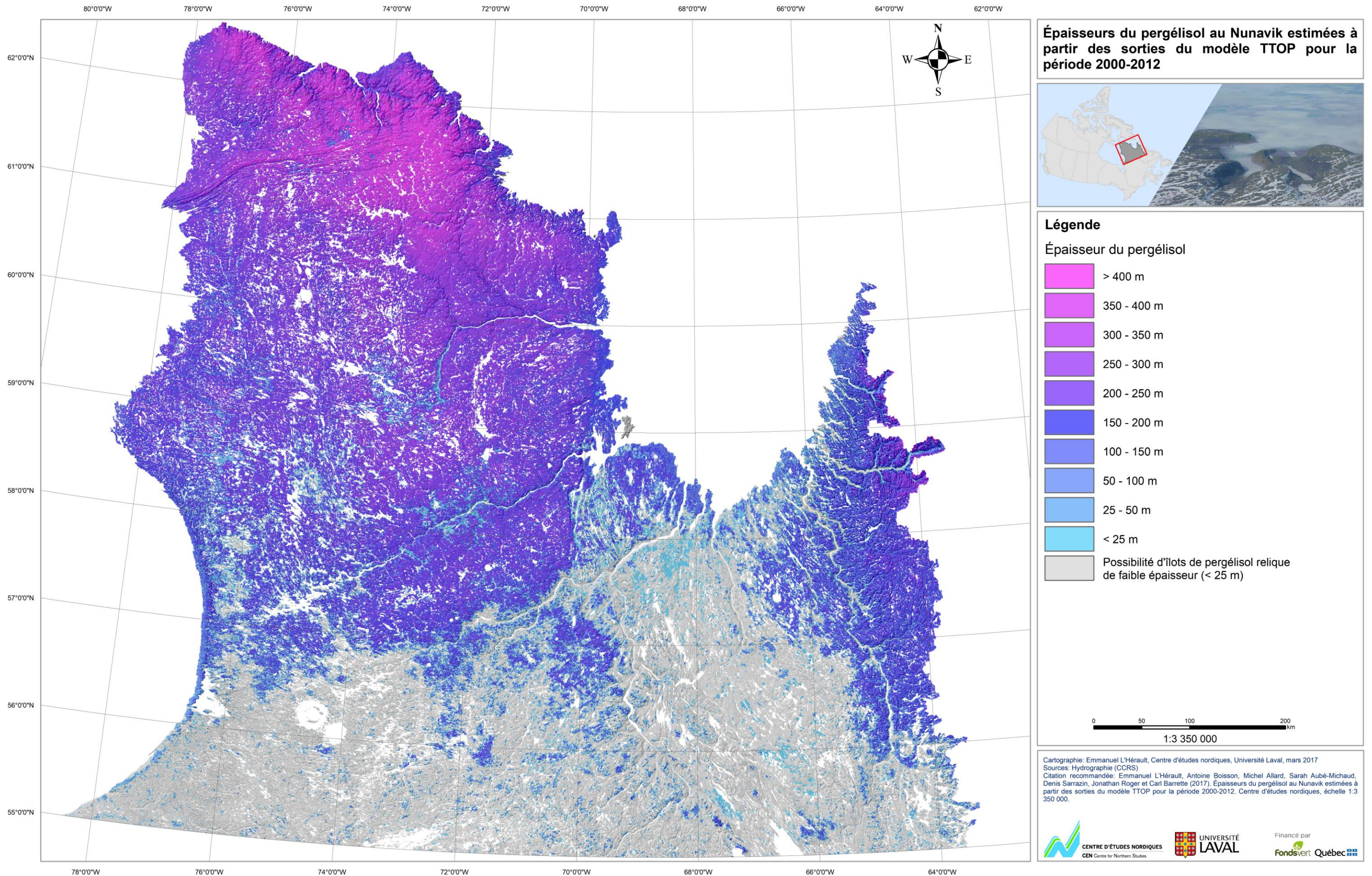
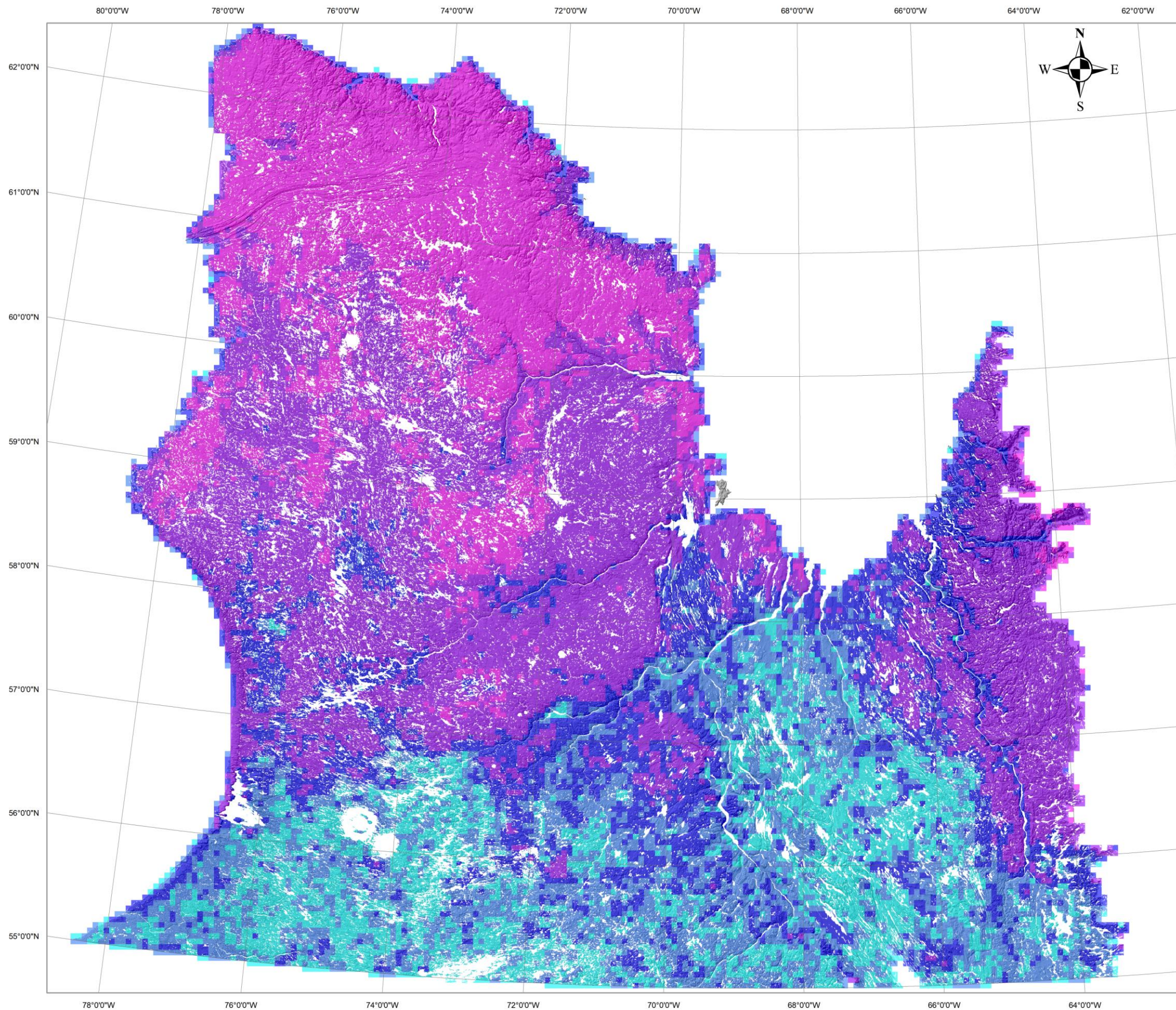


Figure 39 : Carte des épaisseurs probables du pergélisol calculées à partir des températures moyennes au sommet du pergélisol pour la période 2000-2012, d'un flux géothermique constant de 40.26 mW/m² et d'une conductivité thermique uniforme de 2.5 W/m K.



Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2012.



Légende

- Pergélisol continu:**
Probabilité de retrouver du pergélisol sur plus de 90 % du territoire sauf sous les grands lacs et les rivières; épaisseurs dépassant 150 m en général.

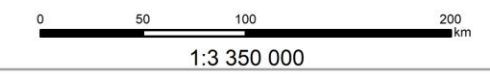
- Pergélisol discontinu et répandu:**
Probabilité de retrouver du pergélisol sur plus de 50 % du territoire sauf sous les grands lacs et les rivières.

- Pergélisol discontinu et dispersé:**
Probabilité de retrouver du pergélisol sur moins de 50 % du territoire excluant les zones sous les grands lacs et les rivières; Présent sous les collines dénudées et pouvant dépasser 100 m d'épaisseur; Paleses et lithales dispersées dans les milieux humides.

- Pergélisol sporadique:**
Probabilité de retrouver du pergélisol sur moins de 10 % du territoire excluant les zones sous les grands lacs et les rivières; rencontré surtout dans les tourbières et sous les sommets suffisamment hauts pour constituer des îlots de toundra forestière; présence possible de masses de pergélisol relique.

- Pergélisol sporadique résiduel:**
Probabilité de retrouver du pergélisol sur moins de 1 % du territoire excluant les zones sous les grands lacs et les rivières; rencontré surtout dans les tourbières et sous les sommets suffisamment hauts pour constituer des îlots de toundra forestière; le pergélisol se présente sous forme d'îlots essentiellement reliques en déséquilibre avec le climat actuel.

Note méthodologique:
La distribution du pergélisol a été évaluée à partir des températures au sommet du pergélisol estimées par le modèle TTOP pour la période 2000-2012. Le pourcentage du territoire occupé par du pergélisol a été calculé par zone de 25 km², soit des blocs de 20 pixels de large par 20 pixels de haut (400 pixels). Les lacs et les rivières ont été exclus de l'analyse.



Cartographie: Emmanuel L'Héroult, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017
Sources: Hydrographie (CCRS)
Citation recommandée: Emmanuel L'Héroult, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2012. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 40 : Distribution du pergélisol au Nunavik selon les sorties TTOP pour la période 2000-2012.

2.3.2 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 36) 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 41.

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 stable 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, donc instable au dégel. Par exemple, il est fréquent d'observer dans les dépôts de sédiments marins, de colluvion 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.

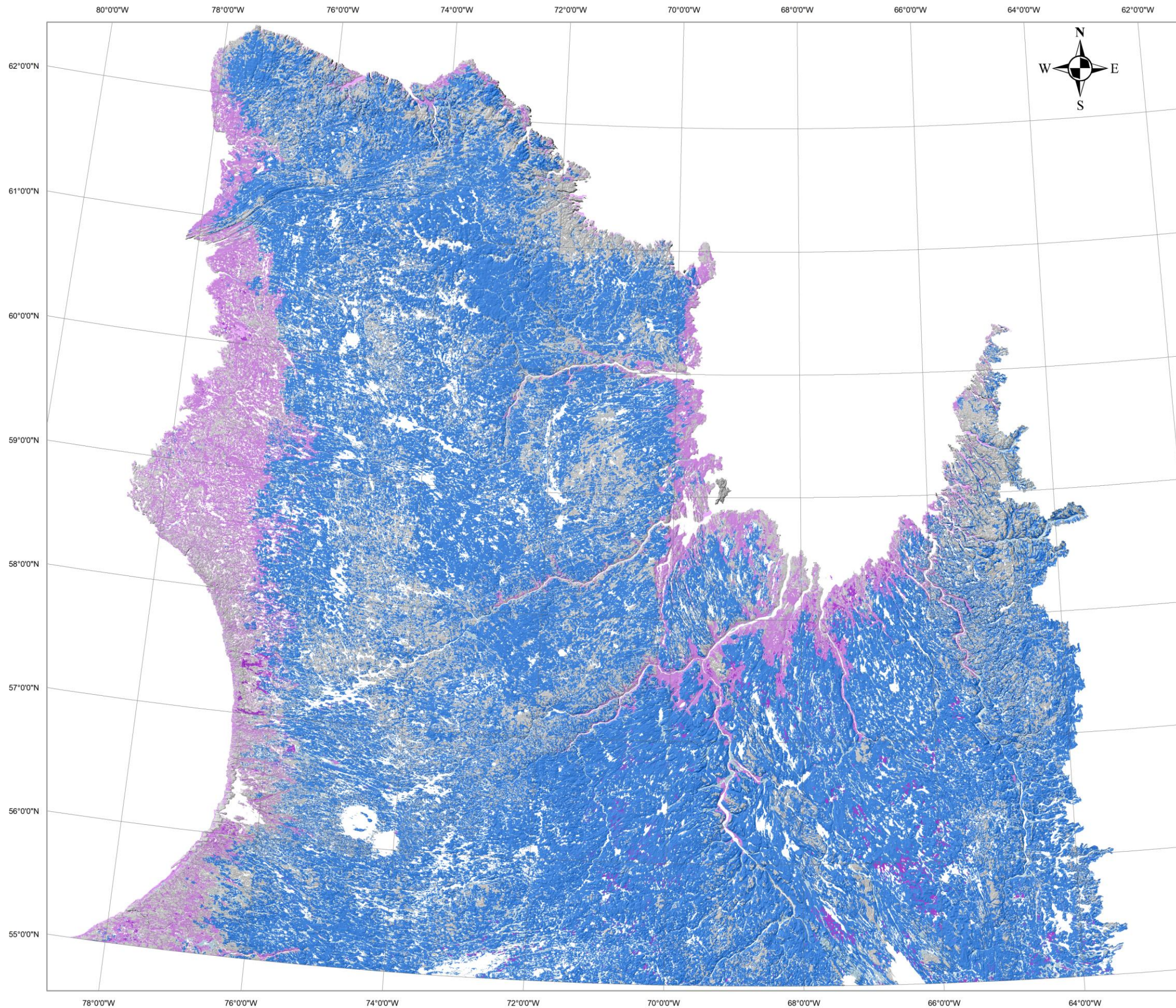
Compte tenu du lien fort entre la géologie de surface et les conditions géocryologiques du pergélisol, la répartition de celles-ci à l'échelle régionale est intimement liée au patron de déglaciation et de submersion marine postglaciaire de la région. On distingue ainsi deux grandes zones : les franges littorales submergées 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 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.

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 a 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 réseau polygonal facilement visible à la surface (Figure 42A) 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 de 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 peuvent atteindre plus d'un mètre de largeur, pour rarement excéder deux mètres, et plusieurs mètres de profondeur (Figure 42B 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 42D).

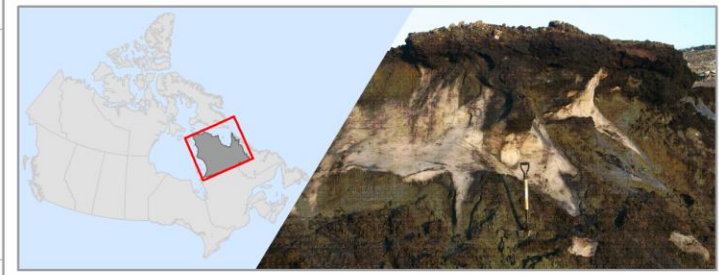
Outre les coins de glace, la présence de glace de glacier enfouie constitue également des masses de glace dont l'occurrence est difficile à prévoir. Lors de la déglaciation, quelques culots de glace de glacier résiduels

peuvent avoir été recouverts puis fossilisés dans les unités fluvioglaciales les rendant ainsi indétectables en surface (Figure 42^E). Par exemple, de telles masses de glace enfouies ont été observées dans les dépôts fluvio-glaciaires dans le secteur de la mine Raglan (Figure 42F). 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 de 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 (sommets, 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.



Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik



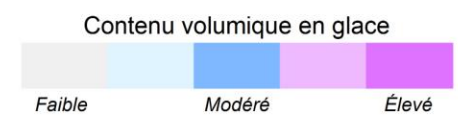
Légende

Dépôts stables au dégel : Roc et dépôts meubles contenant très peu ou pas de glace

- 1a** Socle rocheux. Faible teneur en glace dont seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une petite quantité de glace.
- 1b** Dépôts de sable et gravier en couverture épaisse (> 2 m). Contient de la glace interstitielle poreuse dont le contenu volumique en glace est généralement inférieur à

Dépôts instables au dégel : Dépôts meubles contenant beaucoup de glace

- 2a** Dépôts glaciaires (till) en couverture épaisse (> 2 m) sur socle rocheux. Contient de la glace interstitielle et sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine. Le contenu volumique en glace est généralement inférieur à 30 %. Présence d'ostioles et de coulées de gélifluxion sur les versants. Matériau sujet au fluage et au tassement différentiel lors de sa fonte.
- 2b** Dépôts à granulométrie fine d'origine marine ou lacustre en couverture épaisse (> 2 m). Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut attendre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des glissements de terrain sur les versants.
- 2c** Dépôts organiques en couverture épaisse (> 1 m). Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique est généralement supérieur à 30 % et peut attendre près de 100 %. Matériau sujet à des tassements différentiels importants.



Cartographie: Emmanuel L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017
 Sources: Hydrographie (CCRS)
 Citation recommandée: Emmanuel L'Hérault, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 41: Carte des conditions géocryologiques dérivées des caractéristiques géotechniques associées aux principales classes de dépôts Quaternaires.

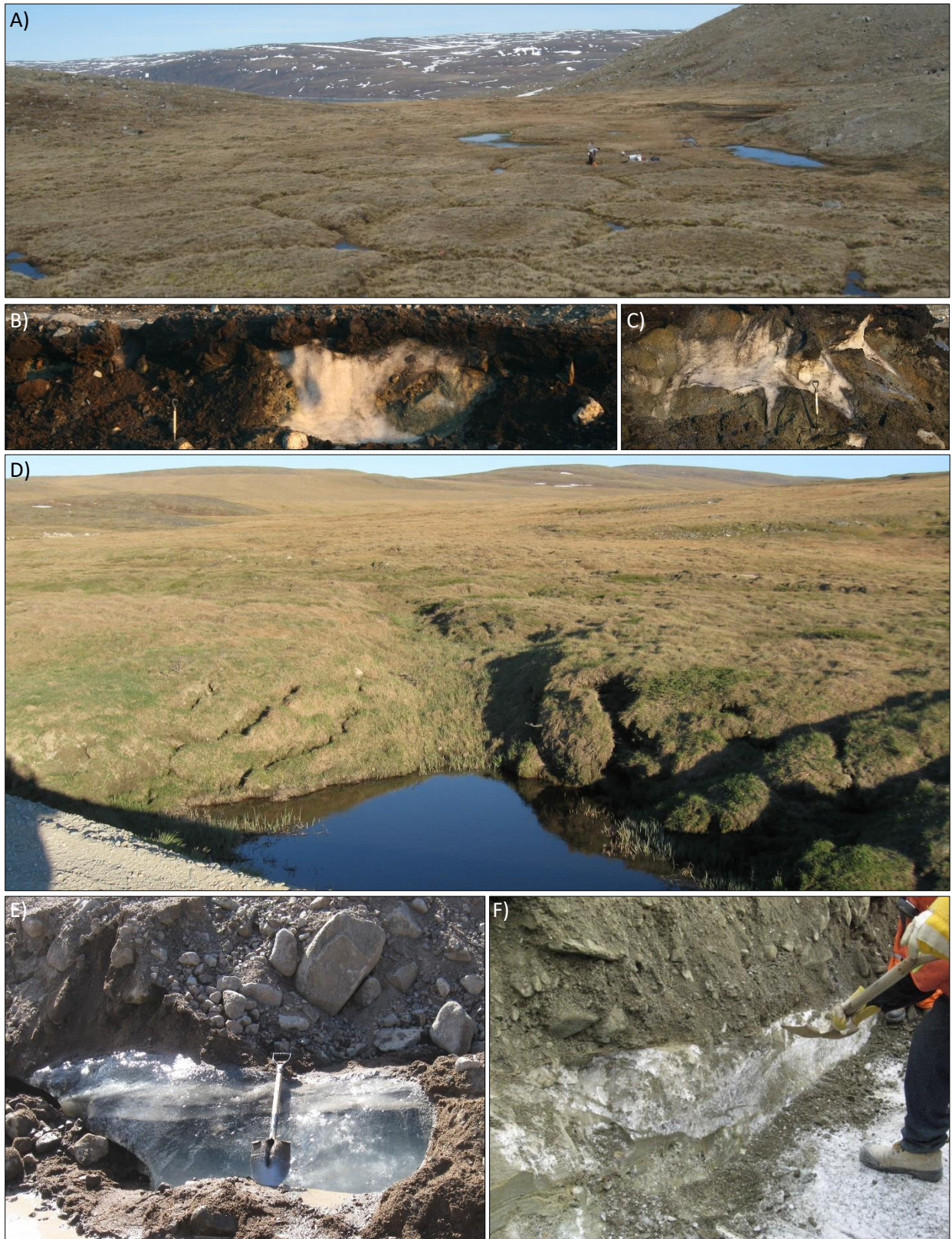


Figure 42 : A) Réseau polygonal de coins de glace. B) et C) Coupes frontales de coins de glace. D) Paysage thermokarstique résultant de la fonte partielle d'un réseau de coins de glace. E) et F) Glace de glacier enfouie sous des dépôts glaciaires grossiers non-gélifs.

2.3.3 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'entraîner 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 43. Une fois l'indice de susceptibilité calculé par pixel de 250 m² 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 44.

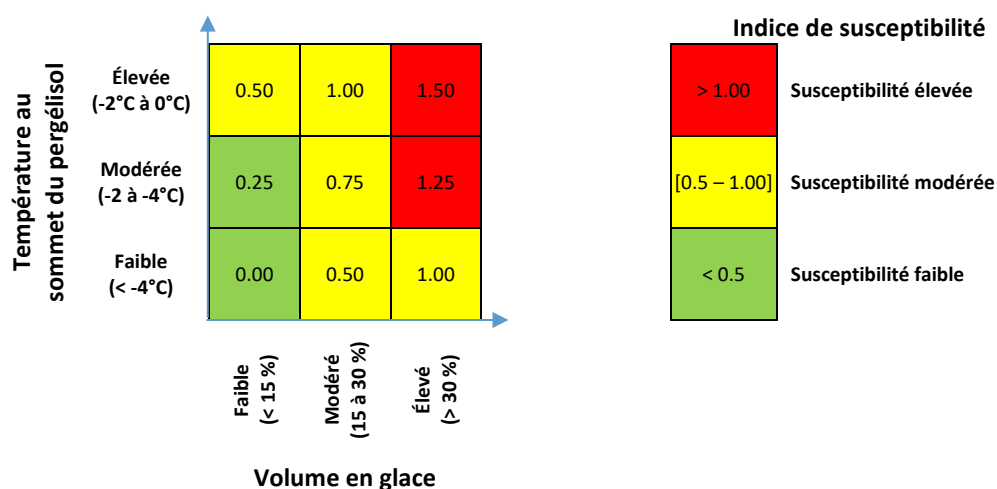
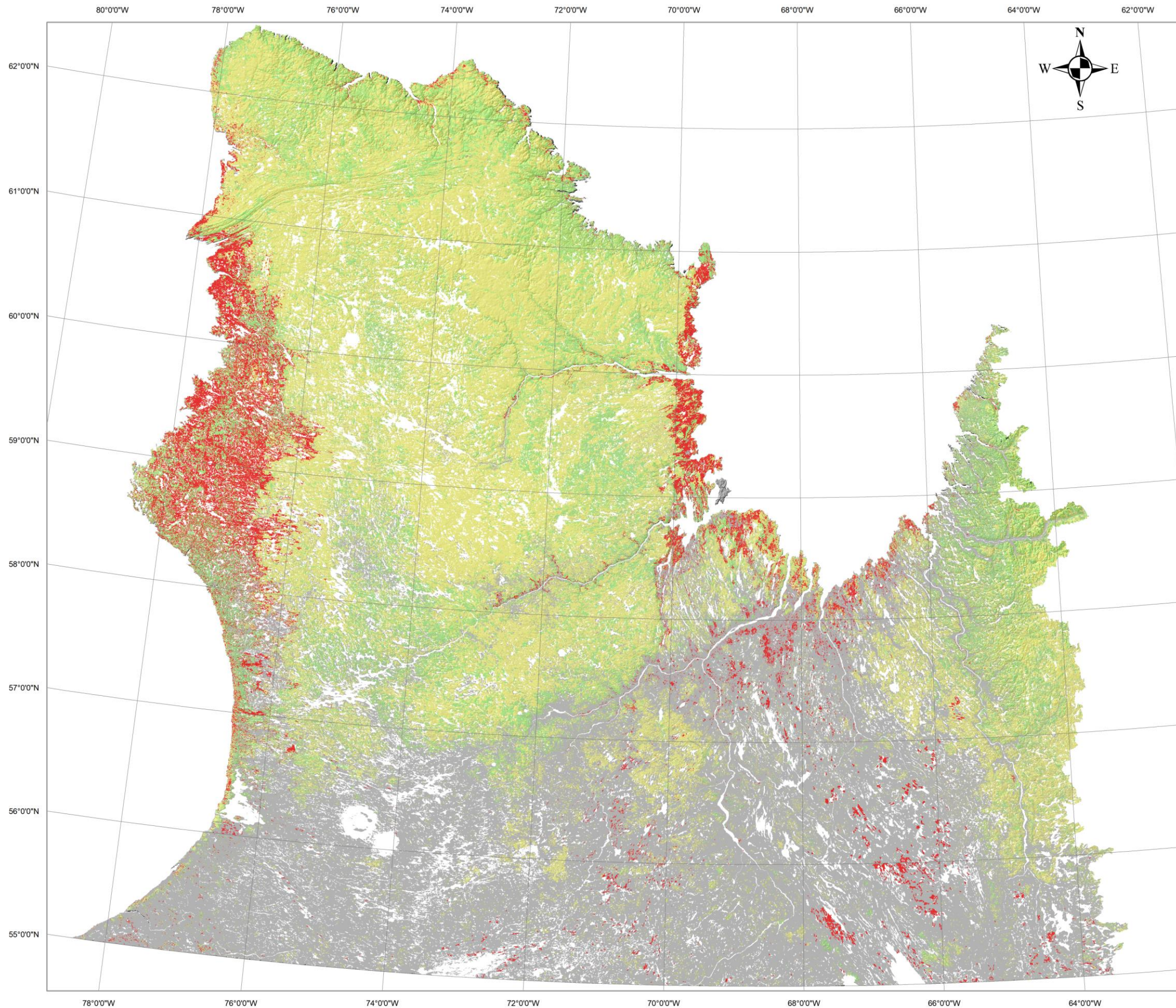


Figure 43 : Pondération différentielle des deux facteurs qui composent l'indice de susceptibilité et la matrice des résultats possibles.

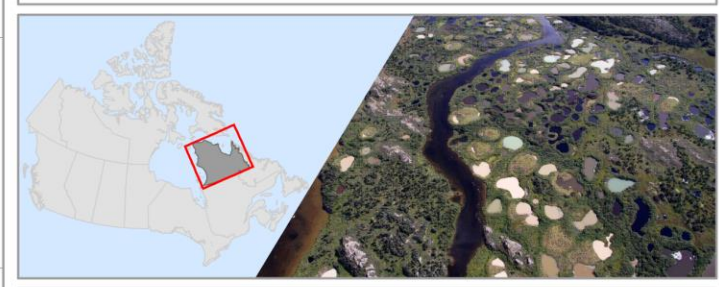
En raison de l'importance des conditions géocryologiques dans la détermination de l'indice de susceptibilité, les secteurs les plus enclins aux tassements thermokarstiques correspondent essentiellement aux zones submergées lors de la déglaciation et recouvertes par des dépôts marins fins gélifs (classe 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 dont le régime thermique du pergélisol y est particulièrement froid, bénéficient d'une certaine résilience du système ce qui atténue la susceptibilité aux affaissements thermokarstiques. 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.



Susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques



Légende Niveau de susceptibilité

- Faible**
Zones où le pergélisol contient peu ou pas de glace et dont la température à son sommet est inférieure à - 2 °C. Le développement de ces zones ne présentent pas d'enjeux majeurs associés à la présence du pergélisol.
- Modérée**
Zones où le pergélisol contient soit un volume en glace élevé et une température à son sommet faible, un volume en glace modéré et une température à son sommet supérieure à - 4 °C ou un faible volume en glace et une température élevée. Le développement de ces zones requièrent la prudence.
- Élevée**
Zones où le pergélisol est riche en glace et dont la température à son sommet est supérieure à - 4 °C. Le développement de ces zones doit être minutieusement planifié voire à éviter autant que possible.
- Zones généralement sans pergélisol; présence possible d'îlots de pergélisol de faible épaisseur et généralement relique; lors de développement, ces îlots de pergélisol peuvent facilement être évités d'autant plus qu'ils se limitent essentiellement aux tourbières.**

Température au sommet du pergélisol	Élevée (-2°C à 0°C)	0.50	1.00	1.50
	Modérée (-2 à -4°C)	0.25	0.75	1.25
	Faible (< -4°C)	0.00	0.50	1.00
		Faible (< 15 %)	Modéré (15 à 30 %)	Élevé (> 30 %)
		Volume en glace		

0 50 100 200 km
1:3 350 000

Cartographie: Emmanuel L'Héroult, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017
Sources: Hydrographie (CCRS)
Citation recommandée: Emmanuel L'Héroult, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 44 : Carte de susceptibilité du territoire du Nunavik aux affaissements thermokarstiques.

3 CLASSIFICATION GÉOMORPHOLOGIQUE DES CÔTES DU NUNAVIK

3.1 LE NUNAVIK : UNE MOSAÏQUE DE SYSTÈMES CÔTIERS

Le Nunavik est entouré par trois façades maritimes aux caractéristiques assurément différentes à savoir la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava. Ce littoral périglaciaire se dessine sur environ 10 000 km entre Kuujuarapik (55°16'N, 77°45'O) et l'île de Killiniq (60°21'N, 64°51'O). Labyrinthique, ce littoral se décompose en une mosaïque de systèmes côtiers tels que les baies, les plages, les hauts promontoires, les fjords et les larges estuaires. Le littoral du Nunavik comporte également une diversité de marnages : microtidal (< 2m) pour la baie d'Hudson; mésotidal (2 à 4 m) à macrotidal (> 4 m) pour le détroit d'Hudson; macrotidal pour la baie d'Ungava. Les dynamiques glacielles sont également parties intégrantes de ce littoral. Aussi, le pergélisol, qu'il soit continu, discontinu ou sporadique, se réchauffe et dégèle, modifiant les processus et les environnements côtiers. Les façades maritimes du Nunavik sont contrastées en termes de conditions de marnage, de types de côtes et de pergélisol, et demeurent peu documentées à ce jour. Actuellement, seul le programme CanCoast de Ressources Naturelles Canada a produit des résultats de cartographie sur une partie des littoraux du Nunavik d'une résolution assez grossière. Il importe donc de fournir une information de base sur la géomorphologie des systèmes côtiers en vue d'appuyer la mise en place d'infrastructures, tant sur la terre ferme qu'en milieu maritime. C'est cette information qui servira à évaluer les risques naturels dans la région côtière et à évaluer les vulnérabilités du milieu côtier.

Dans la littérature scientifique, de nombreuses approches de classification côtière ont été définies et appliquées pour caractériser les traits dominants d'un littoral en termes de propriétés physiques et écologiques. D'après Dionne (1963), les classifications conventionnelles de Johnson (1919), Shepard (1937, 1948), Valentin (1952), et Cotton (1954) n'étaient pas adaptées pour caractériser les littoraux arctiques. Owens (1994) a mis alors au point une classification côtière adaptée exclusivement aux littoraux arctiques et associée aux risques de déversement de pétrole. Elle fut ensuite modifiée par Owens et Sergy (2004) et Owens (2010). Quelques programmes scientifiques ont été menés pour cartographier et classifier les littoraux de l'Arctique canadien : CanCoast (Shaw *et al.*, 1998 ; Couture *et al.*, 2014) ; ACD (*Arctic Coastal Dynamics*, Lantuit *et al.*, 2012) ; ShoreZone (Howes, 2001 ; Harper et Morris, 2014) et eSPACE (*Emergency Spatial Pre-SCAT for Arctic Coastal Ecosystems*, Wynja *et al.*, 2015). Parmi ces programmes, seul CanCoast présentait des données antérieures sur les littoraux du Nunavik.

Par conséquent, il est opportun d'acquérir de solides connaissances sur les systèmes et processus côtiers du Nunavik, afin d'évaluer la sensibilité de ces environnements dans un contexte de changements climatiques et de développement économique. Une analyse géomorphologique détaillée est essentielle pour une bonne gestion de ce vaste littoral. D'ailleurs, depuis quelques années, certaines portions du littoral sont intégrées et protégées dans des parcs ou le seront prochainement (Tursujuq, Monts de Puvirnituq, Cap Wolstenholme, Baie aux Feuilles, Kuururjuaq). Aussi, la géomorphologie et la dynamique côtière actuelles ont besoin d'être mieux connues si on veut anticiper les transformations que provoqueront les changements climatiques (James *et al.*, 2014 ; Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014 ; Massé et Gallant, 2016).

Les études portant sur les littoraux du Nunavik sont fragmentaires dans le temps et l'espace. Les rapports d'exploration scientifiques (Low, 1901, 1902), la succincte classification physiographique du Nunavik par Douglas et Drummond (1955), la carte glaciaire du Canada par Prest *et al.* (1968), la classification de la baie d'Ungava par Barry *et al.* (1977), la description des cuestas du sud-est de la baie d'Hudson par Guimont et Laverdière (1980) apportent néanmoins des informations intéressantes. Les études des environnements côtiers pergélisolés sont dues à Seguin et Allard (1984), Allard *et al.* (1989, 1992, 1998), Fournier et Allard (1992), Beaulieu (1997), Ruz et Beaulieu (1998), Beaulieu et Allard (2003). La géomorphologie du Quaternaire (géologie, déglaciation, relèvement glacio-isostatique) a été décrite

notamment par Matthews (1967), Gray et Lauriol (1985), Lauriol et Gray (1987), Gray *et al.* (1993), Daigneault (2008) et par Lavoie *et al.* (2012).

Principalement rocheux, le littoral du Nunavik s'étire sur environ 10 000 km entre Kuujuarapik (55°16'N, 77°45'O) et l'île de Killiniq (60°21'N, 64°51'O). Il se décompose en une mosaïque de systèmes côtiers : (i) cuestas entrecoupées par de riches environnements sédimentaires (dunes, flèches littorales, deltas), entre Kuujuarapik et Inukjuak ; (ii) affleurements peu élevés, reliques de reliefs glaciaires et fluvioglaciaires en émergence (eskers, drumlins, moraines de De Geer), *skjårs* (petites îles), plages de poche, baies (ex. Kovik), entre Inukjuak et Ivujivik ; (iii) hauts promontoires, fjords et talus d'éboulis pour le détroit d'Hudson (entre le Cap Wolstenholme et le Cap Hopes Advance); (iv) fjords, fjords, côtes basses rocheuses, larges estuaires et marais pour la baie d'Ungava.

Les façades maritimes du Nunavik (baie d'Hudson, détroit d'Hudson et baie d'Ungava) sont différentes en termes de conditions hydrodynamiques, de types de côtes et de pergélisol. Ces éléments sont importants dans la compréhension de la composition granulométrique, la morphologie et les tendances évolutives des littoraux du Nunavik. La dynamique érosive et sédimentaire des littoraux est conditionnée par l'impact de ces événements météorologiques et hydrodynamiques. La compréhension des réponses possibles des littoraux face aux modifications environnementales, particulièrement dans le contexte de réchauffement climatique, est l'un des enjeux majeurs des recherches scientifiques actuelles. Ces littoraux arctiques/subarctiques sont confrontés notamment à la variation du niveau marin relatif, l'allongement de la période d'eau libre, l'exposition aux vagues et aux crues de tempête, les surcotes, les décotes, les poussées glacielles, etc. Ces changements récents et en cours ont besoin d'être mieux connus si on envisage d'en évaluer les impacts.

Le Nunavik connaît un relèvement isostatique postglaciaire parmi les plus élevés au monde. Ces façades maritimes sont affectées par un relèvement à des taux régionaux variables, variant de 1,3 m/siècle sur la côte est de la baie d'Hudson à 0,5 m/siècle le long de la baie d'Ungava et du détroit d'Hudson (Lauriol et Gray, 1987 ; Gray *et al.*, 1993 ; Lavoie *et al.*, 2012 ; James *et al.*, 2014). Par ailleurs, ces reliefs littoraux ont été fortement modelés par le passage de l'Inlandsis laurentidien et l'invasion des mers postglaciaires de Tyrrell et d'Iberville (Figure 45).

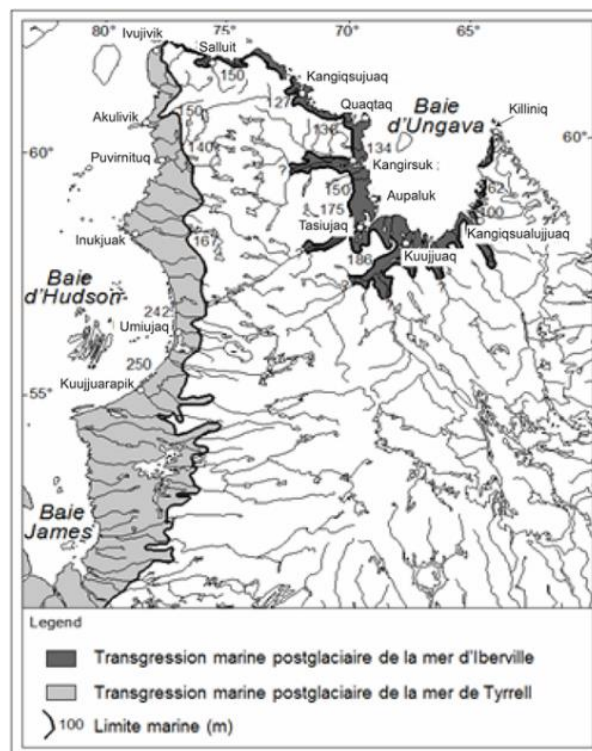


Figure 45 : Transgression marines postglaciaire au Québec nordique.

3.2 OBJECTIFS

Afin de fournir les connaissances de base essentielles en rapport avec la nature du littoral du Nunavik, le troisième axe de ce projet de recherche vise en premier lieu à réaliser une classification en segments des côtes du Nunavik selon des critères géomorphologiques et hydrodynamiques et faite à partir d'images aériennes obliques et planimétriques. Cette classification est complétée avec les données géologiques côtières des sources fédérales et les analyses hydroclimatiques déjà produites au Québec par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et Ouranos. En second lieu, le projet vise à identifier les secteurs fragiles et sensibles, notamment face à l'érosion côtière, aux variations du niveau marin relatif, aux mouvements de versant (terrestres et subaquatiques) et procéder à une première identification des aléas géotechniques côtiers (ex. les zones d'argiles sensibles en milieu littoral).

Par la combinaison de la géomorphologie littorale, de l'hydrodynamique côtière et des systèmes d'information géographique (SIG), la présente étude consiste à analyser les formes, les processus et les environnements côtiers du Nunavik, afin de fournir aux intervenants gouvernementaux, aux entreprises et aux organisations autochtones des connaissances de base essentielles en rapport avec la nature du terrain, les aléas et les vulnérabilités du milieu pour orienter la prise de décision dans le cadre du développement du territoire, incluant la mise en place potentielle d'infrastructures maritimes.

3.3 MÉTHODOLOGIE

Pour la présente étude, le choix s'est porté sur la vidéographie et la photographie par hélicoptère. Le principal avantage de cette technologie est la rapidité et la résolution spatiale élevée permettant l'acquisition d'une information précise et uniforme, pour l'ensemble de la région. Ces données sont très utiles pour l'interprétation et la caractérisation des différents attributs de la classification côtière. Elles permettent d'avoir une preuve irréfutable des différents types de côtes, des entités géomorphologiques et du degré d'érosion.

3.3.1 VIDÉOGRAPHIE/PHOTOGRAPHIE DE LA LIGNE DE RIVAGE

Avec en supplément la contribution financière du réseau de centres d'excellence du Canada ArcticNet et du Centre d'Études Nordiques (CEN), deux survols vidéographiques et photographiques ont été réalisés en août 2015 et 2016 (Tableau 7). Aussi, à la mi-juin 2015, une collaboration avec Environnement Canada (Ottawa) a été établie. Fort de leur programme eSPACE (*emergency Spatial Pre-SCAT for Arctic Coastal Ecosystems*) (Wynja *et al.*, 2015), des géomaticiens guidés par Valérie Wynja, Anne-Marie Demers et Jon Pasher, nous ont prêté le matériel pour la vidéographie et la photographie. Ce programme scientifique est mené pour cartographier et classer les littoraux de l'Arctique canadien en cas d'un futur déversement de pétrole sur les côtes. En utilisant le matériel du programme eSPACE (Figure 46), près de 45 heures de vidéos et 37 000 photographies géoréférencées ont été prises le long du littoral (Tableau 7).

La vidéographie a été réalisée à l'aide d'une caméra JVC Pro GY-HM100U à des altitudes variant de 90 à 120 m, avec une vitesse de vol entre 130 et 150 km/h (Figure 46). Pour certains littoraux plus complexes (ex. côte à *skjär* entre Inukjuak et Puvirnituaq) la vitesse de vol a été augmentée ; pour les littoraux à fjords (ex. détroit d'Hudson) l'altitude dépassait parfois 500 m pour avoir une marge de sécurité compte tenu de la grande hauteur des falaises et des promontoires. L'hélicoptère était positionné à environ 150 m au large de la côte pour assurer une vision claire de la zone intertidale. La vidéographie oblique a été collectée en inclinant la caméra à un angle de 45° afin d'obtenir une vue globale du trait de côte. Les vidéos ont été géolocalisées en utilisant un VMS 333 de la compagnie Red Hen Systems. Quelques commentaires audios ont été intégrés et enregistrés, fournissant des descriptions de la côte afin d'améliorer l'interprétation. En même temps, des milliers de photographies du littoral ont été prises de l'hélicoptère en utilisant un appareil photo Nikon D7100. Ces données ont été intégrées dans une *webmap* créée par le laboratoire de géomatique du Centre national de la recherche faunique (*National Wildlife Research Centre [NWRC]*) (Figure 47).

Tableau 7 : Caractéristiques générales des campagnes de terrain.

	2015	2016
Équipe	A. Boisson, J. Roger, M. Allard, Kim (pilote)	A. Boisson, M. Allard, Jean-Philippe (pilote)
Survol	Kuujuarapik – Baie Déception	Fjords entre Ivujivik et Salluit – Kangiqsualujjuaq
Nombre de kilomètres	4 500	5 000
Photographies	12 000	25 000
Vidéos	20 h	25 h
Conditions météorologiques	Mauvaise météo dans les fjords entre Ivujivik et Salluit	Mauvaise météo dans les estuaires (False, à-la-Baleine), ainsi que dans les environs de Kangiqsujuaq.

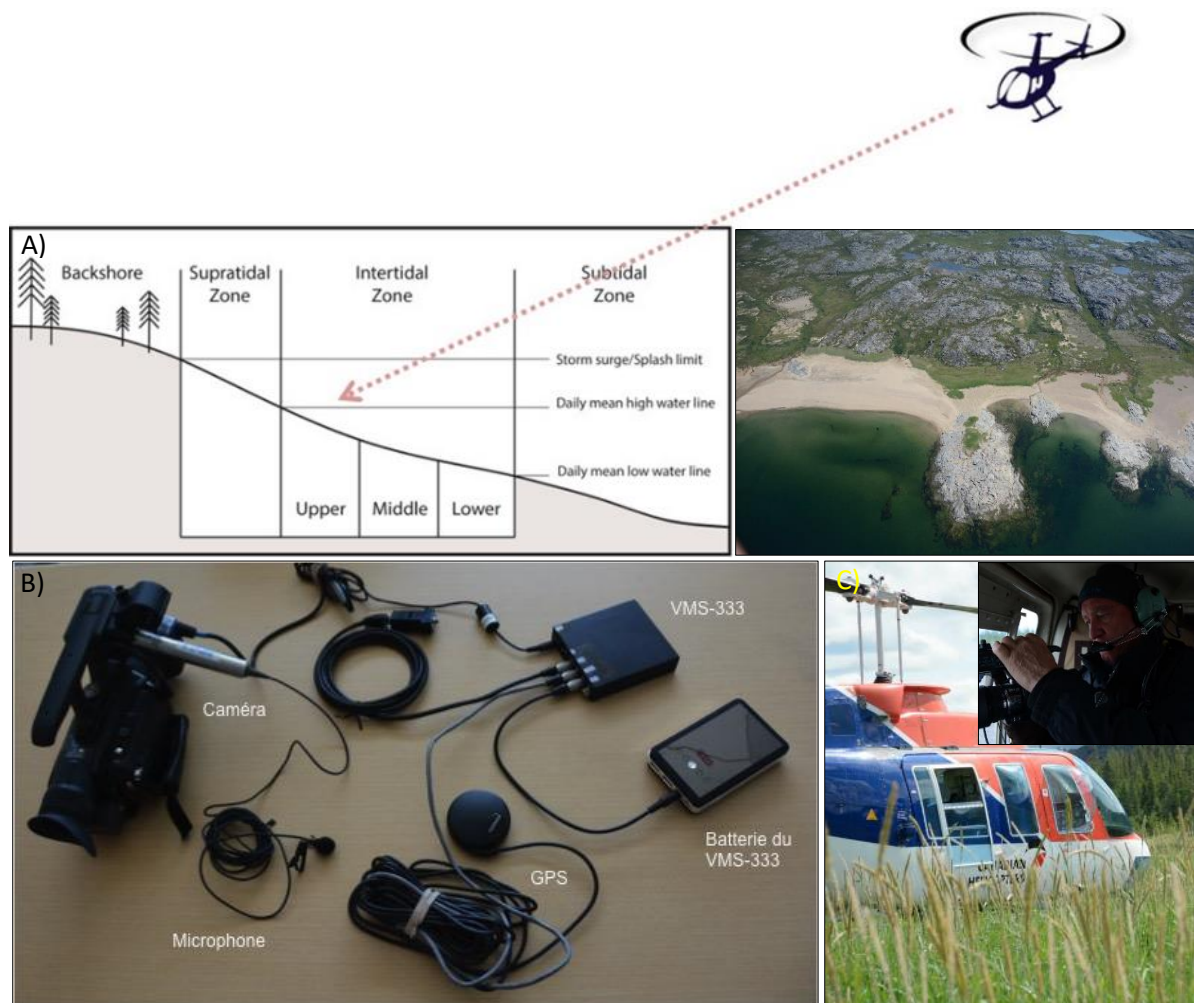


Figure 46 : A) Position de l'hélicoptère et angle de la caméra à 45° pour avoir le focus sur la zone intertidale supérieure. B) Matériel utilisé pour la vidéographie géoréférencée. C) Hélicoptère Bell 206 Long Ranger de la compagnie Canadian Helicopters et position dans l'hélicoptère pour effectuer la vidéographie du littoral.

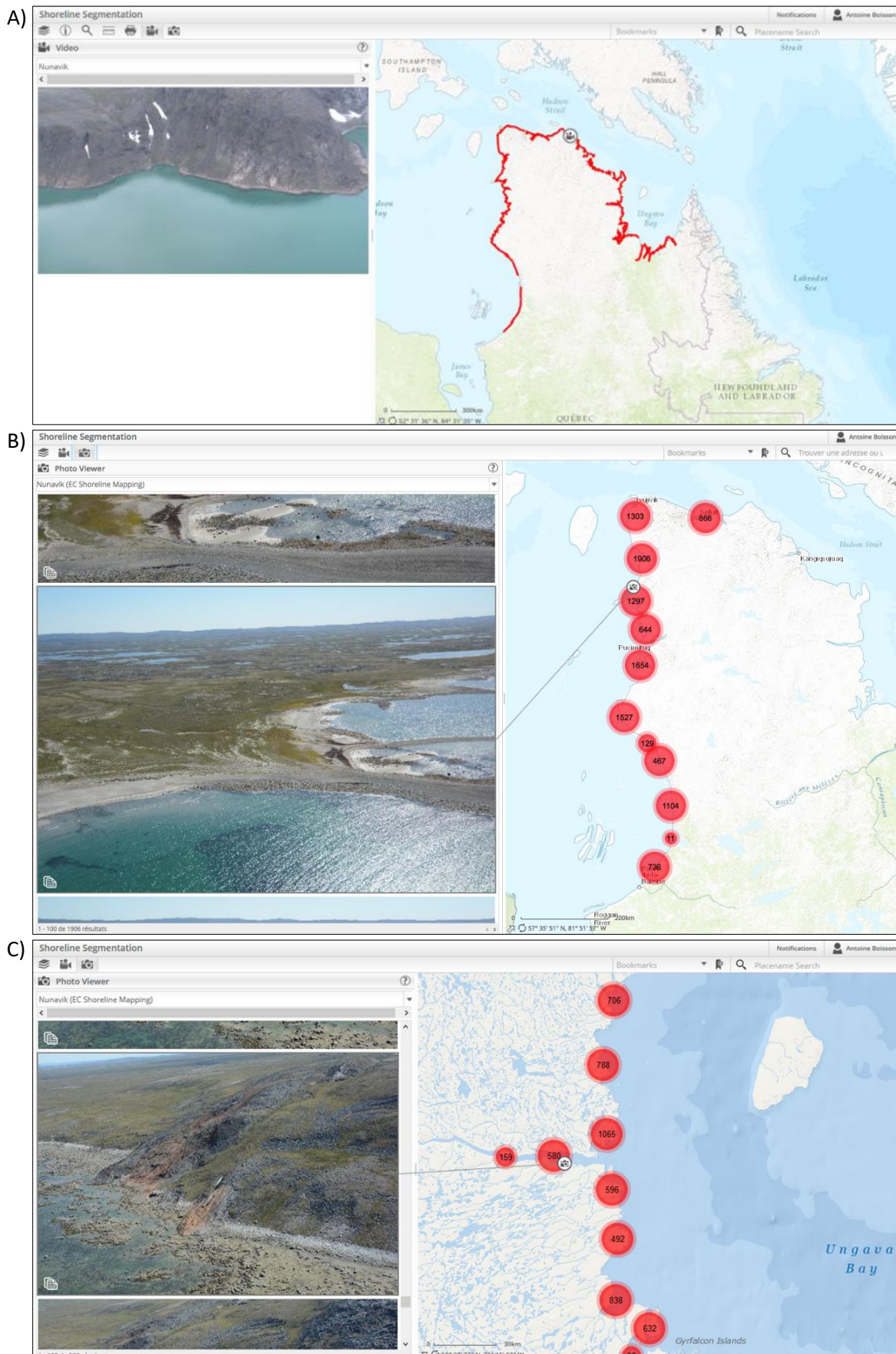


Figure 47 : A) Données vidéographiques et photographiques intégrées dans une *webmap* créée par le laboratoire de géomatique du Centre national de la recherche faunique (*National Wildlife Research Centre*). Photographies géoréférencées B) le long du littoral entre Kuujuarapik et Salluit (août 2015) et C) le long du littoral de Kangirsuk (août 2016).

3.3.2 SEGMENTATION DU LITTORAL

La segmentation du littoral est basée sur la méthodologie du programme eSPACE d'Environnement Canada (Wynja *et al.*, 2015). C'est le processus utilisé pour découper le littoral en segments homogènes selon le type de côte. La taille d'un segment s'échelonne entre 200 m et plusieurs kilomètres. En moyenne, un géomorphologue aguerri est capable de segmenter 40 km de littoral par jour. Pour chaque segment, des attributs descriptifs (substrat, pente, type de côte [classe SCAT], exposition [érosion, sédimentation, glissement de terrain, présence d'une rivière], accessibilité, etc.) sont intégrés dans un formulaire de données pour décrire à la fois le vecteur sur sa longueur (*longshore*) et sur un profil *cross-shore* (zone intertidale, zone supratidale, arrière-plage) (Figure 43). L'utilisation de menus déroulants et de règles préprogrammées par Environnement Canada assure une classification uniforme et consistante des différentes zones (Tableau 8).

Pour réaliser cette segmentation, nous utilisons deux ordinateurs : l'un en réseau privé virtuel (*Virtual Private Network* [VPN]) en lien avec Environnement Canada (Ottawa) avec ArcGIS 10.0 et de nombreuses données cartographiques; l'autre avec la *webmap* qui recueille les données vidéos et les photographies et ArcGIS 10.3 avec la mosaïque RapidEye (MRN, 2010). Le trait de côte de base est celui de CanVec (produit de Ressources naturelles Canada) à l'échelle 1/50 000. Des données auxiliaires incluant des orthophotographies et des produits topographiques (NRCan, 2012) sont également utilisées. La segmentation est opérée à partir d'ArcGIS 10.0, car le formulaire de données d'Environnement Canada ne fonctionne pas sur les plus récentes versions d'ArcGIS. À l'inverse, la fonction pour détecter les photographies géoréférencées n'existait pas sur ArcGIS 10.0.

À noter qu'une partie de la segmentation de la côte Est de la baie d'Hudson a été réalisée par plusieurs étudiants de baccalauréat (Laurence Poulin, Alexandre Chiasson et Julie Nadeau). La figure 49 montre l'état d'avancement du processus de classification du littoral. Le littoral entre la pointe Louis XIV et Kuujuarapik et celui de la côte est de la baie d'Ungava entre Kangiqsualujjuaq et Killiniq n'ont pas été vidéographiés faute de budgets suffisants.

Figure 48 : Profil *cross-shore* d'un environnement côtier et formulaire personnalisé d'Environnement Canada utilisé pour la segmentation.

Tableau 8 : Les différents types de côtes observables dans l'Arctique canadien (SCAT classes) selon Owens et Sergy, 2004 et Owens, 2010):

Type de côte :	Autres critères :
<ol style="list-style-type: none"> 1. Batture à sédiments mixtes et grossiers (Mixed and Coarse Sediment Tidal Flat) 2. Batture sableuse (Sand Tidal Flat) 3. Batture vaseuse (Mud Tidal Flat) 4. Berge vaseuse/argileuse (Mud/Clay Bank) 5. Berge végétalisée (Vegetated Bank) 6. Bois de grève (Driftwood) 7. Falaise de sédiments (Sediment Cliff/Dune/Talus) 8. Falaise de toundra pauvre en glace (Ice-poor Tundra Cliff) 9. Falaise de toundra riche en glace (Ice-rich Tundra Cliff) 10. Falaise rocheuse/verticale (Bedrock Cliff/Vertical) 11. Ligne de rivage de basse toundra inondé (Inundated Low-lying Tundra) 12. Marais (Marsh) 13. Neige/glace (Snow/Ice) 14. Plage ou berge à sédiments mixtes (Mixed Sediment Beach or Bank) 15. Plage ou berge de blocs rocheux 16. (Boulder Beach or Bank) 17. Plage ou berge de cailloux/galets (Pebble/Cobble Beach or Bank) 18. Plage ou berge de sable (Sand Beach or Bank) 19. Plateforme rocheuse (Bedrock Platform) 20. Rampe rocheuse (Bedrock Sloping/Ramp) 21. Rivage tourbeux (Peat Shoreline) 22. Structure anthropique perméable (Man-made Permeable) 23. Structure anthropique solide (Man-made Solid) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La largeur de l'estran 2. La pente 3. Les substrats (3 choix) 4. Accessibilité : <ol style="list-style-type: none"> a. Type : <ol style="list-style-type: none"> i. Bateau ii. À pied iii. Hélicoptère iv. Hydravion v. Machinerie lourde vi. Voiture b. Accessible par la haute plage (backshore) : <ol style="list-style-type: none"> i. Oui/Non c. Accessible par la plage voisine (alongshore) <ol style="list-style-type: none"> i. Oui/Non 5. Le fetch : <ol style="list-style-type: none"> a. Fort b. Moyen c. Faible 6. L'exposition <ol style="list-style-type: none"> a. Avalanche b. Érosion c. Glissement de terrain d. Éboulement e. Sédimentation f. Transport sédimentaire g. Présence d'un cours d'eau 7. Les formes côtières <ol style="list-style-type: none"> a. Plage b. Falaise c. Delta d. Dune e. Flèche littorale f. Etc. 8. Zone supratidale et haute plage <ol style="list-style-type: none"> a. Forêt b. Zone herbacée c. Polygones de toundra d. Surface de landes naturelles e. Terrain d'arbrisseaux f. Marécage g. Toundra h. Plan d'eau i. Etc.

3.4 RÉSULTATS

3.4.1 LA CLASSIFICATION CÔTIÈRE

À la mi-mars 2017, la classification côtière a été réalisée pour le détroit de Manitousuk, la région d'Akulivik et le détroit d'Hudson entre Ivujivik et Baie Déception. Un aperçu du rendu cartographique de la classification côtière pour une trentaine de kilomètres de côte au nord de Kuujjuarapik est illustré à la figure 50. Également, un aperçu de la classification des côtes entre Umiujaq et Inukjuak pour la forme de la zone intertidale supérieure et ses types de plage ainsi que le type d'arrière plage est présenté à la figure 51. Le survol du littoral entre Kuujjuarapik et Baie Déception montre que celui-ci se décompose en une mosaïque de systèmes côtiers (Figure 52) dont certaines sections extrêmement labyrinthiques et aux caractéristiques variables, soit celles entre Inukjuak et la Baie Kovik, devront être classifiées plus grossièrement.

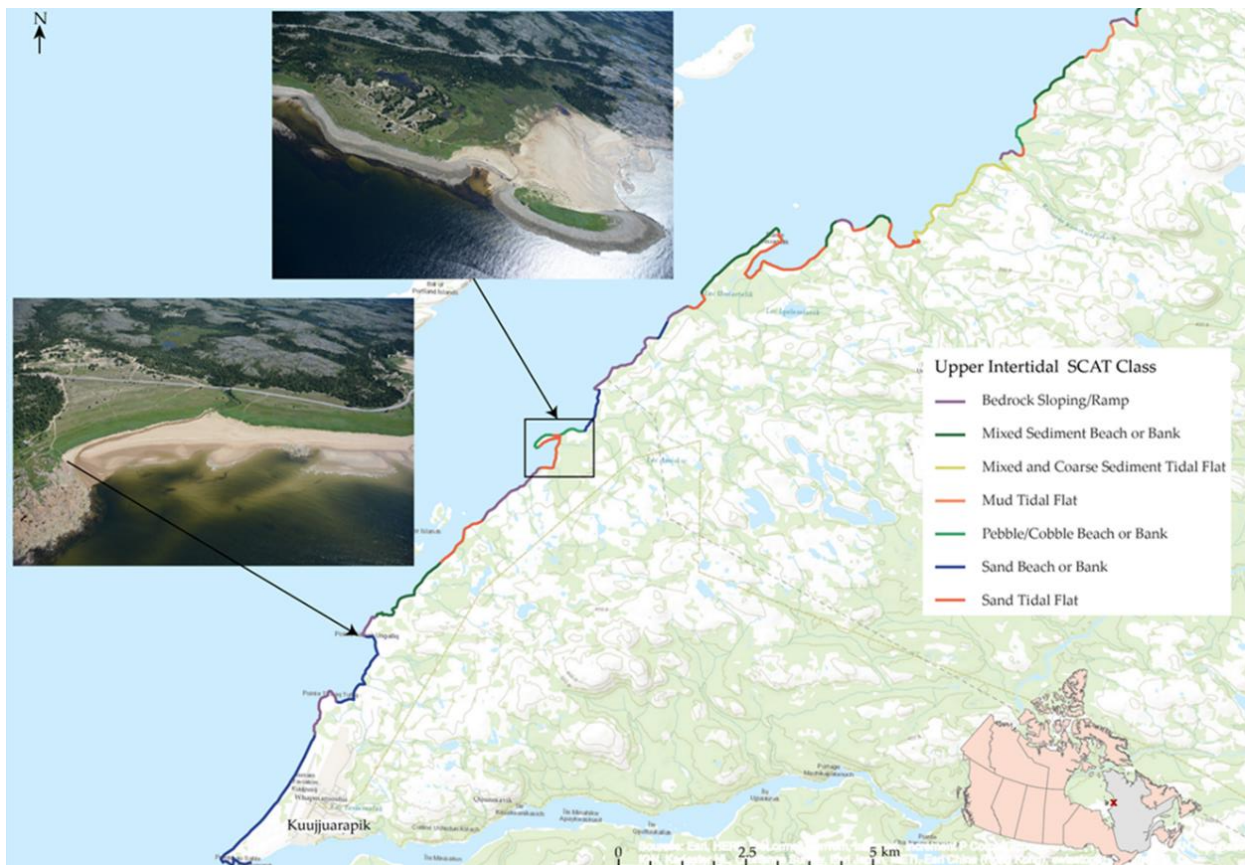


Figure 50 : Classification de la zone intertidale supérieure des environnements côtiers près de Kuujjuarapik.



Figure 51 : Exemple de la classification des côtes entre Umiujaq et Inukjuak. (À gauche) Forme de la zone intertidale supérieure : plage, côte basse, rampe. (Au centre) Type de plage en zone intertidale supérieure : plage à cailloux/galets, plage sableuse. (À droite) Type d'arrière plage : falaise rocheuse, rampe rocheuse, zone herbacée, terrain d'arbrisseau.

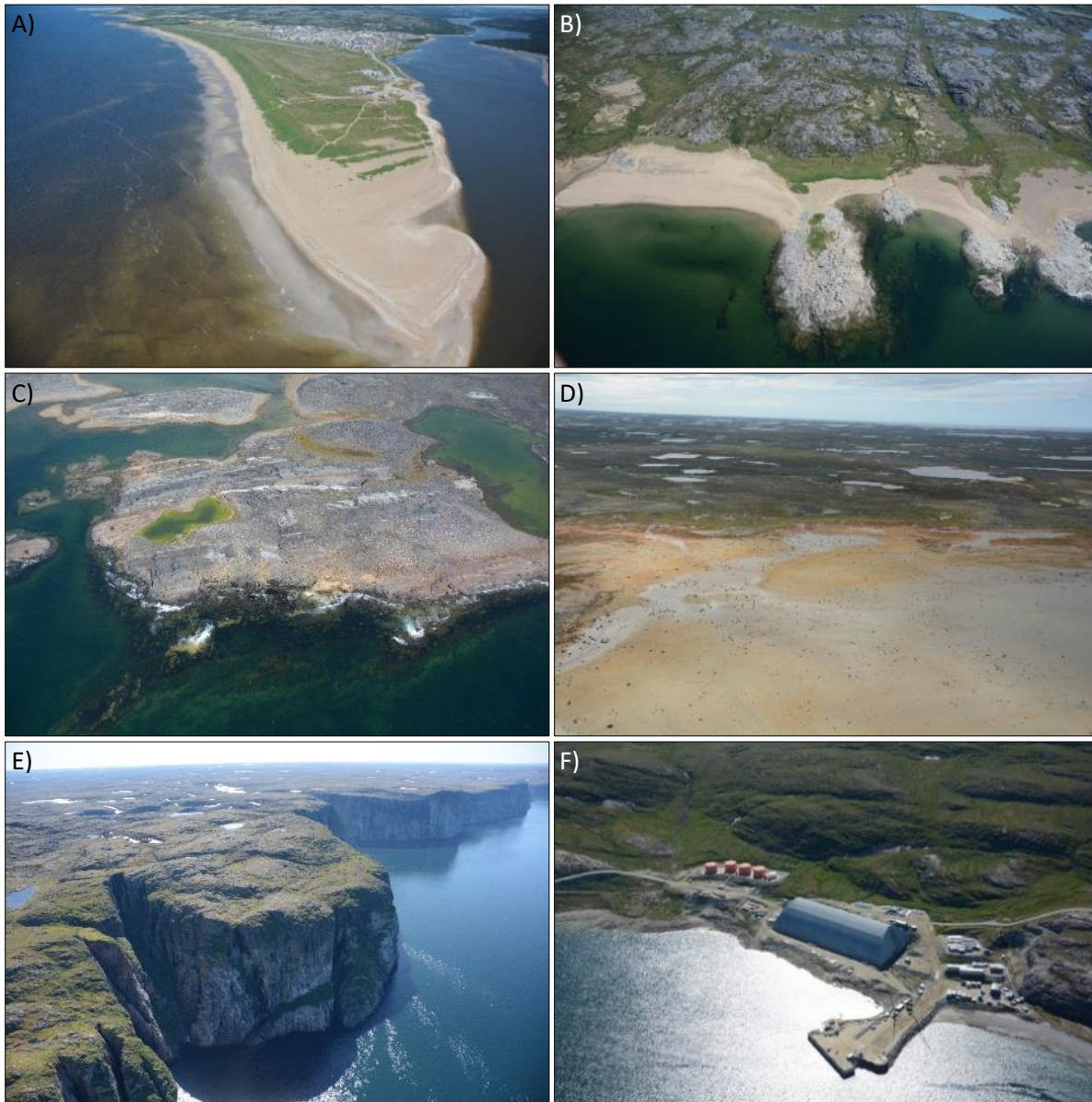


Figure 52 : A) Flèche sableuse à Kuujjuarapik. B) Plages de poche sableuses entrecoupées par des affleurements rocheux entre Umiujaq et Inukjuak. C) Plateforme rocheuse entre Inukjuak et Puvirnituq. D) Batture sableuse entre Puvirnituq et Akulivik. E) Falaise rocheuse/verticale entre Ivujivik et Salluit et F) Structure anthropique solide à Baie Déception.

3.4.2 SPÉCIFICITÉS GÉOMORFOLOGIQUES ENTRE CHAQUE VILLAGE

3.4.2.1 LA CÔTE EST DE LA BAIE D'HUDSON

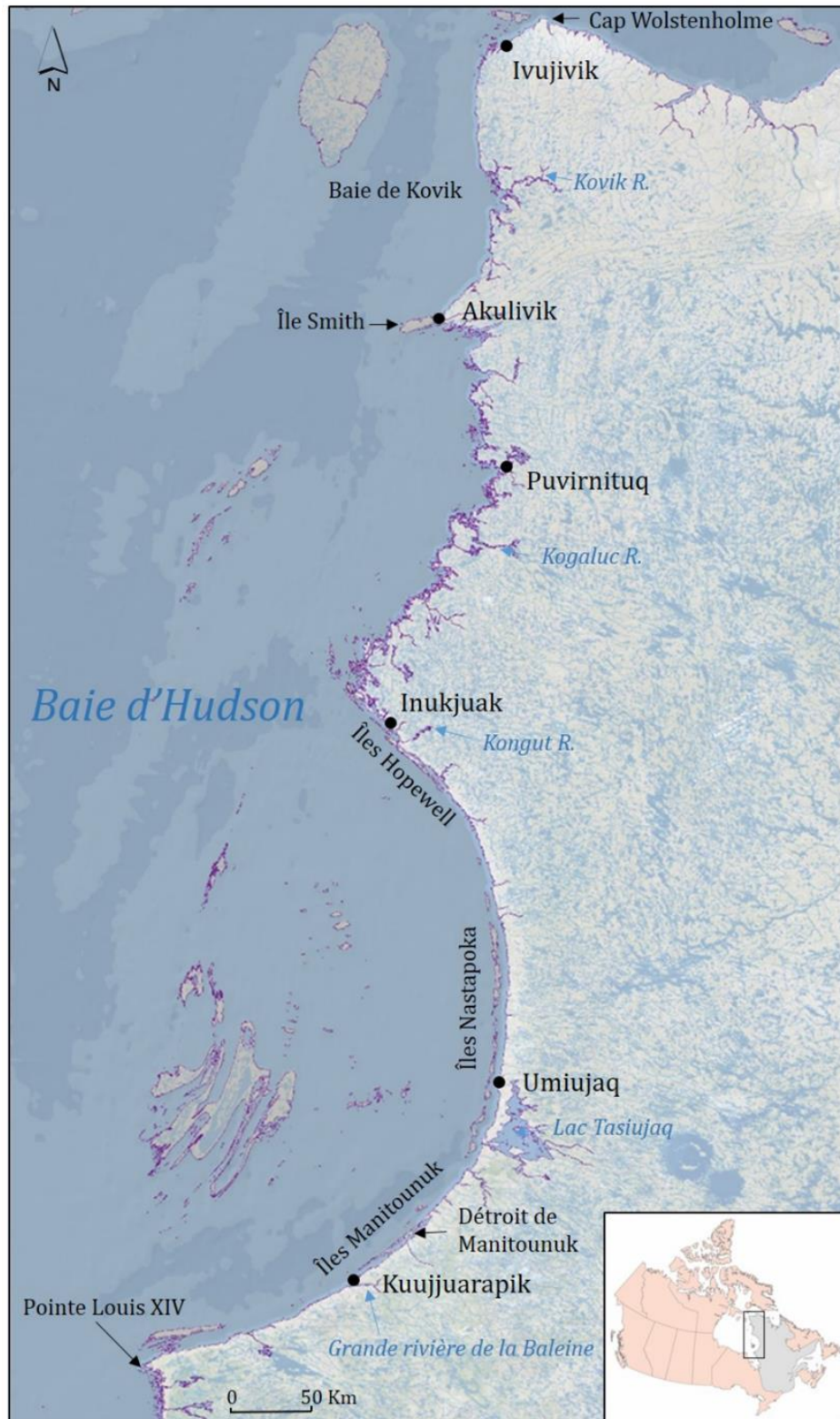


Figure 53 : La côte est de la baie d'Hudson

Entre Kuujjuarapik et Umiujaq (≈ 270 km)



Figure 54 : A) Flèche sableuse en progradation à Kuujjuarapik. B) Marais et microfalaise en érosion dans le détroit de Manitounuk. C) Un relief de cuesta. D) Plages de poche entrecoupées par des affleurements rocheux.

Entre Umiujaq et Inukjuak (≈ 460 km)



Figure 55 : A) Microfalaise en érosion à Umiujaq. B) Plage sableuse en progradation et petit système dunaire. C) Embouchure de la rivière Kongut. D) Plages à sédiments mixtes et à galets protégées par les îles Hopewell.

Entre Inukjuak et Puvirnituk (≈ 1070 km)



Figure 56 : A) Plage sableuse et infrastructure maritime à Inukjuak. B) Plage sableuse entrecoupée par des affleurements rocheux. C) Plages à sédiments mixtes et à galets. D) Côte basse rocheuse en émerision.

Entre Puvirnituk et Akulivik (≈ 300 km)



Figure 57 : A) Plages à sédiments mixtes et à galets. En arrière plage, des dizaines de lacs. B) Littoral labyrinthique avec des moraines de De Geer. C) Lagon en formation. D) Aux abords de la ceinture du Cap Smith.

Entre Akulivik et Ivujivik (≈ 630 km)



Figure 58 : A) Large plage sableuse et système dunaire en progradation. B) Reliques de reliefs fluvioglaciaires (eskers) formant des flèches littorales. C) Moraines de De Geer dans la baie de Kovik. D) Plages de blocs rocheux et de galets au nord de la baie de Kovik.

3.4.2.2 LA CÔTE SUD DU DÉTROIT D'HUDSON



Figure 59 : La côte sud du détroit d'Hudson

Entre Ivujivik et Salluit (≈ 330 km)

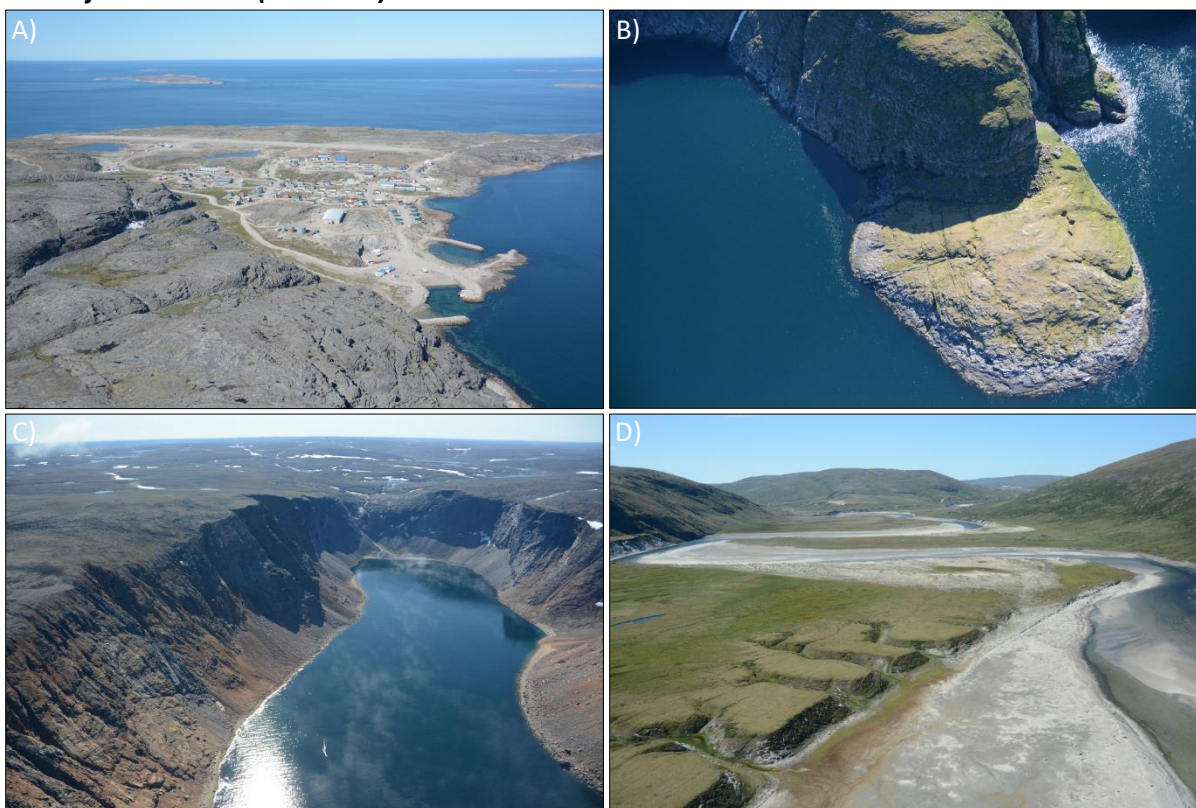


Figure 60 : A) Ivujivik : un village construit sur le roc. B) Le Cap Wolstenholme : le point le plus au nord du Québec. C) Fjords et éboulis. D) Embouchure de la rivière Guichaud.

Entre Salluit et Kangiqsujuaq (≈ 650 km)



Figure 61 : A) Enrochements de fortune à Salluit. B) Baie Déception et ses infrastructures portuaires. C) Fjords et éboulis. D) Longue plage sableuse près du Cap de la Nouvelle France.

Entre Kangiqsujuaq et Quaqtuaq (≈ 780 km)



Figure 62 : A) Hauts promontoires rocheux. B) Coulées de gélifluxion. C) Rampe rocheuse exposée à de fortes houles. D) Plages soulevées dans le fond des fjords.

3.4.2.3 LA CÔTE DE LA BAIE D'UNGAVA

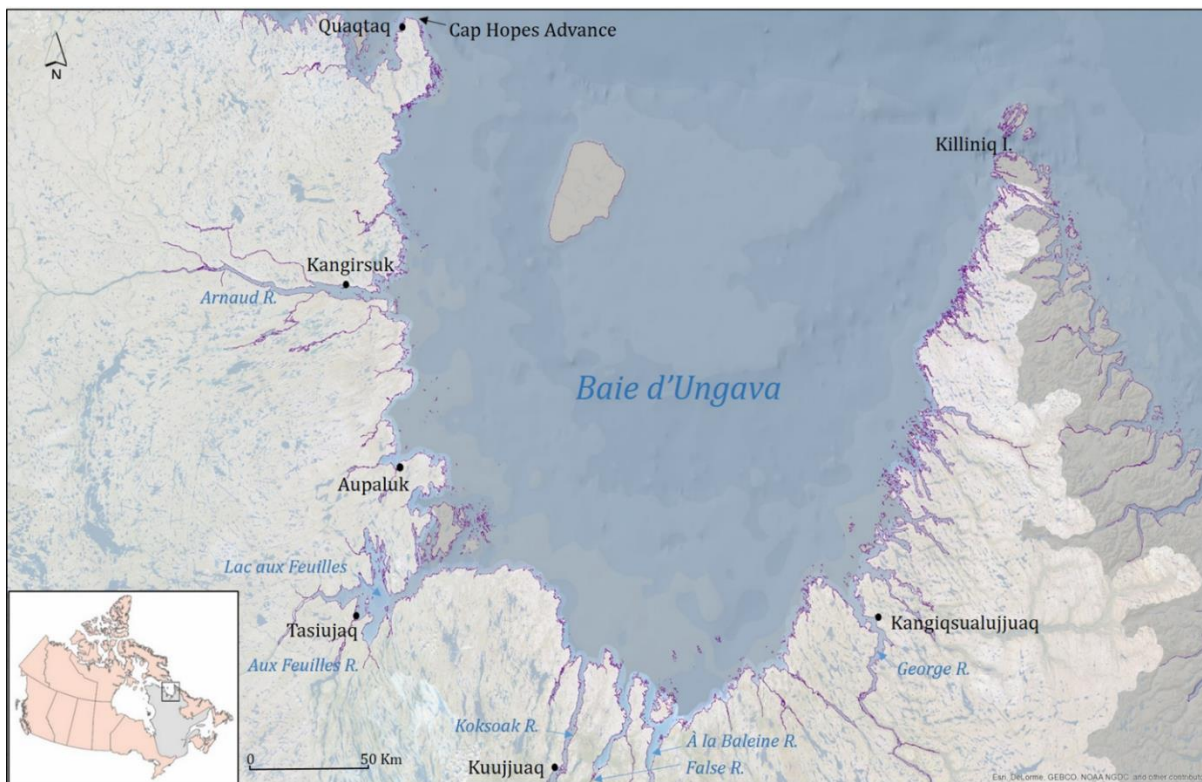


Figure 63 : La côte de la baie d'Ungava

Entre Quaqtaq et Kangirsuk (≈ 450 km)

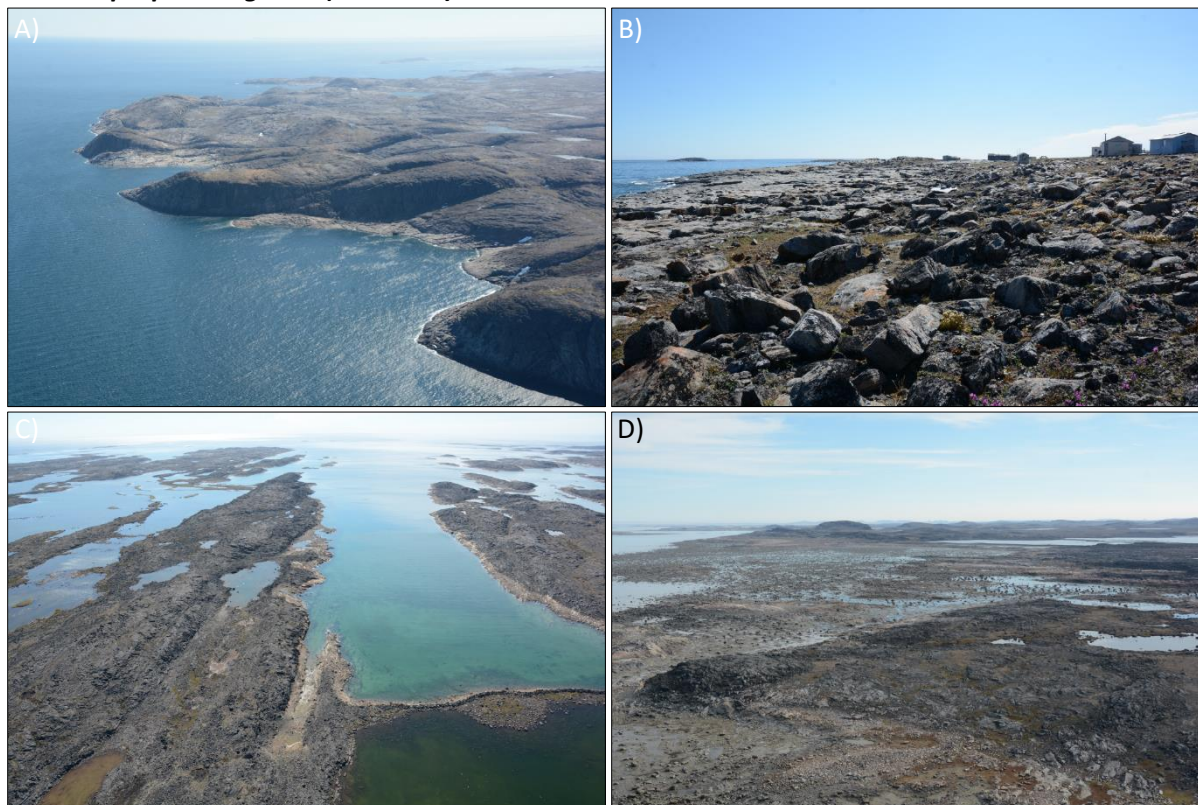


Figure 64 : A) Cap Hopes Advance. B) Rampe rocheuse et cabanes. C) Boulder barricade et rampe rocheuse. D) Large zone intertidale jonchée de blocs rocheux.

Entre Kangirsuk et Aupaluk (≈ 430 km)

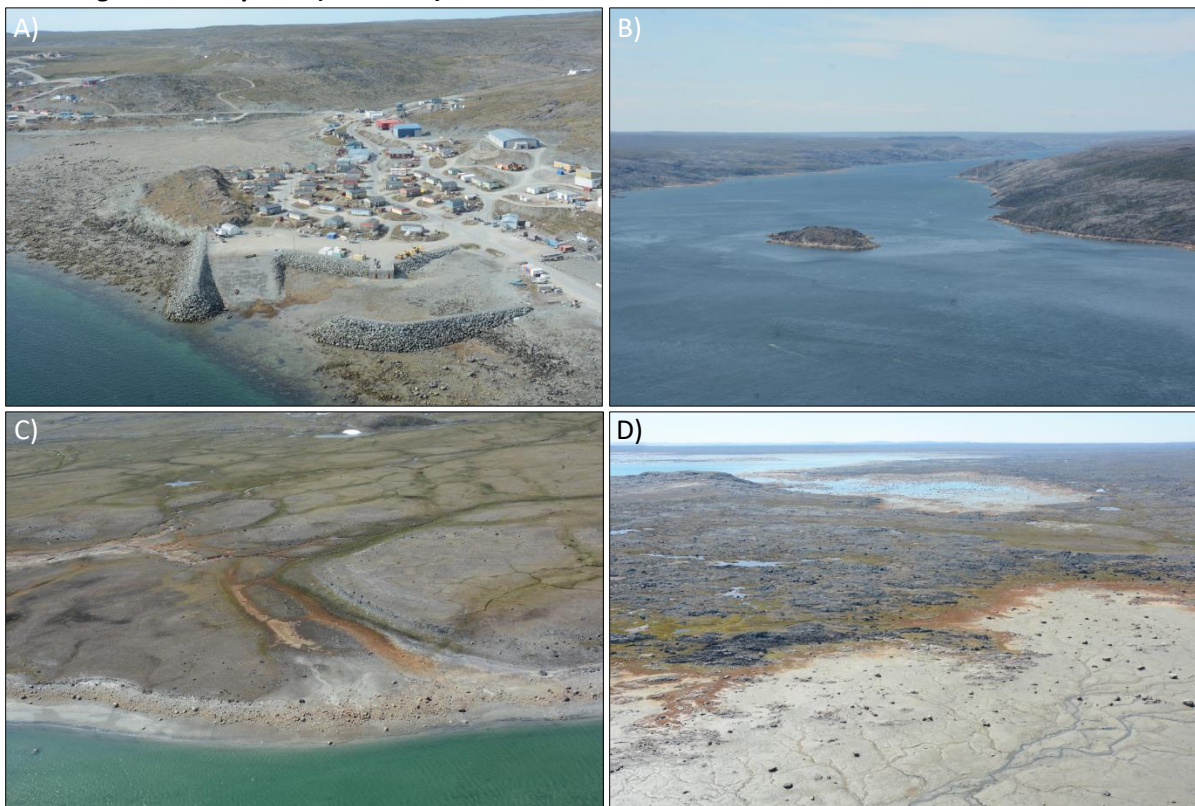


Figure 65 : A) Village de Kangirsuk et son infrastructure maritime. B) Estuaire de la rivière Arnaud. C) Polygones de toundra. D) Marais et côte basse rocheuse.

Entre Aupaluk et Tasiujaq (≈ 600 km)

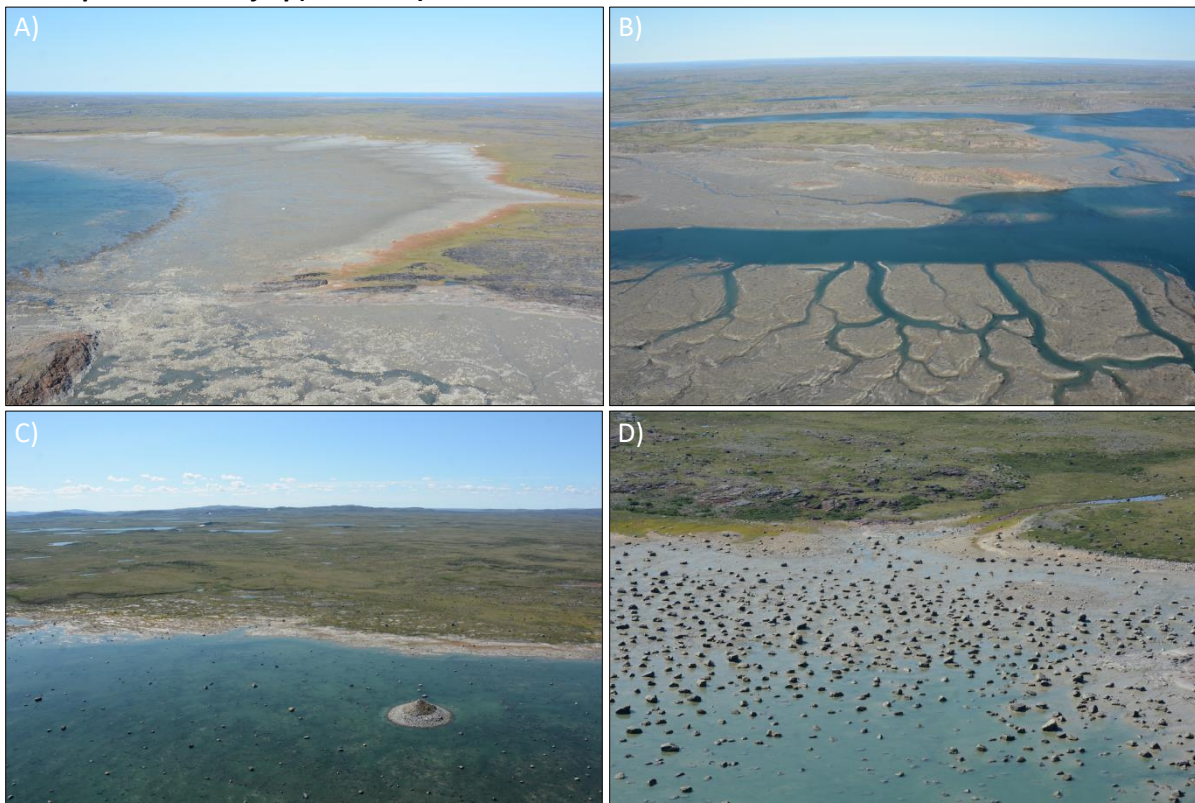


Figure 66 : A) Marais de la baie Ikattok. B) Marais dans le Lac aux Feuilles. C) Moulin de kame. D) Zone intertidale jonchée de blocs erratiques.

Entre Tasiujaq et Kuujjuaq (≈ 450 km)



Figure 67 : A) Route et infrastructure maritime à Tasiujaq. B) Marais en progradation. C) Structure géologique de la Fosse du Labrador. D) Rares plages de sédiments mixtes entrecoupées par des plateformes rocheuses

Entre Kuujjuaq et Kangiqsualujjuaq ($\approx 1\ 080$ km)

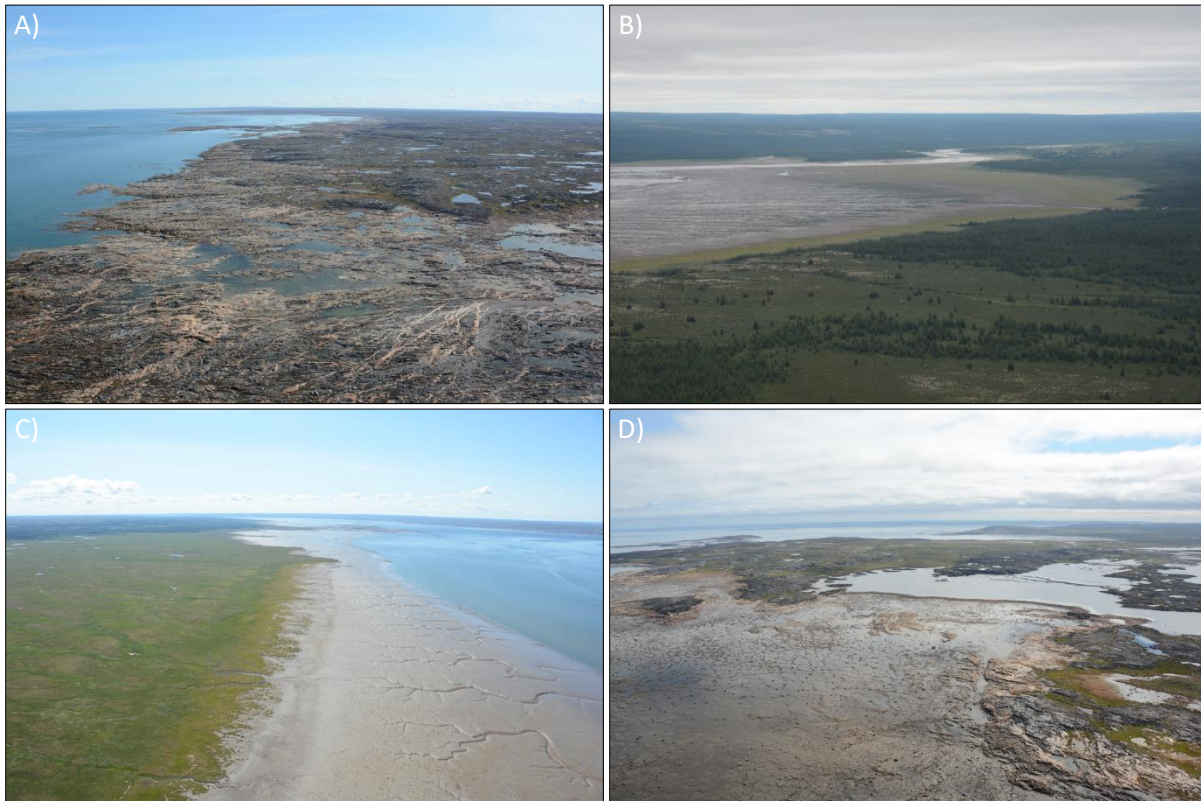


Figure 68 : A) Côte basse rocheuse à l'embouchure de la Koksoak. B) Marais dans l'estuaire de la Faise. C) Marais dans l'estuaire de la rivière à-la-Baleine. D) Boulder barricades.

3.4.3 CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES GÉNÉRALES

3.4.3.1 LA BAIE D'HUDSON

3.4.3.1.1 LES MARÉES ET COURANTS DE MARÉES

Les études concernant les caractéristiques du régime tidal de la baie d'Hudson ont été entreprises par Dohler (1966) (Figure 69) et Freeman et Murty (1976) (Figure 70). Pour la quasi-totalité des côtes de la baie d'Hudson, Dohler (1966) (Figure 69) détermina un régime de type semi-diurne, soit une double périodicité, bimensuelle (cycle de morte-eau/vive-eau) et bi-journalière (cycle de pleine mer/basse mer). Toutefois, les données marégraphiques des stations entre Akulivik et Inukjuak présentent un régime mixte, surtout semi-diurne (Dohler, 1966 ; Pêches et Océans Canada, 2016) (Figure 69). Ces marées sont caractérisées par deux pleines mers et deux basses mers d'amplitudes inégales et à intervalles irréguliers, atteignant leurs plus grandes valeurs après la déclinaison maximale de la lune. Freeman et Murphy (1976) ont créé un modèle numérique des marées pour l'ensemble de la baie d'Hudson, en y produisant les lignes cotidales et les points amphidromiques. Par définition, la marée haute est atteinte au même moment à chaque endroit le long d'une ligne cotidale. Ces lignes se rejoignent vers un point amphidromique, lequel est caractérisé par une amplitude de la marée qui est nulle et se déplace progressivement dans le sens antihoraire. La composante de marée M_2 (période de 12,42 h) indique deux points amphidromiques dans la baie d'Hudson (Dohler, 1966 ; Freeman et Murty, 1976 ; Prinsenberget et Freeman, 1986 ; Saucier *et al.*, 2004) (Figure 70). Le littoral entre Inukjuak et Akulivik se trouve à proximité d'un point amphidromique; il en résulte un marnage microtidal (Tableau 9). Le régime hydrodynamique de la côte orientale de la baie d'Hudson est très faiblement influencé par la marée. En raison de sa morphologie, de sa faible profondeur et de certains paramètres physiques, l'amplitude des marées y est faible. Les villages d'Akulivik, de Puvirnituk (*North Kopak Island*) et d'Inukjuak ont un marnage de type microtidal (< 2m), et plus au sud, les îles Gillies (en face d'Umiujaq) et Bélanger indiquent respectivement 1,5 et 1,8 m (Tableau 9). Le marégraphe de Kuujuarapik révèle une amplitude moyenne de 1,43 m et un marnage maximal de 2 m (Pêches et Océans Canada, 2016) (Tableau 9).

Dans les eaux peu profondes de la baie d'Hudson, les courants circulent suivant une gyre dirigée dans le sens antihoraire (Hachey, 1935) (Figure 71) influencée par les vents et par le ruissellement continental (apports d'eau douce par les fleuves et rivières et la fonte des glaces au printemps et en été) ; le courant principal s'écoule ensuite le long de la rive sud du détroit d'Hudson jusqu'à rejoindre le courant du Labrador dans l'Atlantique (Prinsenberget, 1986 (Figure 72); Wang *et al.*, 1994 ; Ingram et Prinsenberget, 1998). En utilisant des bouées dérivantes, Hachey (1935) fut le premier à identifier cette circulation de sens antihoraire. La circulation cyclonique des masses d'eau dans la baie d'Hudson dépend principalement des entrées et des sorties d'eau (le bassin de Foxe par les détroits de Fury et de Hecla, et le détroit d'Hudson). Les masses d'eau sont formées par la rencontre des eaux de la mer du Labrador (eaux atlantiques), les eaux arctiques et les eaux superficielles de la baie d'Hudson. Les vents, les apports d'eau douce par le bassin versant (contribuant à la formation d'un courant quasi-constant) et la marée semi-diurne (qui pénètre par le détroit d'Hudson) sont autant de contraintes qui forcent le régime de circulation antihoraire de la baie (Ingram et Prinsenberget, 1998).

Des fleuves importants alimentent la baie d'Hudson : Nastapoka, Grande-Rivière-de-la Baleine, Moose, Nelson, Churchill. L'eau douce circule le long des côtes de la baie d'Hudson mais est régulièrement transportée vers le centre. Cette circulation générale des masses d'eau est soumise à une variabilité saisonnière importante liée aux vents, aux variations des débits d'eau douce au printemps et en été, ainsi qu'à la formation du couvert de glace en hiver (Granskog *et al.*, 2011). Il est opportun de noter que la présence et la formation d'une couverture de glace peut altérer le régime des courants de marée (Saucier *et al.*, 2004), en diminuant l'amplitude et en provoquant un avancement de la phase de la marée (Godin, 1986). La variabilité saisonnière des marées n'est donc pas négligeable, avec des changements particulièrement marqués au printemps (Prinsenberget, 1982 ; Saucier *et al.*, 2004), lorsque l'effet de la fonte des glaces s'ajoute à celui de l'augmentation du débit d'eau douce des rivières.

Si le régime des glaces est assez bien documenté (Markham, 1986 ; Garde côtière canadienne, 2012), sa circulation dans la baie est en revanche assez peu connue. Les vitesses moyennes de déplacement des glaces estimées par différents auteurs (Wang *et al.*, 1994 ; Saucier *et al.*, 2004) sont très variables. De même, la variabilité spatiale, comme la présence de polynies le long des côtes et l'accumulation de glace dans le sud-est de la baie, sont des phénomènes encore peu étudiés. Le long de la côte orientale de la baie d'Hudson, les courants de marée sont généralement faibles (en moyenne : 0,04 m/s). En automne, les vents forts induisent des vitesses plus élevées. Au printemps, du fait de la couverture quasi-complète de la glace de mer dans la baie, les courants sont considérablement réduits.

Relativement peu de programmes océanographiques ont été entrepris dans la baie d'Hudson. La couverture de glace saisonnière empêche la plupart des travaux de recherche, et la faible profondeur des eaux côtières augmente la difficulté d'accès pour les sondages bathymétriques et hydrodynamiques. Par conséquent, en dehors de la période d'eau libre, les données des houles et des courants marins sont clairsemées spatialement et temporellement, ou ne sont pas bien connues.

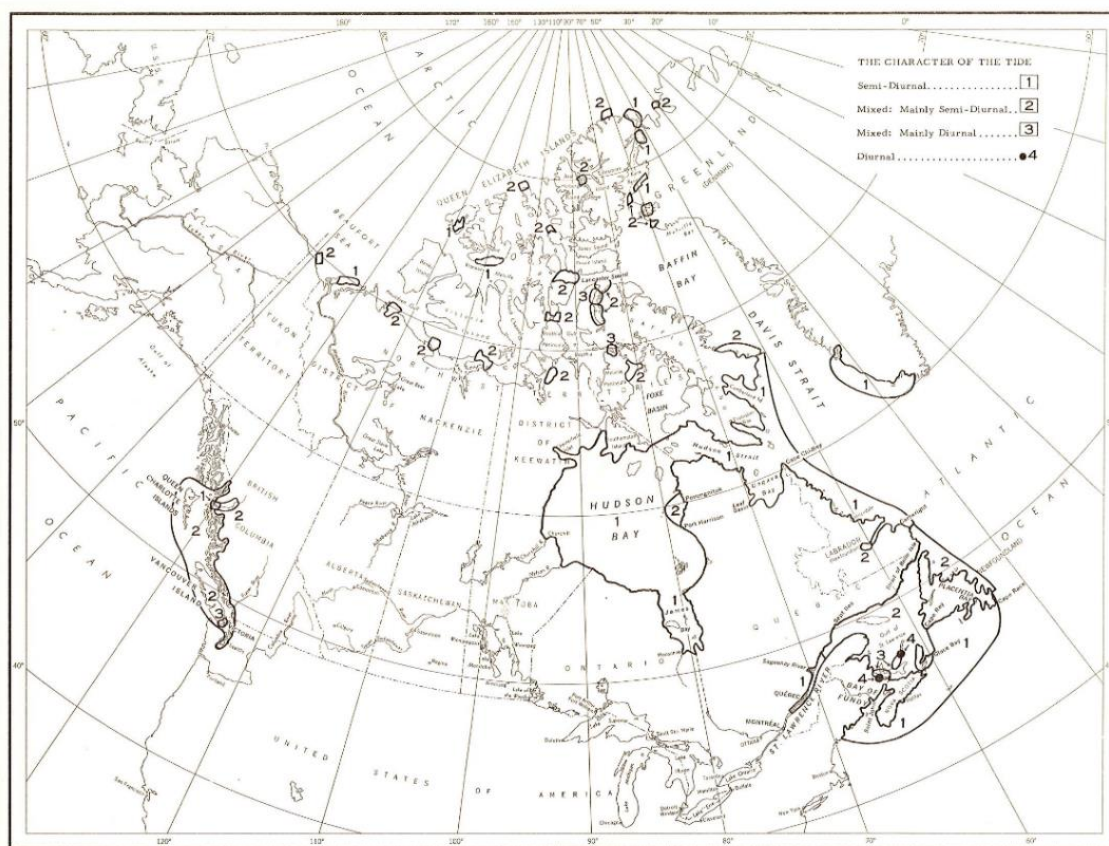


Figure 69 : Carte des caractéristiques des marées au Canada (Dohler, 1966).

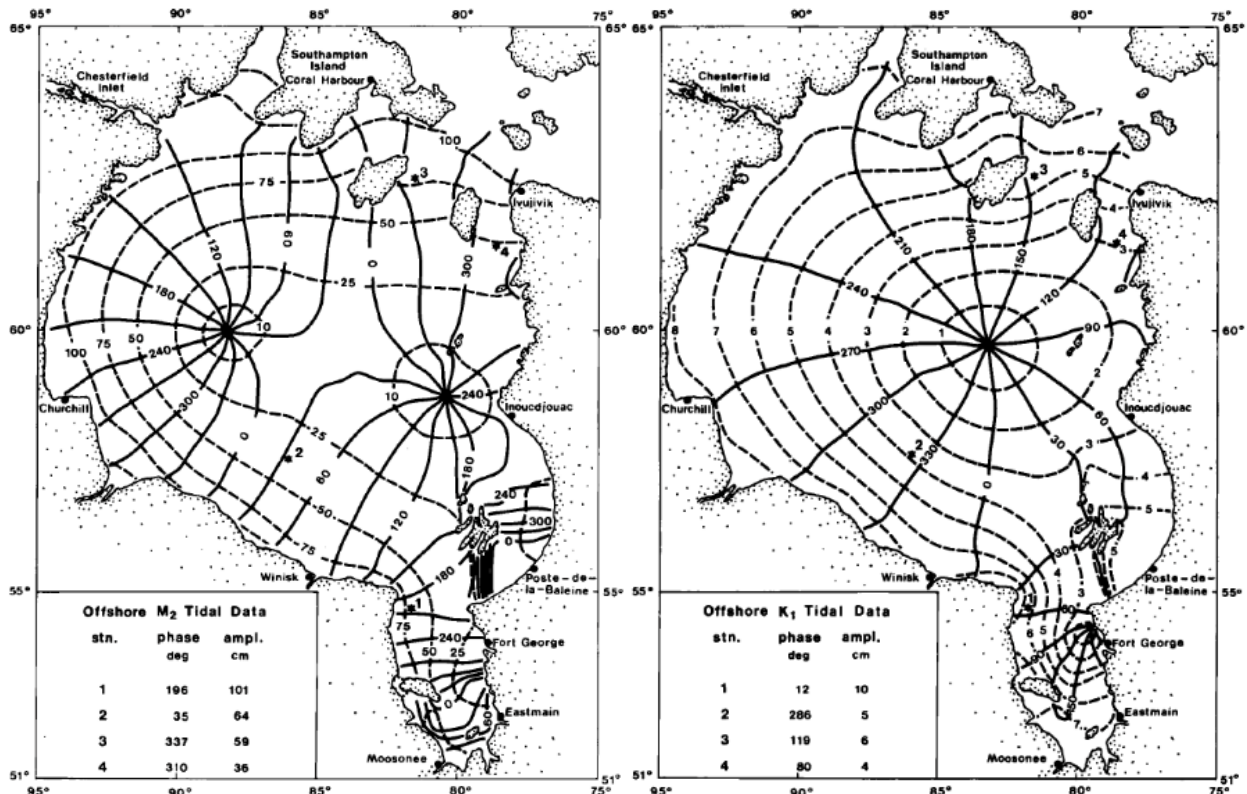


Figure 70 : Les ondes de marées M₂ (composante lunaire semi-diurne) et K₁ (composante lunaire diurne) dans la baie d'Hudson, d'après Freeman et Murty (1976), modifié par Prinsenber et Freeman (1986).

Tableau 9 : Marnages maximaux des stations marégraphiques le long de la côte orientale de la baie d'Hudson (Pêches et Océans Canada, 2016).

Marégraphie	Marnage maximal	Marégraphie	Marnage maximal
Akulivik	0,5	Gillies Island	1,5
North Kopak Island	0,5	Belanger Island	1,8
Inukjuak	0,4	Kuujuarapik	2

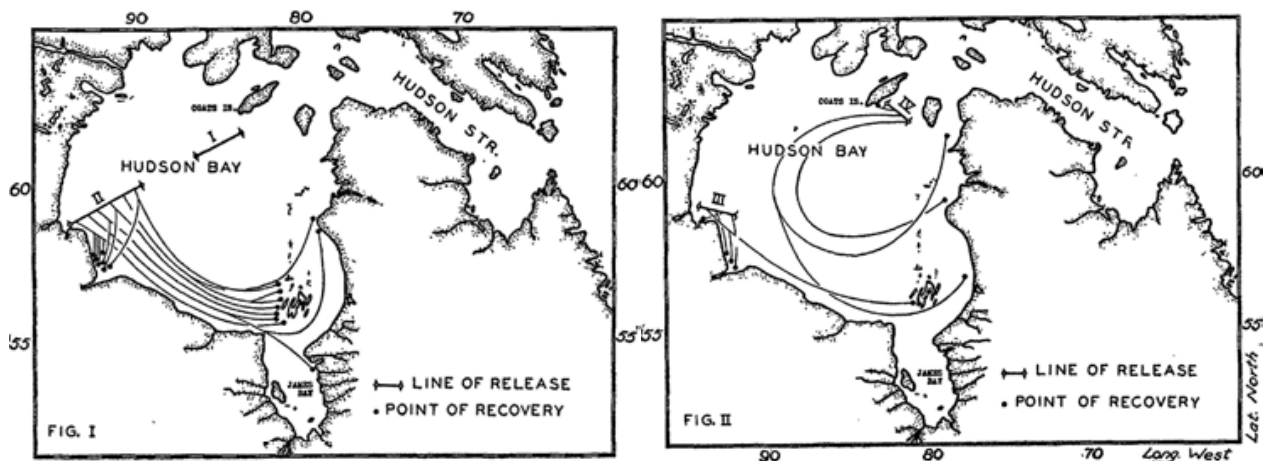


Figure 71 : Circulation cyclonique des eaux de surface déterminée par des bouées dérivantes (Hachey, 1935).

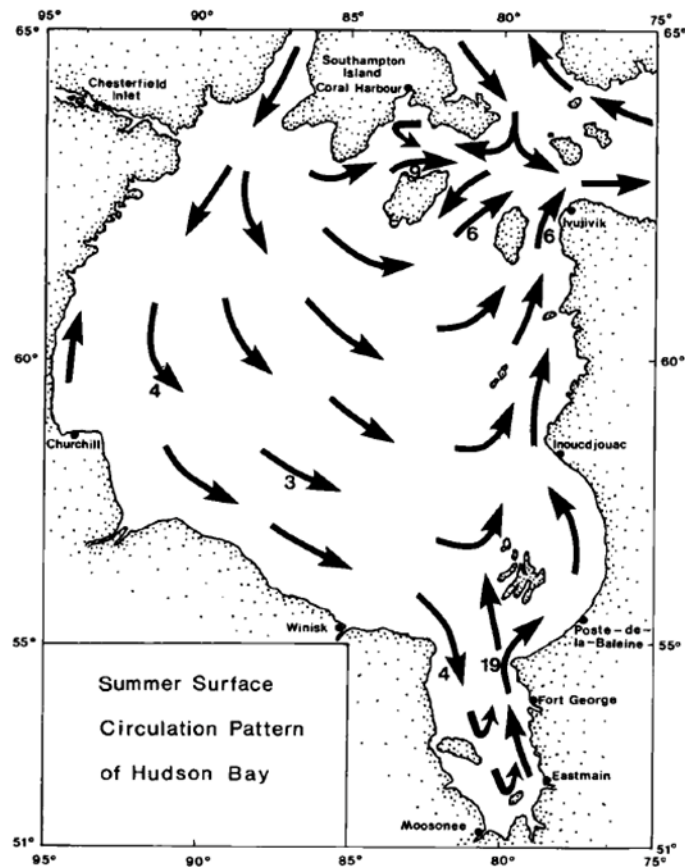


Figure 72 : Schéma de la circulation des eaux de surface en été pour la baie d'Hudson (Prinsenber, 1986)

3.4.3.1.2 LES HOULES

Les données publiées sur les houles sont fragmentaires dans le temps et l'espace, mais les observations de Maxwell (1986), suggèrent que la hauteur moyenne des houles varie entre 1,1 et 1,5 m avec une période moyenne de 5 à 6 secondes. Sur une plage de Kuujuarapik, Héquette et Tremblay (2009) ont déterminés des hauteurs moyennes de 0,7 m en été (allant de 0,1 à 1,8 m) et de 0,8 m en automne (allant de 0,3 à 1,6 m) avec respectivement des périodes moyennes de 4,1 et 4,7 s. Allard *et al.* (1998) avaient déjà remarqués des houles automnales supérieures à 1 m dans le détroit de Manitounuk. Aussi, des hauteurs significatives de houle en condition de tempête ont été mesurées par Hill *et al.* (2003) dans le delta de la Grande-Rivière-de-la-Baleine. Pendant près de 15 heures, les houles ont atteint près de 3 m, entraînant une surcote de 1 m de hauteur. Selon les travaux de Massé et Villeneuve (2013) et Savard *et al.* (2014), les surcotes observées sur la côte nord-est de la baie d'Hudson sont majoritairement causées par des tempêtes produisant de forts vents du nord persistants dans la baie d'Hudson et, dans une moindre mesure, par des diminutions de la pression atmosphérique.

Appartenant au Nunavut (Nunavut Act S.C, 1993), les chapelets d'îles (Manitounuk, Nastapoka, Hopewell) entre Kuujuarapik et Inukjuak, les *skjärs* (petites îles rocheuses situées à moins de 5 km du rivage) entre Inukjuak et Puvirnituk, l'île Smith qui fait face à Akulivik ou les moraines de De Geer en émergence dans la baie de Kovik, sont autant d'entités géomorphologiques qui permettent d'atténuer l'énergie des houles sur la côte québécoise. Par conséquent, ces littoraux du Nunavik sont davantage « protégés » contre l'érosion côtière car le fetch y est limité. Par contre, les littoraux ouverts sur la baie d'Hudson et non protégés par ces îles ont un fetch très important (plusieurs centaines de kilomètres) qui les expose à de plus fortes vagues. Par définition, le fetch correspond à la distance sur laquelle souffle le vent, qui va influencer la formation des vagues, l'orientation et la force de la dérive littorale ainsi que la morphologie de certaines formes le long du rivage.

Sur cette façade maritime, plusieurs périodes d'agitation se distinguent au cours de l'année et sont commandées par la présence ou non du couvert de glace, lequel est présent en moyenne pendant sept mois. Ce dernier a un effet d'amortissement sur les houles, de sorte que l'érosion est arrêtée en hiver. En été, lorsque la glace de mer diminue ou disparaît complètement, l'action des houles reprend, conduisant à une augmentation de l'érosion de la côte. Toutefois, ce sont les deux ou trois dernières tempêtes automnales qui commandent 80-90 % des changements côtiers (Wolfe *et al.*, 1998). Les villages de la côte orientale de la baie d'Hudson sont sujets à une « saison des tempêtes » qui correspond généralement à la saison pendant laquelle la baie est libre de glaces (Savard *et al.*, 2014). Les tempêtes qui sont souvent le principal moteur de l'érosion, se produisent tout au long de l'année, mais leurs impacts sont limités en raison de la présence de la glace de mer et du pied de glace. Même pendant la période estivale, des morceaux de glace de mer de quantités et de tailles diverses peuvent entraver le développement des vagues en milieu proche littoral. Dans un contexte de réchauffement climatique, l'allongement de la période d'eau libre, consécutif à la diminution de l'étendue de la glace de mer, va induire des changements dans la longueur du fetch et permettre une augmentation et une intensification des événements tempétueux en été mais surtout en automne (Jones *et al.*, 2009) en provoquant de fortes surcotes (Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014).

3.4.3.2 LE DÉTROIT D'HUDSON ET LA BAIE D'UNGAVA

3.4.3.2.1 LES MARÉES ET COURANTS DE MARÉES

Les études concernant les caractéristiques du régime tidal de la baie d'Ungava et du détroit d'Hudson ont été entreprises par Dohler (1966) puis intégrées dans des modèles numériques par Easton (1972), Godin (1980), Chandler *et al.* (1985), Arbic *et al.* (2007) et Cummins *et al.* (2010). Le régime hydrodynamique du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava est fortement influencé par la marée. La baie d'Ungava connaît de très grandes marées dont les amplitudes sont semblables, voire supérieures à la baie de Fundy dans les Maritimes ou celle du Mont Saint-Michel en France (O'Reilly *et al.*, 2005 ; Pêches et Océans Canada, 2016). L'intégralité de la baie bénéficie d'un marnage de type macrotidal (> 4m) voire hypertidal (> 6m) (Archer, 2013). Comparé aux environnements micro-, méso- et macrotidaux, les systèmes hypertidaux sont extrêmement rares. La marée est sans conteste l'un des processus les plus importants sinon le plus singulier dans l'hydrodynamique des environnements macro- et hypertidaux. La notion de régime hypertidal est liée à un marnage moyen qui est supérieur à 6 m.

Le marnage atteint un maximum de 16,7 m au Lac-aux-Feuilles (Pêches et Océans Canada, 2016) (Tableau 10). Il diminue de part et d'autre de cet estuaire, mais reste supérieur à 10 m entre Quaqtq et Kangiqsualujuaq. Situé à 53 km en amont de l'embouchure de l'estuaire de la rivière Koksoak, le village de Kuujuaq connaît un marnage maximal de 6,2 m. Au nord-est de la baie, Port Burwell (île de Killiniq, Nunavut) a un marnage en vive eau de 6,9 m (Tableau 10). La forme d'entonnoir de la baie d'Ungava contribue à accroître les marées semi-diurnes vers le sud-ouest jusqu'au Lac-aux-Feuilles (Drinkwater, 1986 ; Archer et Hubbard, 2003). Il est à noter que l'intégralité de la baie d'Ungava se caractérise par un régime de type semi-diurne (Dohler, 1966). Aussi, l'amplitude des marées a pour effet de briser continuellement le couvert de glace qui se forme dès la fin du mois d'octobre. Dans la partie sud de la baie, ces marnages donnent naissance à de larges estrans.

Comparativement à la baie d'Ungava, l'amplitude des marées dans le détroit d'Hudson est plus faible et diminue rapidement vers la baie d'Hudson. On passe alors d'un milieu hypertidal à Kangiqsuaq, à un milieu macrotidal à Douglas Harbour, et même jusqu'à un environnement mésotidal entre la baie Déception et Digges Harbour (Pêches et Océans Canada, 2016) (Tableau 10).

Les caractéristiques océanographiques majeures du détroit d'Hudson et dans une moindre mesure de la baie d'Ungava ont été analysées et résumées par Drinkwater (1986) et Vilks *et al.* (1989). Ce système (détroit d'Hudson et baie d'Ungava) est influencé par plusieurs entrées d'eau principales et par de forts courants de marée (Figure 73). Les eaux peu salées provenant de la baie d'Hudson et du bassin de Foxe entrent par le détroit d'Hudson et circulent vers la baie d'Ungava, alors que les eaux salées de la mer du Labrador entrent par l'est de la baie d'Ungava et circulent vers l'ouest le long de la rive nord du détroit

d'Hudson (Drinkwater, 1986). Aussi, la circulation des eaux de surface dans la baie d'Ungava se fait dans un sens antihoraire. L'onde de marée semi-diurne venant de la mer du Labrador se propage vers le détroit d'Hudson où elle s'amplifie à cause de la configuration des lieux. En effet, il existe une résonance de la marée semi-diurne dans le système baie d'Hudson – détroit d'Hudson (Drinkwater, 1986). Cela entraîne une amplification des ondes, et il en résulte un marnage conséquent. La résonance est donc particulièrement forte dans le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava (Drinkwater, 1986 ; Arbic *et al.*, 2007 ; Cummins *et al.*, 2010). La marée engendre alors des courants alternatifs particulièrement forts autour des caps, des fjords, des détroits et dans les estuaires (Drinkwater, 1986) (Figure 73). Ces courants augmentent grandement les risques pour la navigation. Certains sites de la baie d'Ungava ont d'ailleurs été prospectés pour l'exploitation de l'énergie des marées (CHC, 2006). Le tableau 11 montre que les vitesses maximales du courant de jusant sont considérables et supérieures à celles du courant de flot. Aussi, selon Messier (1985), la durée du jusant à Kuujuaq est supérieure à celle du flot d'environ quatre heures. La baie d'Ungava et ses tributaires constituent un écosystème estuarien très dynamique qui n'a pas d'équivalent dans l'Arctique (Allard et Lemay, 2013).

Tableau 10 : Marnages maximaux et moyens des stations marégraphiques de la baie d'Ungava et du détroit d'Hudson (Pêches et Océans Canada, 2016). * hypertidal ; ** macrotidal ; *** mésotidal.

Baie d'Ungava			Détroit d'Hudson		
Marégraphe	Marnage maximal	Marnage moyen	Marégraphe	Marnage maximal	Marnage moyen
Port Burwell	6,9	4,5**	Kangiqsujuaq	8,6	6,1*
Kangiqsualujuaq	13,2	8,5*	Douglas Harbour	8,5	5,5**
Rivière Koksoak	13,3	8,7*	Deception Bay	5,7	3,6***
Kuujuaq	6,2	4,6**	Salluit	5,3	3,3***
Lac-aux-Feuilles	16,7	11*	Digges Harbour	3,4	2,2***
Hopes Advance Bay	12,8	8,3*			
Agvik Island	11,4	7,5*			
Quaqtaq	10	6,3*			

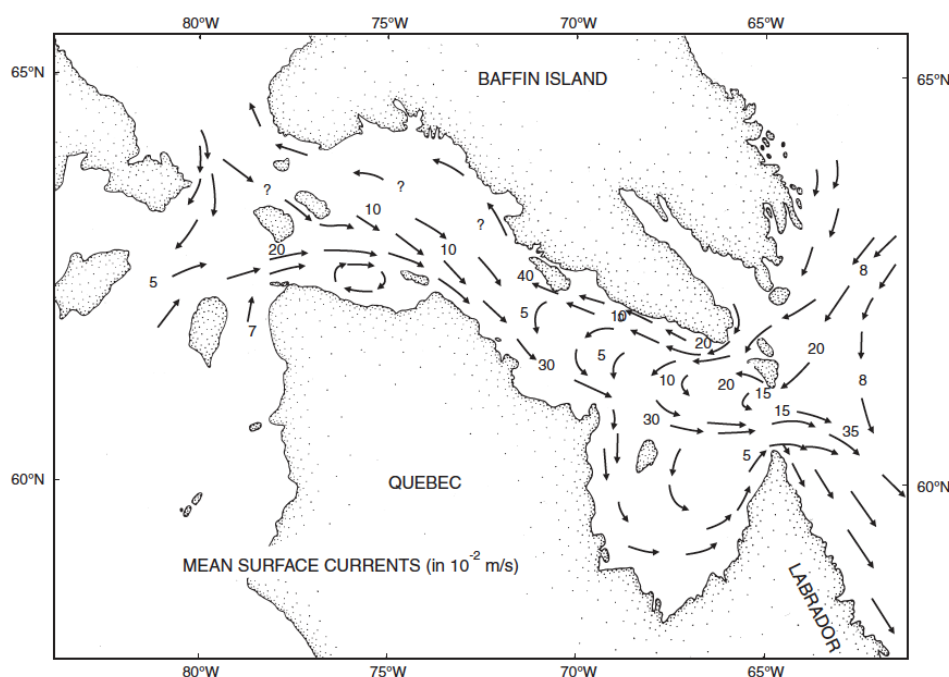


Figure 73 : Circulation des eaux de surface dans la baie d'Ungava et le détroit d'Hudson (Drinkwater, 1986).

Tableau 11 : Vitesses maximales des courants de flot et de jusant en baie d’Ungava (CHC, 2006).

Site	Vitesse maximale du courant de flot (nœuds)	Vitesse maximale du courant de jusant (nœuds)
Baie Hopes Advance (proche d’Aupaluk)	12	23,3
Embouchure de la rivière Arnaud (proche de Kangirsuk)	9	17,5
Embouchure de la rivière George (proche de Kangiqsualujjuaq)	8	15,5
Embouchure de la rivière Koksoak (proche de Kuujjuaq)	6	11,6

3.4.3.2 LES HOULES

Il est important de noter qu’aucune mesure de houle pour la baie d’Ungava n’est recensée dans la littérature scientifique. On peut néanmoins estimer que la baie d’Ungava est dominée d’une certaine façon par les houles. En effet, les environnements macro- et hypertidaux de la baie de Fundy et le Nord-Ouest de la France se caractérisent par des entités géomorphologiques principalement basées et dominées par les houles.

Comme pour la baie d’Hudson, certains reliefs situés plus au large — skjärs, îlots, îles — ainsi que de larges estrans, permettent d’atténuer l’énergie des houles et de « limiter » l’érosion sur la côte québécoise. Toutefois, le fetch est relativement important en baie d’Ungava.

Dans le détroit d’Hudson, les houles sont engendrées par des vents dominants de secteurs SO et NE. Pour la baie Déception, la hauteur moyenne des houles est de 0,8 m avec une période généralement inférieure à 7 s (GENIVAR, 2012). Des périodes de basses pressions atmosphériques accompagnées de vents persistants des secteurs nord à sud-ouest peuvent provoquer une surélévation du niveau d’eau de près d’un mètre de hauteur. Selon Massé et Villeneuve (2013), le principal facteur responsable des surcotes dans le détroit d’Hudson est la variabilité de la pression atmosphérique.

3.4.4 LA GLACE DE MER, UN FORÇAGE HYDRODYNAMIQUE MAJEUR

Les houles et les marées sont communément les deux principaux forçages hydrodynamiques qui commandent les littoraux. Toutefois, pour les régions arctiques et subarctiques, il est opportun d’évoquer le rôle majeur de la glace de mer. Dictée par les mouvements des houles et des marées, la glace de mer constitue un forçage hydrodynamique en tant que tel, et ses différents effets aussi bien positifs que négatifs sur la stabilité de la côte sont considérables. Accolée pendant 7 à 8 mois aux littoraux du Nunavik, la glace de mer permet d’entraver et de stopper le développement des houles. Par conséquent, l’érosion est arrêtée en hiver, mais au printemps et surtout à l’automne, les vents poussent la glace sur la côte (poussées glacielles), érodant la surface de la plage et de l’arrière-plage, y compris les dunes, et endommageant les infrastructures portuaires. Les mouvements des glaces sur la zone côtière peuvent alimenter ou éroder les plages. Des traces d’affouillement par les glaçons (*ice scouring*) soumis au va-et-vient de la marée, sont visibles sur la zone intertidale et subtidale (Héquette *et al.*, 1999 ; Hill *et al.*, 1999).

3.4.5 DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES...

3.4.5.1 VARIATIONS DU NIVEAU MARIN RELATIF JUSQU’À LA FIN DU XXI^E SIÈCLE AU NUNAVIK

L’évolution des côtes du Nunavik se manifeste actuellement par une tendance à l’aggradation (inverse de l’érosion) et à la progradation du trait de côte dans un contexte de fort relèvement glacio-isostatique qui contre l’accélération contemporaine de la remontée du niveau marin en lien avec les changements climatiques. Autrement dit, le littoral du Nunavik évolue sous l’influence d’une baisse du niveau marin relatif. En effet, selon James *et al.* (2014), les villages de Kuujuarapik, d’Inukjuak et de Kuujjuaq connaîtront une diminution du niveau marin jusqu’à la fin du XXI^e siècle au moins (Figure 74). À l’échelle mondiale, rares sont les côtes qui subissent encore un fort relèvement glacio-isostatique. Avec celles du

Golfe de Botnie (entre la Suède et la Finlande), les côtes du Nunavik sont affectées par un fort relèvement à des taux régionaux variables.

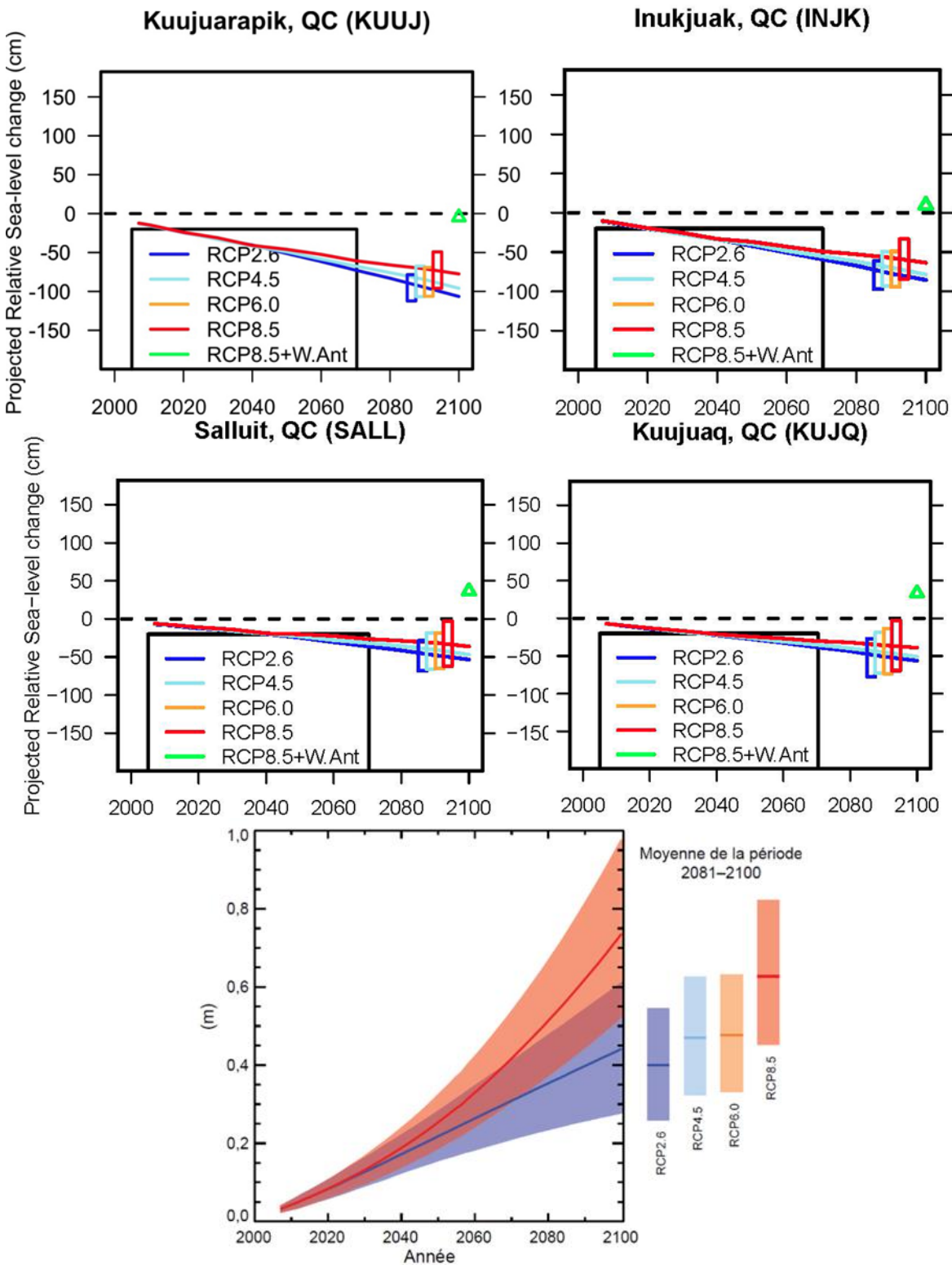


Figure 74 : Projections du niveau marin relatif pour quatre villages du Nunavik (James *et al.*, 2014).

3.4.5.2 LES IMPACTS SUR LA GÉOMORPHOLOGIE LITTORALE

3.4.5.2.1 LES MARAIS

Les marais sont vastes et quasi-omniprésents en baie d'Ungava alors qu'ils se font beaucoup plus rares en baie d'Hudson. Majoritairement observés sur les rives des estuaires à fort marnage (ex. Aux-Feuilles, False, à-la-Baleine, George) ou dans des milieux abrités (ex. détroit de Manitounuk), les marais répondent rapidement à une multitude de facteurs environnementaux, lesquels conditionnent leurs évolutions. Ils sont jonchés de blocs rocheux (blocs glaciels) délestés par des radeaux de glace. On observe une migration des composantes du marais (slikke, schorre) vers la mer. On dit alors que les marais progrudent. Plusieurs entités géomorphologiques caractérisent certains marais du Nunavik comme : les marelles littorales (Fournier *et al.*, 1987) et les cordons de blocs glaciels (Matthews, 1968). Des *boulder barricades* soulevées sont également discernables en arrière plage, synonyme d'une régression du trait de côte. Ces barricades ont un rôle protecteur, en diminuant l'intensité des houles à la côte.

3.4.5.2.2 LES CÔTES SABLEUSES

De manière générale, les côtes sableuses et les formes littorales qui y sont associées (flèches, dunes, tombolos, deltas) sont en aggradation. La construction et l'évolution des flèches littorales et des systèmes dunaires sont liées aux conditions hydrodynamiques régionales (houles, dérives littorales) et à la disponibilité sédimentaire. Les côtes sableuses sont davantage présentes en baie d'Hudson que dans la baie d'Ungava. Dans le sud-est de la baie d'Hudson, de nombreux tombolos sont en formation et vont se raccrocher à des petites îles rocheuses qui appartiennent actuellement au Nunavut, déplaçant ainsi la frontière nordique du Québec.

3.4.5.2.3 LES CÔTES ROCHEUSES

Cuestas, fjords, côtes basses, fjards, *skjårs*, autant d'environnements rocheux qui caractérisent le littoral du Nunavik. Ces côtes subissent continuellement un démantèlement structural par l'érosion (gélifraction, vagues de tempête, poussées par les glaces flottantes) (Figure 75). Les photographies prises en 2015 et 2016 sont formelles ; sur les côtes rocheuses, la gélifraction associée au gel/dégel est importante. Attention, ce phénomène n'est pas nouveau ; il s'opère depuis le retrait de l'Inlandsis Laurentidien. Les affleurements rocheux sont quadrillés par la gélifraction et ces blocs sont sapés par les houles et la marée (Figure 75). Par ailleurs, de très nombreuses plages de blocs rocheux (*boulder beaches*) et des plages de cailloux/galets (*Pebble/Cobble Beaches*), constituent le littoral du Nunavik.



Figure 75 : Fort démantèlement structural par la gélifraction.

3.4.6 LES RISQUES CÔTIERS AU NUNAVIK

Les risques associés aux aléas qui peuvent toucher le littoral du Nunavik sont quasi exclusivement concentrés là où sont localisées les populations et les infrastructures vulnérables, c'est-à-dire aux abords des quatorze villages Inuits. La vulnérabilité s'accroît en raison de la combinaison de dynamiques « naturelles » (modifiées par le réchauffement climatique qui s'opère depuis 1993) et sociales complexes. En effet, depuis la fin du nomadisme, les Inuits sont établis dans des villages situés le long du littoral, à l'embouchure des rivières ou des estuaires. Toutefois, certains aléas rencontrés en milieu côtier (tempêtes, surcotes, décotes, dynamiques glacielles, glissements de terrain en zone littorale) pourraient avoir des impacts sur les infrastructures maritimes, domestiques ou économiques, mais également pourraient présenter un risque pour la navigation ou la pratique de certaines activités traditionnelles.

3.4.6.1 CÔTE EST DE LA BAIE D'HUDSON

Des études sur les glaces, les tempêtes, les vagues et les niveaux d'eau ont été réalisées pour les villages de la baie d'Hudson (Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014 ; Massé et Gallant, 2016). Les surcotes extrêmes en baie d'Hudson varient entre 1 m pour Ivujivik et 1,5 m pour Umiujaq (Massé et Gallant, 2016). Pour cette façade maritime, il faut également noter l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des décotes, c'est-à-dire des bas niveaux extrêmes (Massé et Gallant, 2016). En effet, les décotes seront plus fréquentes et intenses sur la façade orientale de la baie d'Hudson que le long de la côte sud du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava. D'ailleurs, elles devraient être suffisamment prises en compte dans la sélection d'un futur site pour un éventuel port en eau profonde. Elles auront plusieurs impacts : (i) diminution de la profondeur d'eau dans les bassins ; (ii) certains bateaux peuvent être endommagés ; (iii) ensablement à l'embouchure des grandes rivières (Ex. delta de la Grande-Rivière-de-la-Baleine), qui pourrait amener des futurs problèmes de dragage ; (iv) affouillement au pied des infrastructures maritimes.

À Kuujuarapik, une surcote extrême d'environ 1,4 m (Massé et Gallant, 2016), ne causerait pas de dommages sur la voirie et les habitations. L'extrémité de la flèche sableuse pourrait connaître quelques signes d'érosion. Par ailleurs, il faudrait une surcote de 4 m pour observer l'inondation de la piste d'atterrissage. Le village d'Umiujaq fait l'objet des surcotes les plus fortes pour la période 1979-2012 (Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014 ; Massé et Gallant, 2016). Une microfalaise d'érosion est d'ailleurs le témoin de ces événements passés. En cas d'une surcote extrême de 1,5 m (Massé et Gallant, 2016), ni la voirie, ni les habitations ne seraient affectées. Quelques cabanons en bois seraient inondés, ainsi que les lieux de stockage proche de l'infrastructure maritime. À Inukjuak, une surcote maximale a été calculé à 1,2 m (Massé et Gallant, 2016). Quelques maisons seraient alors inondées ainsi que les abords de l'infrastructure maritime et quelques sections de routes. À Puvirnituk, en cas d'une surcote extrême de 1,3 m (Massé et Gallant, 2016), les habitations ne seraient pas affectées. Seules quelques routes seraient inondées ainsi que les abords de l'infrastructure maritime. Toutefois, les habitations seraient vraiment proches (environ 10 mètres) de la zone balayée par une surcote. Évaluée à 1,2 m par Massé et Gallant (2016), une surcote extrême pourrait causer de nombreux dégâts dans le village d'Akulivik, qui est le plus vulnérable des villages face à cet aléa côtier. De nombreuses habitations et la voirie seraient affectées. La route vers le port serait inondée, ainsi qu'une dizaine de maisons (surtout au sud du village). La péninsule serait coupée en deux (la route vers l'aéroport serait inondée). Les débits des rivières pourraient même engendrer des conséquences plus importantes. Enfin, pour Ivujivik, en cas d'une surcote extrême de 1 m (Massé et Gallant, 2016), le secteur de la petite plage sableuse ne devrait pas être affecté. Deux cabanons situées près de la plage pourraient être, quant à eux, légèrement touchés tandis que les abords de l'infrastructure portuaire seront eux inondés.

3.4.6.2 CÔTE SUD DU DÉTROIT D'HUDSON

Quaqtaq et dans une moindre mesure Kangiqsujaq furent l'objet de nombreuses études antérieures sur les infrastructures maritimes, les glaces, les tempêtes, les vagues et les niveaux d'eau (Massé et Villeneuve, 2013 ; Savard *et al.*, 2014 ; Massé et Gallant, 2016). Le village de Salluit a toujours été exclu de ces études, pour une raison que nous ignorons. Le site de baie Déception est également bien documenté (GENIVAR, 2012). Selon Massé et Gallant (2016), les surcotes maximales pour les villages du détroit d'Hudson sont inférieures à 1 m.

À Salluit, le risque associé à une surcote est plus élevé (Figure 76). En cas d'une surcote extrême de 1 m, la première série d'habitations serait impactée, ainsi que la route menant au port. Des enrochements de fortune ont d'ailleurs été mis en place pour protéger les maisons les plus proches du littoral. Les habitations et autres infrastructures proches de l'embouchure de la petite rivière seraient également inondées.

À baie Déception, un glissement de terrain a emporté un port qui était construit sur des argiles marines fragiles. Une avalanche de neige humide a également eu lieu en mai 2005. À Kangiqsujaq, quelques infrastructures domiciliaires situées entre les deux petites rivières qui s'écoulent dans le village pourraient être atteintes par une surcote extrême de 1 m (Massé et Gallant, 2016). À Quaqtaq, le risque associé à une surcote est faible. Situées plus en altitude, les infrastructures sont en dehors de la zone balayée par une surcote extrême possible de 0,7 m (Massé et Gallant, 2016).

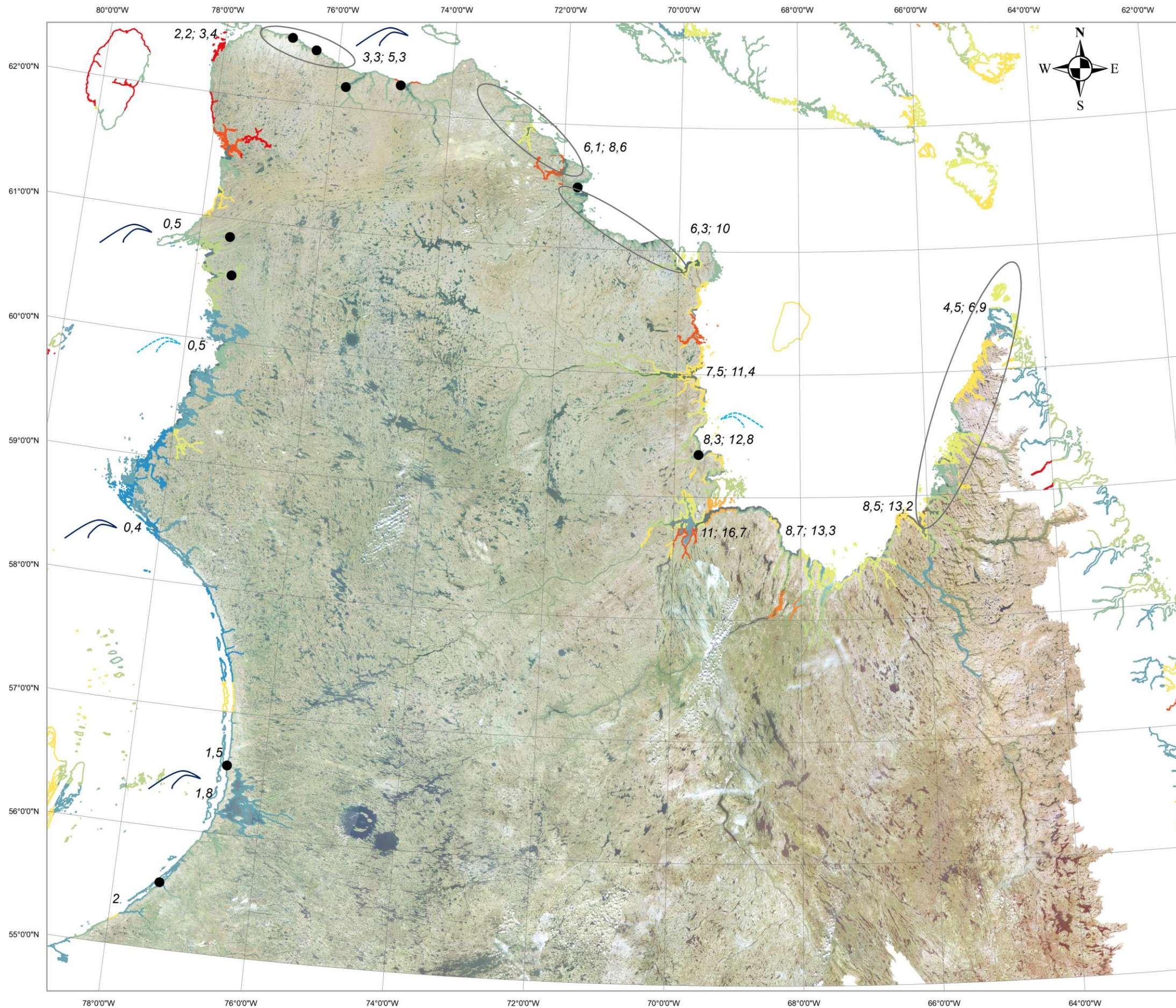


Figure 76 : Surcote et inondation à Salluit

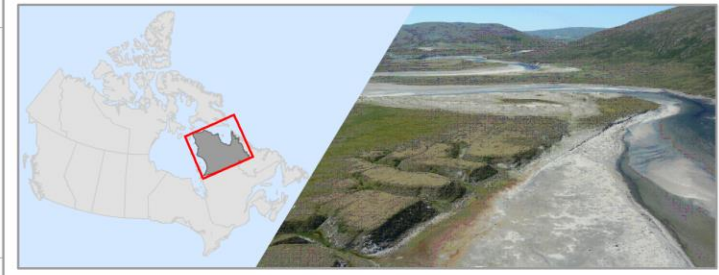
3.4.6.3 CÔTE DE LA BAIE D'UNGAVA

Hormis la réalisation d'études pour le territoire du village de Kuujjuaq, certaines études portant sur les infrastructures maritimes, les glaces, les tempêtes, les vagues et les niveaux d'eau ont été conduites par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports du Québec. L'étude des aléas naturels par Carbonneau *et al.* (2015) a permis d'en apprendre davantage sur les villages d'Aupaluk et de Kangiqsualujjuaq. Récemment, des caméras ont été installées par l'INRS pour observer la dynamique des glaces à Aupaluk. Selon Massé et Villeneuve (2013), et Massé et Gallant (2016), une surcote extrême à Kuujjuaq serait de 1 m. Les villages de la baie d'Ungava sont situés dans de larges estuaires. Tasiujaq et Aupaluk sont les villages les moins élevés en altitude alors que leurs littoraux possèdent les marnages les plus conséquents.

La situation du village de Kangirsuk – sur une colline rocheuse aux versants abrupts – lui confère une certaine sécurité face à un risque de submersion. En cas d'une surcote extrême de 1 m, ni la voirie, ni les habitations et autres infrastructures ne seraient exposées. À Aupaluk, pour une même hauteur de surcote, l'embouchure de la rivière, et dans une moindre mesure, une partie des infrastructures construites en bas de la terrasse marine serait affectée (Carbonneau *et al.*, 2015). Par ailleurs, il n'y a pas d'enrochement pour lutter contre cet aléa rencontré en milieu côtier. À Tasiujaq, le risque associé à une surcote extrême est quasi-nul. Il faudrait une surcote de 2,5 m pour observer les premiers dégâts sur la route menant à l'infrastructure maritime. À Kuujjuaq, peu d'aléas naturels ont été répertoriés et cartographiés par Carbonneau *et al.* (2015). En cas d'une surcote extrême de 1 m (Massé et Gallant, 2016), ni la voirie, ni les habitations et autres infrastructures ne seraient affectées. Pour Kangiqsualujjuaq, le risque associé à une surcote est faible. Seule une partie de la route menant au port serait inondée par une surcote de 1 m. La figure 77 résume de manière schématique la sensibilité des côtes du Nunavik.



Sensibilité des côtes du Nunavik



Légende

- Conditions hydrodynamiques générales**
- 4,5; 6,9 - Marnage moyen; Marnage maximal (Pêches et Océans Canada, 2016)
- Baie d'Ungava : environnement hypertidal (> 6m)
 Détroit d'Hudson : environnement méso- (> 2m) à hypertidal
 Baie d'Hudson : environnement microtidal (< 2m)
- Pour la baie d'Hudson, seul le marnage maximal est indiqué.
- **Signes d'érosion côtière dans des milieux sédimentaires ou liés au dégel du pergélisol côtier**
- Très peu de signes d'érosion pour les milieux sédimentaires (plages, dunes, flèches sableuses) de ce littoral en émerision. La majorité de ces environnements sont en progradation (avance vers la mer).
- **Secteurs à talus d'éboulis**
- Associés aux fjords et aux fjards du détroit d'Hudson et de la côte nord-est de la baie d'Ungava.
- Risques côtiers**
- **Risque probable lié à une surcote**
- **Risque peu probable lié à une surcote**
- Sensibilité des côtes à l'augmentation du niveau marin relatif (Shaw et al., 1998)**
- < 1
 - [1 - 2]
 - [2 - 3]
 - [3 - 4]
 - [4 - 5]
 - [5 - 6]
 - [6 - 7]
 - [7 - 8]
 - [8 - 9]
 - [9 - 20]
- 0 50 100 200 km
1:3 350 000

Cartographie: Antoine Boisson, Centre d'études nordiques, Université Laval, mars 2017
 Sources: Hydrographie (CCRS)
 Citation recommandée: Emmanuel L'Hérault, Antoine Boisson, Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Carl Barrette (2017). Sensibilité des côtes du Nunavik. Centre d'études nordiques, échelle 1:3 350 000.



Figure 77 : Carte de sensibilité des côtes du Nunavik.

4 RENFORCER LE RÉSEAU DE SUIVI CLIMATIQUE

Alors que le climat est une composante dominante en cause dans plusieurs processus physiques et aléas naturels, le suivi, la quantification et la caractérisation des variables climatiques (Températures, précipitation, vent, etc.) sont essentiels afin d'accroître la compréhension de ces processus propres aux milieux subarctiques et arctiques. Au Nunavik, il n'existe qu'un faible nombre de stations météorologiques distribuées essentiellement le long du littoral laissant un vaste territoire sans sources de données régionales.

4.1 OBJECTIFS

Afin de combler cette lacune sur le plan du suivi météorologique à l'intérieur des terres pour le Nunavik, l'objectif de cet axe du projet consistait à installer et mettre en marche deux nouvelles stations afin de renforcer la couverture géographique du réseau de surveillance actuel du climat au Nunavik. Ces deux nouvelles stations s'ajoutent maintenant à un important réseau de suivi météorologique (SILA) opéré et entretenu par le Centre d'études nordiques (CEN) et sont, grâce à un accord avec le MDDELCC, aussi directement intégrées au réseau de stations du MDDELCC. Les critères de fréquence de saisie et de qualité des données sont ceux du MDDELCC.

4.2 MÉTHODOLOGIE

Le choix des sites d'implantation des stations météorologiques a été effectué afin de respecter plusieurs critères géographiques et physiographiques afin que les stations soient représentatives du climat propre aux différentes divisions physiographiques qui caractérisent le Nunavik, mais également assez loin des côtes afin de sonder la dynamique climatique au centre de la péninsule d'Ungava. Outre les spécifications géographiques requises, de nombreuses contraintes logistiques relatives à l'accessibilité des sites pour l'installation et l'entretien ultérieur des stations ont dû être considérées. Ces contraintes logistiques, compte tenu de l'isolement des sites choisis, portaient sur leur accessibilité par voie aérienne, à savoir la présence ou non d'une piste d'atterrissage à proximité du site (accessibilité par avion) ou de la distance de celui-ci par rapport à la communauté la plus près (accessibilité par hélicoptère).

Les deux sites retenus se retrouvent dans la région physiographique de James qui englobe les bassins versants des Baies James, d'Hudson et d'Ungava (Figure 78). La première station (Station du Lac Payne; 59°32.713N, 74°37.874W) se retrouve plus précisément dans la division physiographique du Plateau de Larch à proximité du lac Payne tandis que la seconde (Station des Monts de Puvirnituk (camp Bélanger); 61°21.276N, 75°02.536W) se retrouve dans la division des collines de Povungnituk (Figure 78). La station des Monts de Puvirnituk a été installée à l'emplacement même du camp minier portant le même nom. Le choix du site fut une recommandation de collègues du MFFP et de l'Université Laval travaillant sur la population de caribous migrateurs. Le site a l'avantage d'avoir une piste pour les avions de brousse de type Twin Otter de la compagnie Air Inuit. Il est alors possible de déployer du carburant en barils ou de l'équipement par le biais de la piste. Le site est situé à approximativement 100 km au sud de Salluit et 190 km au Nord-est de Puvirnituk (Figure 79). Le site des Monts de Puvirnituk est, par conséquent, également accessible par hélicoptère. La station du lac Payne a été installée à la tête du lac Payne sur un dépôt composé de moraine de décrépitude. La logistique a été effectuée depuis Puvirnituk en hélicoptère, tant pour la mise en place de la station que pour les visites de maintenance depuis lors. L'étendue d'eau permet l'amerrissage d'un hydravion pour se rendre au site comme alternative. Les positions géographiques ainsi que les caractéristiques techniques de ces deux stations sont présentées respectivement à la figure 80A et au tableau 12.

Quelques semaines avant la mobilisation de l'équipe sur le terrain, les matériaux nécessaires à l'installation des deux nouvelles stations météorologiques ont été expédiés à Puvirnituk sur le premier bateau de la saison de navigation afin que celui-ci soit sur place vers la mi-juillet 2015. La mobilisation de l'équipement et du personnel nécessaire à l'installation de la station météorologique au lac Payne s'est faite par hélicoptère. La mise en place de la station s'est échelonnée entre le 6 et le 9 août 2015. Concernant la

station des Monts Puvirnituk, une mobilisation par avion (Twin Otter) a été possible en raison de la présence d'une piste d'atterrissage à proximité du site (Camp Bélanger). L'installation de la station s'est échelonnée entre le 1^{er} et 4 octobre 2015.

Le système d'acquisition automatique de données est l'élément central des stations météorologiques. Ce module de contrôle est doté d'une programmation qui lui est propre et qui permet de mesurer le signal des différents capteurs et d'enregistrer les données selon la fréquence désirée. Pour les stations, le modèle d'enregistreur utilisé est le CR1000 de Campbell Scientific avec un module CFM100 (2GIG) pour une mémoire étendue. L'instrumentation ainsi que les composantes de sauvegarde, de communication et d'alimentation reposent sur un trépied ajustable en acier galvanisé de 2 à 3 m (Figure 80B et C). L'avantage de ce trépied c'est qu'il s'ajuste aux terrains accidentés et offre une assise solide. Les composantes électroniques du système sont placées à l'intérieur d'un boîtier en aluminium fixé à même la structure, ce qui permet de les protéger des intempéries et du vandalisme. Le système de charge de la station consiste en une batterie, un chargeur régulateur et un panneau solaire. Les stations sont équipées d'un transmetteur GOES TX320 muni d'une antenne YAGI et une balise GPS qui permet la transmission satellite des données lues sur une base horaire via la plateforme GOES. Les stations ont des systèmes d'alimentation indépendants pour l'acquisition de données et la transmission en temps réel. Les données transmises sont acheminées vers les serveurs du MDDELCC et en partie diffusées sur le portail WEB (surveillance du climat) du Gouvernement du Québec (<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>). Les données de la station des Monts de Puvirnituk sont diffusées en ligne depuis la mise en place de la station.

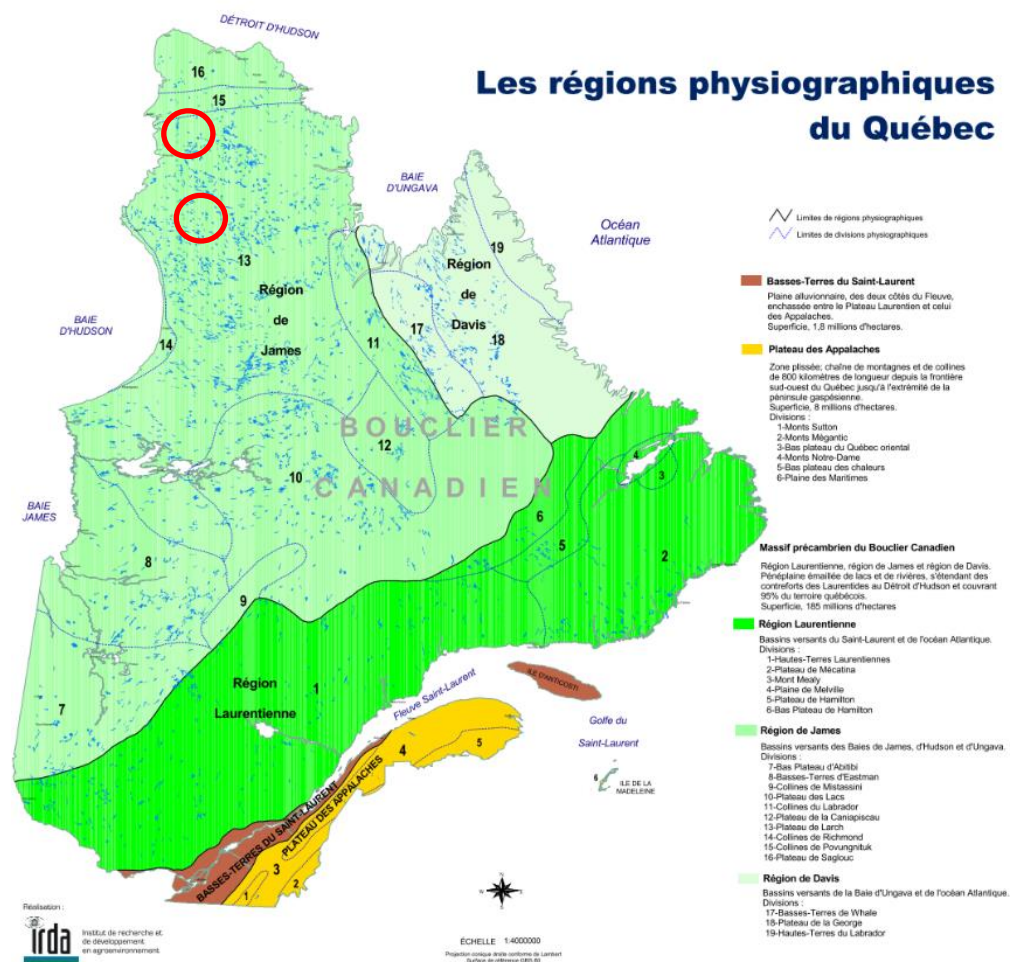


Figure 78 : Les régions et divisions physiographiques du Québec (IRDA, 2008). Les cercles rouges indiquent les secteurs à l'intérieur desquels les stations météorologiques ont été installées.



Figure 79 : Distance à vol d'oiseau entre les nouvelles stations météorologiques déployées et les communautés situées à proximité.

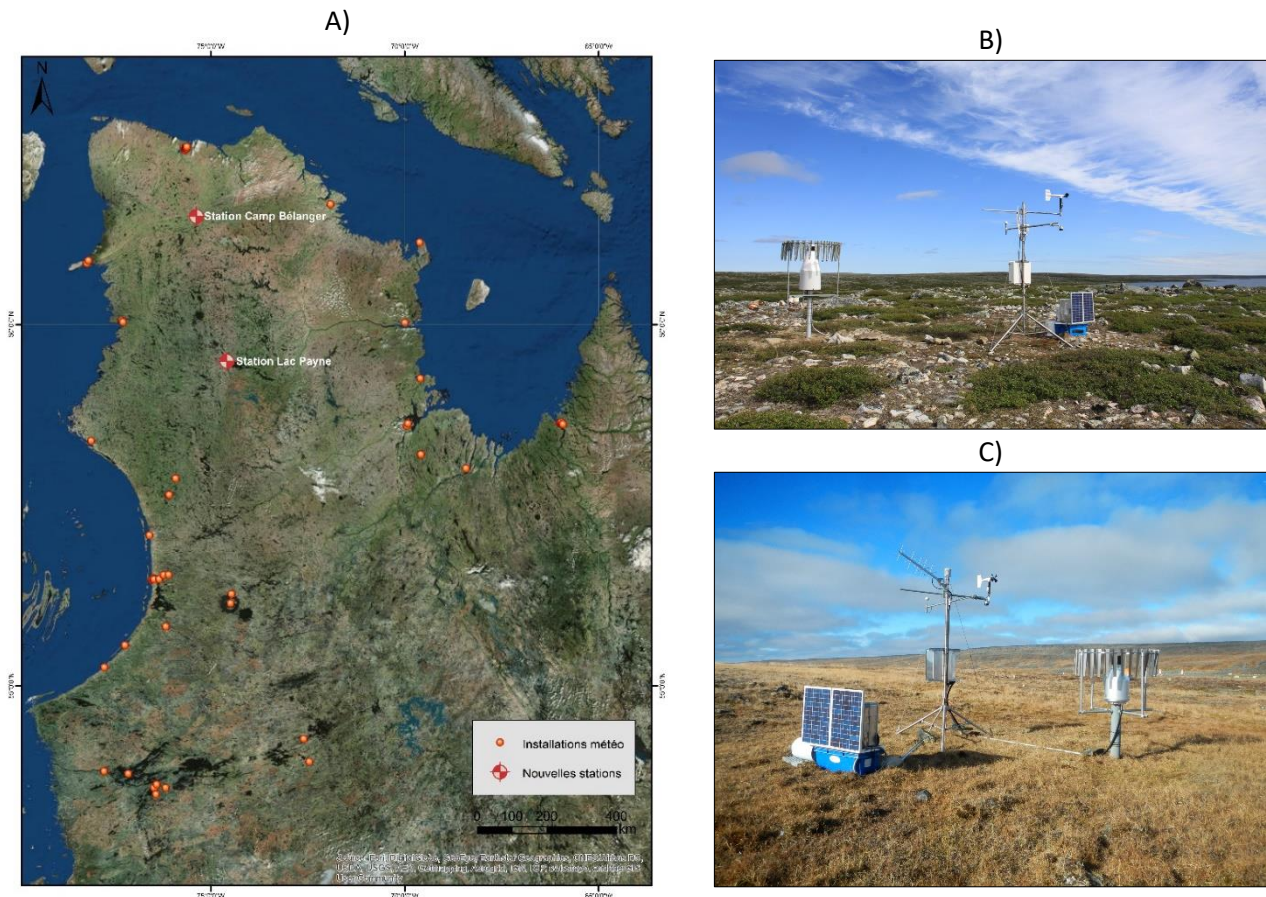


Figure 80 : A) Emplacements des deux nouvelles stations météorologiques. Aperçu de l'instrumentation en place B) à la station du lac Payne et C) la station des Monts Puvirnituq.

Tableau 12 : Caractéristiques techniques propres à chacune des stations météorologiques nouvellement installées.

Variabes météorologiques	Fréquence d'enregistrement	Modèle du capteur	Nombre de capteurs
Pression atmosphérique	Horaire	Baromètre Vaisala PTB 110	1
Température de l'air #1	Horaire	YSI 44033	1
Température de l'air #2	Horaire	Rotronic HC-S3-XT-L	1
Humidité de l'air	Horaire	Rotronic HC-S3-XT-L	1
Hauteur de neige au sol	Horaire	CSI SR-50A	1
Précipitations totales	Horaire	OTT et Geonor	1
Direction et vitesse des vents	Horaire	RM Young 05103-10	1
Température du sol à 5, 15, 30 et 50 cm de profondeur	Horaire	YSI 44033	1 pour chaque profondeur (4 au total)

Tableau 13 : Liste des paramètres enregistrés sur une base horaire depuis octobre 2015 ainsi que ceux ajoutés en 2016.

Paramètres mesurés en 2015-2016	Paramètres ajoutés en 2016
1. Échantillon du voltage de la batterie du système	31. Hauteur de neige au sol (valeur brute)
2. Vitesse maximale du vent	32. Hauteur de neige au sol ajustée à un second capteur
3. Vitesse moyenne du vent	33. Moyenne de la température du sol à 5 cm avec capteur de type CSI_109
4. Échantillon de la direction des vents	34. Moyenne de la température du sol à 15 cm avec capteur de type CSI_109
5. Résultante moyenne de la direction des vents dans l'heure	35. Moyenne de la température du sol à 30 cm avec capteur de type CSI_109
6. Vitesse horizontale moyenne des vents dans l'heure	36. Moyenne de la température de l'air avec capteur de type CSI_109 (deuxième capteur)
7. Moyenne de la température du sol à 5 cm	37. Maximum de la température de l'air avec capteur de type CSI_109 (deuxième capteur)
8. Moyenne de la température du sol à 15 cm	38. Minimum de la température de l'air avec capteur de type CSI_109 (deuxième capteur)
9. Moyenne de la température du sol à 30 cm	
10. Moyenne de la température du sol à 50 cm	
11. Moyenne de la température de l'air à 300 cm	
12. Maximum de la température de l'air	
13. Minimum de la température de l'air	
14. Échantillon de l'humidité de l'air	
15. Moyenne de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure	
16. Maximum de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure	
17. Minimum de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure	
18. Échantillon de la hauteur de neige au sol dans l'heure	
19. Échantillon de la pression atmosphérique dans l'heure	
20. Moyenne des 3 capteurs de précipitations	
21. Déviation standard des 3 capteurs de précipitations	
22. Échantillon de la moyenne des valeurs de précipitation du capteur #1	
23. Échantillon de la moyenne des valeurs de précipitation du capteur #2	
24. Échantillon de la moyenne des valeurs de précipitation du capteur #3	
25. Déviation standard des données de précipitations du capteur #1	
26. Déviation standard des données de précipitations du capteur #2	
27. Déviation standard des données de précipitations du capteur #3	
28. Échantillon de la fréquence du capteur #1	
29. Échantillon de la fréquence du capteur #2	
30. Échantillon de la fréquence du capteur #3	

4.3 RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

4.3.1 STATION DES MONTS DE PUVIRITUQ (CAMP BÉLANGER)

En octobre 2016, la station fonctionnait et la batterie affichait 13.9 V. La récupération des données s'est effectuée sans problème et la vidange et permutation du glycol dans le pluviomètre a eu lieu. Un capteur supplémentaire a été ajouté afin d'avoir une deuxième lecture de la température de l'air et un deuxième paramétrage de la sonde à neige. Trois nouvelles sondes de températures du sol ont été enfouies et branchées. Ces nouveaux capteurs enregistrent la température directement en degrés Celsius. La transmission en temps réel des valeurs de deux de ces sondes rend possible de diffuser en ligne la température de la surface du sol. La température de l'air est mesurée dans un abri radiatif afin de limiter les erreurs lors de période de fort ensoleillement. Le capteur est positionné à 3 m de hauteur sur la structure et enregistre les données sur une base horaire en faisant la moyenne des 60 valeurs de la mémoire flash, en prenant la valeur la plus élevée pour le maximum horaire et la valeur la moins élevée pour le minimum horaire.

La sonde qui permet de quantifier la hauteur de neige au sol a mesuré une accumulation rapide de neige à partir du 6 janvier 2016. En effet, la hauteur de neige au sol est passée de 46 cm à 80 cm en 24 heures puis à 100 cm le 9 janvier en début de journée pour se stabiliser à 122 cm en fin de journée. Bien qu'il n'y ait pas eu d'accumulation importante de neige enregistrée par le pluviomètre, la redistribution de la neige par le vent en serait l'explication. Une accumulation de 15 cm de neige a été enregistrée par la station le 25 décembre avec des vents soufflants du Nord. La sonde à neige n'a rien enregistré pendant ce temps malgré les 15 cm tombés. Quelques jours plus tard, un changement dans la direction des vents avec une prédominance des vents de l'Est du 4 au 9 janvier s'est produit. C'est à ce moment que la neige a été redistribuée sur le site et une accumulation de 80 cm a eu lieu en quelques jours. L'important couvert nival limite la progression de l'onde de gel dans le sol pendant la période hivernale. Les données issues des thermistances enfouies dans le sol à différentes profondeurs le montrent bien. Le profil thermique n'atteint pas -10°C même à 5 cm sous la surface du sol et les courbes sont extrêmement lissées. Une caméra autonome a été positionnée en août 2016 afin d'apprécier la redistribution de la neige sur le site et de noter des phénomènes particuliers sur certains capteurs comme l'englacement de l'orifice du Geonor ou le givre sur l'anémomètre girouette. Lors d'une visite subséquente, des améliorations prévues telles qu'un rehaussement du Geonor d'au moins 50 cm et l'installation d'une seconde sonde à neige distante d'environ 50 mètres de la station permettraient d'améliorer significativement le suivi des précipitations.

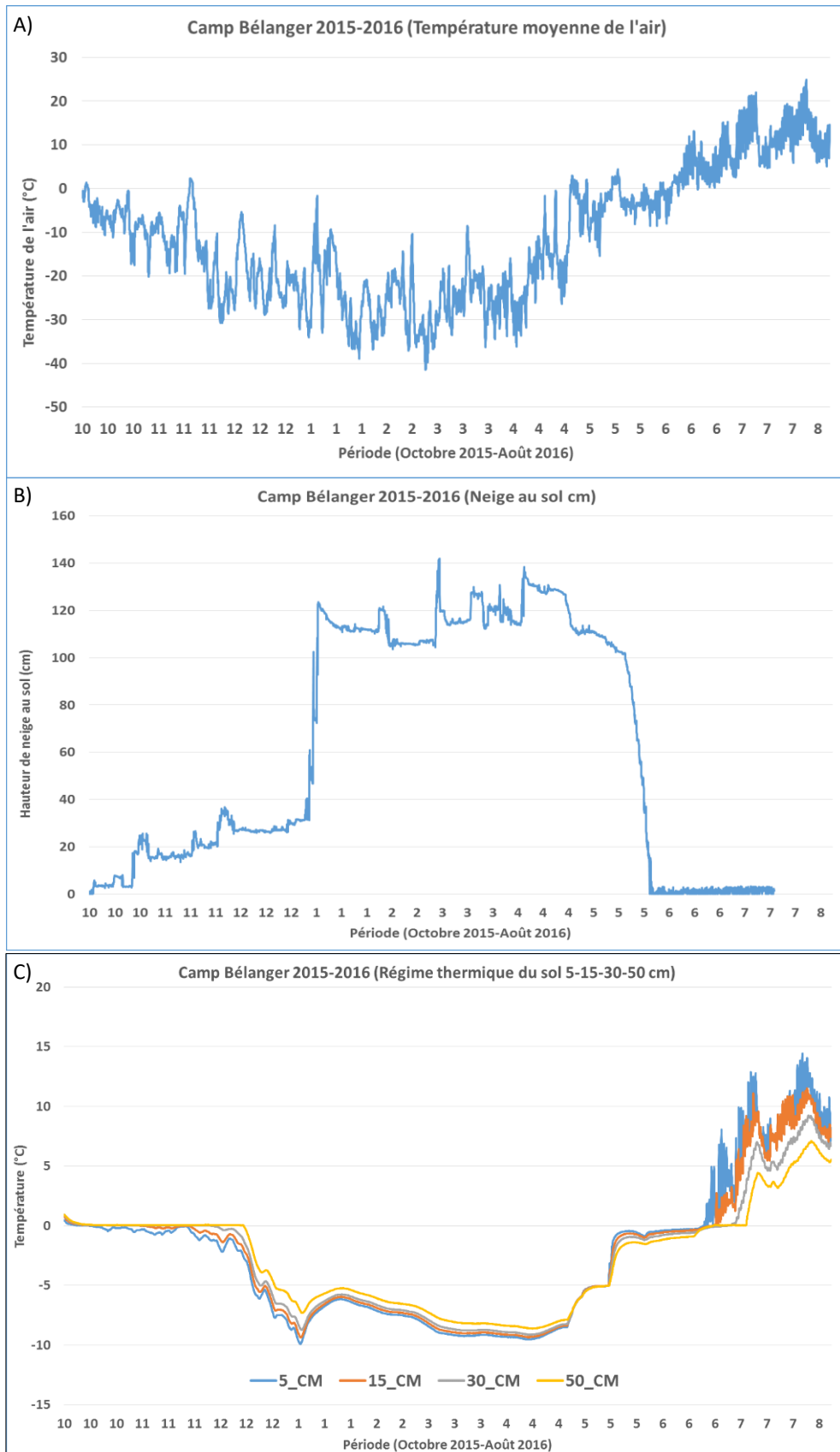


Figure 81 : A) Données de la température moyenne de l'air, B) données de précipitation et C) données de températures du sol mesurées à la station des Monts de Puvirnituk (Camp Bélanger).

4.3.2 STATION LAC PAYNE

Une visite en août 2016 a permis de procéder à la récupération des données accumulées dans la mémoire interne du système d'acquisition automatique de données en plus d'effectuer la maintenance des composantes et de voir aux réparations suite à un bris de communication avec la station. Bien que certains capteurs transféraient des données erronées dès la fin du mois d'août 2015, la station a continué d'émettre des données jusqu'en mai 2016.

La figure 82A montre la courbe de la température moyenne de l'air prise à 3 m de la surface du sol dans un abri radiatif non-ventilé. La courbe bleue est issue d'une thermistance placée en relève à la sonde d'origine. Ces thermistances de relève sont posées pour recueillir des données en cas de bris de la thermistance principale émettrice. Celle-ci ayant été endommagée par un ours, c'est grâce à cette thermistance de relève que les données ont pu être récupérées lors de la visite d'entretien. La courbe orange présente la section de données disponibles suite au bris de la sonde principale par l'ours. Bien que le câble de la sonde à neige fut aussi sectionné, les données de températures du sol (Figure 82B) montrent bien un régime thermique peu influencé par un important couvert de neige. La température du sol descend sous les -10 °C en hiver peu importe la profondeur et les courbes dentelées indiquent une influence marquée des fluctuations de la température de l'air dans le sol (mesurés jusqu'à 50 cm de profondeur).

La mission de terrain pour l'entretien de la station en 2016 a permis de découvrir qu'un ours avait sectionné quelques fils à trois reprises dans l'année. Une première fois le 24 août à 6 heures le matin, une seconde fois le 20 septembre et finalement le premier mai 2016. La liste des paramètres retenus par le système d'acquisition de données paraît dans le tableau ici-bas avec la récupération de données, illustrée en bleu, suite aux différents bris de système (Tableau 14).

Lors de l'opération de maintenance, les fils pour l'alimentation électrique aux panneaux solaires avaient été sectionnés d'où le manquement de données en juin et juillet 2016. De plus, un panneau solaire a été abîmé et devra être remplacé (cela a été fait en septembre 2017). Les fils ont été réparés et l'alimentation de la station a été rétablie. Les fils pour la sonde de température et d'humidité de l'air ont aussi été réparés de même que les fils pour la sonde à neige. Le pluviomètre OTT n'était plus à niveau et le correctif a été apporté en ajustant la fixation de soutien. De plus, 4 sondes ont été ajoutées à la station, 1 pour la température de l'air et 3 pour la température de sol en °C pour une transmission en temps réel de ces données. À la fin de la visite, tous les capteurs fonctionnaient et la transmission de données était, dès lors, rendue possible.

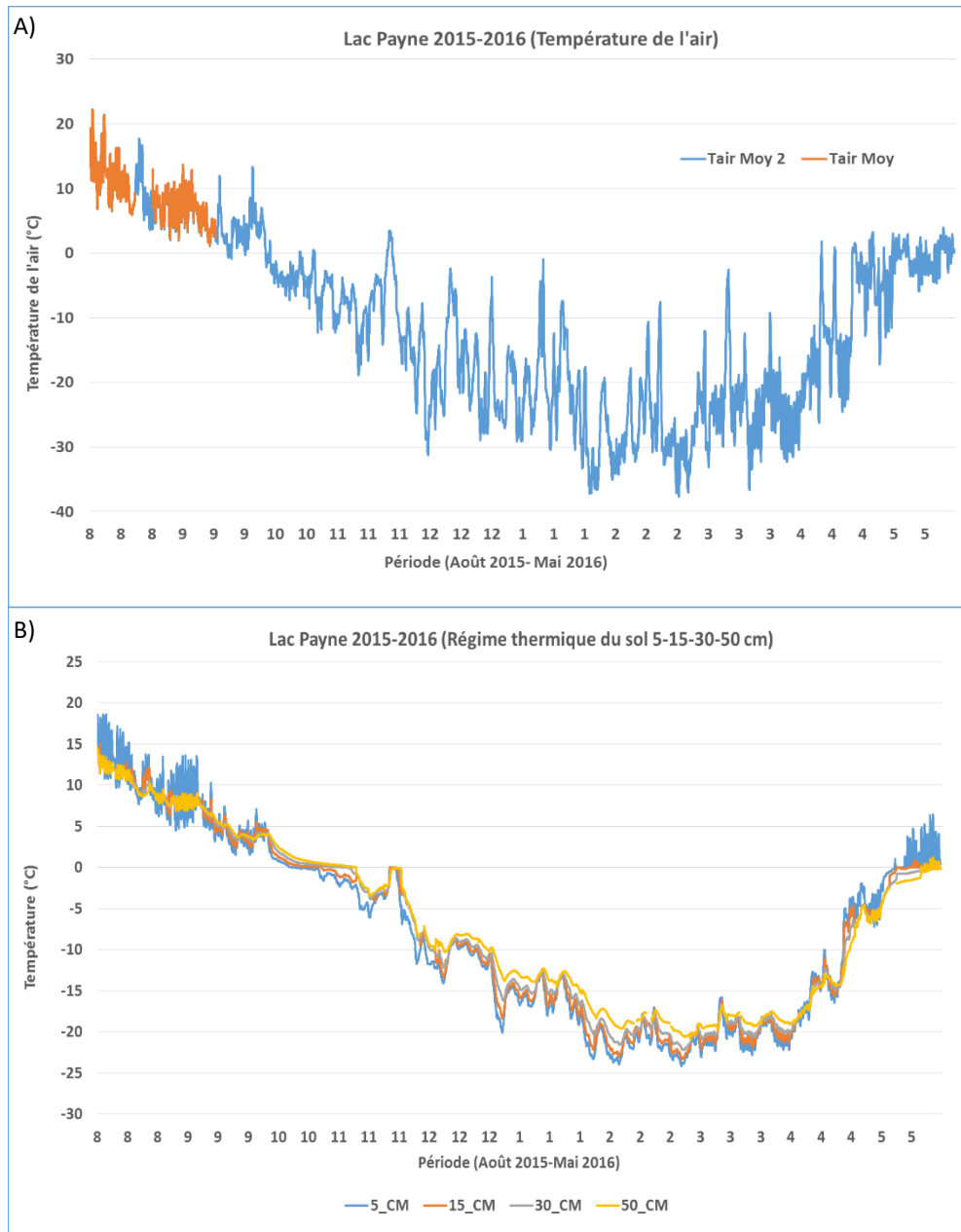


Figure 82 : A) Données de la température moyenne de l'air prise à 3m de la surface du sol dans un abri radiatif non-ventilé. La courbe bleue est issue d'une thermistance placée en renfort à la sonde d'origine n'ayant pas été vandalisée. La courbe orange présente les données disponibles suite au bris de la sonde principale. B) Données de températures du sol.

Tableau 14 : Liste des paramètres retenus par le système d'acquisition de donnée suite aux différents bris.

	août	sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
A- Échantillon du voltage de la batterie du système													
B- Vitesse maximale du vent													
C- Vitesse moyenne du vent													
D- Échantillon de la direction des vents													
E- Résultante moyenne de la direction des vents dans l'heure													
F- Vitesse horizontale moyenne des vents dans l'heure													
G- Moyenne de la température de l'air #2													
H- Moyenne de la température du sol à 5 cm													
I- Moyenne de la température du sol à 15 cm													
J- Moyenne de la température du sol à 30 cm													
K- Moyenne de la température du sol à 50 cm													
L- Moyenne de la température de l'air à 300 cm													
M- Maximum de la température de l'air													
N- Minimum de la température de l'air													
O- Échantillon de l'humidité de l'air													
P- Moyenne de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure													
Q- Maximum de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure													
R- Minimum de la température de l'air de la dernière minute avant l'heure													
S- Échantillon de la hauteur de neige au sol dans l'heure													
T- Échantillon de la pression atmosphérique dans l'heure													
U- Valeur de l'intensité à la fin de l'heure du pluviomètre OTT													
V- Valeur maximale de l'intensité de l'heure (PCi)													
W- Échantillon de collecte du pluviomètre OTT													
X- Maximum de collecte du pluviomètre OTT													

CONCLUSION

AXE 1 : DOCUMENTER ET RECENSER LES RISQUES NATURELS AU NUNAVIK

À ce jour, le recensement des aléas naturels au Nunavik issu du relevé de littérature est complété. Ce relevé de littérature a permis de publier une version préliminaire d'un guide d'identification des aléas naturels au Nunavik. Ce guide illustré et facile d'utilisation présente les différents aléas naturels potentiellement observables sur le territoire tout en fournissant de l'information de base sur les processus et les facteurs contributifs en causes. Ce guide a d'ailleurs été présenté lors d'une rencontre avec les Rangers au mois de décembre 2015 et lors des visites-consultations tenues dans les communautés. Nous travaillons actuellement sur une version finale qui tiendra compte des plus récents exemples d'aléas naturels recensés. Les derniers témoignages recueillis à l'été 2016 lors des visites-consultations tenues conjointement avec l'ARK ont été intégrés dans la base de données. Lors de ces visites, de nouvelles collaborations avec les instances locales ont été établies, particulièrement avec le village d'Inukjuak, et permettront de renforcer la participation des acteurs locaux dans la cueillette de données.

La répartition des aléas sur le territoire montre une dichotomie entre l'intérieur des terres et les côtes ainsi que les zones d'occupation et celles peu fréquentées. À ce stade, il importe de demeurer prudent dans l'interprétation. Il est vrai que les côtes semblent, à priori, afficher un niveau d'exposition plus élevé en raison de la diversité des aléas recensés, l'occurrence et l'abondance de ces derniers. Cette diversité et récurrence découlent probablement du fait que le littoral est un milieu dynamique fortement exposé à plusieurs éléments susceptibles de déclencher un aléa (les vagues, les vents, les marées, les glaces, etc.) et également un milieu très sensible en raison de la diversité des dépôts meubles mis en place (ex. argile marine riche en glace, plages sableuses, etc.). Il demeure toutefois plausible que l'inoccupation et la couverture photographique dispersée et discontinue de l'intérieur des terres renforcent cette différence. Cette inoccupation a pour effet de limiter la probabilité que l'aléa soit observé par des témoins ou que ce dernier impacte le système humain (pertes humaines, matérielles et économiques) forçant ainsi sa documentation. Par conséquent, avant de tirer des conclusions sur la sensibilité du territoire aux différents aléas naturels, l'analyse complète des photos obliques disponibles permettrait d'accroître la couverture spatiale et temporelle tout en facilitant la détection d'aléas difficilement perceptibles avec les méthodes actuellement utilisées. Il n'en demeure pas moins que les vastes superficies de pénéplaine rocheuse avec une mince couverture de dépôts glaciaires du centre de la péninsule sont moins propices aux événements catastrophiques que les régions à fort relief ou à dépôts meubles sensibles.

Le recensement des évidences géomorphologiques spécifiques aux aléas par photo-interprétation est avancé, mais ne pourra pas être terminé en raison du nombre trop élevé de photos et le manque de temps pour procéder à leur analyse. Il reste plus de 60 % des photos aériennes obliques provenant de la Direction des Inventaires Forestiers à analyser. Ces levés photographiques se sont avérés extrêmement utiles pour le recensement des aléas et méritent que l'exercice soit poursuivi. Il est envisagé que des levés supplémentaires pourront également être disponibles en profitant de l'entretien des deux nouvelles stations météorologiques pour réaliser de nouveaux transects photographiques. Également, la contribution de levés photographiques obliques supplémentaires effectués lors de récents inventaires écologiques complétés par le MDDELCC et l'ajout de collaborateurs provenant de différents organismes qui œuvrent dans le Nord permettraient de renforcer la couverture spatiale et temporelle du territoire et ainsi permettre de recenser davantage d'aléas.

Malgré la complémentarité des différentes méthodes pour recenser les aléas, ceux d'origine météorologique sont pratiquement impossibles à identifier par photo-interprétation et laissent place à la subjectivité lorsque recensés par des témoignages. Afin de contrer ce manque, il s'avère nécessaire de procéder à une analyse plus physique des variables climatiques impliquées en s'appuyant sur les travaux d'Ouranos. Par exemple, la compilation et l'analyse des trajectoires des tempêtes tirées de l'étude de Savard *et al.* (2014) permettraient de cartographier et quantifier la susceptibilité du territoire face aux aléas d'ordre météorologique associés aux passages de ces systèmes (ex. : Blizzard, tempête de vent, surcote, etc.). Également, des indices de susceptibilité pourraient être développés (ex. Susceptibilité du

territoire aux blizzards et aux tempêtes de vents) à partir des variables climatiques disponibles via les jeux de données des réanalyses. La figure 83A présente un exemple américain des résultats qui pourraient découler d'une telle démarche. Dans une phase ultérieure, une fois un niveau d'analyse relativement uniforme sur l'ensemble du territoire pour tous les types d'aléas naturels convenus, le niveau de susceptibilité du territoire du Nunavik face à un aléa ou plusieurs aléas pourrait être quantifié, puis cartographié. Un tel exercice réalisé pour le territoire des États-Unis est présenté à la figure 83B.

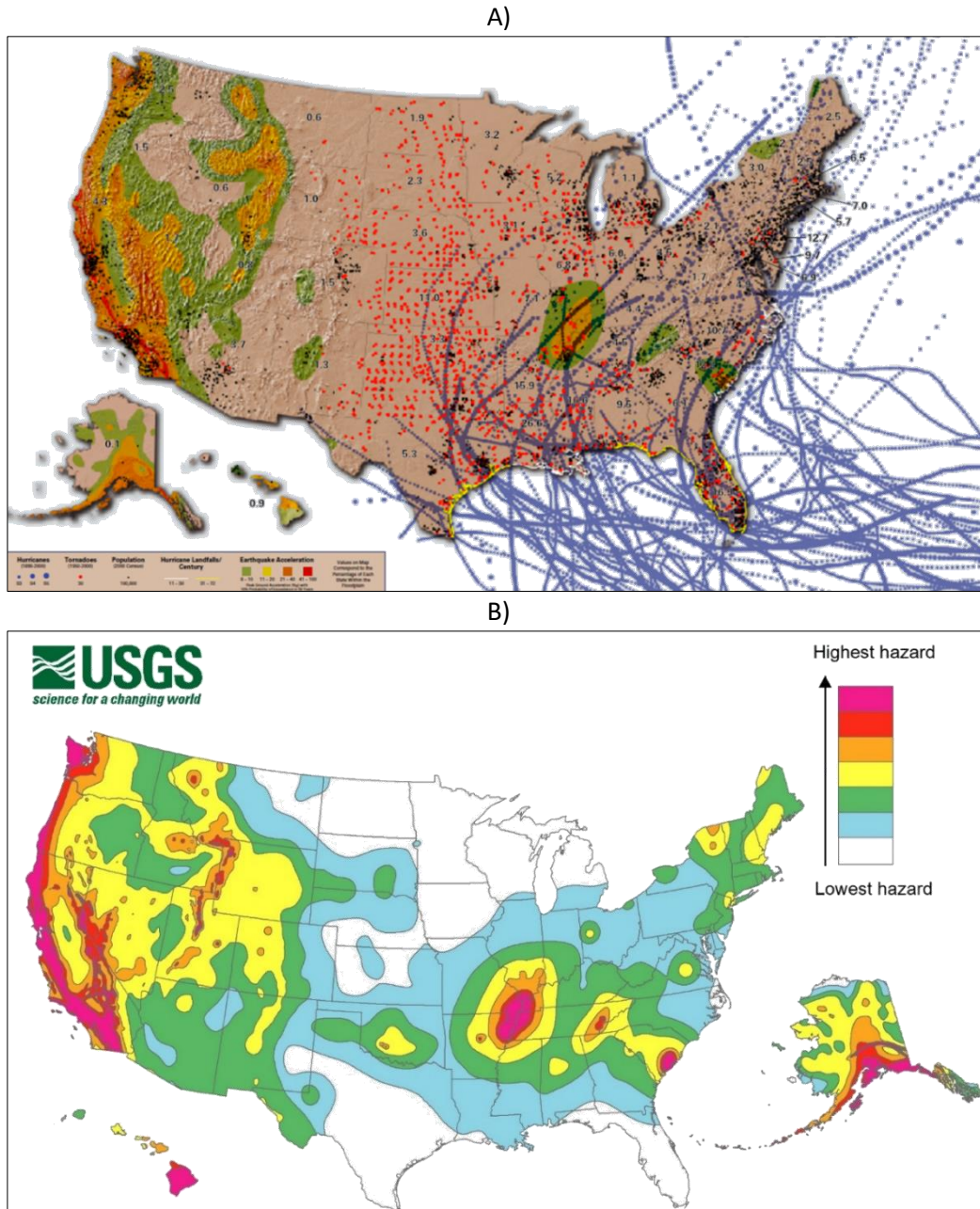


Figure 83 : A) Recensement et cartographie des aléas naturels aux États-Unis. Les tornades recensées sont présentées par les points rouges et les trajectoires des principaux ouragans par les lignes bleues (sources : Van Der Vink *et al.*, xxxx ; www.hazardscaucus.org). B) Carte montrant les zones susceptibles d'être affectées par des tremblements de terres (USGS : <http://earthquake.usgs.gov/hazards/products>).

AXE 2 : CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL AU QUÉBEC

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 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 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 entraîner un biais chaud pour ce qui est des températures de surface hivernales. La présence d'un tel biais devra être validée. 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 produite au cours de la phase 1 devra être réalisée. Le processus de validation sera effectué par des visites sur le terrain selon un plan d'échantillonnage davantage élaboré que dans la phase 1 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 MTMDET devrait être entreprise. L'acquisition de ces nouvelles connaissances permettra de préciser les caractéristiques ainsi que la distribution géographique des différentes composantes environnementales essentielles à une bonne compréhension des conditions de pergélisol sur l'ensemble du territoire arctique québécois et ultimement mieux évaluer sa susceptibilité face aux aléas naturels associés au pergélisol.

La phase 2 permettra 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 sciences du pergélisol comme, par exemple, les différentes formes de terrain associés à la présence d'un pergélisol riche en glace (ex. : paises, polygones à coins de glace, etc.). Également, la disponibilité promise de la nouvelle carte de classification écologique de la Direction des inventaires forestiers permettra d'aller chercher davantage d'information sur la densité et la structure de la végétation et ainsi espérer améliorer la relation entre les types de végétation et les caractéristiques du couvert nival. La précision de la carte des températures du pergélisol en sera grandement améliorée. Il serait 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. 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.

AXE 3 : CLASSIFICATION DES CÔTES

Certains travaux restent à être réalisés: (i) la segmentation et la classification du littoral entre baie Déception et Kangiqsualujuaq, (ii) la correction de la classification de plusieurs sections de la côte orientale de la baie d'Hudson. La collaboration d'Environnement Canada est assurée pour poursuivre cette tâche.

Les fichiers numériques seront transmis et comprendront : (i) ~ 37 000 photographies géoréférencées ouvrables sur ArcGIS 10.X, (ii) ~ 45 heures de vidéographies géoréférencées, (iii) la segmentation et la classification du littoral selon la méthodologie du programme eSPACE d'Environnement Canada au format .mxd. Ces données pourraient être introduites dans une *webmap* qui pourrait être créée sur le site du MFFP. Ces données seraient alors disponibles gratuitement pour le grand public et pour d'autres chercheurs (géologues, biologistes, archéologues, etc.).

La phase 2 de ce projet permettra de compléter et de perfectionner la classification côtière. En effet, deux sections du littoral n'ont pas encore été survolées : entre Kangiqsualujuaq et l'île de Killiniq (~ 1 600 km) et entre Pointe Louis XIV et Kuujuarapik (~ 150 km).

Depuis quelques années, certains aléas côtiers (surcote, décote, évènements tempétueux) ont été évalués aux abords des infrastructures maritimes (Massé et Villeneuve, 2013 ; Massé et Gallant, 2016). Toutefois, certains aléas nécessiteraient des études approfondies. C'est le cas notamment des poussées glacielles (*ice push*), dont les conséquences sur la morphologie et sur les infrastructures maritimes sont encore méconnues. Il serait utile de procéder à des levés de cartographie sous-marine dans les estuaires, les baies et les fjords qui sont des lieux importants de collecte de ressources alimentaires pour les Autochtones et des sites potentiels de création ou d'expansion d'installations portuaires.

Un projet d'installation de la fibre optique dans les villages du Nunavik est en cours (Figure 84). Les personnes responsables de ce projet ont souhaité nous rencontrer pour avoir des photographies des villages et obtenir des informations sur la géomorphologie littorale. En effet, le passage du milieu sous-marin au milieu terrestre via la zone littorale est la principale problématique pour connecter ce câble sous-marin aux différents villages. Une collaboration avec les entreprises concernées permettrait de faire de nombreuses mesures *in situ* sur certaines plages, afin notamment d'évaluer plus précisément leurs susceptibilités face aux poussées glacielles.

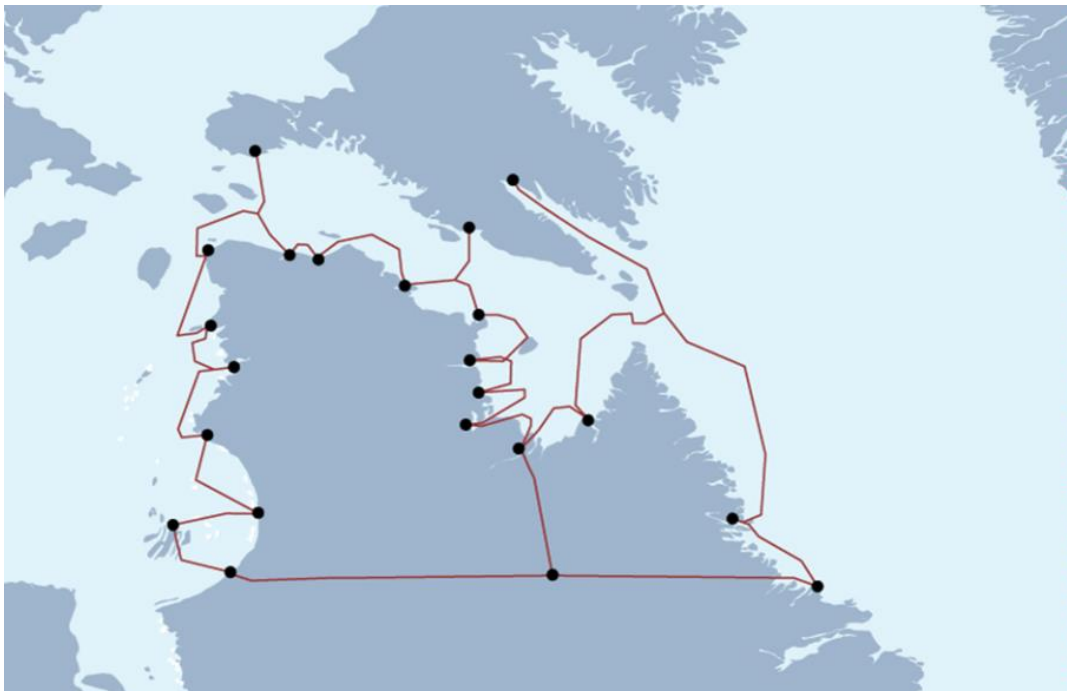


Figure 84 : Projet d'installation de la fibre optique au Nunavik, Nunavut et Labrador. Source : <http://wfnstrategies.com/portfolio-items/eastern-arctic-undersea-fibre-optic-network/?portfolioID=392>

AXE 4 : SUIVI CLIMATIQUE

La mobilisation de l'équipement et du personnel nécessaire à l'installation de la station météorologique au lac Payne s'est faite par hélicoptère. La mise en place de la station s'est échelonnée entre le 6 et le 9 août 2015. Concernant la station des Monts Puvirnituq, une mobilisation par avion (Twin Otter) a été possible en raison de la présence d'une piste d'atterrissage à proximité du site (Camp Bélanger).

Après quelques semaines de bon fonctionnement, le capteur de température de l'air a fait défaut à la station du lac Payne entre le 23 et le 29 septembre 2015 puis a arrêté définitivement de fonctionner le 20 octobre 2015. Toutefois, cette station est dotée comme mesure de sécurité d'une deuxième sonde de température de l'air dont les données mesurées ne sont pas transmises en temps réel, mais sont enregistrées. Les manques dans la série de températures atmosphériques et de hauteur de neige ont donc été comblés a posteriori.

La station des Monts Puvirnituq fonctionne parfaitement. Les données enregistrées dans le premier mois suivant son installation ne montrent aucune anomalie. Toutefois, une vérification devra être faite afin de valider si l'augmentation de la hauteur de neige survenue entre le 10 et 13 janvier 2016 est réelle ou le résultat d'un bris ou du déplacement du capteur. À cet effet, une caméra a été installée à l'été 2016 afin de mieux comprendre la dynamique d'enneigement au site.

Pour 2017, il faudra prévoir un remplacement du panneau solaire endommagé, 2 nouvelles batteries puisque les batteries de la station ont enregistré plus de 157 épisodes de bas voltage et sans doute de nombreux court-circuit lorsqu'un ours a endommagé le fil d'alimentation. Il faudra aussi prévoir quelques panneaux cloutés pour le sol à proximité de la station afin de limiter le risque de bris par les animaux.

L'installation ayant eu lieu et les stations étant opérationnelles, un budget annuel sera nécessaire pour les entretenir.

PHASE 2

Après consultation avec le ministère des Forêts, de la faune et des parcs et des partenaires gouvernementaux, il faudra s'attendre à ce que la phase 2, s'il y a, comporte une forte composante de communication envers les parties prenantes au développement du nord par la publication des versions avancées des produits cartographiques, la présentation de conférences, des échanges avec les agents économiques, tant privés que publics, et la diffusion de l'information au grand public en général.

Les objectifs spécifiques pour la phase 2 pourraient consister à :

- Approfondir l'enquête sur les aléas naturels auprès des populations concernées
- Poursuivre l'analyse des secteurs identifiés comme étant particulièrement susceptibles aux aléas naturels.
- Produire une carte avancée des conditions de pergélisol au Nunavik en considérant davantage l'influence des variables climatiques, géomorphologiques et écologiques sur le régime géothermique et les conditions géocryologiques des sols.
- Produire une analyse fine de la sensibilité au changement climatique des écosystèmes terrestres affectés par la présence et la disparition du pergélisol.
- Produire une analyse fine de la sensibilité au changement climatique des géosystèmes côtiers affectés par la hausse du niveau marin global, la diminution de la durée de la couverture de glace et l'augmentation probable du nombre et de l'intensité des tempêtes maritimes.
- Établir les liens physiques et numériques entre ce travail et les études de climat menées parallèlement par le Consortium Ouranos.
- Identifier d'autres zones potentielles pour recevoir de nouvelles stations météorologiques et ainsi améliorer la compréhension du climat régional.

RÉFÉRENCES

- Adams J., Wetmiller, R.J., Hasegawa, H.S. et Drysdale, J. (1991). The first surface faulting from a historical intraplate earthquake in North America. *Nature*, 352 : 617-619.
- 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., Michaud, Y., Ruz M.-H. et Héquette A. (1998). Ice-foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a subarctic microtidal environment, Manitounuk Strait, northern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(9) : 965-979.
- 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.
- Arbic B.K., St-Laurent P., Sutherland G. et Garrett C. (2007) On the resonance and influence of the tides in Ungava Bay and Hudson Strait. *Geophysical Research Letters*, 34(17) : 5p.
- Archer A.W. (2013) World's highest tides: Hypertidal coastal systems in North America, South America and Europe. *Sedimentary Geology*, 284-285 : 1-25
- Archer A.W. et Hubbard M.S. (2003). Highest tides of the world. *Geological Society of America, Special Paper 370* : 151-173.
- Barry R.G., Krane R.G., Locke C.W., Locke W.W. et Miller G.H. (1977). The coastal environment of southern Baffin Island and northern Labrador-Ungava. Final Report to the Arctic Petroleum Operators Association; Calgary, Alberta APOA Project 138, University of Colorado, 166 p.
- Beaulieu N. (1997) Évolution d'un rivage subarctique soumis au relèvement isostatique, détroit de Manitounuk, Hudsonie. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, Québec.
- Beaulieu N. et Allard M. (2003) The impact of climate change on an emerging coastline affected by discontinuous permafrost: Manitounuk Strait, northern Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 : 1393-1404.
- Bent, A.L. (1994). The 1989 (Ms 6.3) Ungava, Quebec, Earthquake: a Complex Intraplate Event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84(4) : 1075-1088.

- Bhiry, N., Delwaide, A., Allard, M., Bégin, Y., Fillion, L., Houle, G., Payette, S., Pienitz, R. et Vincent, W. (2011). Environmental change in the Great Whale River region, Hudson Bay: Five decades of multi-disciplinary research by Centre d'études nordiques (CEN), *Ecoscience*, 18 : 182-203.
- Blackwell, D. D. et Richards, M. (2004). Geothermal map of North America: Explanation of resources and applications: *Geothermal Resources Council Transactions*, 28 : 317-320.
- Bleau, S. (2012). Étude du comportement des glaces dans un environnement subarctique en régime macrotidal, estuaire de la rivière Koksoak, Nunavik. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, 235 p.
- Boatwright, J. et Choy, G.L. (1992). Acceleration source spectra anticipated for large earthquakes in northeastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82(2) : 660-682.
- Boucher, M., Grondin, G. et Paquet-Bouchard, B. (2012). Landslide in the Permafrost near a Ministère des Transports du Québec Infrastructure in Salluit and Stabilization Work. *Cold Regions Engineering 2012* : 779-788.
- Brown, Ross D. et Bruce Brasnett. (2015). Mise à jour annuelle. *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.
- Campbell, C., Bakermans, L., Jamieson, B. et Stethem, C. (2007). Current and future snow avalanche threats and mitigation measures in Canada. Rapport final remis à la Sécurité Publique du Canada. 109 p.
- 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.
- Chandler P.C., de Margerie S. et Covill J.D. (1982) Numerical Modelling of Tides in Hudson Strait and Ungava Bay. *Canadian Contractor Report of Hydrography and Ocean Sciences*, 13 : 60 p.
- Charron, I. (2015). Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik. Rapport final. Ouranos, Montréal, 86 p.
- CHC (Canadian Hydraulics Centre). (2006) Inventory of Canada's marine renewable energy resources, 101 p.
- Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.S. et Duhamel-Beaudry, É. (2012). Étude du comportement des glaces de mer et d'eau douce du Nunavik au voisinage des infrastructures maritimes – Apport des connaissances locales et de la télédétection. Rapport de recherche no R1389 remis au Ministère des Transports du Québec, au Consortium OURANOS et au Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Nord Canada. Institut national de la recherche scientifique, 186 p.
- Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R. et Stock L. (2008) Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, 35(1) : 6 p.
- Cotton C.A. (1954) Deductive morphology and the genetic classification of coasts. *Scientific Monthly*, 78 : 163-181.
- Couture N., Manson G., Forbes D., Fraser P., Frobel D., James T., Jenner K., Smith C., Szlavko B., Taylor R. et Whalen D. (2014) CanCoast: a tool for helping to assess climate change vulnerability and impacts of development. AANDC Climate Change Adaptation Program Webinar - May 21, 2014 (Power Point presentation).
- Cummins P.F., Karsten R.H. et Arbic B.K. (2010) The Semi-Diurnal Tide in Hudson Strait as a Resonant Channel Oscillation. *Atmosphere-Ocean*, 48(3) : 163-176.
- Daigneault R.-A. (2008) Géologie du Quaternaire du nord de la péninsule d'Ungava, Québec; Commission géologique du Canada, Bulletin 533 : 115 p.
- Dionne J.-C. (1963) Les types de côtes de la rive Sud de l'estuaire du Saint-Laurent, de Rivière-du-Loup à Matane. *Norois*, 38(1) : 151-160.

- Dohler G. (1966) Tides in Canadian Waters. Canadian Hydrographic Service, Marine Sciences Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 17 p.
- Douglas M.C.V. et Drummond R.N. (1955) Map of the physiographic regions of Ungava-Labrador. *The Canadian Geographer*, 2 : 9-16.
- Drinkwater K.F. (1986) Physical oceanography of Hudson Strait and Ungava Bay. In Martini EP (ed) *Canadian Inland Seas*, Oceanogr Ser 44 Elsevier, New York, 237-261.
- Ducharme, M.-A., Allard, M., Côté, J. et L'Hérault, E. (2015). Measurements of permafrost thermal conductivity through CT-scan analysis. *GEOQuébec* 2015, 7 p.
- Easton A.K. (1972) Tides of Hudson Strait. *Bedford Institute of Oceanography*, 14 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 héli-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.
- Fournier A. et Allard M. (1992) Periglacial Shoreline erosion of a rocky coast estuary: Rivière George, Northern Québec. *Journal of Coastal Research*, 8(4) : 926-942.
- Fournier A., Allard M. et Seguin M.K. (1987) Typologie morpho-génétique des marelles du marais littoral de la baie de Kangisualujuaq, estuaire du George, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire*, 41(1) : 47-64.
- Freeman N.G. et Murty T.S. (1976) Numerical Modelling of Tides in Hudson Bay. *Journal of the Fisheries Research Board Canada*, 33 : 2345-2361.
- French, H. (2007). *The Periglacial Environment: Third Edition*, Éditions Wiley, 478 p.
- Garde côtière canadienne. (2012) Climatologie des glaces et conditions météorologiques. <http://www.ccg-gcc.gc.ca/folios/00913/docs/icenav-ch3-fra.pdf>
- Genivar. (2012). Environmental and social impact assessment of the Deception Bay wharf and sediments management. Report from GENIVAR for Canadian Royalties Inc. Appendices (Volume 2). Multiple pagination.
- Genivar. (2012) Étude d'impact sur l'environnement et le milieu social pour l'aménagement d'infrastructures portuaires et la gestion des sédiments à la baie Déception. Rapport de GENIVAR à Canadian Royalties Inc. Annexes (Volume 3), 584 p.
- Germain, D. et Martin, J.-P. (2011). The vulnerability of northern cities to weather-related hazards : case studies from the province of Quebec, Eastern Canada. *Advances in Environmental Research*, 22 : chapter 5.
- 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.
- Godin G. (1980) Cotidal charts for Canada, Marine Sciences and Information Directorate. Department of Fisheries and Oceans, Ottawa, 93 p.
- Godin G. (1986) Modification by an ice cover of the tide in James and Hudson Bay, Arctic, 39(1) : 65-67.
- 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.

- Granskog M.A., Kuzyk Z.A., Azetsu-Scott K. et Macdonald R.W. (2011) Distributions of runoff, sea-ice melt and brine using $\delta^{18}\text{O}$ and salinity data – A new view on freshwater cycling in Hudson Bay. *Journal of Marine Systems*, 88 : 362-374.
- Gray J.T. et Lauriol B. (1985) Dynamics of the Late Wisconsin Ice Sheet in the Ungava Peninsula Interpreted from Geomorphological Evidence. *Arctic and Alpine Research* 17(3) : 289-310
- Gray J.T., Lauriol B., Bruneau D. et Ricard J. (1993) Postglacial emergence of Ungava peninsula, and its relationship to glacial history. *Canadian Journal of Earth Science*, 30(8) : 1676-1696.
- Guimont P. et Laverdière C. (1980) Le sud-est de la mer d'Hudson : un relief de cuesta, In; McCann S.B., (Eds.), *The Coastline of Canada*. Geological Survey of Canada, Paper 80-10 : 303-309.
- Hachem, S. (2008). Cartographie des températures de surface, des indices de gel et de dégel et de la répartition spatiale du pergélisol à l'aide du Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Université Laval, thèse de doctorat, 145 p.
- Hachem, S., Allard, M. et Duguay, C. (2009). Using the MODIS land surface temperature product for mapping permafrost: an application to northern Québec and Labrador, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20: 407–416. doi: 10.1002, 672 p.
- Hachem, S., Duguay, C. R. et Allard, M. (2012). Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain, *The Cryosphere*, 6 : 51-69, doi:10.5194/tc-6-51-2012.
- Hachey H.B. (1935) The circulation of Hudson Bay Water as Indicated by Drift Bottles. *Science*, 82(2125) : 275-276.
- Harper J.R. et Morris M.C. (2014) *Alaska ShoreZone Coastal Habitat Mapping Protocol*. 164 p.
- Harris, C. et Lewkowicz, A.G. (1993). Form and internal structure of active-layer detachment slides, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, Northwest-Territories, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30(8) : 1708-1714.
- Harris, C. et Lewkowicz, A.G. (2000). An analysis of the stability of thawing slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2) : 449-462.
- Héquette A. et Tremblay P. (2009). Effects of low water temperature on longshore sediment transport on a subarctic beach, Hudson Bay, Canada. *Journal of Coastal Research*, 25 : 171–180.
- Héquette A. et Tremblay P., Hill P.R. (1999). Nearshore erosion by combined ice scouring and near-bottom currents in eastern Hudson Bay, Canada. *Marine Geology*, 158 : 253–266.
- Hétu, B., Brown, K. et Germain, D. (2011). Les victimes d'avalanche au Québec entre 1825 et 2009. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 55 (3) : 273-287.
- Hétu, B. (2014). Dendrochronologie. Présentation à L'UQTR, Trois-Rivières, 11 mars 2014.
- Hétu, B. et Dubé, J.-F. (1999). L'avalanche du 1^{er} janvier 1999 à l'école Satuumavik de Kangiqsualujuaq (Québec nordique). Ministère de la Sécurité publique, 24 p.
- Hill P.R., Meulé S. et Longuépée H. (2003). Combined-flow processes and sedimentary structures on the shoreface of the wave-dominated Grande-rivière-de-la-Baleine delta. *Journal of Sedimentary Research*, 73(2) : 217-226.
- Hill P.R., Simard A. et Héquette A. (1999). High-resolution seismic stratigraphy of late Quaternary deposits in Manitounouk Sound, northern Quebec: Effects of rapid postglacial emergence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36 : 549-563.
- Howes D.E. (2001). British Columbia biophysical ShoreZone mapping system – a systematic approach to characterize coastal habitats in the Pacific Northwest. Puget Sound Research Conference, Seattle Washington, Paper 3a, 11 p.
- Ingram R.G. et Prinsenberg S.J. (1998). Coastal oceanography of Hudson Bay and surrounding eastern Canadian Arctic waters, In; Robinson A.R, Brink K.H. (Eds.) *The Sea*, 11(29) : 835-861
- IPCC. (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J.

Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- James T.S., Henton J.A., Leonard L.J., Darlington A., Forbes D.L. et Craymer M. (2014). Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States. Geological survey of Canada, Open file 7737, 72 p.
- Jamieson, B. et Stethem, C., (2002). Snow avalanche hazard and management in Canada: Challenges and progress. *Natural Hazards*, 26 : 35-53.
- Johnson D.W. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. New York: Wiley, 584 p.
- Joly S., Senneville S., Caya D., Saucier F.J. (2011). Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing. *Climate Dynamics*, 36 : 1835-1849.
- Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A. et Flint P.L. (2009). Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 36(3) : 5 p.
- Lantuit H., Overduin P.P., Couture N. *et al.* (2012). The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines. *Estuaries and Coasts*, 35(2) : 383-400.
- Lauriol B. et Gray J.T. (1987). The Decay and Disappearance of the Late Wisconsin Ice Sheet in the Ungava Peninsula, Northern Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 19 : 109-126.
- Lavoie C., Allard M. et Duhammel D. (2012). Deglaciation landforms and C-14 chronology of the Lac Guillaume-Delisle area, eastern Hudson Bay: a report on field evidence. *Geomorphology*, 159 : 142-155.
- Lemieux, C., Allard, M., Fortier, D., Grandmont, L., Larrivée, K., L'Hérault, E. et Carbonneau, A.-S. (2013). Une évaluation du parc immobilier du Ministère de la santé et des services du Québec en fonction de la sensibilité du pergélisol au Nunavik. Rapport final. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 95 p.
- 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 Kangiqsualujuaq. 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.
- Lied, K. et Domaas, U. (2000). Avalanche hazard assessment in Nunavik and on Côte-Nord, Québec, Canada. Ministère de la Sécurité publique du Québec, 34 p.
- Low A.P. (1901) Report on explorations of the coasts of Hudson Strait and Ungava Bay. Geological Survey of Canada, Annual Report 11 : 118 p.

- Low A.P. (1902). Report on an exploration of the east coast of Hudson Bay from Cape Wolstenholme to the south end of James Bay. Geological Survey of Canada, Annual Report 13 : 84 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.
- Markham W.E. (1986). The ice cover, In; Martini E.P. (Eds.) *Canadian Inland Seas*, Oceanography Series 44, Elsevier, New York, 101-116.
- Massé A. et Villeneuve M. (2013). Infrastructures maritimes du Nunavik. Modélisation numérique des marées et des ondes de tempête dans la baie d’Hudson, le détroit d’Hudson et la baie d’Ungava. Rapport présenté à Ouranos par le Groupe Conseil LaSalle, 93 p.
- Massé A. et Gallant N. (2016) Marée et ondes de tempêtes dans la baie d’Hudson, la baie James, le détroit d’Hudson et la baie d’Ungava – Modélisation numérique des niveaux d’eau actuels et futurs dus aux changements climatiques. Rapport présenté à Ouranos, LaSalle NHC, Montréal, 31 p. + annexes
- Matthews, B. (1962). Snow conditions at Schefferville, winter 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.
- Matthews B. (1967) Late Quaternary Land Emergence in Northern Ungava, Québec. *Arctic*, 20(3) : 176-202
- Matthews B. (1968) Late quaternary events in Northern Ungava, Quebec. Thèse, Université McGill, 308 p.
- Maxwell J.B. (1986) A climate overview of the Canadian inland seas, In; Martini E.P. (Eds.) *Canadian Inland Seas*, Oceanography Series 44, Elsevier, New York, 79-100.
- 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.
- Messier D. (1995). Synthesis of Physical Modifications in the Koksoak River Estuary Following the Cutoff of the Caniapiscou River. Direction Ingénierie et Environnement, Société d’énergie de la Baie James, 54 p.
- 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 Schefferville. Pages 151-158. In *Permafrost, Proceedings Sec. Inter. Conf. (Yakutsk. U.S.S.R.)*, National Academy of Science. Washington, D.C.
- O’Reilly C.T., Solvason R. et Solomon C. (2005). Where are the world’s largest tides?, In; Ryan J., (Eds.), *BIO Annual Report* : 44-46.
- Owens E.H. (1994). *Canadian Coastal Environments, Shoreline Processes, and Oil Spill Cleanup*. Ottawa, Ontario: Environment Canada, Environmental Emergency Branch, Report EPS 3/SP/5, 328 p.
- Owens E.H. (2010). *Primary Shoreline Types of the Canadian North*. Ottawa, Ontario: Department of the Environment, 172 p.
- Owens E.H. et Sergy G.A. (2004). *The Arctic SCAT Manual: A Field Guide to the Documentation of Oiled Shorelines in Arctic Regions*. Edmonton, Alberta: Environment Canada, 172 p.
- 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.
- Pêches et Océans Canada. (2016). *Tables de marées et courants du Canada : lac aux Feuilles*. Service hydrographique du Canada, Ottawa.
- Prest V.K., Grant D.R. et Rampton V. (1968). *Glacial Map of Canada*. Geological Survey of Canada, 1253-A.
- Prinsenberg S. J. (1982). Tirne variability of physical oceanographic parameters in Hudson Bay. *Naturaliste canadien*, 109 : 685-700.

- Prinsenbergh S.J. (1986). The circulation pattern and current structure of Hudson, In; Martini E.P. (Eds.) Canadian Inland Seas, Oceanography Series 44, Elsevier, New York, 187-203.
- Prinsenbergh S.J. et Freeman N.G. (1986). Tidal heights and currents in Hudson Bay and James Bay, In; Martini E.P. (Eds.) Canadian Inland Seas, Oceanography Series 44, Elsevier, New York, 205-216.
- Ramseier, R.O., Gantcheff, G.S. et Colby, L. (1973). Oil Spill at Deception Bay, Hudson Strait. Environment Canada, Inland Water Directorate, Water Resources Branch, Ottawa, Scientific Series, 29.
- 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.
- Ruz M.-H. et Beaulieu N. (1998). Érosion littorale le long d'une côte en émergence rapide : détroit de Manitoonuk, Canada. Annales de Géographie, 107(600) : 160-178.
- Santé et Services sociaux. (2013). Programme ÉVAQ : un outil à considérer en cas de catastrophe. Présentation au Forum en sécurité civile, Québec, 7 et 8 mai 2013.
- Saucier F.J., Senneville S., Prinsenbergh S., Roy F., Smith G., Gachon P., Caya D. et Laprise R. (2004). Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. Climate Dynamics, 23 : 303-326.
- Savard, J.-P., Gachon, P., Rosu, C., Martin, P., Aider, R. et Saad, C. (2014). Impact des changements climatiques sur le régime des tempêtes, les niveaux d'eau et les vagues dans le Nunavik. Rapport scientifique final d'Ouranos pour le Ministère des Transports du Québec. Montréal, Québec, 110 p.
- Seguin M.K. et Allard M. (1984). La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manitoonuk, côte est de la mer d'Hudson, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 21(3) : 354-364.
- Shaw J., Taylor R.B., Forbes D.L., Ruz M.-H. et Solomon S. (1998). Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. Geological Survey of Canada, Bulletin 505, 79 p.
- Shepard F.P. (1937). Revised classification of marine shorelines. Journal of Geology, 45 : 602-624.
- Shepard F.P. (1948). Submarine Geology. New York: Harper, 348 p.
- Smith, M.W. et Riseborough, D.W. (1996). Permafrost monitoring and detection of climate change. Permafrost and Periglacial Processes 7: 301-309.
- Stethem, C.J. et Schaerer, P.A. (1979). Avalanche accidents in Canada: A selection of case histories of accidents 1955 to 1976. DBR Paper no. 834 of the Division of Building Research, Ottawa, 114 p.
- Stethem, C., Jamieson, B., Schaerer, P., Liverman, D., Germain, D. et Walker, S. (2003). Snow avalanche hazard in Canada: a review. Natural hazards, 28 : 487-515.
- 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.
- Valentin H. (1952). Die Küsten der Erde. Beiträge zur allgemeinen und regionalen Küstenmorphologie. Petermanns Geographische Mitteilungen Ergänzungsheft, 246 : 118 p.
- Vilks C., MacLean B., Deonarine C.G. et Moran K. (1989). Late quaternary paleoceanography and sedimentary environments in Hudson Strait. Géographie physique et Quaternaire, 43 : 164-178.
- 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.
- 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.

Wynja V., Demers A.-M., Laforest S., Lacelle M., Pasher J., Duffe J., Chaudhary B., Wang H. et Giles T. (2015). Mapping coastal information across Canada's northern regions based on low-altitude helicopter videography in support of environmental emergency preparedness efforts. *Journal of Coastal Research*, 31(2) : 276-290.

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/

NunatsiaqOnline. (2010). Rain, winds and high tides pound Nunavik's northern coast. Diffusé le 14 octobre 2010. http://www.nunatsiaqonline.ca/stories/article/141010_rain_wind_and_high_tides_pound_nunaviks_northern_coast/

NunatsiaqOnline. (2015). Warm wet Arctic weather leads to flight disruptions, bad roads. Diffusé le 20 novembre 2015. http://www.nunatsiaqonline.ca/stories/article/65674warm_wet_arctic_weather_leads_to_flight_disruptions_bad_roads/

Nunavut Act. (1993). <http://www.canlii.org/ca/sta/n-28.6/whole.html>

ANNEXE 1 : GUIDE DES ALÉAS NATURELS POTENTIELLEMENT OBSERVABLES AU NUNAVIK

**Guide des aléas naturels potentiellement observables au Nunavik /
Guide of the potentially observable natural hazards in Nunavik**



**Table des matières /
Table of contents**

Détails et procédures / Details and procedures	1
Glissement de terrain / Landslide	2
Géelifluxion / Gelifluction	3
Coulée de débris / Debris flow	4
Avalanche de neige humide / Slush avalanche	5
Avalanche de neige sèche / Dry snow avalanche	6
Éboulement rocheux / Rockfall	7
Affaissement thermokarstique / Thermokarst subsidence	8
Thermo-érosion / Thermal-erosion	9
Érosion côtière et fluviale / Coastal and fluvial erosion	10
Érosion par le vent / Wind erosion	11
Crue soudaine et inondation / Flash flood and flood	12
Drainage d'un lac / Lake drainage	13
Embâcle et débâcle glaciaire / Ice-jam and break-up	14
Poussée glacielle / Ice-push	15
Glaçage / Icing	16
Butte saisonnière à noyau de glace / Frostblister.....	17
Tremblement de terre / Earthquake	18
Sécheresse / Drought	19
Feu / Wildfire	20
Glossaire [FR]	21
Glossary [EN]	22
Références / References	23
Notes	24

Détails et procédures / Details and procedures

Lorsque vous observez un aléa présenté dans ce guide, voici les étapes à suivre / When you observe a hazard presented in this guide, here are the steps to follow :

	ÉTAPE 1	STEP 1
1	Prendre une photo de l'aléa et noter son numéro de photo.	Take a picture of the hazard and note the photo number.
2	Écrire la date (jour/mois/année).	Write the date (day/month/year).
3	Écrire votre nom complet.	Write your full name.
4	Écrire les coordonnées GPS si votre appareil photo n'a pas de GPS.	Write the GPS coordinates of the hazard if your camera does not have GPS.
5	Si vous observez d'autres détails importants, notez les dans la section Notes à la fin du guide.	Note any other important detail in the Notes section at the end of the guide.

Personne ressource / Contact person :

Jonathan Roger
Professionnel de recherche / Research coordinator
Centre d'études nordiques / Centre for Northern Studies
Téléphone : (418) 656-2131 ext : 8298
Courriel : jonathan.roger@cen.ulaval.ca

Glissement de terrain / Landslide

[FR] Un glissement de terrain est un phénomène géologique où une masse de terre descend sur une pente sous l'influence de la gravité. Après la mise en mouvement, la masse conserve globalement sa consistance et son apparence. Parfois, la surface est caractérisée par la présence de morceaux de végétation. Les glissements de terrain surviennent lorsque la chaleur progresse rapidement dans la couche superficielle du sol et que celle-ci contient beaucoup de glace. Ils ont tendance à survenir vers la fin d'un été particulièrement chaud alors que la chaleur pénètre plus profondément que les années précédentes. Ils surviennent sur des sols très riches en glace, par exemple les argiles marines ou les tills.

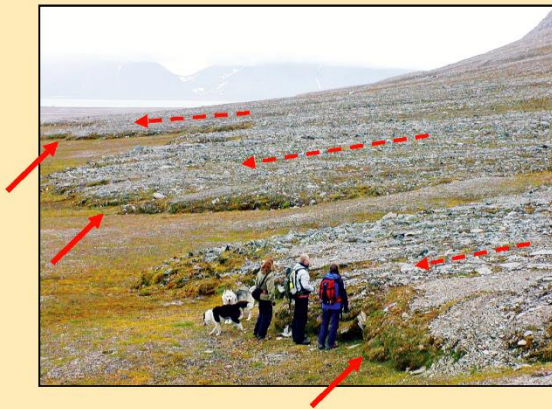
[EN] A landslide is the downslope movement of a mass of soil under the influence of gravity. After setting in motion, the mass generally retains its consistency and appearance. Sometimes, the surface is characterized by the presence of vegetation pieces. Landslides occur when heat is progressing rapidly in the surface layer of the soil and the layer contains a lot of ice. They tend to occur near the end of a particularly hot summer when the heat penetrates deeper than in previous years. Landslides occur on very ice-rich soils, such as marine clays or tills.



Gélifluxion / Gelifluction

[FR] La gélifluxion consiste à la descente lente de la surface du sol sur les pentes. Il s'agit en fait du glissement en été de la partie superficielle dégelée du sol sur le sol encore gelé en-dessous. La présence du sol gelé sous la surface empêche l'eau de pénétrer en profondeur dans le sol et favorise une augmentation de la quantité d'eau dans la partie superficielle du sol au point de la rendre semi-liquide. Ainsi lors du dégel en été les sédiments gorgés d'eau se mettent à descendre sur les pentes. Les coulées de gélifluxion sont caractérisées par une surface assez uniforme et un front abrupt sous forme de lobe.

[EN] Gelifluction is the slow downslope flow of soil surface on the slopes. It is the creep of the thawed soil surface layer on the ground still frozen underneath. The presence of the frozen soil underneath the thawed surface prevents the water to penetrate deeply into the soil and promotes an increase in the amount of water in the surface layer of the soil to the point of making it semi-liquid. Thus, during summer thaw waterlogged sediments begin to descend on the slopes. The gelifluction flows are characterized by a fairly uniform surface and a steep lobe-shaped front.

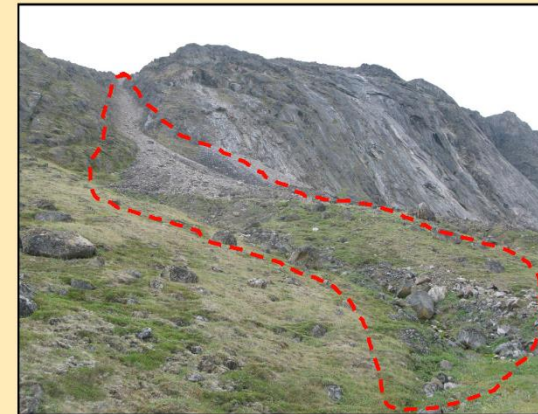


3

Coulée de débris / Debris flow

[FR] Les coulées de débris sont des mouvements de masse rapides de roches et/ou de débris le long d'une pente. Généralement, les coulées de débris sont causées par une forte pluie soudaine et/ou par une fonte rapide de neige. L'eau est absorbée par les débris, ce qui déclenche le mouvement vers le bas de la pente. Les coulées de débris peuvent parcourir des distances importantes à de très grandes vitesses. Les sédiments déposés au front de la coulée forment de larges cônes, souvent au bas des pentes.

[EN] Debris flows are rapid mass movements of rock and/or debris along a slope. Generally, debris flows are caused by a sudden heavy rain and/or by a rapid snowmelt. The water is absorbed by the debris, triggering a flow down the slope. Debris flows can travel considerable distances to a high speed. Sediment deposition at the front of the flows produces large cone or fan shapes, often at the foot of the slopes.

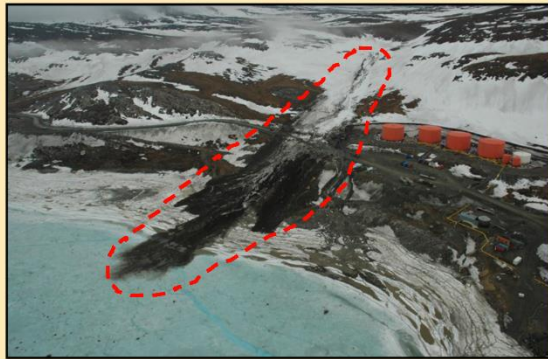


4

Avalanche de neige humide / Slush avalanche

[FR] Les avalanches de neige humide se produisent généralement lors d'une fonte de neige rapide et de pluies abondantes. Elles se composent généralement d'un mélange d'eau, de neige, de boue et de blocs rocheux. Les avalanches de neige humide surviennent dans des ravins ou des corridors torrentiels qui dévalent des pentes. Elles peuvent également survenir sur des pentes douces. Les dépôts laissés par les avalanches de neige humide sont normalement sombres et sales.

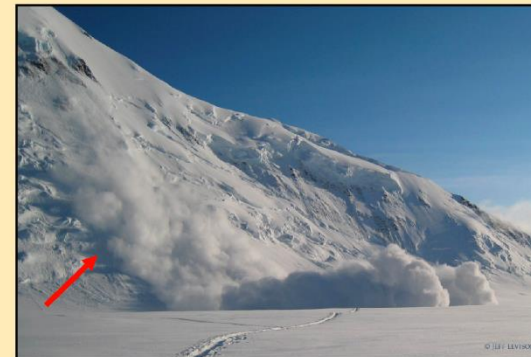
[EN] Slush avalanches generally occur during a rapid melting of snow and heavy rains. They usually consist of a mixture of water, snow, mud and boulders. Slush avalanches generally occur in ravines or torrential corridors that flow down the slopes. They can occur on very gentle slope angles. The deposits left by the slush avalanches are normally dark and dirty.



Avalanche de neige sèche / Dry snow avalanche

[FR] Une avalanche de neige correspond au glissement rapide d'une masse de neige le long d'une pente sous l'effet de son propre poids ou de la gravité. Les avalanches de neige se développent dans les endroits caractérisés par une chute de neige abondante. Elles sont particulièrement favorisées dans les zones de fortes pentes. La majorité des avalanches débutent comme des avalanches de neige qui, souvent en court de route, captent une quantité variable de débris rocheux de tailles diverses devenant ainsi des avalanches de débris. La neige et les débris déposés au front de l'avalanche prennent la forme de larges cônes, souvent au bas des pentes.

[EN] A snow avalanche is the rapid flow of a mass of snow along a slope under the influence of its own weight or gravity. Snow avalanches develop in environments characterized by abundant snowfall. Such activity is especially favored in areas of steep slopes. Most avalanches start as snow avalanches, then picking up varying amounts of rock debris where they run, ultimately becoming debris avalanches. Sediment deposition at the front of the avalanche produces large cone or fan shapes, often at the foot of a slope.



Éboulement rocheux/ Rockfall

[FR] Un éboulement rocheux correspond à une chute rapide de fragments de roches de tailles différentes détachés d'une falaise ou d'une pente très raide. Les fragments rocheux tombés par gravité s'accumulent à la base de la pente. L'éboulement rocheux est le mouvement de masse le plus rapide et est plus fréquent dans les zones de montagne. Il est lié à différents facteurs comme l'érosion ou les conditions météorologiques. Lors de leur chute, les fragments rocheux tombent vers le bas de la pente dans une série de bonds. Le mouvement n'est pas guidé par une surface de glissement.

[EN] Rockfall is the relatively free falling or precipitous movement of a newly detached segment of bedrock of any size from a cliff or other very steep slope. The rock fragments fallen by gravity accumulate at the base of slopes. They are related to factors such as erosion or weather conditions. It is the fastest form of mass movement and is most frequent in mountain areas. Movement may be straight down, or in a series of leaps and bounds down the slope; it is not guided by an underlying slipping surface.



7

Affaissement thermokarstique/ Thermokarst subsidence

[FR] L'affaissement thermokarstique est un phénomène lent et progressif qui se caractérise par l'abaissement d'une surface suite à une perte de soutien. Ce phénomène est associé à une perte d'eau lors du dégel et de son élimination soit par évaporation ou par drainage. Le dégel peut provenir de la chaleur produite par une construction ou par une activité industrielle laquelle est directement transférée au pergélisol (sol gelé), avec pour résultats le dégel du pergélisol qui supporte la structure. Les affaissements thermokarstiques provoqués par le dégel du pergélisol entraînent la déformation des bâtiments et des dommages structurels. L'affaissement se produit généralement sans ouverture de cavité, même si des fissures peuvent apparaître.

[EN] Thermokarst subsidence is a slow and progressive process characterized by the downward displacement of surface material. It is associated with a loss of water upon thawing and its removal by either evaporation or drainage. Thawing can come from the heat generated by a construction or industrial activity which goes directly into the permafrost (frozen soil), so the result is the thawing of the permafrost that supports the structure. Thermokarst subsidence caused by thawing permafrost causes the deformation of buildings and other structural damages. It usually occurs without opening cavity, although cracks can appear.



8

Thermo-érosion/ Thermal-erosion

[FR] La thermo-érosion résulte principalement de la fonte des neiges, des précipitations et du dégel du pergélisol (sol gelé) en été. L'eau se concentre dans des chenaux d'écoulement et peut aussi être concentrée dans une ornière (trace profonde formée par les roues d'un véhicule) ou dans une fissure remplie de glace (coin de glace). L'eau entre éventuellement en contact avec le pergélisol et érode le sol gelé. Rapidement, un ou des ravins peuvent se creuser. Les ravins qui en résultent sont souvent caractérisés par la forme d'un "T" inversé.

[EN] Thermal-erosion mainly results from snowmelt, precipitation and thawing permafrost (frozen soil) in summer. Water is concentrated in flow channels and can also be concentrated in a rut (deep mark formed by the wheels of a vehicle) or in a crack filled with ice (ice wedge). Running water comes in contact with permafrost and erodes the frozen soil. Quickly, ravines may widen. The gullies that result are often characterized by an inverted "T" cross-profile.



Érosion côtière et fluviale/ Coastal and fluvial erosion

[FR] L'érosion côtière et fluviale est un processus naturel qui affecte les côtes et les berges des cours d'eau et des lacs. Ce phénomène est généralement lent et graduel, mais dans certains secteurs, compte tenu de la nature des sols et de la configuration de la côte, il peut être très rapide. Les processus en cause tels que les vagues, les courants et les vents détachent les sédiments des côtes et des berges, les transportent puis les déposent plus loin. Des tempêtes successives ou une tempête particulièrement violente peuvent entraîner un recul important des côtes et des berges. Les vagues et les forts courants entraînent l'exposition du sol gelé (pergélisol), lequel dégel rapidement au contact de l'eau.

[EN] Bank and fluvial erosion is a natural process that affects coasts and banks of rivers and lakes. This phenomenon is generally slow and gradual, but in some areas, given the nature of the soil and the configuration of the coast, it can be very fast. The processes involved, such as waves, currents and winds, erode sediments of the coasts and banks, carry them away, and subsequently deposit them far from their original location. Successive storms or a particularly violent storm can cause significant coastal and banks retreat. Storms waves and high currents cause the exposure of frozen ground (permafrost), which thaws quickly in contact with water.



Érosion par le vent/ Wind erosion

[FR] Les particules fines telles que le sable fin et le silt sont arrachées par le vent de la surface du sol et sont transportées sur de longues distances. Ce phénomène se produit principalement sur les terrains plats exposés au vent et là où le sol est sec et composé de particules fines. Chargé de sédiments, le vent érode la surface des sols et des roches et les autres grains de sable. Le vent peut également enlever les particules les plus fines à la surface du sol et ne laisser sur place que les plus grossières, lesquelles ne peuvent être transportées par le vent.

[EN] Fine particles such as fine sand and silt are detached from the land surface by wind and transported over long distances. This phenomenon occurs mostly in flat and exposed land and anywhere the soil is loose, dry, and finely granulated. Loaded of sediments, the wind erodes the soil and rock surface and also the other sand grains. Wind can also remove the smallest particles on the ground and leave behind the coarser which cannot be transported by the wind.



Sédiments grossiers laissés à la surface du sol / Coarser sediments left on the soil surface

Surface du sol érodé / Eroded soil surface

Crue soudaine et inondation/ Flash flood and flood

[FR] Une crue correspond à une montée rapide et soudaine du niveau d'eau d'une rivière ou d'un fleuve alors que l'inondation correspond à l'invasion des terres par les eaux qui débordent de leur canal. Les crues et les inondations sont dues à des conditions météorologiques exceptionnelles d'une longue durée ou par une pluie violente de courte durée. Elles peuvent également survenir lors de la période de fonte des neiges, lors d'une rupture de barrage de glace (débâcle) ou lors d'un drainage rapide d'un lac. Les crues peuvent transformer de petits ruisseaux en torrents dévastateurs et causer beaucoup de dommages.

[EN] Flash flood is a quick and sudden rise of stream or river water level while flood is the invasion of land by waters overflowing their channel. Flash floods and floods are due to exceptional weather conditions for a considerably long period or by a heavy torrential rain of a short duration. They can also occur during the snowmelt period, during the breaking of an ice dam (break-up) or during fast lake drainage. Flash floods can transform small streams in devastating torrents and can cause a lot of damage.



Crue soudaine / Flash flood

Inondation / Flood

Drainage d'un lac/ Lake drainage

[FR] Le drainage d'un lac peut être très rapide, parfois catastrophique. La cause principale du drainage d'un lac est l'érosion le long de canaux, superficiels ou souterrains, interconnectés par des fissures remplies de glace (coins de glace). Ce phénomène survient lors de la période de fonte des neiges ou après une pluie torrentielle d'été. Dans les zones côtières, les lacs peuvent être drainés par le recul rapide de la côte due à l'érosion par l'action des vagues. Les activités humaines telles que la construction d'une route au bulldozer près du point de sortie d'un lac peut aussi conduire à un drainage rapide.

[EN] Lake drainage can be very fast and sometimes catastrophic. The main cause of the lake drainage is erosion along channels, superficial or underground, interconnected by cracks filled with ice (ice wedge). The phenomenon occurs during the high water snowmelt period or after a torrential summer rainstorm. In coastal areas, lakes may be drained by rapid coastal retreat associated with erosion by wave action. Man-made activities such as the construction of a bulldozed road at the lake outlet can also lead to fast lake drainage.



13

Embâcle et débâcle glaciaire/ Ice-jam and break-up

[FR] Un embâcle est une accumulation de glace dans un cours d'eau pouvant former un barrage de glace. La glace peut atteindre près de 2 m d'épaisseur. La rupture du barrage de glace, appelée débâcle, peut se déclencher de deux façons. La première survient lorsqu'une augmentation rapide de l'écoulement de l'eau vient créer une pression sur le barrage de glace et le brise. La seconde se produit lorsque le couvert de glace fond sur place dû à l'augmentation des températures de l'air et de l'eau. La débâcle est habituellement rapide et peut parfois être accompagnée d'inondations. Lors de son passage, la glace érode les rives.

[EN] An ice jam is caused by an accumulation of ice in a river that can form an ice dam. The river ice can be as much as 2.0 m thick. Breaking of the ice dam, called break-up, can be triggered in two ways. The first occurs when a rapid increase in water flow creates pressure on the ice accumulation and breaks it. The second occurs when the ice cover deteriorates locally due to the increased temperatures of the air and water. Break-up is usually rapid and often accompanied by flooding. The river ice erodes the shore surface.



14

Poussée glacielle/ Ice-push

[FR] Poussée exercée sur les rives par l'expansion de la glace sur les baies, les détroits et les lacs. Généralement le phénomène de poussée glacielle suit une augmentation des températures. La glace de mer est forcée, par les vagues et les forts vents du large, de s'étendre sur la côte. Une fois sur les rives, la glace pousse et creuse les sédiments de plage pour former des bourrelets en-dessous et au-dessus de la zone de marée haute. Les poussées glacielles se produisent aussi sur les berges de plans d'eau intérieures qui sont assez grands pour permettre au vent de faire bouger la couverture de glace.

[EN] Lateral pressure that is caused by the expansion of ice on bays, straits and lakes. Generally, ice-push follows a rise in temperature. Sea ice is forced, by waves and strong onshore winds, to lie upon the coast. Once on the banks, the ice pushes and scours beach sediments to form bulges below and above the high tide zone. Ice-pushes also occur around the shores of inland water bodies that are large enough to permit wind-induced movement of the ice cover.



15

Glaçage/ Icing

[FR] Les glaçages sont des couches de glace qui se forment soit en surface du sol, soit dans le lit d'un cours d'eau ou d'un lac. Ils sont le produit de l'eau qui gèle lorsqu'elle coule en surface en hiver. L'écoulement souterrain peut se faire dans la partie superficielle du sol non gelée. Les glaçages peuvent atteindre quelques mètres d'épaisseur et s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. Ces couches de glace fondent tardivement en été. Les glaçages forment des dômes lorsque l'eau continue de s'accumuler sous une première couche de glace déjà formée. Ils surviennent souvent dans le lit de rivières qui conservent un léger débit en hiver sous leur lit.

[EN] Icings are layers of ice that form either on the soil surface or in the bed of a river or lake. They occur when freezing water flows on the surface in winter. Groundwater flow can be in the superficial part of the unfrozen soil. Icings can reach several meters thick and extend over several hundred meters. They can melt very late in the summer. They form domes when the water continues to accumulate under a first layer of ice already formed. Icings often occur in the bed of rivers that retain a small flow under their bed during winter.



16

Butte saisonnière à noyau de glace/ Frostblister

[FR] L'eau qui circule dans le sol se concentre en un endroit et forme une lentille de glace emprisonnée sous la surface du sol gelé l'hiver. Ce sol gelé bombe et se fissure suite à la pression créée par l'eau. Lorsque la lentille d'eau gèle, elle devient le cœur glacé de la butte. Étant donné qu'elle se forme sous la surface du sol, la glace est recouverte d'une couche de sédiments ou de végétaux. Cette couche est fréquemment déchirée et la glace est visible au printemps dans les fissures et les petits effondrements de terrain. Normalement, la glace fond au cours de l'été, mais il arrive parfois qu'elle survive plus d'une année. Les buttes saisonnières à noyau de glace se reforment à peu près au même endroit à toutes les années, soit au pied de pentes, dans des milieux humides et dans des endroits où il y a des sources d'eau.

[EN] Water flowing in the soil concentrates at one place and form an ice lens trapped under the surface of the frozen soil in winter. This frozen ground will swell and crack due to the pressure created by the water. When the water lens freezes, it becomes the frozen heart of the mound. Because it is formed under the ground surface, the ice is covered with a layer of sediments or plants. In spring, this layer is often torn and ice is visible in the cracks and small field collapses. Normally, the ice melts during the summer, but sometimes it survives more than a year. They are reformed at approximately the same place every years, at the foot of slopes, in wet environments and where there are water sources.



17

Tremblement de terre/ Earthquake

[FR] Un tremblement de terre est un mouvement de la surface du sol, allant d'un léger tremblement à une secousse violente capable de secouer les bâtiments. Les secousses se propagent à travers le sol à partir du centre du tremblement de terre. Les tremblements et les secousses sont associés à des mouvements de la roche sous la surface de la Terre. Les tremblements de terre peuvent avoir des effets catastrophiques sur les infrastructures et peuvent également causer des glissements de terrain, des avalanches et des fissures dans le sol.

[EN] An earthquake is a motion of the ground surface, ranging from a faint tremor to a violent shock capable of shaking buildings. The tremors spread through the ground from the center of the earthquake. The trembling and shaking are associated with movements of the rock below the Earth's surface. Earthquakes can have catastrophic effects on infrastructures and can also cause landslides, avalanches and soil cracks.



18

Sécheresse / Drought

[FR] Période climatique prolongée durant laquelle la quantité des précipitations est inférieure à la moyenne enregistrée sur plusieurs années dans la région. La quantité des précipitations est généralement suffisamment faible pour que l'évaporation conduise à une importante diminution de la quantité d'eau dans les sols ainsi que dans les sources d'eau souterraine et de surface.

[EN] Prolonged climatic period during which the value of precipitations is lower than average recorded over several years in the region. The value of precipitation is generally low enough so that the evaporation leads to a significant decrease in the amount of water in soils and in sources of groundwater and surface water.



19

Feu / Wildfire

[FR] Les feux peuvent se produire en milieu naturel, tel que la toundra. Ils peuvent couvrir de grands territoires rapidement. Les feux entraînent la destruction du couvert végétal et la mise à nu du sol sous-jacent. Les feux peuvent être causés par des événements naturels tels que la foudre ou par des activités humaines.

[EN] Fires can occur in the natural environment, such as the tundra. They can cover large areas quickly. Fires lead to the destruction of vegetation cover and exposure of the underlying soil. Fires can be caused by natural events such as lightning or by human activities.



20

Glossaire [FR]

Argile : Les argiles sont constituées de particules dont le diamètre est inférieur à 0,002 mm. Elles sont d'origine marine.

Blanc dehors : Un blanc dehors survient lorsque la couverture de neige et le ciel se combinent pour produire un voile blanc. Les gens ne voient pas les ombres, ni l'horizon et perdent tous sens de la profondeur et de l'orientation.

Coin de glace : Glace massive, généralement en forme de coin dont la pointe est dirigée vers le bas. Elle résulte du gel de l'eau dans des fissures dans le sol.

Couche active : Parfois appelée mollisol, la couche active est la couche superficielle du sol qui dégèle à chaque été et regèle à chaque hiver.

Front de dégel : Lorsque la surface du sol commence à dégelé, on dit que le front de dégel descend dans le sol. Généralement, le front de dégel correspond à la ligne de température égale à 0 °C dans le sol.

Front de gel : Lorsque la surface du sol commence à geler, on dit que c'est la progression du front de gel dans le sol. Cependant, dans les régions où le pergélisol est froid (par exemple de quelques degrés sous 0 °C) un second front de gel remonte vers le haut aussi à partir de la base de la couche active. C'est le gel par le haut et le bas.

Lentilles de glace : Très abondant dans les sols à texture fine (silt, argiles, sables fins et très fins). Ce type de glace se présente sous forme de lentilles variant en épaisseur de moins de 1 mm à plusieurs centimètres.

Pergélisol : Le pergélisol est défini comme «Sol (ou roche) qui se maintient à une température égale ou en dessous de 0 °C pendant au moins deux ans». Stratigraphiquement, le pergélisol comprend deux couches : la couche active et le pergélisol lui-même.

Plafond du pergélisol : Limite supérieure du pergélisol, typiquement riche en glace

Teneur en eau : Quantité d'eau contenue dans un échantillon de sol dans lequel elle est en mélange, en suspension ou en dissolution.

Till : Matériau transporté et déposé par des glaciers. Le till est généralement constitué de sable, silt, argile, gravier et blocs.

Glossary [EN]

Active layer : The active layer is the surface layer of the ground that thaws every summer and freezes again every winter.

Clay : Clays are composed of particles with a diameter less than 0.002 mm and of marine origin.

Ceiling permafrost : Upper permafrost limit, typically ice-rich.

Freeze front : When the soil surface begins to freeze, it is the progress of the freeze front in the soil. However, in areas where the permafrost is cold (i.e. a few degrees below 0 °C), there can be a second freeze front going up from the base of the active layer. This is the two-sided freezing.

Ice lenses : Very abundant in fine-textured soils (silt, clays, fine and very fine sands). This type of ice is in the form of lenses varying in thickness from less than 1 mm to several centimeters.

Ice-wedge : A massive, generally wedge-shaped, ground ice composed of vertically orientated ice which extends below the permafrost. It results from the freezing of water in cracks.

Permafrost : Permafrost is defined as "Soil (or rock) that is maintained at a temperature at or below 0 °C for at least two years" (Comité Associé de Recherches Géotechniques, Conseil national de recherches du Canada, 1988). Stratigraphically, permafrost has two layers: the active layer and permafrost itself (French, 2007).

Thaw front : When the soil surface begins to thaw, the thaw front descends into the ground. Generally, the thaw front corresponds to the line of equal temperature of 0 °C in the ground. The maximum depth reached by the thaw front at the end of summer defines the thickness of the active layer.

Till : Material carried and laid down by glacial ice. Till is generally composed of sand, silt, clay, gravel and boulders.

Water content : Amount of water contained in a soil sample. The water can be mixed, in suspension or in solution.

Whiteout : Whiteout occurs when snow cover and sky combine to produce a white glow. People in whiteouts do not see shadows or horizon and lose all sense of depth and orientation.

**Références/
References**

Buffin-Bélanger, T. et Héту, B., 2008. Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec. In : J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil, 2008. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec, 594 p.

Étongué Mayer, R., Roche, Y. et Mouafo, D., 2002. Dictionnaire des termes géographiques contemporains. Montréal, Guérin, 343 p.

Gerard, R., 1990. Hydrology of floating ice. National Hydrology Research Institute, science report no. 1, Saskatoon, pp. 103–134.

French, H.M. 2007. The periglacial environment. John Wiley and Sons, Chichester, England ; Hoboken, NJ, 458 p.

Gerard, R., 1990. Hydrology of floating ice. National Hydrology Research Institute, science report no. 1, Saskatoon, pp. 103–134.

L'Hérault, E., 2009. Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 139 p.

Mackay, J. R., 1988. Catastrophic lake drainage, Tuktoyaktuk peninsula area, District of Mackenzie. Geological Survey of Canada, paper 88-1D, 83–90.

Mackay, J. R., 1981. An experiment in lake drainage, Richards Island, Northwest territories: a progress report. Geological Survey of Canada, paper 81-1A, 63–68.

Strahler, A. et Archibold, O.W., 2008. Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment. Fourth Edition Canadian Version, Wiley, 652 p.

Trenhaile, A.S., 2010. Geomorphology: A Canadian Perspective. Fourth Edition, Oxford University Press, 558 p.

Notes

