

Caractérisation géotechnique et cartographie améliorée du pergélisol dans les communautés nordiques du Nunavik

Umiujaq

Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, gouvernement du Québec

Michel Allard, Alexandre Chiasson, Arianne B. St-Amour, Sarah Aubé-Michaud,
Valérie Mathon-Dufour, Emmanuel L'Hérault,
Samuel Bilodeau et Catherine Deslauriers
Centre d'études nordiques, Université Laval



Novembre 2020

AVANT-PROPOS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) et le gouvernement du Québec pour la confiance et le financement accordés dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques en vue de la réalisation de cette étude. Nous soulignons également la collaboration de l'Administration régionale Kativik. Nous sommes redevables aussi aux communautés visitées pour leur hospitalité et leur engagement envers ce projet. Les auteurs tiennent également à souligner l'importante participation de Sarah Aubé-Michaud, qui fut responsable du projet, de 2017 à 2019.

Auteurs :

- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Alexandre Chiasson, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Arianne B. St-Amour, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Valérie Mathon-Dufour, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Sarah Aubé-Michaud, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Samuel Bilodeau, étudiant 2^e cycle, Département de géographie, Université Laval
- Catherine Deslauriers, étudiante 2^e cycle, Département de géographie, Université Laval

Citation recommandée (rapport général) :

Allard, M., Chiasson, A., B. St-Amour, A., Mathon-Dufour, V., Aubé-Michaud, S., L'Hérault, E., Bilodeau, S. et Deslauriers, C., (2020). Caractérisation géotechnique et cartographie améliorée du pergélisol dans les communautés nordiques du Nunavik. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval.

Citation recommandée (par rapport) :

Chiasson, A., Allard, M., B. St-Amour, A., Mathon-Dufour, V., Aubé-Michaud, S., L'Hérault, E., Bilodeau, S. et Deslauriers, C., (2020). Caractérisation géotechnique et cartographie améliorée du pergélisol dans les communautés nordiques du Nunavik : Umiujaq. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 101 pages.

Adresses courriel de correspondance : Michel.allard.3@ulaval.ca,

Emmanuel.lherault@cen.ulaval.ca, Alexandre.chiasson.2@ulaval.ca

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	I
TABLE DES MATIÈRES	II
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VIII
INTRODUCTION	1
1.1. CONTEXTE	1
1.2. MANDAT	3
1.2.1. <i>Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.1</i>	3
1.2.2. <i>Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.2</i>	4
2. MÉTHODOLOGIE	6
2.1. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.1	6
2.1.1. <i>Localisation des villages étudiés</i>	6
2.1.2. <i>Observations sur le terrain</i>	6
2.1.3. <i>Cartographie étendue et révisée des dépôts de surface</i>	14
2.1.4. <i>Technologie du géoradar (GPR)</i>	15
2.1.5. <i>Caractérisations géotechniques des propriétés du pergélisol</i>	16
2.1.6. <i>Compilation des informations géoscientifiques et analyses multicritères</i>	18
2.1.7. <i>Production des cartes de conditions de pergélisol et de contraintes sévères à l'aménagement</i>	19
2.1.8. <i>Production des cartes de pentes</i>	22
2.1.9. <i>Analyses multicritères et production des cartes indicielles du risque</i>	24
2.1.10. <i>Introduction dans l'étude des cartes des aléas naturels</i>	30
2.2. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.2	35
2.2.1. <i>Suivi climatique et géothermique dans les villages du Nunavik</i>	35
2.2.2. <i>Modélisation géothermique du pergélisol et simulation numérique des variations de l'épaisseur de la couche active</i>	38
2.2.3. <i>Projections et simulations</i>	39
3. LE PERGÉLISOL, LES RISQUES NATURELS ET L'AMÉNAGEMENT D'UMIUJAQ	42
3.1. CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS GÉOMORPHOLOGIQUES ET DES PROPRIÉTÉS DU PERGÉLISOL.....	44
3.1.1. <i>Carte de la géologie de surface</i>	44
3.1.2. <i>Carte des conditions de pergélisol</i>	48
3.1.3. <i>Carte des aléas naturels</i>	48
3.1.4. <i>Carte de potentiel de construction</i>	50

3.2. RÉGIME THERMIQUE ACTUEL DU PERGÉLISOL ET ANALYSES PRÉDICTIVES EN FONCTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	53
3.2.1. <i>Climat et pergélisol</i>	53
3.2.2. <i>Analyses prédictives du régime thermique du pergélisol (par câbles)</i>	57
3.2.3. <i>Projections et simulations climatiques</i>	61
4. FAITS SAILLANTS	68
RÉFÉRENCES.....	69
GLOSSAIRE	73
ANNEXES	74
A. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE GÉORADAR.....	75
CARTES DE LA COMMUNAUTÉ.....	88
CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE	89
CARTE DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL	91
CARTE DE POTENTIEL DE CONSTRUCTION	93
CARTE DES ALÉAS NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS.....	95
PLANCHES SYNTHÈSES	97
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ D'UMIUAQ	98
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ D'UMIUAQ - CARTES SYNTHÈSES	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de distribution du pergélisol et localisation des communautés au Nunavik (modifiée de L’Hérault et Allard, 2018).....	8
Figure 2 : Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik (adapté de L’Hérault et al., 2017 et L’Hérault et Allard, 2018).....	9
Figure 3 : Rencontre avec les responsables locaux de la communauté d’Akulivik, août 2018.....	13
Figure 4 : Enregistrement de levés de géoradar sur les routes de la communauté d’Akulivik, août 2018.....	13
Figure 5 : Diagramme synthèse des différentes couches d’information géographique utilisées dans l’analyse matricielle en vue de produire des cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes (tirée de L’Hérault et al., 2013).	18
Figure 6 Informations géoscientifiques utilisées pour la construction des cartes de conditions du pergélisol pour la communauté d’Inukjuak. Tiré de Carbonneau et al. (2015).	21
Figure 7 : Carte des contraintes sévères à l’aménagement pour la communauté d’Inukjuak. La couleur rouge identifie les endroits non constructibles, à savoir le littoral marin, les zones intertidales, les plaines alluviales actuelles, les berges de lacs et les ruisseaux.	22
Figure 8 : A) Orthomosaïque générée à partir des photographies aériennes prises en 2010. B) MNE de 2010 de faible résolution (4 m x 4 m) disponible pour la zone en périphérie du milieu bâti. C) Superposition du MNE haute résolution (1 m x 1 m) produit à partir des données LIDAR de 2010 sur le MNE faible résolution (zone bleue). D) comblement des zones non couvertes par les deux MNE de 2010 (zone bleue et rose) avec le MNE haute résolution (1 m x 1 m) de 2002 produit par procédé photogrammétrique. E) MNE mixte qui couvre la totalité de la superficie de la nouvelle carte des dépôts de surface et des conditions du pergélisol (Cadre rouge). Carte de relief ombragé (F) et carte des pentes (G) produites à partir du MNE mixte. Tiré de L’Hérault et al. (2013).....	23
Figure 9 : Structure et pondération de l’information géospatiale à l’intérieur de l’équation matricielle utilisée pour calculer l’indice de risque. Tiré de Carbonneau et al. 2015.....	28
Figure 10 : Détermination du niveau de risque par l’intermédiaire de huit catégories de critères.....	32
Figure 11 : Matrice de risque accompagnée de ses légendes.....	33
Figure 12 : Légende des cartes des aléas naturels actuels et appréhendés dans les villages du Nunavik.....	34
Figure 13 : Comparaison d’une année climatique, formée du couplet des saisons de gel et de dégel, et d’une année calendaire, du 1 ^{er} janvier au 31 décembre, en fonction du temps (Allard et al., 2018 – adapté de Mathon-Dufour, 2014).	38
Figure 14 : Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29) pour la sous-région du Nord-du-Québec (tiré de Ouranos, 2015).....	40
Figure 15 : Simulations retenues par Ouranos et utilisées par le CEN, sauf le modèle HadGEM2 (encadré en rouge), car leur calendrier comprime les données sur 360 jours.....	41

Figure 16 : Localisation des levés de géoradar et des travaux de terrain réalisés à l'été 2017 à Umiujaq.....	43
Figure 17 : Profil de géoradar réalisé sur la route le long du littoral, suggérant la présence de sédiments littoraux et pré-littoraux stratifiés sur roc. La profondeur du dépôt peut atteindre les sept mètres d'épaisseur à l'endroit du levé 42.....	45
Figure 18 : Zone de sédiments littoraux et pré-littoraux minces sur roc (Mn/R) au sud de la communauté d'Umiujaq.....	46
Figure 19 : Interprétation du levé de géoradar 52 près de la route menant à l'aéroport. Les levés de GPR démontrent la présence d'un dépôt gélif sous des dépôts éoliens (Er).	47
Figure 20 : Localisation d'un cabanon abandonné près de la baie d'Hudson en raison du recul de la micro-falaise (3 m de hauteur).	49
Figure 21 : Interprétation du levé de géoradar 54 en bordure de la route menant à l'aéroport. Les levés de GPR démontrent la présence d'un dépôt gélif dans les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (GFf2).....	52
Figure 22 : Normale climatique des précipitations sous forme de pluie (mm) et de neige (cm) pour la période 1981-2010 dans la région d'Umiujaq, calculée à partir de quatre réanalyses (Charron, 2015).	54
Figure 23 : Direction et vitesse des vents à la station climatique UMIROCA, localisée sur le versant côtier d'Umiujaq, pour la période de 1997 à 2017.....	54
Figure 24 : Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel enregistrée aux câbles à thermistances UMIROCA et VDTSYBU à Umiujaq pour la période de 1997 à 2017. La couche active a dépassé 20 m d'épaisseur (profondeur de la plus profonde thermistance sur le câble) dans le roc (basalte) entre 2007 et 2010 et entre 2013 et 2016.	55
Figure 25 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 1997 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017 enregistrée au câble UMIROCA, localisé dans le roc, sur le versant côtier d'Umiujaq.	55
Figure 26 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2008 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017 enregistrée au câble VDTSYBU, localisé dans le silt sableux de la Vallée-des-Trois près du village d'Umiujaq.....	56
Figure 27 : Température moyenne annuelle de l'air (TMAA) simulée à partir de 10 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5 d'augmentation de gaz à effet de serre pour Umiujaq de 1950 à 2100.....	57
Figure 28 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans des silts et sables, à Umiujaq.	59
Figure 29 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans le roc, à Umiujaq.....	60
Figure 30 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle UMI_VDTSB de 2018 à 2100.	61

Figure 31 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle UMI_VDTSB..... 62

Figure 32 : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l’année 2010, pour le modèle UMI-VDTSB..... 63

Figure 33 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4,5 minimum d’augmentation de gaz à effet de serre, b) 4,5 moyen d’augmentation de gaz à effet de serre, c) 4,5 maximum d’augmentation de gaz à effet de serre, d) 8,5 minimum d’augmentation de gaz à effet de serre, e) 8,5 moyen d’augmentation de gaz à effet de serre et f) 8,5 maximum d’augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle UMI_ROC de 2018 à 2100. 64

Figure 34 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle UMI_ROC. 65

Figure 35 : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active soumise à une série de 5x les températures observées durant l’année 2010, pour le modèle UMI-ROC. 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Calendrier des travaux de terrain réalisés au cours des étés 2017 et 2018. ..	10
Tableau 2 : Tableau synthèse des travaux de terrain réalisés aux étés 2017 et 2018	12
Tableau 3 : Indice de sensibilité au tassement et valeurs de pentes critiques selon les conditions de pergélisol. Tiré de Carbonneau et al. (2015).	25
Tableau 4 : Classification du potentiel à la construction selon la valeur de l'indice de risque. Tiré de Carbonneau et al. 2015.	28
Tableau 5 : Corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique accompagnées des types de fondations adaptés et la valeur de pente critique pour chacune des classes.	29
Tableau 6 : Liste des sites de mesures sélectionnés, du type de données, de la couverture temporelle des données disponibles et du type de matériel géologique dans lequel se retrouvent les câbles à thermistances pour les 13 communautés du Nunavik.	35
Tableau 7 : Caractéristiques principales de chaque scénario RCP (tiré de Ouranos, 2015, adapté de Rogelt et al., 2012).	40
Tableau 8 : Grille d'analyse des contraintes au développement de la communauté d'Umiujaq (Tiré de Aubé-Michaud et al., 2019).	50
Tableau 9 : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station climatique UMIROCA, localisée sur le versant côtier d'Umiujaq, pour la période de 2004 à 2017.	53
Tableau 10 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble UMI_VDTSB, localisé en terrain naturel à Umiujaq.	58
Tableau 11 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble UMI_ROC, localisé en terrain naturel près de l'aéroport.	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ARK : Administration régionale Kativik

CEN : Centre d'études nordiques

ICAR : Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale de Ressources naturelles Canada

INRS-ETE : Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe international d'étude sur le climat

GPR : *Ground Penetrating Radar* (Géoradar)

ICP : Indice de contrainte des pentes

IST : Indice de sensibilité attribué au tassement

MAMH : Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation

MAMOT : Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire

MERN : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

MNE : Modèle numérique d'élévation

MSP : Ministère de la Sécurité publique du Québec

MTQ : Ministère des Transports du Québec

RCP : Representative Concentration Pathways

SHQ : Société d'habitation du Québec

SIG : Système d'information géographique

INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

Bien que l'existence et la distribution géographique du pergélisol au Nunavik étaient relativement bien documentées depuis longtemps (voir Allard et Séguin, 1987, pour une mise à jour de l'époque), la société québécoise a commencé à rencontrer des défis géotechniques surtout lors de la construction des aéroports dans plusieurs villages par le ministère des Transports du Québec (MTQ), dans la période allant de 1985 à 1992 (L'Hérault *et al.*, 2013). Alors que les préoccupations liées aux impacts du réchauffement climatique dans les régions de pergélisol commençaient à se faire entendre dans l'Arctique et dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord, le Nunavik demeurait épargné, car le nord-est du Canada continuait de se refroidir lentement depuis le temps de la 2^e guerre mondiale (Allard *et al.*, 1995; Kasper et Allard, 2001). La tendance climatique s'est inversée abruptement en 1993 et le climat du Nunavik s'est ensuite réchauffé de plus de trois degrés en à peine une décennie, engendrant des impacts et forçant les ministères responsables de la sécurité publique, des infrastructures de transport, de l'habitation et des infrastructures urbaines à intervenir et à appuyer les pouvoirs régionaux dans leurs besoins en adaptation. Un glissement de terrain dans la couche active survenu à Salluit le 5 septembre 1998, à la fin d'un été particulièrement chaud, et qui a provoqué l'arrêt de l'expansion du village, a été le déclencheur d'une série de travaux sur les villages qui s'est poursuivie jusqu'à la présente étude.

Suivant les constatations et les préoccupations du gouvernement du Québec, le Centre d'études nordiques (CEN) a contribué à l'obtention de connaissances essentielles sur la géologie de surface et les conditions de pergélisol dans les villages du Nunavik avec le lancement de l'étude sur le village de Salluit commandée par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) de 2002 à 2004. Après le dossier de Salluit, dans le cadre du programme ICAR (Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale de Ressources naturelles Canada) coordonné au Québec par le consortium Ouranos avec des fonds fédéraux, le CEN a dressé les cartes de dépôts de surface de Tasiujaq, Kangirsuk, Akulivik et Puvirnituk (Allard *et al.*, 2007a). Tout en continuant de raffiner la méthodologie de cartographie pour la rendre mieux adaptée pour les résidents Inuit et les aménagistes, les villages avec pergélisol restants ont aussi fait l'objet d'une cartographie récemment grâce à du financement du Fonds vert obtenu par le MAMH; il s'agit des communautés de Kangiqsualujjuaq, Kuujjuaq, Aupaluk, Quaqaq, Kangiqsujuaq, Ivujivik, Inukjuak et Umiujaq (N.B. Kuujjuarapik n'a pas de pergélisol dans son espace construit).

L'intention dans cette phase 1 dédiée principalement à la cartographie était de fournir aux communautés, à l'Administration régionale Kativik (ARK) et aux autres parties intéressées une première documentation spatiale de base qui serait perfectible et ensuite de procéder dans une phase 2 à la caractérisation géotechnique du pergélisol des villages par une

campagne de forages, de sondages, de relevés de géophysique, d'échantillonnage et d'analyses en laboratoire.

Le projet précédent commandé par le MAMH (autrefois MAMOT) (phase 1) devait en principe ne comprendre que de la cartographie par analyses d'images satellitaires et de photos aériennes. Il prévoyait aussi une tournée du Nunavik en une seule fois pour présenter les résultats dans les huit communautés concernées. Cependant, afin de vérifier minimalement les interprétations de photographies aériennes, il fut nécessaire d'aller quand même sur le terrain en 2014 et d'effectuer une tournée rapide de huit villages pour observer la morphologie du terrain, effectuer quelques forages peu profonds et des sondages (en louant de la machinerie des communautés). Dans chaque village, les autorités locales ont alors été rencontrées. Par ailleurs, nous avons aussi accompagné l'ARK dans des visites de planification urbaine dans plusieurs villages en 2013 et 2014. Il en résulte que toutes les communautés du Nunavik connaissent déjà le programme et que toutes ont déjà été consultées sur les problèmes d'instabilité constatés localement. Mais la tournée formelle d'information comme prévu au contrat a dû être annulée en partie faute de temps, mais surtout parce que l'ARK a entretemps adopté un calendrier différent de consultations et de planification urbaine dans les communautés réparties sur son territoire. Ce calendrier s'étale sur une période plus longue. Or le personnel de l'ARK et les autres experts alors invités apprécient que nous les accompagnions à titre d'experts lors de ces visites pour fournir et expliquer l'information scientifique pertinente tout en contribuant à la formation du public. Le résultat est qu'un lien de confiance est maintenant établi dans toutes les communautés.

La caractérisation géotechnique plus précise des formations meubles des 13 communautés sur pergélisol du Nunavik réalisé dans le cadre la présente phase 2 fournit des connaissances précises sur la texture, la teneur en glace (globalement appelée la géocryologie), les propriétés thermiques et les propriétés mécaniques courantes du pergélisol. Or ces propriétés sont aussi les paramètres qui régissent les transferts de chaleur dans les sols et, par conséquent, la façon dont les sols seront affectés par le changement climatique. Le réchauffement des profils de température, l'approfondissement de la couche active (provoquant des tassements dus à la fonte de glace dans le sol) en réponse à l'augmentation des températures atmosphériques et les impacts possibles sur les bâtiments et infrastructures sont étroitement liés à ces propriétés. Dans ce contexte, il devient donc important d'ajouter aux connaissances géocryologiques acquises une dimension prédictive par l'analyse thermique et par des simulations fondées sur des hypothèses climatiques plausibles. Il est espéré que les résultats de ces simulations éclaireront les choix et les prises de décisions pour l'expansion des villages, pour améliorer la qualité et la résilience des habitations et, aussi, pour supporter l'urbanisation harmonieuse à laquelle aspirent maintenant les communautés.

1.2. MANDAT

1.2.1. Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.1

L'objectif général de la mesure 5.2.1 du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC) est de compléter la caractérisation géotechnique du pergélisol dans les villages du Nunavik où le pergélisol est présent (N.B. Seul le village de Kuujjuarapik n'a pas de pergélisol sur son territoire) alors qu'il manquait encore, à la fin des travaux précédents, des connaissances en vue d'appuyer les ingénieurs, les constructeurs, les aménagistes et les décideurs locaux dans la planification de l'occupation du territoire urbain en fonction de la qualité variable dans l'espace des sols gelés de façon permanente - le pergélisol. Parmi les outils de planification figure le choix des meilleurs concepts de fondations pour les différents types de bâtiments qui devront être construits ou restaurés. Outre les fondations appropriées aux conditions de sol, la planification de l'aménagement du territoire est aussi un moyen pour sélectionner les espaces à construire en tenant compte de la géomorphologie et des propriétés du pergélisol, tout en offrant des opportunités d'améliorer l'architecture urbaine et la qualité de la vie communautaire.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- 1) Procéder à un nombre adéquat d'échantillonnages pour couvrir l'ensemble des conditions de sol au moyen de sondages, de relevés géophysiques, de carottages et de forages dans les villages, tout en privilégiant les secteurs prioritaires définis à la fois par la pression du développement urbain et les aspirations des communautés.
- 2) Caractériser les propriétés géotechniques du pergélisol dans ces villages, c'est-à-dire mesurer leurs propriétés et leur comportement face au dégel par des analyses et des essais de laboratoire, afin de prédire les impacts de la phase de dégel qui s'annonce avec le changement climatique. Les normes techniques existantes et en cours d'élaboration pour cette caractérisation seront suivies pour garantir la qualité et l'utilité des résultats.
- 3) Porter une attention particulière à la disposition stratigraphique des dépôts de surface pergélisolés, notamment dans deux conditions spécifiques :
 - la profondeur au socle rocheux, qui peut servir d'assise (ex. par fonçage de pieux) ou donner lieu à des technologies nouvelles d'adaptation (ex. dégel préalable contrôlé de dépôts peu épais sur un substrat rocheux solide).
 - la présence possible de couches de pergélisol sensible au dégel à plus de 2 à 3 mètres de profondeur, en raison de la stratigraphie des dépôts quaternaires. Les travaux de terrain précédemment réalisés suggèrent que de tels dépôts existent notamment à Umiujaq et à Inukjuak (Carbonneau *et al.*, 2015). Dans de tels cas, le siège des tassements causant des dommages sous des sols en apparence stables est situé en profondeur.

4) Incorporer les nouvelles informations ainsi acquises dans la base d'informations spatiales existante et les intégrer dans les cartes de pergélisol et de potentiel de construction produites antérieurement. Une version améliorée des cartes en résultera.

5) Profiter des forages à réaliser pour y installer des câbles à thermistances munis de *data loggers* dans les villages où plus de données sont nécessaires, afin de surveiller les conditions géothermiques dans le futur. Au départ, les communautés d'Ivujivik, Kangiqsujuaq et Inukjuak étaient en effet jugées en déficit de câbles à thermistances.

6) Accompagner l'Administration régionale Kativik (ARK) et les communautés dans leurs consultations et leurs prises de décision, en les informant à titre d'experts scientifiques indépendants.

1.2.2. Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.2

Le premier objectif général de la mesure 5.2.2 du PACC est de mieux prédire le comportement du pergélisol dans l'ensemble des communautés du Nunavik (**Figure 1**) avec les meilleures et les plus probables prévisions de réchauffement climatique d'ici l'année 2100. L'intention de cet exercice est d'aider à prévoir quels secteurs sensibles, construit ou non, du territoire de chaque village est appelé à voir son pergélisol se dégrader sur un horizon de décennies, de façon à orienter dès maintenant la prise de décisions pour maintenir la qualité de l'habitat et des infrastructures. Il s'agit donc d'adaptation planifiée au changement climatique.

Le second objectif est d'évaluer le risque que poserait une variation climatique à court terme comportant une succession de quelques années particulièrement chaudes, puisque la profondeur maximum annuelle de dégel (ou épaisseur de la couche active) répond aux fluctuations climatiques inter-annuelles. En effet, un approfondissement de la couche active provoque le dégel des couches supérieures du pergélisol et crée des tassements du terrain. Sur les terrains en pente, cet approfondissement rapide est une cause connue de déclenchement de glissements de terrain. L'occurrence d'années particulièrement chaudes est donc à traiter comme un risque naturel dont l'occurrence probable doit être intégrée dans la planification de l'aménagement.

Les objectifs spécifiques initiaux du projet sont :

1) Maintenir à jour l'analyse thermique des sols du village de Salluit grâce aux données de suivi accumulées par l'instrumentation installée au cours des dernières décennies et réaliser des exercices de modélisation orientés en fonction à la fois des risques climatiques sur une courte période et des scénarios de changement à moyen et long terme. Cette mise à jour de l'analyse de risque climatique dans ce village particulièrement sensible nous apparaît importante, si l'on considère l'exemple des années chaudes que nous avons connues (années 2005, 2006 et 2010) durant lesquelles des glissements de terrain dus au dégel du pergélisol se sont produits.

2) Étendre les prévisions de comportement du pergélisol aux autres communautés. Une attention particulière sera accordée aux villages situés à la frange méridionale de la zone de pergélisol continu (c.-à-d. à la transition entre les zones continue et discontinue). Dans ces villages et leurs environs, la couche active atteint déjà des profondeurs considérables (ex. 2 m et plus), mais des couches riches en glace pourraient demeurer à de plus grandes distances sous la surface et seraient susceptibles de générer des tassements ultérieurs en dégelant. De plus, les profils thermiques de ces villages affichent déjà des valeurs dites « tièdes ». Il s'agit ici des villages d'Umiujaq, d'Inukjuak, de Tasiujaq, de Kuujjuaq et de Kangiqsualujjuaq.

3) Réaliser une analyse thermique et une simulation exhaustive pour les autres villages en zone continue, mais aux sols encore relativement froids dont il faut se préoccuper et qui sont susceptibles de subir des impacts sur un plus long terme. Il s'agit ici des villages de Puvirnituq, d'Akulivik, d'Ivujivik, de Kangiqsujuaq, de Quaqtac, de Kangirsuk et d'Aupaluk.

Changements d'approche en cours de réalisation des mandats

Faute de disponibilité de machinerie spécialisée de forages et compte tenu de coûts logistiques qui auraient largement dépassé le budget, il ne fut pas possible de réaliser des forages profonds dans des villages où cela était souhaité initialement (Inukjuak, Kangiqsualujjuaq, Tasiujaq, Kangiqsujuaq.). Les abondants relevés de géoradar ont cependant permis de produire une excellente information stratigraphique et, surtout, de vérifier la présence de roc sous les premiers mètres de dépôts à plusieurs endroits dans les villages.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.1

La méthodologie générale pour la caractérisation et la cartographie du pergélisol utilisée dans le cadre de ce projet est celle préalablement développée par L'Hérault *et al.* (2013). Toutefois, quelques modifications ont été apportées par Carbonneau *et al.* (2015), dont l'ajout de classes dans les conditions de pergélisol permettant de décrire les conditions de terrain avec un niveau de détail accru.

2.1.1. Localisation des villages étudiés

Dix des quatorze communautés du Nunavik se situent en zone de pergélisol continu, deux sont en zone de pergélisol discontinu et abondant et une est située en zone de pergélisol discontinu et dispersé (**Figures 1-2**). Les villages d'Umiujaq, d'Inukjuak, d'Akulivik, d'Ivujivik, de Kangiqsujuaq, de Tasiujaq, de Kuujuaq et de Kangiqsualujuaq avaient été sélectionnés en 2015 pour des échantillonnages de pergélisol sur le terrain, de la caractérisation géotechnique et une cartographie améliorée du pergélisol. Ces communautés avaient été priorisées en raison de l'estimation du manque de connaissances approfondies des conditions du pergélisol sur leur territoire. Ces communautés avaient également été sélectionnées en raison du risque potentiellement élevé de dégradation dû aux effets des changements climatiques projetés dans les zones bâties et dans les zones limitrophes destinées à une probable expansion.

Durant le projet, il a été jugé opportun d'améliorer la caractérisation géotechnique du pergélisol et la compilation de nouvelles données dans les cas de Salluit, Aupaluk, Kangirsuk, Puvirnituq et de Quaqaq afin d'accroître la précision des cartes de conditions du pergélisol pré-existantes.

Puisqu'il n'y a pas de pergélisol dans le village de Kuujuarapik, cette communauté ne fait pas partie de cette étude.

2.1.2. Observations sur le terrain

Une première campagne de travaux de terrain a eu lieu au cours de l'été 2017 dans cinq communautés inuites, soit Umiujaq, Inukjuak, Kangiqsujuaq, Tasiujaq et Kangiqsualujuaq (**Tableau 1**). À chacun des villages visités, les autorités municipales (principalement des maires, des gérants municipaux et des directeurs techniques) ont été rencontrées afin de leur faire part du projet, de recueillir leurs commentaires concernant sa pertinence, ainsi que de prendre connaissance des problèmes liés au pergélisol rencontrés dans la communauté, comme par exemple des tassements dans les rues et des bâtiments affectés par des déformations du sol. Nous nous sommes aussi enquis des difficultés d'aménagement du territoire et de la gestion municipale en raison des instabilités du pergélisol. Ces rencontres furent l'occasion de nous informer sur les aspirations des

communautés en ce qui a trait à leur développement et au réaménagement possible de secteurs urbains.

Ces rencontres ont permis d'établir des liens entre les connaissances traditionnelles et locales des gens et les informations techniques sur le pergélisol. Elles ont aidé à prioriser les sites d'échantillonnage et à orienter nos travaux de terrain. Ces entretiens nous ont donné l'occasion d'être témoins des stratégies d'adaptations appliquées par certaines communautés en fonction de la géomorphologie locale et de l'abondance relative des ressources en matériaux granulaires. Le niveau d'intérêt dans les communautés pour l'adaptation aux conditions de pergélisol appelées à changer est très élevé. Il apparaît que la sensibilité du public au changement climatique, associée aux informations obtenues par les travaux de recherche antérieurs, a contribué déjà à mieux cibler les options d'adaptation dans chaque village.

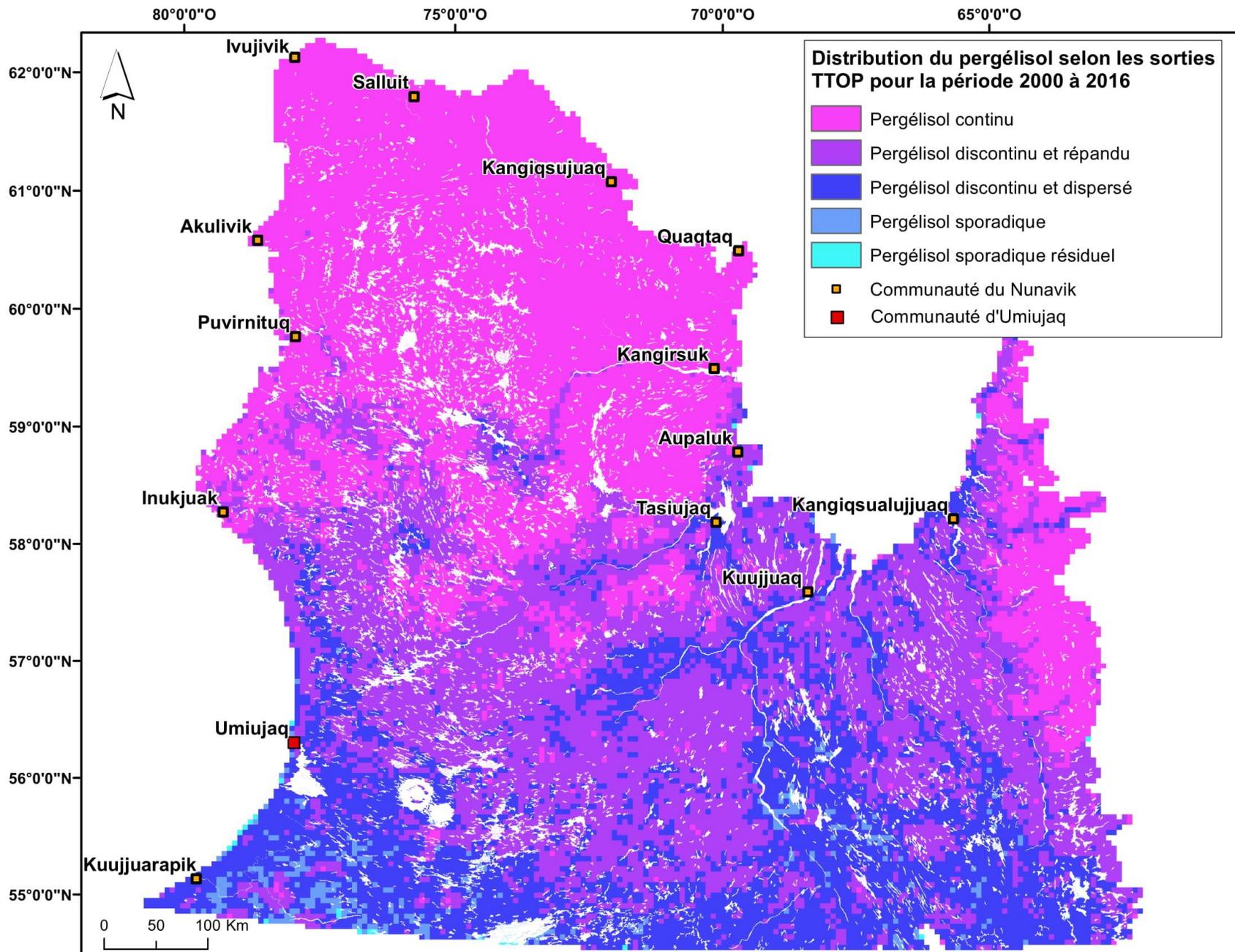


Figure 1 : Carte de distribution du pergélisol et localisation des communautés au Nunavik (modifiée de L'Hérault et Allard, 2018).

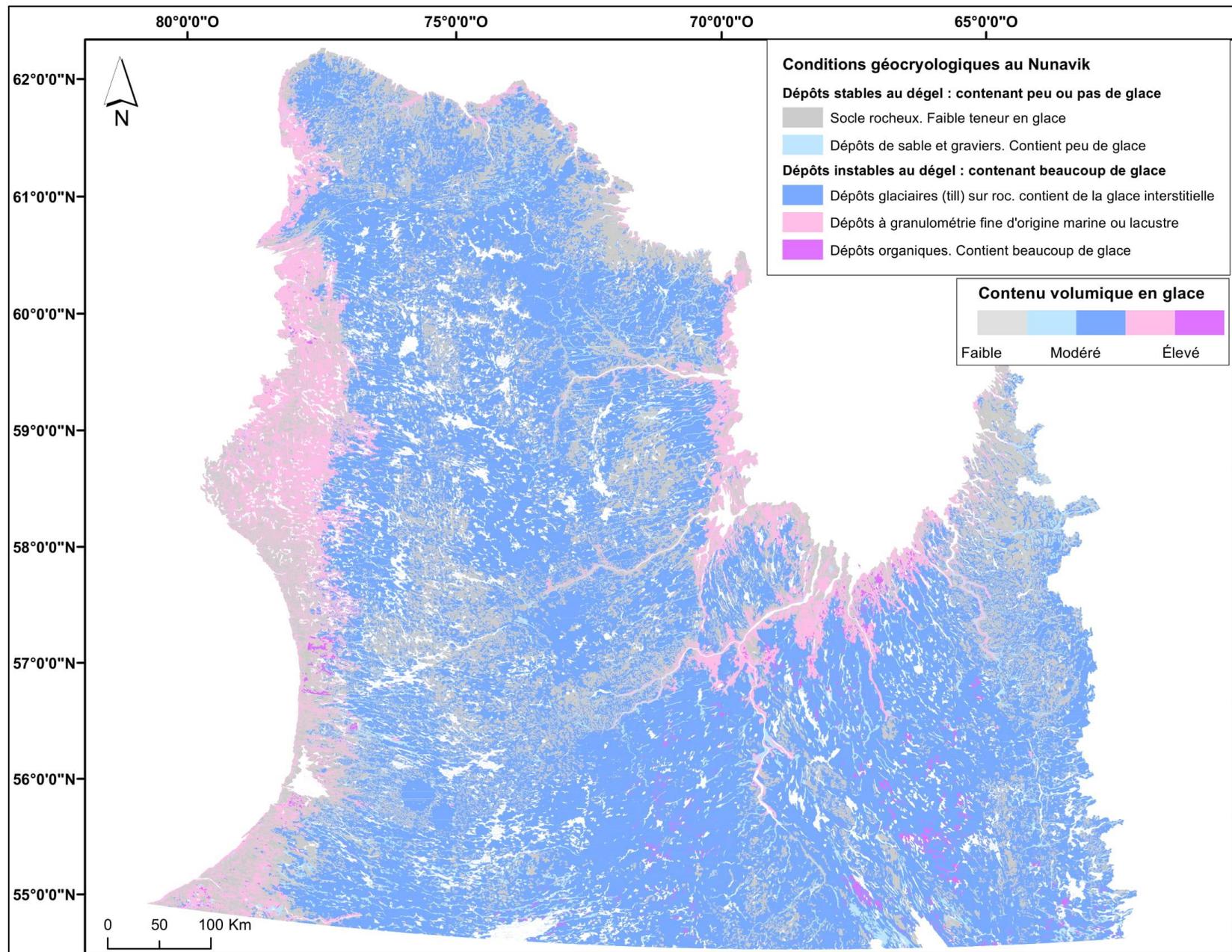


Figure 2 : Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik (adapté de L'Héroult *et al.*, 2017 et L'Héroult et Allard, 2018).

Tableau 1 : Calendrier des travaux de terrain réalisés au cours des étés 2017 et 2018.

		Calendrier des travaux de terrain 2017																																			
Village	Équipe	Juillet																Août																			
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	...	13	14	15	16	17	18	19							
Kangiqualujuaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer	Orange					Orange																														
			Vert	Vert	Vert		Bleu																														
Tasiujaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer					Orange				Orange																											
							Vert		Bleu	Bleu																											
Kangijsujuaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer									Orange																											
											Vert		Bleu																								
Salluit	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer											Orange	Orange																								
														Orange																							
Inukjuak	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																																				
																									Vert		Bleu	Bleu									
Umiujaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																																				
																											Orange		Bleu	Bleu		Orange					

		Calendrier des travaux de terrain 2018																																													
Akulivik	Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Alexandre Chiasson, Samuel Bilodeau																																				Orange			Orange				Orange			
																																								Bleu	Bleu	Bleu	Bleu		Vert		Orange
Salluit	Michel Allard, Charles-David Babin																																														
Kuujuuaq	Michel Allard, Charles-David Babin																																														

Tâches effectuées	
Orange	Déplacements
Vert	Période de forages
Bleu	Géophysique
Pourpre	Rencontre avec les communautés
Jaune	Observation de surface

Sur le plan technique, des forages stratégiquement localisés dans les différentes unités de terrain ont été réalisés à l'aide d'une foreuse portative. Des échantillons gelés non perturbés, d'un diamètre de 100 mm, ont pu être récupérés jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre plus de 5 m. Chaque forage a été réalisé en suivant une méthode éprouvée par l'expérience. Il s'agit de procéder à une excavation à la pelle jusqu'au front de dégel pour y déposer un tubage de 300 mm de diamètre, servant à retenir les parois d'excavation lors du forage. Afin de minimiser les pertes et les risques de dégradation des échantillons lors des prélèvements, des courses moyennes de 30 cm ont été réalisées (L'Hérault *et al.*, 2013).

Une description sommaire de chaque échantillon, incluant sa profondeur, le type de sédiment le constituant ainsi que sa cryostructure, a été réalisée sur le terrain. Les échantillons gelés ont ensuite été expédiés au Laboratoire de Géomorphologie et de Sédimentologie de l'Université Laval pour y effectuer des analyses géotechniques. Les observations de forages ainsi que les données issues des analyses en laboratoires ont été compilées à l'intérieur des rapports de forages. Pour compiler ces informations et reproduire la stratigraphie des échantillons, le logiciel LogplotTM de la compagnie Rockware® a été utilisé. L'information compilée au cours de l'étude a été mise à jour simultanément avec la complétion des essais en laboratoire (L'Hérault *et al.*, 2013).

Outre les forages, plusieurs sondages superficiels ont été réalisés à la pelle. Limités à la couche active, ces sondages ne permettent pas de fournir de l'information sur les conditions de pergélisol. Toutefois, ils apportent des précisions sur les types de dépôts de surface, les conditions de drainage et la profondeur de dégel.

Les observations notées aux sites de forage et ailleurs sur le territoire concernent la présence de formes de terrain en surface (ostioles, soulèvements gélivaux, fentes de gel, buttes, barricades de blocs glaciels, etc.) révélatrices des conditions sous-jacentes dans le pergélisol (telles que la présence de coins de glace et de glace de ségrégation) (L'Hérault *et al.*, 2013). Pour l'ensemble des villages visités à l'été 2017, nous avons réalisé 12 forages peu profonds (environ 4-5 m) avec la foreuse portative, 5 sondages de surface à la pelle, 2 coupes stratigraphiques (observations dans des berges et falaises naturelles) et 13 « observations de surface », c'est-à-dire la reconnaissance et la localisation au GPS de formes particulières, tels que des affleurements rocheux ponctuels et isolés, et des processus périglaciaires révélateurs de conditions de pergélisol, par exemple des buttes saisonnières à noyau de glace ou des fentes de gel.

Aux forages se sont ajoutés 103 levés linéaires de géoradar, totalisant 25,22 kilomètres (**Tableau 2**). L'utilisation de cet instrument de géophysique a été privilégiée, car l'interprétation des profils obtenus aide considérablement à localiser les zones de pergélisol à texture fine et riches en glace, de même que la profondeur au roc si elle n'est pas trop grande (profondeur maximale d'investigation de 5 à 6 mètres en général). Cette dernière variable pourra s'avérer très utile dans le futur pour déterminer des secteurs où il serait possible d'ancrer des pieux dans le roc à un coût modéré. Le géoradar est également utile

pour détecter les coins de glace, lesquels sont des formes de glace massive dans le sol, pouvant provoquer des instabilités au dégel.

Pour chaque activité de terrain, les coordonnées géographiques ont été relevées à l'aide d'un GPS *Garmin* dont la précision de localisation avoisine les trois mètres. Les observations de terrain effectuées ont permis d'acquérir des informations sur les processus de surface actifs sur les territoires visités, en plus de valider l'interprétation des unités géologiques préalablement effectuée sur les photographies aériennes.

Des travaux de terrain ont également été réalisés à l'été 2018 dans le village d'Akulivik. Au total, 33 levés de géoradar ont été effectués, 11 sur des routes et 22 en milieu naturel, totalisant 14,36 kilomètres, et 15 sondages de surface à la pelle ont été réalisés (**Figures 3-4; Tableau 2**). Les coordonnées géographiques de 26 petits affleurements rocheux ont également été relevées à l'aide d'un GPS. Les observations de terrain ont permis d'acquérir des informations sur les processus de surface actifs sur le territoire en plus de valider l'interprétation des unités géologiques effectuées antérieurement (L'Hérault *et al.*, 2013).

Les informations récoltées sur le terrain, ainsi que celles provenant d'études antérieures (Allard *et al.*, 2007 a, Allard *et al.*, 2007 b; L'Hérault *et al.*, 2012), ont été regroupées dans une table d'attributs à référence spatiale où chaque élément est localisé par ses coordonnées géographiques. L'exploitation de cette table d'attributs dans un système d'information géographique (SIG) (ArcGIS® version 10.6) offre l'avantage de pouvoir exécuter des requêtes et de consulter rapidement l'information, de visualiser et positionner les observations de terrain ainsi que de les représenter sous forme de cartes thématiques (Carbonneau *et al.*, 2015).

Tableau 2 : Tableau synthèse des travaux de terrain réalisés aux étés 2017 et 2018

Villages	Forages	Sondages de surface	Coupes stratigraphiques	Affleurements rocheux	Levés de géoradar (GPR)	Longueur totale des levés de GPR (km)	Autres observations de surface	Total
Kangihsualujuaq	5	-	-	-	18	5,67	-	23
Tasiujaq	4	-	-	-	13	-	-	17
Kangihsujuaq	1	1	1	-	21	6,07	4	28
Inukjuak	2	-	1	9	18	4,65	2	32
Umiujaq	-	4	-	68	33	8,83	7	112
Akulivik	-	15	-	26	33	14,36	-	74
Total	12	20	2	103	136	39,58	13	286



Figure 3 : Rencontre avec les responsables locaux de la communauté d'Akulivik, août 2018.



Figure 4 : Enregistrement de levés de géoradar sur les routes de la communauté d'Akulivik, août 2018

2.1.3. Cartographie étendue et révisée des dépôts de surface

La cartographie des unités géologiques a été réalisée dans le but d'étendre l'interprétation sur des territoires plus vastes que ceux couverts par les cartes précédentes (Allard *et al.*, 2007a). En effet, il est apparu lors des visites précédentes de communautés et de conversations avec les administrateurs de l'ARK que les communautés prennent rapidement de l'expansion spatiale et que les infrastructures publiques s'étendent sur le territoire dont les sols restent méconnus. La mise à jour cartographique a aussi permis d'apporter des précisions supplémentaires sur l'épaisseur des couches stratigraphiques, la profondeur du roc à certains endroits et les caractéristiques géotechniques des dépôts meubles. Les informations géotechniques et stratigraphiques provenant de la littérature, notamment des rapports d'experts liés à des projets de construction, ont été combinées aux informations acquises lors des campagnes de terrain et intégrées aux données cartographiques.

La photo-interprétation sur ordinateur a été réalisée à l'aide du logiciel SUMMIT EVOLUTION de DAT/EM Systems International, permettant la numérisation des unités de terrain à l'écran dans une interface de vision tridimensionnelle et une intégration directe dans le logiciel de cartographie ArcGIS. Les photographies aériennes et les levés LIDAR acquis pour les villages à l'automne 2010 par le MTQ, le MAMH et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) ont été utilisées comme base cartographique pour la numérisation des unités géologiques de surface. Les photographies aériennes des villages acquises par le MAMH en 2015 et 2016 ont été utilisées pour le travail de validation et de révision des dépôts de surface. Afin d'accroître la précision de cette cartographie et d'étendre la caractérisation et la délimitation des dépôts de surface sous les infrastructures en place, les anciennes photographies aériennes datant d'avant l'expansion des villages ont été numérisées, puis géoréférencées. De cette manière, il a été possible d'étendre la photo-interprétation à la section couverte par le milieu bâti et ainsi de délimiter l'étendue des dépôts de surface en continuité avec le milieu encore naturel (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015). De plus, cette photo-interprétation de la géologie de surface originale de milieux maintenant bâtis a permis de relier les problèmes observés actuellement dans les villages avec les propriétés du pergélisol.

La sémiologie utilisée pour les cartes des dépôts géologiques est basée sur la légende des formations superficielles quaternaires établie par la *Commission géologique du Canada*. Cette légende permet une discrétisation des différentes unités de terrain selon les caractéristiques sédimentaires et l'expression géomorphologique (ex. plage, levée alluviale, delta, esker, drumlins, moraine, etc.) qui permettent d'en déterminer l'origine. Dans cette légende, la description de chacune des unités de terrain cartographiées contient également des informations sur la granulométrie, la composition lithologique, les structures sédimentaires, l'épaisseur et les conditions de pergélisol propres à chacun des dépôts (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

Il est important de mentionner que la délimitation des zones de répartition des unités géologiques de surface et l'estimation de leur épaisseur que présentent les cartes comportent des incertitudes en raison de la grande variabilité spatiale des conditions de terrain comme les inégalités de la topographie du roc sous-jacent aux dépôts meubles, les mélanges produits dans la couche superficielle du terrain par les processus de gel et de dégel (cryoturbations) et le fait qu'il est difficile de sonder à la pelle en milieu de pergélisol au-delà de quelques décimètres dans le pergélisol. En conséquence, les cartes produites dans ce rapport sont des images d'ensemble qui doivent être utilisées comme un outil général susceptible d'orienter la planification. Dans chaque projet de construction, il demeure recommandé de procéder à un examen du sol avant la construction, ce qui peut aller d'une simple observation pour les cas où l'incertitude est faible jusqu'à des forages et des études géotechniques poussées pour les cas où l'incertitude est grande et pour les gros édifices pouvant requérir des fondations particulières (ex. pieux à friction, thermosyphons, etc.) (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015; SHQ, 2018).

2.1.4. Technologie du géoradar (GPR)

Plusieurs levés de géoradar en milieu naturel et sur des routes ont été réalisés afin de visualiser la stratigraphie, en plus d'estimer la profondeur du front de dégel et celle du socle rocheux. Le système d'acquisition est un pulse EKKO PRO de *Sensors and Software* opéré à trois fréquences (50, 100 et 200 MHz), selon la résolution spatiale et la profondeur de l'exploration désirée. La profondeur des couches et des réflecteurs est calculée en utilisant la vitesse du signal électromagnétique dans le sol, qui varie en fonction de la nature du sol. Dans le cadre de ce projet, la vitesse du signal a été déterminée à l'aide de la méthode du réflecteur hyperbolique intégrée au logiciel Ekko_View Deluxe (Annan, 2003). Au total, 136 levés de géoradar ont été réalisés, soit 18 à Kangiqsualujjuaq, 13 à Tasiujaq, 21 à Kangiqsujuaq, 18 à Inukjuak, 33 à Umiujaq et 33 à Akulivik (**Tableau 2**).

Le signal des relevés GPR a été traité avec le logiciel Ekko_View Deluxe. Les fonctions Dewow et DC Shift ont été utilisées afin de filtrer le bruit et les interférences des signaux électromagnétiques. Des fonctions séquentielles de gain et de filtre ont également été appliquées pour réduire le bruit près de la surface et compenser la perte du signal en profondeur. L'interprétation des levés de géoradar a été réalisée à partir des images de profil rendues par le logiciel *EKKO_View 2*. L'emplacement des relevés a été obtenu à l'aide d'un GPS de type NovAtel Smart-V1 ayant 1,8 m de précision géographique et mesurant en continu la position le long des tracés. La topographie des levés a été intégrée dans ArcMap 10.6 en utilisant les valeurs d'élévation aux deux extrémités des tracés mesurés avec le GPS et vérifiées sur le modèle d'élévation du terrain (Mathon-Dufour et Allard, 2015). Le GPS utilisé est un NovAtel Smart-V1 qui a environ 1,8 m de précision géographique.

L'interprétation des levés de géoradar permet de calculer la profondeur des différentes couches de dépôts meubles. L'identification des contacts stratigraphiques est le résultat

d'un exercice de corrélation entre les réflecteurs observés sur les levés de géoradar et les informations obtenues par forage ou par des coupes naturelles du terrain (par exemple le long de berges en érosion). L'utilisation des levés de géoradar permet de visualiser la continuité latérale et l'organisation des unités géologiques de surface entre des observations ponctuelles de terrain. Comme il s'agit d'une approche d'interprétation et d'interpolation, il est nécessaire de rester prudent sur les pseudo-épaisseurs des différentes unités qui apparaissent dans les coupes géologiques synthèses, car leur précision dépend du nombre d'observations stratigraphiques distribuées le long du relevé et de leur validité (L'Hérault *et al.*, 2014).

Avant le départ sur le terrain, quelques améliorations techniques ont été apportées à notre instrument afin d'optimiser ses déplacements dans la toundra, lesquels sont parfois difficiles lorsque le terrain est humide ou chaotique. Une large feuille de PVC a été coupée sur mesure et installée sous les roues avant et les antennes du géoradar lui permettant de glisser sur les blocs et les bourrelets de végétation de la toundra (Bilodeau, 2019). Cette importante modification a grandement facilité le travail sur le terrain à l'été 2018, permettant à l'équipe de couvrir de plus grandes distances, lesquelles auraient été difficiles, voire impossibles à atteindre sur certains types de terrain. Sans ce toboggan de PVC, les antennes du géoradar, placées très près du sol, sont constamment freinées par la végétation et les blocs en surface.

2.1.5. Caractérisations géotechniques des propriétés du pergélisol

Lors des campagnes sur le terrain, deux types d'échantillons ont été prélevés : les échantillons non gelés provenant de la couche active récupérés lors des sondages superficiels, coupes ou excavations et les échantillons gelés provenant du pergélisol et extraits lors des forages. Selon le type d'échantillon, ceux-ci ont été soumis à différentes analyses en laboratoire suivant une séquence structurée de manière à extraire le maximum d'informations par échantillon. Le protocole utilisé est décrit en détail par L'Hérault *et al.* (2012; 2013).

Les carottes gelées récoltées lors des forages ont été systématiquement scannées aux rayons-X et numérisées à l'aide d'un scanner tomodensitométrique de type médical à l'Institut national de la recherche scientifique Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE) à Québec. Cette méthode non destructive de caractérisation (Calmels et Allard, 2004; Calmels, 2005; L'Hérault, 2009; L'Hérault *et al.*, 2009; 2012; 2013) fournit une image numérique à haute résolution de la cryostructure et des cryofaciès du pergélisol. Sur ces images, les matériaux de faible densité sont présentés par des teintes foncées et ceux de forte densité par des teintes claires. L'acquisition d'une image transversale de 512 pixels par 512 pixels à tous les 0,6 mm le long de la carotte permet d'obtenir une résolution de voxel de 0,2 mm x 0,2 mm x 0,6 mm. Avec cette résolution et les reconstitutions tomographiques des carottes qui en résultent, il est possible de décrire les cryofaciès selon : 1) la forme, l'épaisseur, la longueur et l'inclinaison des cryostructures; 2) la forme et

l'orientation des bulles d'air, indicatrices du sens des flux thermiques dans le sol; 3) le type de sédiment; et 4) la présence de matière organique. Ces observations permettent également de noter la profondeur des discontinuités (s'il y a lieu) correspondantes aux limites entre les couches cryostratigraphiques. De plus, les images à haute résolution des échantillons facilitent la sélection des analyses subséquentes et aident à compléter les informations notées sur le terrain, qui sont souvent minimales afin de limiter les risques de dégradation thermique (L'Hérault *et al.*, 2014).

Certains échantillons jugés représentatifs des conditions de pergélisol de la région à l'étude ont été soumis à des essais de tassement et consolidation au dégel. Ces essais consistent à laisser dégeler un échantillon de sol dans une cellule et à mesurer le tassement total subséquent. Une charge supplémentaire (contrainte) a également été appliquée sur les échantillons afin de simuler l'influence du poids (ou charge) d'un remblai ou d'un bâtiment sur la valeur de tassement total. Les essais de consolidation au dégel réalisés ont été effectués dans une cellule œdométrique standard légèrement modifiée. Lors des expérimentations, une contrainte verticale initiale de 25 kPa, correspondant à peu près au poids de la couche active dégelée, a été appliquée au cours du dégel de l'échantillon. Une fois le dégel et la consolidation initiale complétés, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a plus de déformations verticales sous une même contrainte, la contrainte est augmentée à 100 kPa pour une période minimale de 24 h afin de simuler le poids d'un remblai ou d'un bâtiment de dimensions moyennes (L'Hérault *et al.*, 2014).

La teneur en eau gravimétrique (w) en pourcentage a été mesurée systématiquement sur tous les échantillons selon la norme CAN/BNQ 2501-170-M-86, c'est-à-dire en divisant la masse de l'eau sur la masse du sol sec. Une fois la teneur en eau déterminée, l'échantillon est tamisé à l'aide d'un tamis 400 microns de manière à obtenir deux fractions de sol dont le diamètre des particules est respectivement inférieur et supérieur à 400 microns. La distribution granulométrique de la fraction supérieure à 400 microns a été déterminée par la méthode des tamis (norme BNQ 1530-060/1978) tandis que celle de la fraction inférieure à 400 microns a été déterminée à l'aide d'un réfractomètre laser modèle Horiba. Pour ce faire, la fraction inférieure à 400 microns est sous-échantillonnée de manière à en obtenir environ 10 grammes à l'aide du séparateur en acier inoxydable (Jones chutes splitter). Sur ce sous-échantillon, les carbonates et la matière organique sont éliminés respectivement par traitement à l'acide chlorhydrique et par perte au feu. Ce traitement préalable aux analyses granulométriques permet également de déterminer par pesée la quantité de carbonates et de matière organique dans le sédiment. Les résultats obtenus par les deux méthodes ont été compilés puis intégrés dans un graphique. La mise en relation du diamètre, rapporté en abscisse, avec le pourcentage cumulatif, porté en ordonnée, permet d'obtenir une courbe granulométrique qui illustre la distribution des particules du sol en fonction de leur diamètre (L'Hérault *et al.*, 2013).

2.1.6. Compilation des informations géoscientifiques et analyses multicritères

Une fois les données essentielles recueillies lors des relevés sur le terrain et par l'analyse de photos aériennes, l'étape de la synthèse et de la cartographie peut être abordée dans un SIG. Les cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol produites pour les villages du Nunavik sont le résultat d'une analyse multicritères rendue possible par l'utilisation de plusieurs couches d'information à caractère spatial. L'utilisation d'un SIG permet la superposition des différentes couches d'informations jugées importantes dans le cadre d'une analyse de sensibilité du pergélisol en dégel en vue de classer le terrain selon certains critères préétablis. Un diagramme synthèse qui résume l'origine des différentes couches d'information géospatiale utilisées dans l'analyse matricielle est présenté à la **figure 5**.

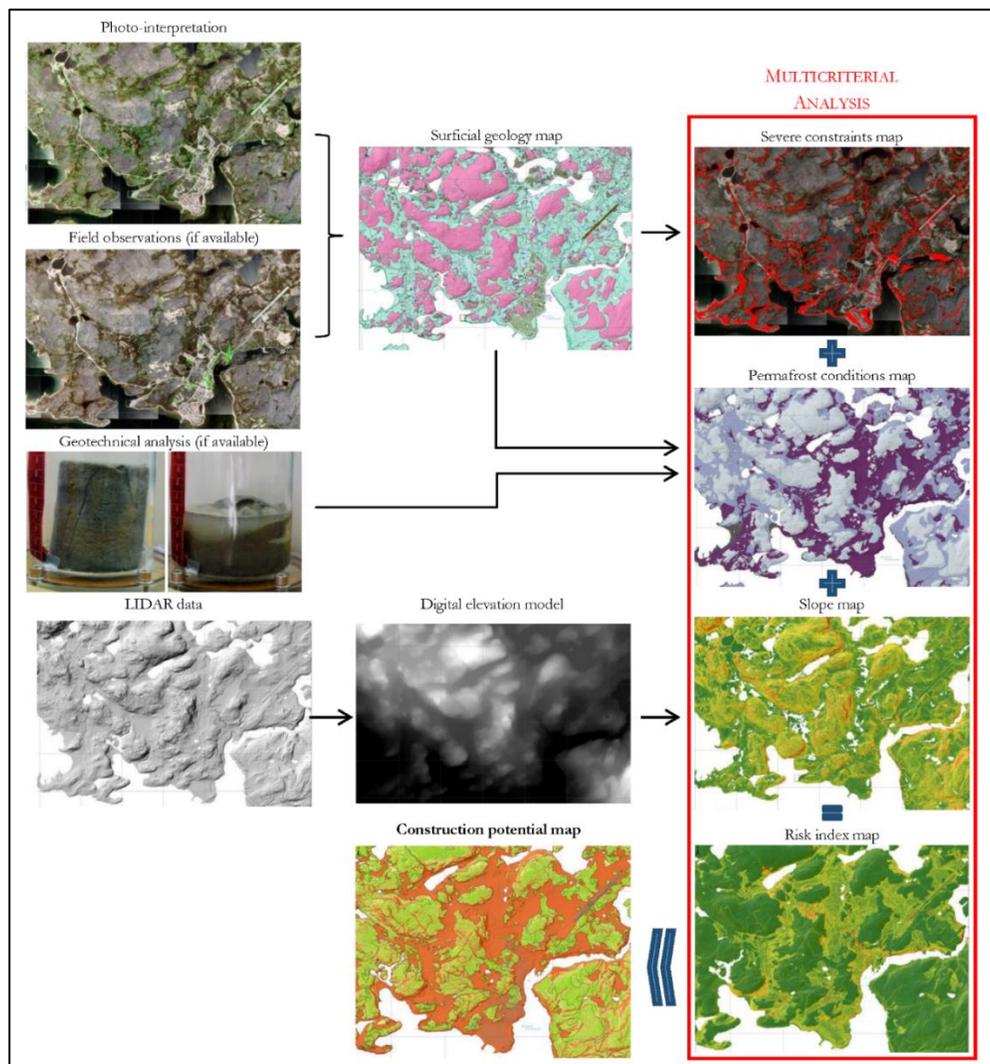


Figure 5 : Diagramme synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées dans l'analyse matricielle en vue de produire des cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes (tirée de L'Hérault *et al.*, 2013).

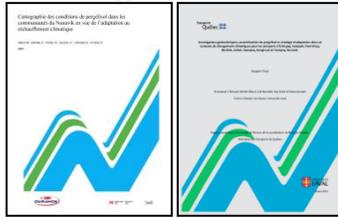
2.1.7. Production des cartes de conditions de pergélisol et de contraintes sévères à l'aménagement

Des limitations logistiques, méthodologiques et financières ne permettent pas la réalisation de forages en nombre suffisant pour assurer une couverture serrée du territoire des communautés. Puisqu'il est impossible d'échantillonner le territoire à une échelle cartographique de quelques mètres carrés, une interpolation des observations est nécessaire afin de cartographier les conditions du pergélisol. Il en résulte une incertitude, qui devra être prise en compte par les promoteurs et compensée au besoin par des études géotechniques d'avant-projet. Néanmoins, étant intimement liées aux caractéristiques sédimentaires et aux conditions de drainage, les conditions de pergélisol peuvent être déduites à partir des unités géologiques de surface cartographiées précédemment, puis validées et précisées par un échantillonnage sélectif. En effet, les environnements sédimentaires dans lesquels les unités géologiques de surface 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 unités de terrain selon leurs caractéristiques sédimentaires propres (granulométrie, composition lithologique, structures, couleur, épaisseur, etc.) et leurs expressions morphologiques (plage, levée alluviale, delta, esker, drumlins, moraine, etc.). Ces caractéristiques et expressions morphologiques constituent un héritage géologique ayant un effet non négligeable sur le comportement géotechnique du dépôt ainsi que sur les caractéristiques structurales et les propriétés du pergélisol. Ainsi, les unités géologiques de surface cartographiées dans les communautés à l'étude ont été regroupées en deux principales classes de conditions de pergélisol, à savoir les dépôts stables au dégel (roc et dépôts pauvres en glace) et les dépôts instables au dégel (dépôts quaternaires riches en glace) (**Figure 6**). Pour chacune des classes de conditions du pergélisol, des valeurs de pentes critiques ont été déterminées selon les risques estimés en fonction de la nature du dépôt de surface et des processus de terrain observés (**Tableau 3**). Au-delà de ces valeurs de pentes critiques, les terrains sont jugés défavorables à la construction. Par exemple, pour le roc ou un dépôt grossier mince sur roc (conditions 1a et 1b), une valeur de pente de 15° a été fixée arbitrairement de manière à limiter le volume de déblai/remblai nécessaire pour accueillir une fondation sur radier ou pour éviter une hauteur excessive des pieux. Pour les tills (conditions 2a et 2b), une pente de 8° et plus apparaît propice aux fluages (coulées de gélifluxion), donc susceptible de provoquer des déformations ou des pressions sur les infrastructures. Sur des argiles riches en glace (conditions 2c et 2d), une pente supérieure à 2° (ou 3,5 %) est jugée à risque de décrochement de couche active dans le contexte d'une combinaison de surcharge, d'humidité excessive (fonte d'horizons riches en glace, dégel rapide et précipitations abondantes). Les valeurs de pentes critiques pour les conditions 2a, 2b, 2c et 2d, ont été déterminées empiriquement à partir d'observations de mouvements de masse (actifs et inactifs) sur le terrain comme des glissements, des décrochements, des

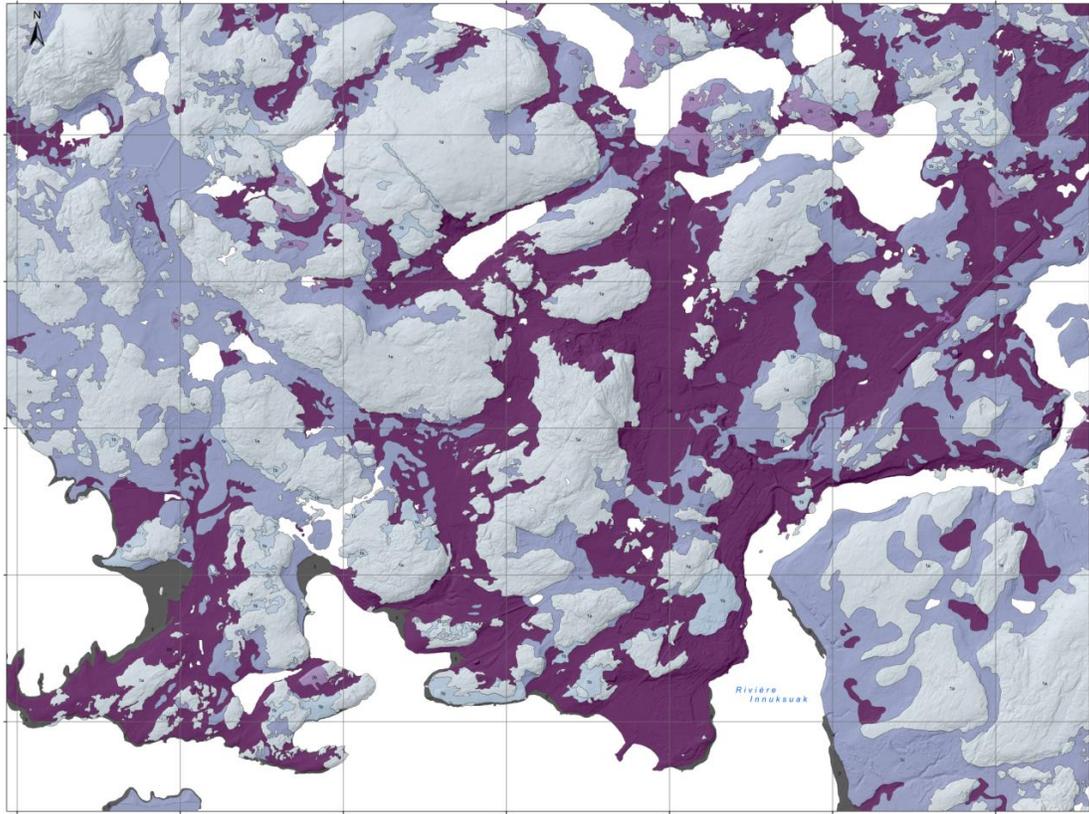
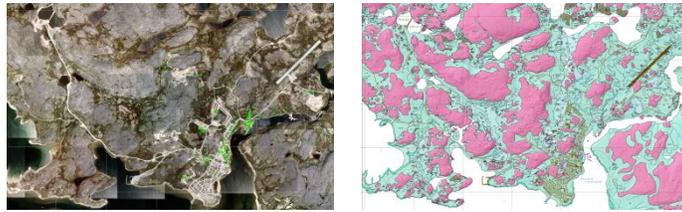
lobes de gélifluxion ou des sols triés. Le recensement par photo-interprétation de mouvements de masse en lien avec les conditions du pergélisol en place a notamment été utilisé pour déterminer ces valeurs de pente critiques (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

À ces deux principales classes de conditions du pergélisol s'ajoute une troisième classe qui regroupe les contraintes sévères à l'aménagement. Ces contraintes ont été identifiées par photo-interprétation, par l'analyse d'images LIDAR et par des observations sur le terrain. Elles regroupent les risques géologiques et les formes périglaciaires, à savoir les secteurs à risque de glissements de terrain (identifiables par des cicatrices d'anciens glissements), les pentes susceptibles au fluage du pergélisol (lobes de gélifluxion), les zones mal drainées sujettes aux suintements provoquant la formation de glaçages et de buttes saisonnières à noyau de glace ainsi que les secteurs à risque de thermo-érosion, notamment ravinements existants et les réseaux de sillons de polygones à coins de glace (**Figure 7**). Ces terrains problématiques occupant des surfaces restreintes et dispersées dans le paysage disposent d'une pondération de risque élevé, qui s'additionne aux indices de risque calculés selon les conditions de pergélisol et la pente afin qu'ils soient considérés comme peu ou non favorables à la construction (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

Rapports antérieurs



Cartographie des dépôts de surface et observations de terrain



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

- 1a** Socle rocheux
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 4,5 et 6 m. Seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une faible quantité de glace.
- 1b** Dépôt de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle poreuse dont le contenu volumique en glace est généralement inférieur à 10 %.
- 1c** Dépôts de sable et gravier stratifiés épais (> 2 m).
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés.

Dépôts instables au dégel : Dépôts meubles contenant beaucoup de glace

- 2a** Dépôt glaciaire (till) en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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 à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur.
- 2b** Dépôt glaciaire (till) en couverture épaisse (> 2 m) sur socle rocheux.
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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.
- 2c** Dépôts à granulométrie fine d'origine marine et en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux ou dépôt de sable et gravier épais.
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur. Matériau sujet à des ruptures de pente sur les versants.
- 2d** Dépôts à granulométrie fine d'origine marine.
La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants lors de sa fonte.

Contraintes sévères

- 3** Processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles.

Figure 6 : Informations géoscientifiques utilisées pour la construction des cartes de conditions du pergélisol pour la communauté d'Inukjuak. Tiré de Carbonneau *et al.* (2015).



Figure 7 : Carte des contraintes sévères à l'aménagement pour la communauté d'Inukjuak. La couleur rouge identifie les endroits non constructibles, à savoir le littoral marin, les zones intertidales, les plaines alluviales actuelles, les berges de lacs et les ruisseaux.

2.1.8. Production des cartes de pentes

À l'automne 2010, le MTQ, le MAMH et le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) ont fait l'acquisition de photographies aériennes et de levés LIDAR aéroportés pour la production d'orthophotographies (**Figure 8A**) et de modèles numériques d'altitude dans les 14 villages du Nord-du-Québec. La couverture des données LIDAR se limite au milieu bâti des communautés. Conséquemment, la création d'un modèle numérique d'élévation (MNE) étendu qui couvre la superficie des nouvelles cartes de dépôts de surface (s'étendant au-delà du milieu bâti des communautés) a nécessité la manipulation de plusieurs sources de données d'élévation d'une précision et d'une résolution différentes. Pour les zones non bâties en périphérie des communautés, des MNE d'une résolution initiale de quatre mètres et ré-échantillonnée au mètre ont été utilisés (**Figure 8B**). Par la suite, pour les zones bâties des communautés, des MNE ont été générés à partir des levés LIDAR, dont la précision altimétrique et géographique est inférieure à 10 cm et la résolution supérieure à 1 point/m². Les données LIDAR ont fait l'objet d'une série de traitements pour éliminer les erreurs et les points de mesure redondants afin de produire des MNE de grande qualité sous forme de grille d'une résolution de 1 m par 1 m (**Figure 8**

et 8C). La superposition de ces deux MNE n'englobe pas toujours la même superficie que celle couverte par la cartographie étendue des dépôts de surface et des conditions du pergélisol. Dans de tels cas, il s'avère nécessaire d'utiliser un troisième jeu de données d'élévations obtenues en 2002 par procédé photogrammétrique et disponibles pour toutes les communautés du Nunavik (**Figure 8D**). À l'échelle de 1/2 000, la précision planimétrique est de l'ordre de ± 40 cm avec une précision hypsométrique de ± 50 cm pour les points cotés. La superposition de ces jeux de données d'élévation a permis d'obtenir une couverture continue sous forme de grille, d'une résolution de 1 m par 1 m, pour la totalité de la zone couverte par les nouvelles cartes étendues des dépôts de surface et des conditions du pergélisol (**Figure 8E**). C'est à partir de ces nouveaux MNE que les cartes ombragées du relief (**Figure 8F**) et les cartes de pentes ont été produites (**Figure 8G**) (L'Hérault *et al.*, 2013).

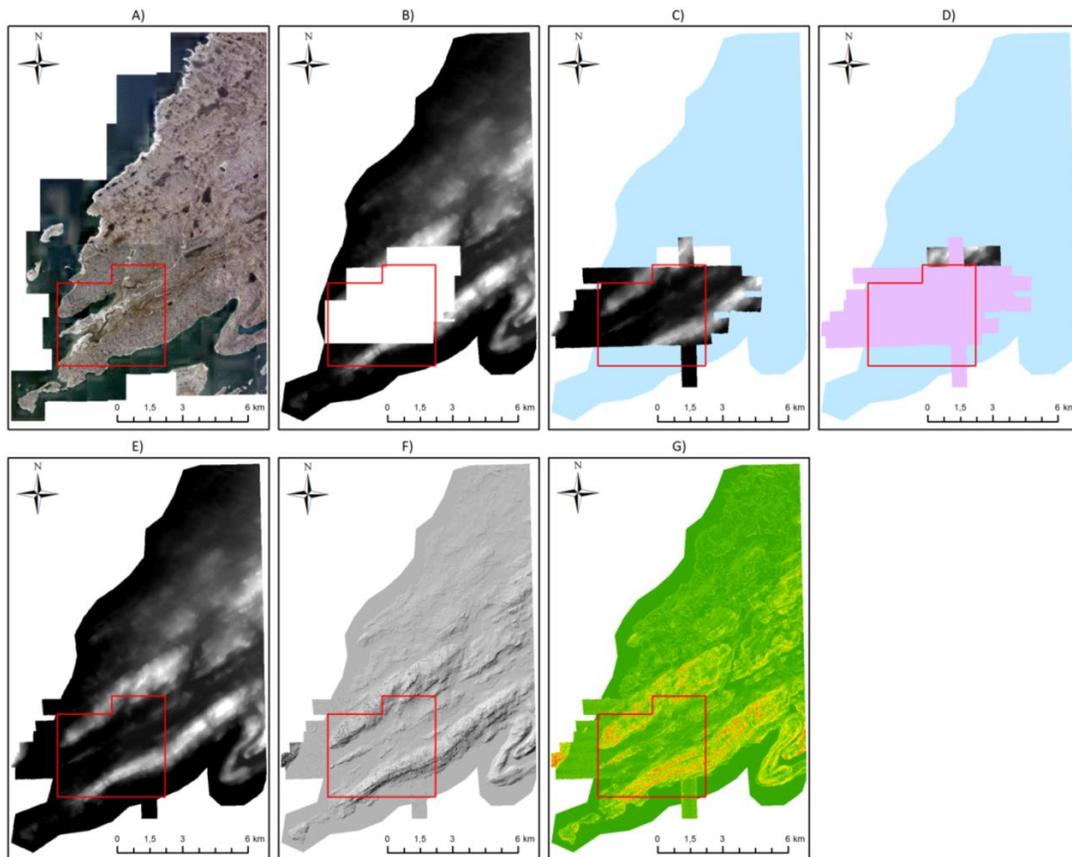


Figure 8 : A) Orthomosaique générée à partir des photographies aériennes prises en 2010. B) MNE de 2010 de faible résolution (4 m x 4 m) disponible pour la zone en périphérie du milieu bâti. C) Superposition du MNE haute résolution (1 m x 1 m) produit à partir des données LIDAR de 2010 sur le MNE faible résolution (zone bleue). D) comblement des zones non couvertes par les deux MNE de 2010 (zone bleue et rose) avec le MNE haute résolution (1 m x 1 m) de 2002 produit par procédé photogrammétrique. E) MNE mixte qui couvre la totalité de la superficie de la nouvelle carte des dépôts de surface et des conditions du pergélisol (Cadre rouge). Carte de relief ombragé (F) et carte des pentes (G) produites à partir du MNE mixte. Tiré de L'Hérault *et al.* (2013).

2.1.9. Analyses multicritères et production des cartes indicielles du risque

Pour chaque village, une base de données géoréférencée et regroupant les caractéristiques du pergélisol fut créée. Ces caractéristiques incluent les données de forages effectués précédemment (Allard *et al.*, 2009; L'Hérault *et al.*, 2009; 2012 et autres rapports), la nature ainsi que la répartition spatiale des dépôts et des formes de surface, la topographie et les conditions de drainage. Les cartes contenant ces informations, et énumérées précédemment, permettent d'évaluer les risques d'instabilité dans le milieu bâti actuel et futur, ainsi que les risques associés à la dégradation du terrain, l'approfondissement de la couche active et à l'instabilité sur les versants en raison du réchauffement du pergélisol. L'utilisation d'un SIG permet de surcroît la superposition des différentes couches d'information jugées importantes dans le cadre d'une analyse de sensibilité du pergélisol au dégel, en vue de classer le terrain selon certains critères préétablis (Carbonneau *et al.*, 2015).

Les données géospatiales quantitatives comme les pentes sont facilement intégrables à l'intérieur d'une équation matricielle. Toutefois, les données géospatiales qualitatives nominales comme les conditions de pergélisol et les contraintes sévères recensées sur le terrain doivent être pondérées de manière à pouvoir être quantifiées et intégrées. La pondération des différentes conditions de pergélisol a été effectuée en tenant compte de leur sensibilité au tassement qui est directement proportionnelle à la quantité de glace présente dans le dépôt et à l'épaisseur de celui-ci. Ainsi, pour les différentes conditions de pergélisol recensées, l'indice de sensibilité attribué au tassement (IST) est de 0 pour le socle rocheux, les sédiments grossiers pauvres en glace ou les dépôts glaciaires d'une épaisseur inférieure à 2 m, de 60 pour les sédiments glaciaires épais et de 120 pour les dépôts à granulométrie fine riches en glace (**Tableau 3**) (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

Tableau 3 : Indice de sensibilité au tassement et valeurs de pentes critiques selon les conditions de pergélisol. Tiré de Carbonneau *et al.* (2015).

<i>Dépôts stables au dégel : Roc et dépôts meubles contenant très peu ou pas de glace</i>		<i>IST</i>	<i>Pente critique</i>
	Socle rocheux		
1a	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 4,5 et 6 m. Seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une faible quantité de glace.	0	15° et plus Coefficient : 8
	Dépôt de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.		
1b	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle poreuse dont le contenu volumique en glace est généralement inférieur à 10 %.	0	15° et plus Coefficient : 8
	Dépôts de sable et gravier stratifiés épais (> 2 m).		
1c	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés.	0	10° et plus Coefficient : 12
<i>Dépôts instables au dégel : Dépôts meubles contenant beaucoup de glace</i>		<i>IST</i>	<i>Pente critique</i>
	Dépôt glaciaire (till) en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.		
2a	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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 à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur.	0	8° et plus Coefficient : 15
	Dépôt glaciaire (till) en couverture épaisse (> 2 m) sur socle rocheux.		
2b	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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.	60	8° et plus Coefficient : 7,5
	Dépôts à granulométrie fine d'origine marine et en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux ou dépôt de sable et gravier épais.		
2c	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur. Matériau sujet à des ruptures de pente sur les versants.	60	2° et plus Coefficient : 60
	Dépôts à granulométrie fine d'origine marine.		
2d	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants lors de sa fonte.	120	2° et plus Coefficient : 60

Tel que mentionné aux sections 2.1.7 et 2.1.8, les risques associés à la pente varient en fonction des différentes conditions de pergélisol rencontrées. Par conséquent, afin d'être en mesure de considérer l'influence de la pente dans l'évaluation du risque, un coefficient de pente (α) propre à chacune des conditions de pergélisol a été développé et se définit par l'équation suivante (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015) :

$$\alpha = \frac{R_{\text{seuil maximal}}}{S_c}$$

Où $R_{\text{seuil maximal}}$ correspond au seuil maximal de l'indice de risque au-delà duquel le terrain est jugé défavorable à la construction et Sc est la valeur de la pente critique en degrés déterminée pour une condition de pergélisol donné. Par exemple, pour la condition de pergélisol 1a, le coefficient de pente sera égal à (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015) :

$$\alpha_{ij} = \frac{R_{\text{seuil maximal}}}{Sc_{1a}} = \frac{120}{15} = 8$$

Ainsi, pour chaque cellule de la carte des conditions de pergélisol, un coefficient de pente a été attribué afin de créer une carte de coefficients de pente $[\alpha_{ij}]$. Le produit d'Hadamard (multiplication matricielle cellule par cellule) entre cette dernière et la carte des pentes permet d'obtenir une carte de contrainte des pentes $[ICP_{ij}]$ définie par l'équation suivante (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015) :

$$[ICP_{ij}] = [\alpha_{ij}] [S_{ij}]$$

Ainsi, pour une cellule géographique donnée, lorsque la valeur de l'indice de contrainte des pentes (ICP) est supérieure à 120, c'est-à-dire lorsque la pente est supérieure à la valeur de pente critique établie pour la condition de pergélisol rencontrée, celle-ci est classée défavorable à la construction (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

Ultimement, un indice de risque est calculé pour chacune des cellules en additionnant l'IST, l'ICP et les contraintes sévères à l'aménagement (**Figure 9**). Théoriquement, l'indice de risque peut avoir une valeur qui varie entre 0 et 5640. Plus cet indice est élevé, plus l'interaction entre les contraintes, les conditions de pergélisol et les pentes font en sorte que le terrain est sensible, donc défavorable à la construction. Un indice de risque de 120, qui correspond à la somme des trois indices (IST, ICP et contraintes sévères) a été déterminé au-delà duquel, les terrains sont jugés défavorables à la construction. Cette reclassification a pour objectif de classer le terrain à l'intérieur de trois catégories soit : 1 - les terrains aménageables pour la construction, 2- les terrains aménageables pour la construction, mais sujets à des tassements limités et restreints à certains types de fondations et, 3 - les terrains en principe défavorables à la construction (**Tableau 4**) (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

Ainsi la carte de potentiel de construction résulte de l'addition spatialisée de l'information des autres cartes ou couches d'information. Les conditions de pergélisol incluses dans la compilation sont les conditions observées actuellement, de sorte que les terrains identifiés comme défavorables à la construction (classe 3) sont aussi ceux qui seront le plus affectés par le dégel du pergélisol provoqué par le changement climatique. Les bâtiments édifiés sur les terrains classés aménageables, mais nécessitant des explorations techniques plus poussées ou des fondations spéciales (classe 2) seront intégralement protégés ou moins impactés en fonction des mesures prises lors de leur construction.

Une synthèse des corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique est présentée au **tableau 5**. Compte tenu des techniques de fondation possibles en milieu pergélisolé (radiers, pieux, thermosiphons, dégel provoqué, etc.), des suggestions relatives aux techniques de construction potentiellement applicables sur les terrains classés « aménageables » selon les conditions de pergélisol y sont proposées. Il est important de mentionner qu'en raison de la grande variabilité spatiale tant horizontale que verticale des teneurs en glace à l'intérieur d'une même unité géologique de surface, les cartes du potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes qui sont présentées dans ce rapport sont avant tout un outil d'aide à la planification et ne remplacent pas les études géotechniques d'avant-projet. Les fondations proposées selon les conditions de pergélisol ont été sélectionnées parmi celles documentées dans la littérature et couramment utilisées au Nunavik et au Nunavut. Elles sont bien décrites dans le *Guide de bonnes pratiques : Construction d'habitations au Nunavik* de la *Société d'habitation du Québec* (2018). Il est important de noter qu'il demeure nécessaire de mener des études géotechniques et d'ingénieries approfondies avant la construction afin, notamment, de déterminer en fonction des conditions de pergélisol locales rencontrées, le choix optimal du type de fondation et le dimensionnement approprié. Le tout en vue d'adapter la conception de la fondation et ainsi d'atténuer sa vulnérabilité en cas de dégel du pergélisol (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

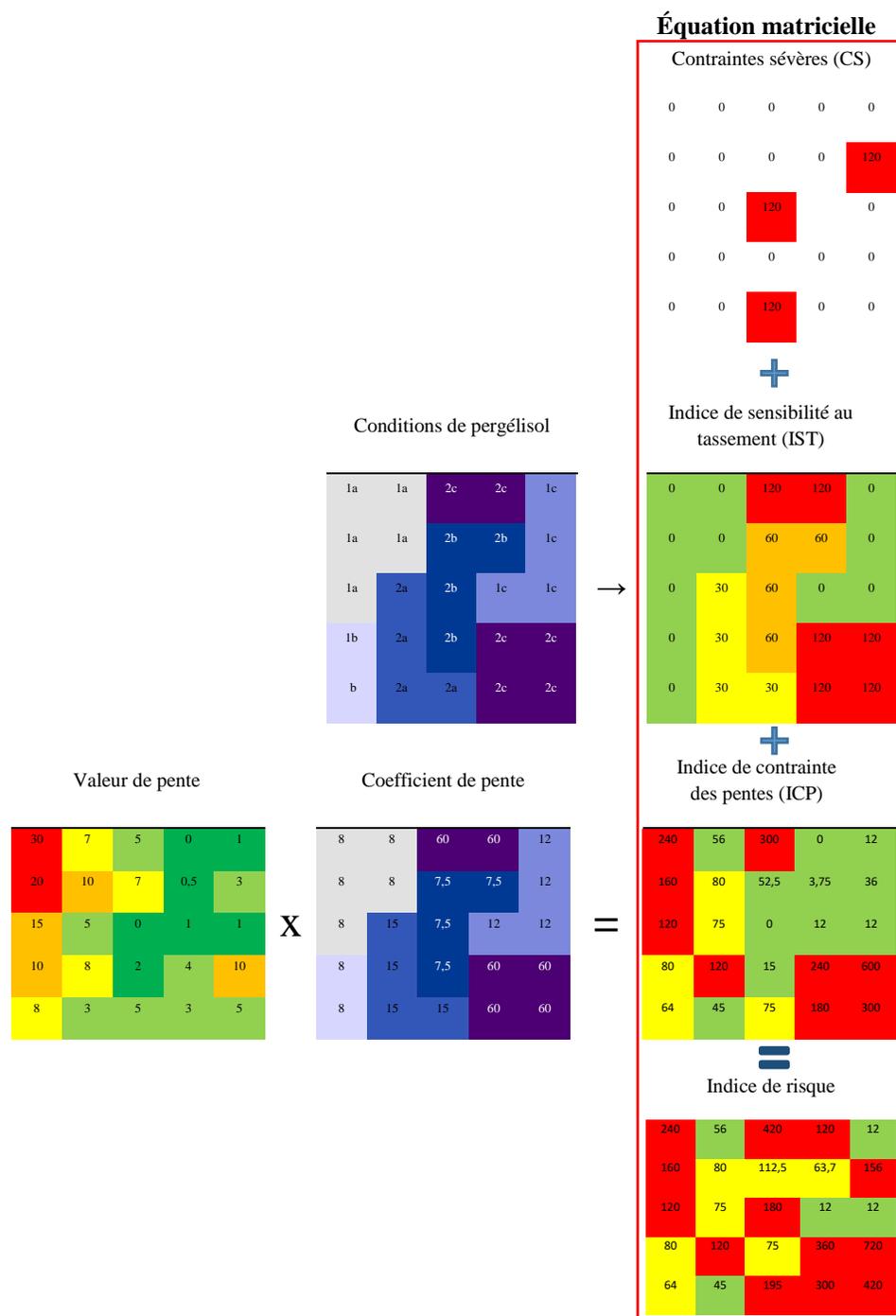


Figure 9 : Structure et pondération de l'information géospatiale à l'intérieur de l'équation matricielle utilisée pour calculer l'indice de risque. Tiré de Carbonneau *et al.* 2015.

Tableau 4 : Classification du potentiel à la construction selon la valeur de l'indice de risque. Tiré de Carbonneau *et al.* 2015.

Classes de potentiel de construction	Indice de risque	Code de couleur
Terrains aménageables pour la construction.	entre 0 et 60 exclusivement	
Terrains aménageables pour la construction, mais sujets à des tassements limités et restreints à certains types de fondation. Peuvent nécessiter des travaux de nivellement importants.	entre 60 et 120 exclusivement	
Terrains défavorables à la construction.	120 et plus	

Tableau 5 : Corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique accompagnées des types de fondations adaptés et la valeur de pente critique pour chacune des classes.

DEPOTS STABLES AU DEGEL : ROC ET DEPOTS CONTENANT TRES PEU OU PAS DE GLACE						
DÉPÔTS DE SURFACE	CONDITIONS DE PERGÉLISOL	TYPES DE FONDATIONS ADAPTÉS AUX CONDITIONS DE PERGÉLISOL	PENTE CRITIQUE	POTENTIEL DE CONSTRUCTION SELON LES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET LES PENTES		
R	Socle rocheux massif d'âge précambrien dont la surface est parsemée de blocs et parfois recouverte d'une mince couche de sable et gravier avec cailloux.	1a	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 4,5 et 6 m. Seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une faible quantité de glace.	Fondations nordiques de tous types. Des adaptations à la topographie accidentée sont souvent nécessaires.	15° et plus	Terrains aménageables pour la construction (pente < 7,5°). Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 7,5 et 15°). Terrains défavorables à la construction (pente > 15°).
Mn/R	Dépôt de sable et gravier en couverture mince sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés.	1b	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle poreuse dont le contenu volumique en glace est généralement inférieur à 10 %.	Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfente du couvert de sédiments gelés).	15° et plus	Terrains aménageables pour la construction (pente < 7,5°). Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 7,5 et 15°). Terrains défavorables à la construction (pente > 15°).
At Gf Gfp GMf Mn Mnf Ev	Dépôts de sable et gravier stratifiés épais. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m.	1c	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés.	Fondations nordiques sur radier et chevalets ajustables ou pieux. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier pourraient requérir des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermosyphons).	10° et plus	Terrains aménageables pour la construction (pente < 5°). Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 5 et 10°). Terrains défavorables à la construction (pente > 10°).
DEPOTS INSTABLES AU DEGEL : DEPOTS QUATERNAIRES CONTENANT BEAUCOUP DE GLACE						
Tv+R Tx/R Tm/R	Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture mince sur socle rocheux (till). Composé principalement de sable et de silt avec quelques graviers et blocs. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés.	2a	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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 à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur.	Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfente du couvert de sédiments gelés).	8° et plus	Terrains aménageables pour la construction (pente < 4°). Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 4 et 8°). Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).
T Tm Tx	Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture épaisse sur socle rocheux (till). Composé principalement de sable et de silt avec quelques graviers et blocs. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m avec possibilités d'affleurements rocheux ponctuels.	2b	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. 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.	Fondations sur pieux possibles, mais requérant des forages plus profonds pour l'installation. Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermosyphons). Excavation à éviter.	8° et plus	Terrains aménageables pour la construction, mais requiert la prudence (pente < 8°). Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).
L/Mn L/R O/Mn O/R M/R Mb/R L O O/Mb	Dépôts à granulométrie fine d'origine marine ou lacustre (sable fin, silt et argile) en couverture mince sur socle rocheux ou dépôt de sable et gravier épais. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc ou le dépôt Quaternaire sous-jacent. Présence d'affleurements rocheux dispersés.	2c	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur. Matériau sujet à des ruptures de pente sur les versants.	Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfente du couvert de sédiments gelés).	2° et plus	Terrains aménageables pour la construction, mais requiert la prudence (pente < 2°). Terrains défavorables à la construction (pente > 2°).
Av/M Mn/M Mit Mb GMd	Dépôts à granulométrie fine d'origine marine (sable fin, silt et argile). Parfois recouvert d'une couche mince de sols organiques, de sédiments alluviaux, de sédiments littoraux ou de sédiments lacustres. Dépôt mal drainé.	2d	La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants lors de sa fonte.	Fondations sur radiers et chevalets ajustables possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la dégradation du pergélisol (ex. : thermosyphons). Excavation à éviter.	2° et plus	Terrains défavorables à la construction.
CONTRAINTES SEVERES : PROCESSUS PERIGLACIAIRES ET DE VERSANTS DYNAMIQUES, LITTORAUX ET PLAINES ALLUVIALES ACTUELLES						
C Ap Mi Mr	Dépôts contemporains soumis à des processus géomorphologiques actuels et dynamiques. Inondations et mouvements de versant (ex. : éboulis). Cicatrices d'ancien glissement, sillons de polygones à coin de glace, buttes saisonnières à noyau de glace, etc.	3	Processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles	Terrain problématique à éviter	N.A	Terrains défavorables à la construction.

2.1.10. Introduction dans l'étude des cartes des aléas naturels

Afin de pouvoir intégrer dans la discussion les potentiels et les risques propres à chaque village en fonction des aléas naturels (tels que les glissements de terrain, les avalanches, les inondations et les submersions côtières), nous avons intégré dans le présent rapport les analyses de risques produites dans le cadre d'un différent projet, commandé par le ministère de la Sécurité publique du Québec (Aubé-Michaud *et al.*, 2019). Et ce, puisque l'addition de la carte des risques face aux aléas naturels vient compléter les éléments d'information requis lors de la prise de décision dans l'aménagement des communautés.

L'estimation du niveau de risque face à un aléa potentiel dépend du degré de vulnérabilité des éléments exposés aux effets de cet aléa. La démarche consiste à établir l'importance respective des divers risques en fonction des caractéristiques propres à l'aléa potentiel ainsi que de l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et de ses conséquences éventuelles. Tous les éléments essentiels pour estimer le niveau de risque sont connus une fois que les probabilités d'occurrence d'un aléa et ses conséquences potentielles sont déterminées.

La méthode utilisée dans ce projet pour définir le niveau de risque repose sur l'utilisation de huit catégories de critères, chacun faisant l'objet d'une évaluation qualitative (**Figure 10**). La première série de critères consiste à caractériser l'aléa potentiel à partir de cinq éléments. Tout d'abord, la possibilité que se produise un aléa pouvant causer des dommages ou des atteintes doit être déterminée. Ainsi, la première échelle décrit une gradation de l'importance des probabilités d'occurrence. Cinq niveaux de probabilités d'occurrence sont retenus : presque certain, très probable, probable, peu probable et rare. Cette échelle permet d'estimer la probabilité de voir un aléa se produire au moins une fois sur une période de temps donnée. Par exemple, l'occurrence peu probable suggère que l'aléa peut se produire en moyenne une fois aux 100 ans, portant ainsi à croire que ce dernier pourrait survenir une seule fois sur cette longue période de temps. Toutefois, il faut préciser que mathématiquement, cela signifie plutôt que l'aléa a une chance sur 100 de se produire au courant d'une année. La deuxième échelle, utilisée pour caractériser l'aléa, a pour but de définir la vitesse d'évolution de celui-ci. Trois niveaux ont été retenus : subit, progressif (heure), et progressif (mois/année). La troisième échelle vient qualifier le niveau d'intensité de l'aléa. Trois niveaux ont été conservés : élevé (impliquant une masse importante et beaucoup d'énergie), intermédiaire (masse et énergie moins grandes et localisées), et faible (masse et énergie très faibles). La quatrième échelle consiste à caractériser l'étendue spatiale de l'aléa et de ses effets. Les trois niveaux retenus sont : vaste (le village au complet), restreint (une partie du village) et localisé (ex. un bâtiment). La cinquième échelle, soit la dernière utilisée pour caractériser l'aléa, qualifie la durée de l'impact causé par l'aléa. Trois niveaux ont été retenus : long (mois/année), intermédiaire (jour) et court (minute/heure).

La seconde série de critères a pour objectif de qualifier la vulnérabilité des éléments exposés (**Figure 10**). Le concept de vulnérabilité fait référence aux éléments d'un milieu exposé à un aléa potentiel ainsi qu'à leurs caractéristiques et conditions. L'exposition représente la relation entre un aléa potentiel et les éléments pouvant être soumis à sa manifestation. La première échelle qualitative de la vulnérabilité rapporte les éléments qui sont exposés aux effets de l'aléa, par exemple des maisons, l'école, le CLSC, les routes, les tours de communication, etc. La seconde échelle consiste à déterminer le degré d'exposition des éléments vulnérables aux effets de l'aléa. Trois niveaux ont été retenus : élevé, intermédiaire et faible. Le choix du degré d'exposition est fonction du nombre et de la concentration d'éléments exposés ainsi que de la proximité de l'élément par rapport à l'aléa.

La dernière échelle qualitative expose une gradation des conséquences potentielles (**Figure 10**). Cinq niveaux de conséquences sont retenus : sévères, majeures, modérées, mineures, et négligeables. Les conséquences potentielles dépendent du degré d'exposition ainsi que de la sensibilité des éléments exposés aux aléas, lesquels sont liés à différents facteurs et différentes conditions. Les facteurs de vulnérabilité se regroupent sous quatre grandes catégories : 1) sociale; 2) économique; 3) matérielle; et 4) environnementale. Cette méthode qualitative à deux échelles permet d'attribuer un classement aux probabilités d'occurrence et aux conséquences potentielles, peu importe que les données recueillies soient de nature qualitative ou quantitative.

Les données récoltées (qualitatives ou quantitatives) sont par la suite appliquées à une matrice (**Figure 11**). Cette dernière permet de classer les risques selon quatre niveaux en fonction des probabilités d'occurrence et des conséquences potentielles : très élevé, élevé, modéré et bas. Les différents niveaux de probabilités d'occurrence et de conséquences potentielles sont définis dans la légende qui accompagne la matrice (**Figure 11**). Un élément exposé qui n'est pas sensible aux effets d'un aléa n'est pas nécessairement vulnérable. Donc, dans un tel cas, le niveau de risque est classé modéré, voire faible. Par exemple, un risque avec une probabilité d'occurrence qualifiée de presque certain, mais dont les conséquences potentielles sont décrites comme négligeables, est qualifié de modéré. À l'inverse, un risque avec une probabilité d'occurrence considérée comme rare, mais dont les conséquences sont qualifiées de sévères est classé très élevé. Cette matrice traduit donc le fait qu'un risque ayant des conséquences potentielles jugées très importantes doit être considéré comme majeur même si son occurrence est classée peu probable.

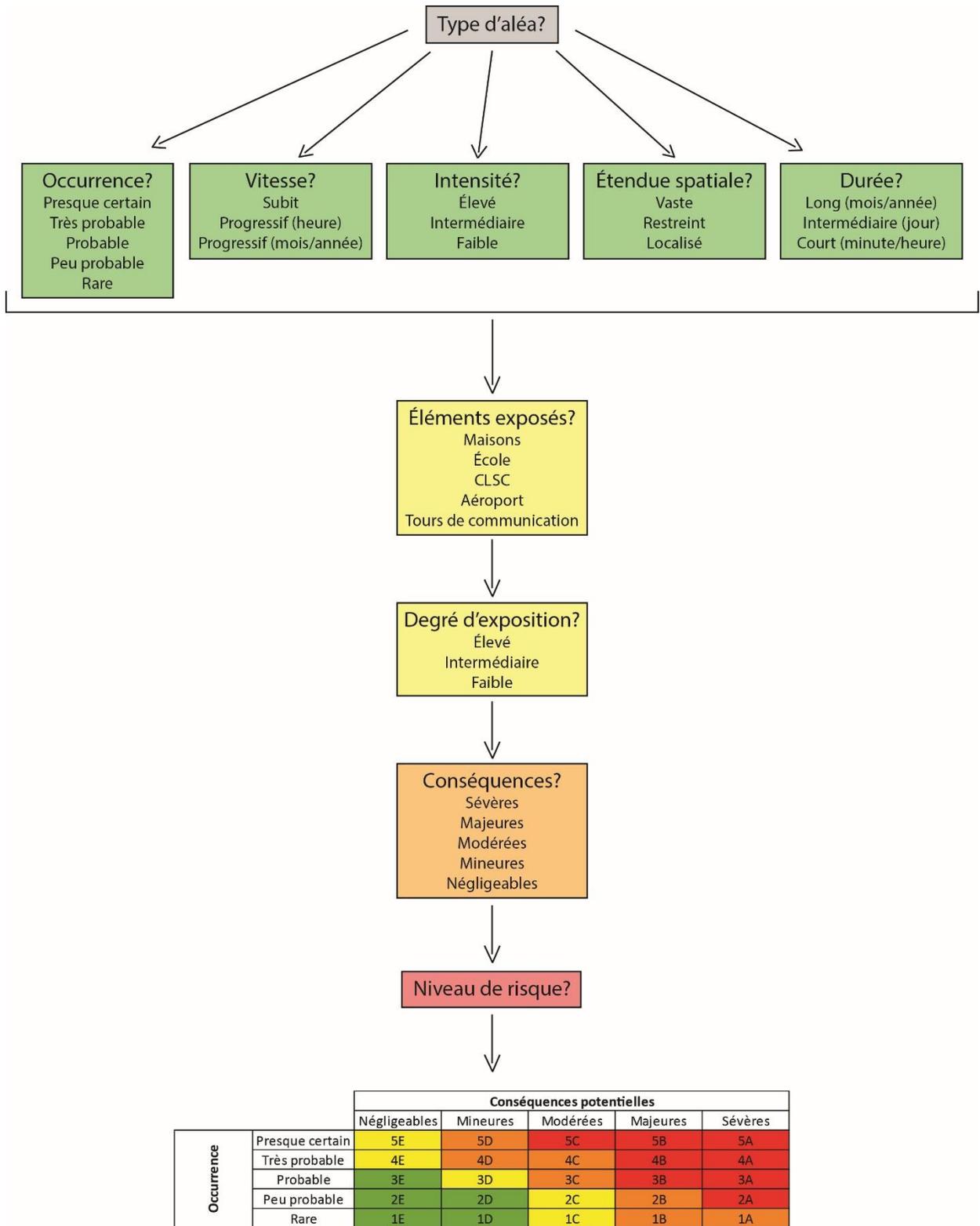


Figure 10 : Détermination du niveau de risque par l'intermédiaire de huit catégories de critères.

		Conséquences potentielles					Code couleur	Niveau
		Négligeables	Mineures	Modérées	Majeures	Sévères		
Occurrence	Presque certain	5E	5D	5C	5B	5A	Très élevé	
	Très probable	4E	4D	4C	4B	4A		
	Probable	3E	3D	3C	3B	3A	Modéré	
	Peu probable	2E	2D	2C	2B	2A		
	Rare	1E	1D	1C	1B	1A	Bas	

Occurrence		
Probabilité d'occurrence	Description	Valeur
Presque certain	Probabilité d'occurrence élevée (50 %) Peut se produire en moyenne 1 fois aux 2 ans	5
Très probable	Probabilité d'occurrence moyennement élevée (10 %) Peut se produire en moyenne 1 fois aux 10 ans	4
Probable	Probabilité d'occurrence faible (3 %) Peut se produire en moyenne 1 fois aux 30 ans	3
Peu probable	Probabilité d'occurrence très faible (1 %) Peut se produire en moyenne 1 fois aux 100 ans	2
Rare	Circonstances exceptionnelles (0,1 %) Peut se produire en moyenne 1 fois aux 1000 ans	1

Conséquences		
Conséquences potentielles	Description	Valeur
Sévères	Mort Infrastructures et équipements détruits Coût économique très élevé Large impact environnemental	A
Majeures	Blessures graves nécessitant une évacuation Infrastructures et équipements endommagés Coût économique élevé Impact environnemental d'ordre moyen	B
Modérées	Blessures demandant des soins Infrastructures et équipements peu endommagés Coût économique moyen Impact environnemental faible	C
Mineures	Blessures mineures Infrastructures et équipements peu ou pas endommagés Coût économique faible Peu ou pas d'impact environnemental	D
Négligeables	Peu ou pas de blessures Aucun bien endommagé Coût économique très faible Pas d'impact environnemental	E

Figure 11 : Matrice de risque accompagnée de ses légendes.

Appuyée sur des critères qualitatifs, cette matrice permet d'estimer le niveau des risques à partir de paramètres applicables uniformément à toutes les communautés. La quantification des probabilités d'occurrence et des conséquences potentielles n'est généralement pas possible pour tous les risques. En effet, les occurrences sont souvent calculées à partir de séries statistiques trop courtes (échelle de temps trop petite) ou des données quelquefois peu fiables. L'estimation du niveau de risque et la comparaison entre eux sont donc facilitées par l'utilisation d'une telle matrice basée sur des critères qualitatifs.

Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet ont été principalement accomplies à partir de données existantes. Tout d'abord, une revue de littérature exhaustive a été réalisée afin de recenser et documenter les aléas naturels survenus sur le territoire du Nunavik jusqu'à ce jour (Aubé-Michaud et Roger, 2015; L'Hérault *et al.*, 2017). Parmi les sources d'information consultées, on retrouve essentiellement les rapports techniques, les articles scientifiques et journalistiques. Afin de compléter le recensement des aléas naturels au Nunavik, une compilation de témoignages recueillis dans les différentes communautés a été en partie effectuée. Des visites de consultation ont eu lieu en 2015 dans les villages d'Ivujivik, Inukjuak, Umiujaq, Quaqaq et Kangiqsualujjuaq. Finalement, un exercice de photo-interprétation a été entrepris afin d'identifier à l'aide d'images satellitaires et de photographies aériennes obliques, acquises par le MFFP, les différents aléas naturels potentiellement observables sur le territoire du Nunavik.

Finalement, les zones pouvant potentiellement être affectées par des aléas naturels et les éléments (bâtiments, infrastructures, ressources) potentiellement en cause sont représentées sur une carte pour chaque village, dont la légende apparaît à la **figure 12**.

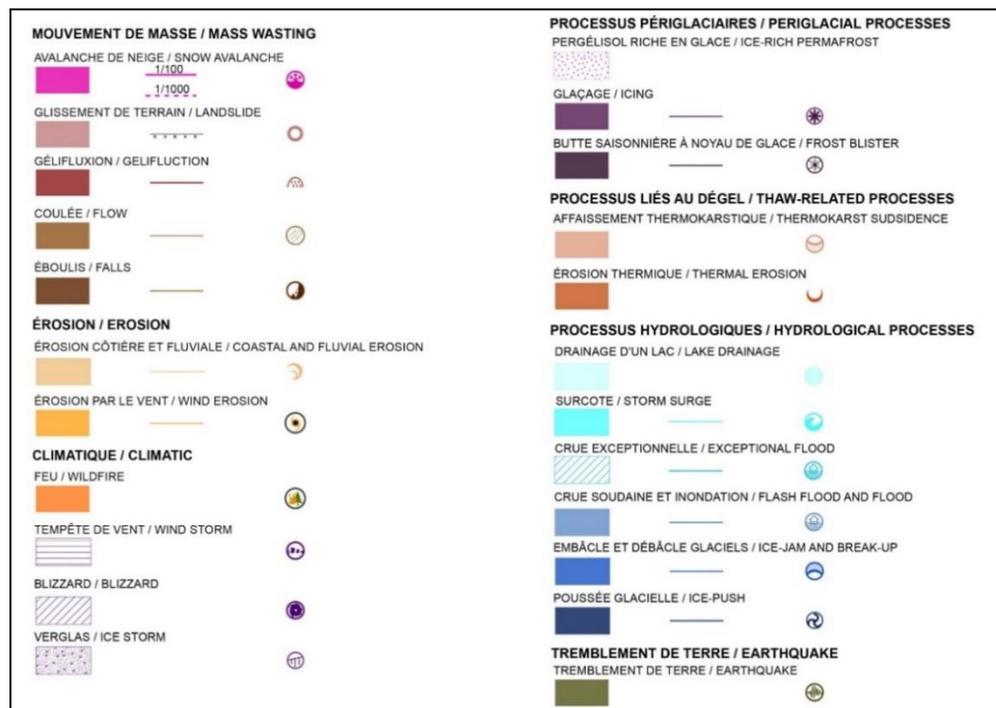


Figure 12 : Légende des cartes des aléas naturels actuels et appréhendés dans les villages du Nunavik.

2.2. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.2

2.2.1. Suivi climatique et géothermique dans les villages du Nunavik

La méthodologie utilisée fait appel au réseau SILA du Centre d'études nordiques, mis en place afin de suivre les changements climatiques dans les environnements nordiques (CEN, 2018). Ce réseau d'instruments est composé, entre autres, de câbles à thermistances et de stations météorologiques installés dans la majorité des villages nordiques du Nunavik. Dans le cadre des présents travaux, deux câbles à thermistances supplémentaires furent installés à Kangiqsualujjuaq dans des lotissements prévus (un d'eux fut ensuite détruit malencontreusement par des travaux publics). Dans les cas où il n'y avait pas de données disponibles, des sources alternatives ont été utilisées telles qu'Environnement Canada (2018), le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC, 2018) et le rapport Ouranos élaborant le portrait climatique du Nunavik, par Charron (2015). Pour chacun des 13 villages couverts par cette étude, les températures de l'air, les températures du sol (lorsque disponibles), les vents et les précipitations (lorsque disponibles) ont été compilés et les séries temporelles ont été élaborées. Cette analyse de suivi donne un aperçu relativement exhaustif de l'évolution récente du climat et des températures du pergélisol dans les villages du Nunavik et applicables à l'ensemble de la région. Les sites de mesures utilisés à la fois pour ce suivi et comme source de validation des simulations dans la section 2.2.2 sont listés au **tableau 6**.

Tableau 6 : Liste des sites de mesures sélectionnés, du type de données, de la couverture temporelle des données disponibles et du type de matériel géologique dans lequel se retrouvent les câbles à thermistances pour les 13 communautés du Nunavik.

Station	Type de données	Couverture	Type de matériel
Akulivik			
HT-162	Tsol	1990 à 2018	Till remanié en surface (Tx)
	Tair	1990 à 2018	
Aupaluk			
HT-299	Tsol	1990 à 2018	Sable et gravier (Mn)
	Tair	2004 à 2018	
Inukjuak			
INU-F2	Tair	2008-2018	Sables et silt (Mb)
	Tsol	2008-2018	
Ivujivik			
MELCC	Tair	2013-2018	
Kangiqsualujjuaq (GR)			
KANG231	Tsol	1992-2013	Roc
KANGCRE	Tair	2005-2017	
KANG100	Tsol	1997-2017	Sable et gravier fluvioglaciaires (GFb)
GR2017-F1	Tsol	2016-2017	Sables fins et silts (Gmi)
Kangiqsujuaq (WB)			
MELCC	Tair	2013-2018	

Kangirsuk			
KANGIR-HT1B	Tsol	2005-2018	Till remanié sur roc (Tx)
	Tair	2008-2018	
Kuujuuaq			
Env. Canada	Tair	1947-2018	Sable alluvial (At)
KUU2017 F05	Tsol	2017-2018	
	Tsol		
Puvirnituaq			
PUVFOR1A	Tsol	2005-2018	Sable silteux sur silt et argiles
	Tair	2005-2018	
PUV_F2	Tsol	2009-2018	Sable silteux sur silt et argiles
Quaqtaq			
HT-156	Tsol	1988-2018	Sables et graviers littoraux sur roc (Mn/R)
	Tair	2004-2018	
Salluit			
SILA/FP3	Tsol	2002-2016	Till
	Tair	2002-2017	
Env. Canada	Tair	2015-2018	
HT-154	Tsol	1987-2018	Roc
FP2	Tsol	2002-2018	Silts et argile
SALGLIS	Tsol	2006-2018	Silts et argile
FP4-V2	Tsol	2017-2018	Silts et argile
FS26-V2	Tsol	2017-2018	Route/Silts et argiles
Tasiujaq			
HT-157	Tsol	1988-2017	Schiste (Roc)
	Tair	2002-2017	
HT-304	Tsol	1993-2018	Sable et gravier, silt sableux, silt et argile (Mi/Mb/MGa)
	Tair	2004-2018	
TAS-F2	Tsol	2010-2018	Sable et gravier, silt sableux, silt et argile (Mi/Mb/MGa)
Umiujaq			
UMIROCA	Tsol	1997-2017	Roc
	Tair	1997-2017	
VDTSYBU		2008-2017	Silt sableux (GFf2)

* Les codes entre parenthèses réfèrent aux classes de dépôts de surface sur la carte du village.

2.2.1.1. Prétraitement et analyse des données climatiques et géothermiques

Le village de Salluit a été traité de façon plus intensive que les autres étant donné la sensibilité particulièrement grande de ses sols au réchauffement climatique. En effet, le pergélisol riche en glace et parfois salin y occupe de vastes superficies sous le milieu déjà bâti. Ayant fait l'objet d'études antérieures, on y trouve une station météorologique

complète et des câbles à thermistances dont les données s'étendent, pour certains, sur trois décennies.

Toutes les séries de données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes. Les températures de l'air ont été utilisées afin de calculer plusieurs indices climatiques, tels que les moyennes journalières, saisonnières et annuelles, les indices de gel et de dégel, la durée des saisons de gel et de dégel, etc. Les températures du sol ont, quant à elles, servi à déterminer le régime thermique du pergélisol (profondeur maximale de dégel saisonnier, températures moyennes en fonction de la profondeur, etc.) puis à valider les modèles géothermiques. Les précipitations ne sont pas enregistrées ou toutes rapportées dans les villages du Nunavik, à l'exception de Salluit et de Kuujuaq pour lesquels les séries disponibles ont été compilées.

Il n'y a pas de données géothermiques pour les villages d'Ivujivik et de Kangiqsujaq. Dans ces deux cas, les simulations ont été établies en fonction des connaissances géologiques recueillies durant les travaux de la mesure 5.2.1 et en fonction des données climatiques de bonne qualité disponibles par les grilles de réanalyse. Dans le cas des villages d'Inukjuak et Kangirsuk, les données géothermiques disponibles ne sont pas représentatives du reste du village, étant donné leur localisation en marge de la piste d'atterrissage où les profils thermiques sont perturbés. Nous avons donc utilisé la stratigraphie détaillée à l'emplacement des câbles à thermistances, mais les simulations ont été établies en fonction des données climatiques locales et des réanalyses. Enfin, deux câbles à thermistances utilisés pour calibrer les simulations climatiques ont subi un soulèvement gélival (à Puvirnituq et Tasiujaq), provoquant une erreur dans les profondeurs de lecture. Une analyse des données a permis de déterminer la date à partir de laquelle le soulèvement est survenu et la calibration des modèles a pu être réalisée en utilisant les données climatiques des années précédentes. Par conséquent, dans le cas de la station PUVFOR1A, située à Puvirnituq, la calibration du modèle a été réalisée sur les années de 2005 à 2008. Les années 2008 à 2011 ont été utilisées pour calibrer le modèle de la station HT-304, située à Tasiujaq.

On peut avoir une confiance élevée dans la représentation adéquate de la réalité (incluant ses variations naturelles inhérentes) dans les simulations des villages où ce n'est pas un câble à thermistance donné qui a servi de validation comparative. Cette confiance découle d'abord du fait que la correspondance est excellente entre les données de réanalyses et les mesures réelles aux sites où les deux types de données sont disponibles. Elle découle aussi du fait que la stratigraphie et les propriétés thermiques des sols intégrés dans les modèles sont réelles, étant obtenues de forages et d'analyse en laboratoire. Finalement, la comparaison avec les résultats des villages voisins aux simulations calées sur des câbles montre des valeurs cohérentes et logiques.

2.2.1.1. Détermination des années climatiques

Afin d'illustrer et d'observer les tendances saisonnières et annuelles, les moyennes et les indices ont été calculés sur l'année climatique plutôt que sur l'année calendaire (**Figure 13**). L'année calendaire, débutant le premier janvier et se terminant le 31 décembre, coupe en effet la saison de gel en deux. L'année climatique, quant à elle, prend en compte le doublet formé par la saison de gel et de dégel. L'avantage de cette méthode est de pouvoir établir directement la correspondance entre les cycles de température dans le sol, les cycles de gel et de dégel de la couche active et les températures atmosphériques. C'est ce régime cyclique naturel qui est à l'origine du régime thermique du pergélisol et qu'il faut obligatoirement simuler dans les projections de réchauffement climatique.

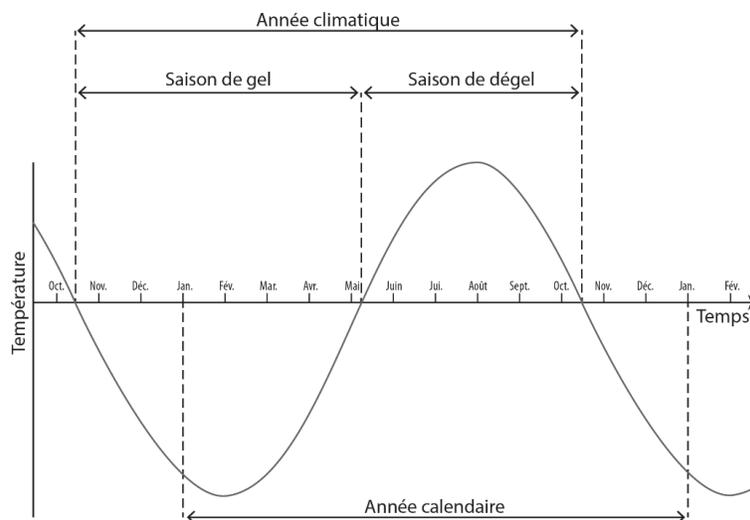


Figure 13 : Comparaison d'une année climatique, formée du couplet des saisons de gel et de dégel, et d'une année calendaire, du 1^{er} janvier au 31 décembre, en fonction du temps (Allard *et al.*, 2018 – adapté de Mathon-Dufour, 2014).

2.2.2. Modélisation géothermique du pergélisol et simulation numérique des variations de l'épaisseur de la couche active

2.2.2.1. Le modèle géothermique

Afin de procéder aux simulations numériques, nous avons élaboré des modèles cryostratigraphiques synthèses représentant la séquence verticale des diverses couches de sol avec les teneurs en glace du milieu où se trouvent les câbles à thermistance retenus pour l'analyse. Ces modèles géologiques sont fondés sur les données de forage et les informations stratigraphiques obtenues des travaux de la mesure 5.2.1. Ils représentent les matériaux (sable, argile, glace, eau, etc.) du sous-sol à chaque site, lesquels matériaux ont des propriétés thermiques (conductivité, capacité calorifique volumique, chaleur latente de

fusion définie par la teneur en eau) qui commandent les transferts de chaleur et qu'il faut intégrer dans les calculs.

Les simulations géothermiques ont été réalisées à l'aide du logiciel TEMP/W de *GEOSLOPE International Ltd.* TEMP/W est un logiciel à éléments finis permettant de modéliser le transfert de chaleur et le changement de phase dans un système poreux, tel que le pergélisol (GEOSLOPE International Ltd., 2014).

Pour chacune des simulations produites, les étapes préalables suivantes ont été réalisées :

1. Élaboration du domaine de simulation à l'aide du logiciel TEMP/W
 - 1.1. Géométrie
 - 1.2. Maillage
2. Détermination des propriétés des matériaux du sol
 - 2.1. Conductivité thermique k (kJ/jour/m/°C)
 - 2.2. Capacité calorifique volumétrique C (kJ/m³/°C)
 - 2.3. Teneur en eau volumétrique *in situ*
 - 2.4. Température de fusion (0°C ou inférieur, dans les cas de sédiments salins)
3. Détermination des conditions limites du modèle
 - 3.1. Températures de l'air
 - 3.2. Facteurs- n (rapport entre les températures de l'air et celles en surface du sol (voir glossaire))
 - 3.3. Flux géothermique
4. Production d'un modèle initial validé sur les profils réels des câbles à thermistances, lancement des simulations, validation. Production d'un modèle initial non validé sur un câble, mais néanmoins représentatif, dans les communautés qui en sont dépourvues).
5. Analyse de la signification des simulations pour l'avenir du pergélisol dans chaque village

2.2.3. Projections et simulations

Afin de simuler l'évolution du régime thermique en fonction des scénarios climatiques couramment utilisés dans la pratique internationale, nous avons utilisé pour chaque village une gamme de six simulations de températures de l'air provenant du Modèle régional canadien du climat (MRCC5) fournies par le consortium Ouranos. Ces simulations sont calculées selon les scénarios d'évolution des gaz à effet de serre produits par le Groupe international d'étude sur le climat (GIEC), soit les RCPs (pour Representative Concentration Pathways), suivant différentes hypothèses politico-économiques d'ici 2100 (van Vurren *et al.*, 2011; Ouranos, 2015).

Trois simulations différentes, à savoir un scénario extrême inférieur, un médian et un extrême supérieur, sont basées sur le scénario RCP4.5 prévoyant une stabilisation sans dépassement de la production de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2100. Ce scénario modéré

correspond à un réchauffement moyen global de 2,4 °C vers 2100 (par rapport aux températures de 1850) et un forçage radiatif vers 2100 de 4,5 W/m². Trois autres simulations (deux extrêmes et une médiane) sont basées sur le scénario RCP8.5, prévoyant des émissions de gaz à effet de serre croissantes d'ici 2100. Ce scénario pessimiste correspond à un réchauffement moyen global de 4,9 °C vers 2100 (par rapport aux températures de 1850) et un forçage radiatif vers 2100 de 8,5 W/m² (**Tableau 7**).

Notre choix de ces scénarios se justifie en premier lieu par le fait que la réalisation du scénario RCP 2.6 impliquant un déclin dans les émissions de GES semble quasi-irréalisable dans l'état actuel des politiques publiques à l'échelle internationale d'une part et d'autre part parce que les régions nordiques sont appelées à continuer un réchauffement supérieur au reste de la planète en raison de l'amplification arctique. Par ailleurs, la médiane ainsi que les variantes optimistes et pessimistes du scénario RCP 6.0 sont englobées à l'intérieur des marges supérieures et inférieures des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (**Figure 14**). En conséquence, aucune information supplémentaire utile ne découlerait de son emploi.

Tableau 7 : Caractéristiques principales de chaque scénario RCP (tiré de Ouranos, 2015, adapté de Rogelt *et al.*, 2012).

Nom	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Évolution	Équivalent CO ₂ (ppm)	Réchauffement moyen global vers 2100 p/r 1850 (°C)	Équivalent SRES approximatif (en termes de changement de température globale)
RCP8.5	8.5	Émissions fortes et continues	1370	4.9	A1FI
RCP6.0	6.0	Stabilisation sans dépassement	850	3.0	B2
RCP4.5	4.5	Stabilisation sans dépassement	650	2.4	B1
RCP2.6	2.6	Pic avant 2050 et réduction	490	1.5	Aucun

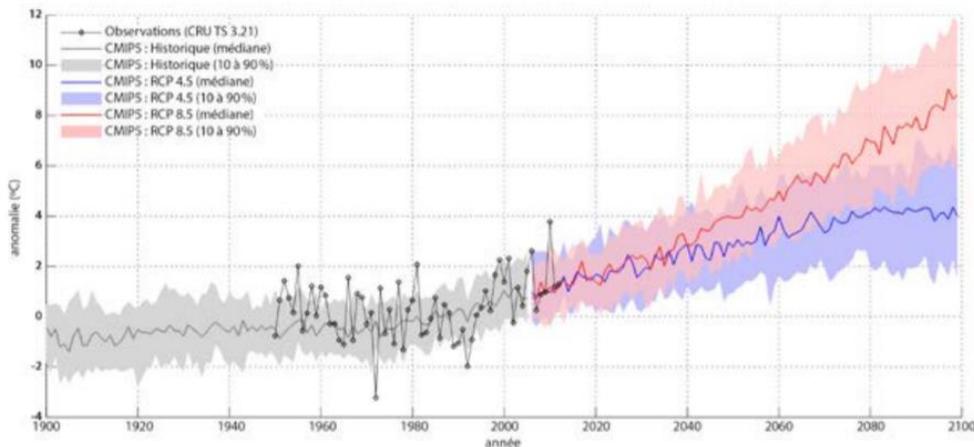


Figure 14 : Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29) pour la sous-région du Nord-du-Québec (tiré de Ouranos, 2015).

La fourchette de prévisions climatiques et la variabilité de chacune permettent d'estimer des vitesses de changement climatique et des amplitudes à l'intérieur desquelles des décisions pourront devoir être prises pour le maintien ou non de sections de villages sur le pergélisol sensible et pour la proposition de fondations mieux adaptées.

Pour chacune des 13 communautés, les températures maximums et minimums journalières de 1950 à 2100, pour 11 modèles climatiques identifiés à la **figure 15**, selon un RCP de 4,5 et de 8,5 ont été traitées (pour un total de 572 fichiers). Parmi les 11 modèles de référence utilisés chez Ouranos, seul le modèle HadGEM2 (no. 8) n'a pas été utilisé par nous, car son calendrier comprimé sur 360 jours (12 mois de 30 jours) par année le rend difficile à intégrer dans les simulations de régime thermique du pergélisol qui sont fondées des valeurs mensuelles et des cycles thermiques annuels de 365 jours.

<i>Centre</i>	<i>Modèle</i>	<i>RCP</i>	<i>Centre</i>	<i>Modèle</i>	<i>RCP</i>
1	GCESS	BNU-ESM	7	IPSL	4.5
					8.5
2	CCCMA	CanESM2	8	MOHC	4.5
					8.5
3	CMCC	CMCC-CMS	9	MPI-M	4.5
					8.5
4	CSIRO-BOM	ACCESS1.3	10	NCC	4.5
					8.5
5	INM	INM-CM4	11	NOAA	4.5
					8.5
6	IPSL	IPSL-CM5A-LR			4.5
					8.5
					4.5
					8.5

Figure 15 : Simulations retenues par Ouranos et utilisées par le CEN, sauf le modèle HadGEM2 (encadré en rouge), car leur calendrier comprime les données sur 360 jours.

3. LE PERGÉLISOL, LES RISQUES NATURELS ET L'AMÉNAGEMENT D'UMIUJAQ

Le village d'Umiujaq (signifiant *bateau*) (56° 33'02,9" N, 76° 33'04.6" O), dont la population avoisine les 450 habitants, se situe sur la côte est de la baie d'Hudson, à environ 160 km au nord de Kuujjuarapik, en face des îles Nastapoka et à proximité du lac Tasiujaq, anciennement le lac Guillaume-Delisle (Allard *et al.*, 2007b; Statistique Canada, 2017; **Figure 16**). Entre 2011 et 2016, la communauté a connu une diminution de sa population (-0,5 %) passant de 444 à 442 personnes. Au total, 105 logements construits sont à la disposition des 442 résidents. Plus de la moitié des logements (n = 55) est habité par cinq personnes ou plus. À Umiujaq, la taille moyenne des ménages est de 4,2 personnes.

La région est caractérisée par des formations géologiques constituées de roches volcano-sédimentaires de la province tectonique de Churchill, qui sont à l'origine d'un paysage de *cuestas* (Fortier *et al.*, 2011). Ces collines rocheuses asymétriques sont inclinées selon une pente douce vers la baie d'Hudson tandis que leurs sommets atteignant 320 m surplombent le lac Tasiujaq par de hautes falaises (Carbonneau *et al.*, 2015).

La communauté d'Umiujaq est située aux limites de la zone de pergélisol discontinu et la zone de pergélisol sporadique. Entre 2004 et 2017, la température moyenne annuelle climatique de l'air était de -2,89 °C. Affecté par un climat côtier humide et de fréquents brouillards, le village reçoit des précipitations moyennes annuelles avoisinant 739 mm, dont 30,8 cm sous forme de neige.

La carte des unités géologique de la région d'Umiujaq a été validée au cours de la campagne de terrain réalisé à l'été 2017 et suite aux analyses des données de terrain. Quatre sondages à la pelle ont alors été faits au sud de la communauté. Nous avons également fait sept observations de surface (principalement des buttes saisonnières à noyau de glace) et 68 affleurements rocheux ont été cartographiés au GPS. Un total de 33 levés de géoradar a été réalisé sur les routes dans le village et en milieu naturel. Dans le cadre du projet, 28 levés situés dans les zones bâties et à proximité du nouveau secteur domiciliaire, au sud de la communauté ont été traités et analysés (**Figure 16**).

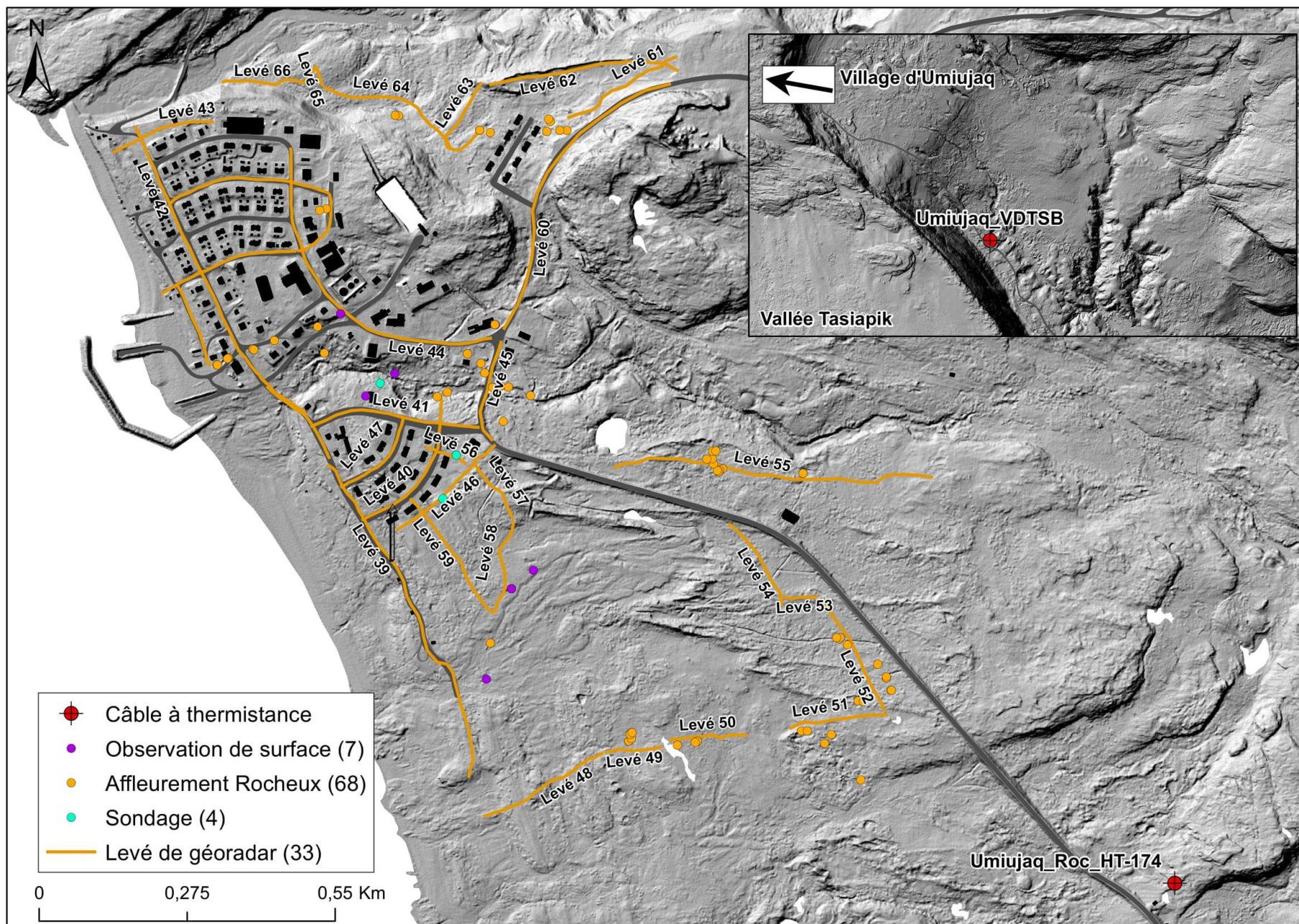


Figure 16 : Localisation des levés de géoradar et des travaux de terrain réalisés à l'été 2017 à Umiujaq.

3.1. Cartographie des conditions géomorphologiques et des propriétés du pergélisol

3.1.1. Carte de la géologie de surface

L'épisode glaciaire du Wisconsinien a mis en place des dépôts d'origines glaciaires (Tm). Des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (GFf2) ont également été déposés en contact avec le glacier lors d'une stabilisation du front glaciaire le long des fronts des cuestas (Lajeunesse et Allard, 2003). À la suite du retrait de l'Inlandsis Laurentidien, la transgression marine de la mer de Tyrrell a ennoyé le territoire jusqu'à 250 m d'altitude (Lavoie, 2006). Des sédiments fins composés de silt et d'argiles (Mb) se sont déposés dans les dépressions structurales profondes, tandis que des sédiments plus grossiers, des champs de blocs, des plages soulevées et des terrasses (Mn, Mn/GFf2, Mn/R) ont été mis en place sur les versants exposés des collines rocheuses pendant la régression marine postglaciaire (Lévesque *et al.*, 1988; Fortier *et al.*, 2011). Par endroits, les sédiments littoraux et pré-littoraux ont subséquemment été remodelés par l'action fluviale et éolienne (At, Er, Er/GFf2). L'abaissement du niveau de base en lien avec l'émersion des terres et le retrait de la mer postglaciaire a favorisé l'incision de terrasses de part et d'autre de la rivière Umiujaq par l'érosion fluviale des dépôts fluvioglaciaires et marins (GFf2) (Carbonneau *et al.*, 2015).

Les travaux de terrain de l'été 2017 ont permis de réviser la carte des dépôts de surface produite par Carbonneau *et al.* (2015). Au sud de la communauté, entre le littoral et la route de l'aéroport, l'étendue réelle des zones de dépôts littoraux et pré-littoraux (Mn) a été validée et corrigée. Une grande superficie du territoire d'Umiujaq est recouverte par des dépôts littoraux et pré-littoraux (Mn) déposés sous la forme de plages soulevées ou de terrasses marines. D'ailleurs, la communauté est établie sur ces dépôts. Cette couche de sédiments est assez mince, soit entre 1 à 2 mètres d'épaisseur, et est composée d'un sable moyen à grossier avec la présence de lits de minéraux lourds et des fragments de coquilles (Dessau-Soprin inc, 2002; L'Hérault *et al.*, 2012). Les levés de géoradar effectués au sud du village, entre le littoral et la route de l'aéroport, confirment que ces derniers sont minces sur roc (**Figures 17 et 18**).

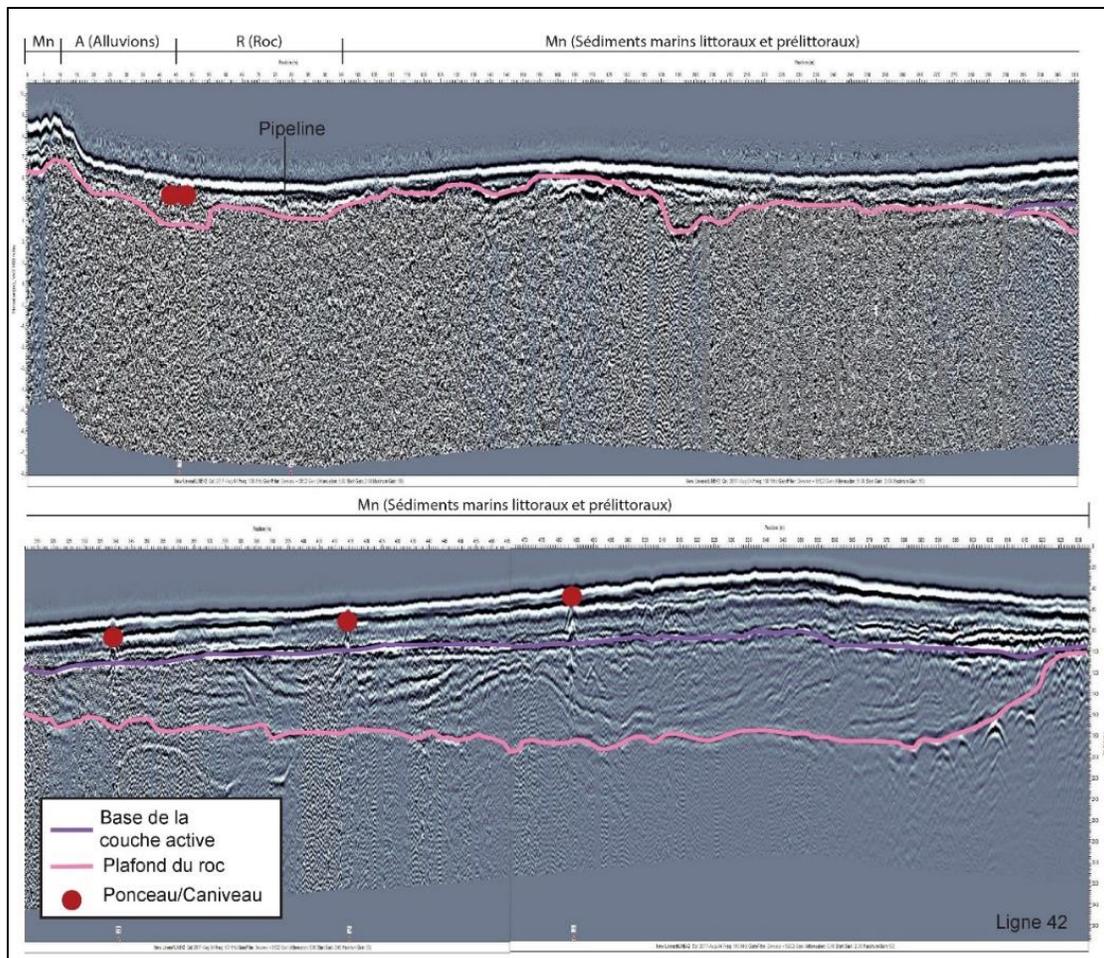


Figure 17 : Profil de géoradar réalisé sur la route le long du littoral, suggérant la présence de sédiments littoraux et pré-littoraux stratifiés sur roc. La profondeur du dépôt peut atteindre les sept mètres d'épaisseur à l'endroit du levé 42.

Les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique sont retrouvés sur la majorité du territoire d'Umiujaq. Cette unité géologique occupe le fond de la vallée de la rivière Umiujaq en amont. Au site du village et autour, elle repose sous différentes unités géologiques de surface telles que les sédiments éoliens et les sédiments littoraux et pré-littoraux. Selon L'Hérault *et al.* (2012), la couverture de sédiments en surface a généralement une épaisseur inférieure à 2,5 m et l'épaisseur des sédiments d'épandage proglaciaire varie entre 6 et 8 m. Suite aux observations de terrain, la limite des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (GFf2) a été validée au sud du village. L'extension de ces dépôts gélifs a également été validée sous les dépôts éoliens dans le secteur de la route de l'aéroport grâce à l'analyse des levés de géoradar (**Figure 19; Annexes A - Interprétation des profils de géoradar : Ligne 53**). Dans le même secteur, un complexe de sédiments éoliens sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Er/GFf2) a été cartographié. Selon L'Hérault *et al.* (2012), les sédiments éoliens sont composés de sable moyen à fin bien trié d'une épaisseur moyenne d'un mètre.

Les sédiments glaciaires sont plutôt rares dans la région immédiate du village. C'est dans la vallée Tasiapik que des dépôts de till ont été identifiés, adossés aux flancs escarpés de celle-ci. Il s'agit d'un till formant une moraine frontale (Tm) qui a été mis en place au front du glacier, alors que celui-ci était en contact avec la mer de Tyrrell et était appuyé sur les fronts de cuesta dans le bassin du Lac Tasiujaq. De vastes affleurements rocheux sont présents dans l'est de la communauté et continuent d'affleurer plus en altitude (Allard *et al.*, 2007a). Une mince couverture de sédiments littoraux et pré-littoraux sableux et blocailleux et de sédiments éoliens recouvre par endroits le roc.



Figure 18 : Zone de sédiments littoraux et pré-littoraux minces sur roc (Mn/R) au sud de la communauté d'Umiujaq.

Au nord de la communauté, en bordure de la rivière, les dépôts meubles antérieurs ont été érodés et remaniés par l'encaissement du chenal fluvial. Sur leur passage, les eaux de la rivière ont laissé sur place un dépôt d'alluvions de terrasse fluviale (At), lequel a été ajouté à la carte des dépôts de surface d'Umiujaq. L'abaissement du niveau de base durant les derniers millénaires est visible par l'étagement des terrasses fluviales. Ces dépôts alluviaux consistent essentiellement en des sables fins à moyens avec graviers. Les sols de ce secteur sont considérés favorables à la construction (L'Hérault *et al.*, 2012; Carbonneau *et al.*, 2015).

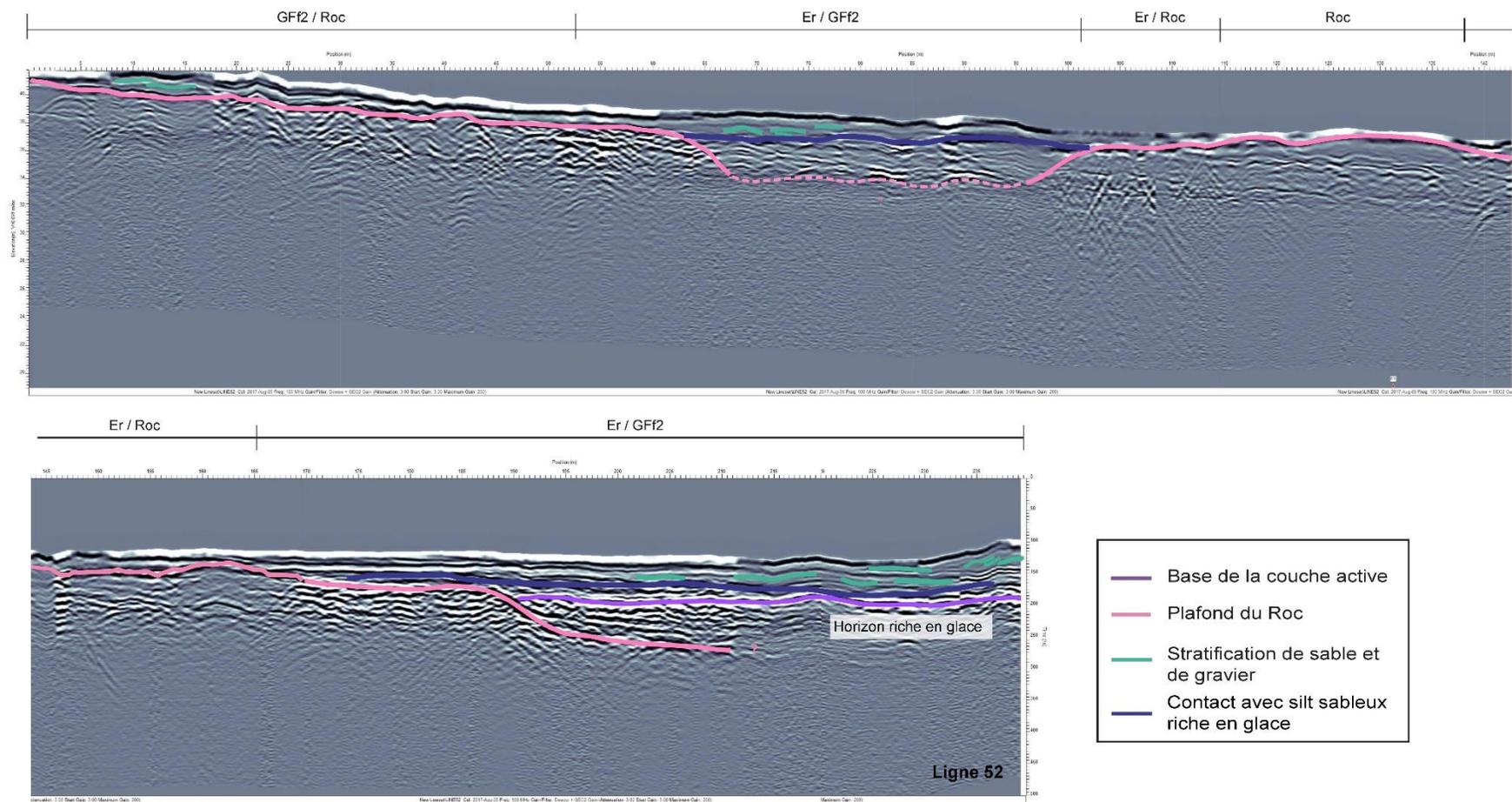


Figure 19 : Interprétation du levé de géoradar 52 près de la route menant à l'aéroport. Les levés de GPR démontrent la présence d'un dépôt gélif sous des dépôts éoliens (Er).

3.1.2. Carte des conditions de pergélisol

Les terrains où sont construites les infrastructures principales du village sont constitués de sédiments marins littoraux grossiers et épais (classe 1c) stables au dégel. Cette terrasse marine se prolonge au nord du village, de l'autre côté de la rivière Umiujaq, ainsi que vers l'est et offre un excellent potentiel pour l'expansion de la communauté où des fondations de tous types peuvent être utilisées.

Le roc (classe 1a) est également présent au nord de la communauté et offre des terrains favorables et stables au dégel. Cependant, le développement d'infrastructures de ce côté de la rivière nécessiterait la construction de ponts.

À l'endroit du nouveau secteur résidentiel, la mise à jour de la carte des dépôts de surface a permis d'y redéfinir les conditions de pergélisol. Sur la carte de Carbonneau *et al.* (2015), le secteur avait été classé comme instable au dégel du pergélisol (classe 2d). L'analyse des levés de géoradar et les observations de terrains ont démontré que le dépôt est de manière générale assez mince, entre 1 à 2 mètres d'épaisseur, et est composé essentiellement d'un sable moyen à grossier et repose sur le roc (Mn/R) (Classe 1b) (**Annexes A - Interprétation des profils de géoradar : Lignes 40 et 56-57**). De plus, quelques affleurements rocheux sont observables à la surface. Plus au sud, à l'entrée du village, la limite des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique, soit les sédiments géelifs, (GFf2) a été validée et corrigée. On y retrouve aussi des dépôts littoraux et pré-littoraux reposant sur le roc (Mn/R).

3.1.3. Carte des aléas naturels

La zone littorale de la région d'Umiujaq est exposée à une surcote de 1,5 m en cas de tempêtes avec une forte dépression atmosphérique et de grosses vagues (Massé et Gallant, 2016; Boisson, 2019). Cela se manifeste actuellement par le recul de la micro-falaise (environ 3 m de hauteur) le long de la plage qui a récemment provoqué la destruction de cabanons (**Figure 20**). L'absence d'enrochement pour lutter contre ce risque côtier rend le littoral de la communauté vulnérable à cet aléa et son niveau de risque est estimé élevé (3C). Toutefois, seules les installations portuaires seraient submergées en cas de surcotes. La présence de plaines alluviales et de milieux humides mal drainés à Umiujaq représente une contrainte au développement. Ces terrains mal drainés, retrouvés principalement dans les creux topographiques, sont à risque d'être inondés lors de pluies abondantes et/ou de la fonte rapide de la neige au printemps (2D).

La présence de pergélisol riche en glace (classe 2d) dans certains secteurs d'Umiujaq est très bien documentée. Les affaissements thermokarstiques engendrés par le dégel du pergélisol sont presque certains dans le secteur et le risque d'affaissement est estimé élevé (5D). Au sud du village, le drainage naturel du terrain provoque des suintements et crée des buttes saisonnières à noyau de glace. Ces processus liés au pergélisol sont également

à considérer lors de l'expansion de la communauté sur le territoire, malgré leur niveau de risque estimé modéré (5E).



Figure 20 : Localisation d'un cabanon abandonné près de la baie d'Hudson en raison du recul de la micro-falaise (3 m de hauteur).

Quelques pieds de versants sont affectés par des éboulements rocheux, principalement au front des cuestas situées dans la vallée Tasiapik. Ce type d'aléa survient subitement et son intensité est élevée. La probabilité d'occurrence de ce type d'aléa dans la région d'Umiujaq est probable et les conséquences sont majeures. Le niveau de risque des éboulements rocheux est donc estimé très élevé (3B). Plusieurs blocs ont d'ailleurs déjà été transportés et déposés par ce type de mouvement de masse à proximité de la route qui relie le village d'Umiujaq au lac Tasiujaq (Veilleux *et al.*, 2019). Les pieds de versants sont donc à éviter lors de l'aménagement de nouvelles infrastructures. Notons que ce risque est absent dans le village lui-même.

De surcroît, nous avons tracé sur la carte des aléas la superficie du bassin hydrographique de la petite rivière dans laquelle la communauté pompe son eau pour remplir périodiquement (surtout pour l'hiver) son réservoir taillé dans le roc. Ce territoire devrait être protégé de toute perturbation anthropique et de toute contamination.

Tableau 8 : Grille d'analyse des contraintes au développement de la communauté d'Umiujaq (Tiré de Aubé-Michaud *et al.*, 2019).

Types d'aléas		Contraintes	
Mouvements de masse	Glissements de terrain		
	Gélifluxion		
	Coulée de débris		
	Éboulement rocheux	3B	
	Avalanche (sèche et humide)		
Processus hydrologiques	Crue et inondation	2D	
	Submersion côtière	3C	
	Drainage d'un lac		
	Embâcle et débâcle		
	Poussée glacielle		
Processus reliés au pergélisol	Affaissement thermokarstique	5D	
	Glaçage		
	Érosion thermique		
	Butte saisonnière à noyau de glace	5E	
Érosion	Côtière		
	Fluviale		
	Éolienne	5E	
Climatique	Blizzard	5B	5D
	Tempête de vent	5B	5D
	Feu		
	Verglas	5B	5D
Tremblement de terre			

3.1.4. Carte de potentiel de construction

Les terrains sur lesquels sont construites les infrastructures du village d'Umiujaq consistent en des sédiments marins littoraux grossiers et épais (classe 1c) stables au dégel. La terrasse, qui se prolonge au nord du village, de l'autre côté de la rivière Umiujaq ainsi que vers l'est, offre aussi un excellent potentiel pour l'extension de la communauté. Des fondations de tous les types peuvent y être utilisées. Toutefois, le développement dans ce secteur reste limité en raison de la présence de plusieurs dépotoirs et des bassins d'épuration tout au long de la route menant au lac Tasiujaq (Carbonneau *et al.*, 2015). Dans la portion sud du village, la limite et la nature des dépôts de surface ont été corrigées suite aux travaux de terrain et à l'analyse des levés de géoradar. Ces terrains constitués de sédiments littoraux et pré-littoraux minces sur roc (Mn/R) (classe 1b), autrefois passé inaperçus dans le secteur au sud de la communauté, sont jugés favorables à la construction. Le roc (classe 1a), également présent au nord de la communauté, offre des terrains favorables et stables au dégel. Des affleurements rocheux sont également présents le long de la route d'accès à l'aéroport.

Le territoire d'Umiujaq possède quelques terrains problématiques pour le développement de la communauté. Une partie des secteurs situés à la frange sud du village sont composés de sédiments fins riches en glace et instables au dégel (GFf2) (classe 2d). Par endroits, ces dépôts sont recouverts en surface d'un mince dépôt (< 2 m) de sable généralement stable (Er/GFf2). Les analyses de levés de géoradar ont permis de confirmer la présence de ce dépôt d'épandage proglaciaire subaquatique (GFf2) épais de quelques mètres et potentiellement riche en glace (**Figure 21**).

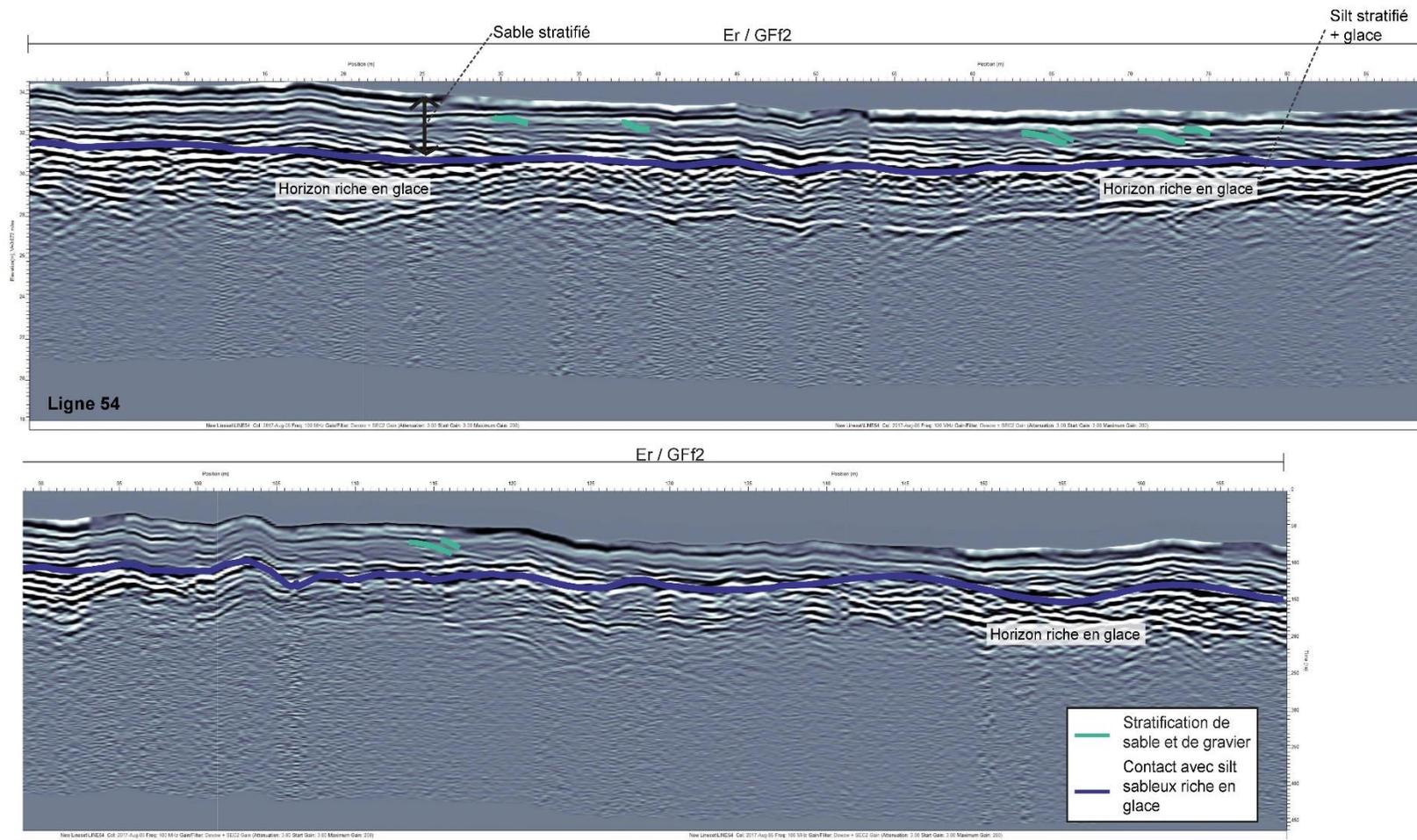


Figure 21 : Interprétation du levé de géoradar 54 en bordure de la route menant à l'aéroport. Les levés de GPR démontrent la présence d'un dépôt gélique dans les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (GFf2).

3.2. Régime thermique actuel du pergélisol et analyses prédictives en fonction du changement climatique

3.2.1. Climat et pergélisol

Le **tableau 9** présente les températures annuelles et saisonnières, en plus des indices de gel et de dégel à Umiujaq, pour la période comprise entre 2004 et 2018. Pour cette période, la température annuelle moyenne est de $-2,89\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les deux années les plus chaudes sont 2005-2006, avec une température annuelle moyenne de $-1,70\text{ }^{\circ}\text{C}$, et 2009-2010, avec une température annuelle moyenne de $-0,41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les mois les plus humides sont août à octobre, avec des précipitations moyennes de 85 mm (**Figure 22**).

La **figure 23** présente la moyenne horaire de la direction et de la vitesse des vents pour la période de 2014 à 2015. Les vents de l'est provenant de l'intérieur des terres dominant statistiquement et ont une vitesse comprise entre 25 et 50 km/h, avec quelques pointes pouvant atteindre 75 km/h. Toutefois, les tempêtes marines estivales et automnales se caractérisent par de forts vents du sud-ouest et de l'est.

Température de l'air : principaux indices climatiques

Tableau 9 : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station climatique UMIROCA, localisée sur le versant côtier d'Umiujaq, pour la période de 2004 à 2017.

Année climatique		2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011
Saison de gel	Début	31-oct	01-nov	02-nov	28-oct	30-oct	20-oct	13-nov
	Fin	24-avr	15-avr	21-mai	01-mai	04-juin	11-mai	08-mai
	Durée	175	165	200	186	217	203	176
	Moyenne T°C	-15,04	-12,03	-11,47	-13,97	-12,46	-8,14	-12,21
	Indice de gel (FI)	2659	2011	2327	2629	2743	1715	2177
Saison de dégel	Début	25-avr	16-avr	22-mai	02-mai	05-juin	12-mai	09-mai
	Fin	31-oct	01-nov	27-oct	29-oct	19-oct	12-nov	15-nov
	Durée	189	199	158	180	136	184	190
	Moyenne T°C	8,72	6,88	7,54	9,27	9,63	8,10	7,67
	Indice de dégel (TI)	1686	1428	1196	1685	1319	1509	1485
Moyenne année climatique		-2,71	-1,70	-3,10	-2,54	-3,94	-0,41	-1,89
Ratio (FI/TI)		1,58	1,41	1,95	1,56	2,08	1,14	1,47

Année climatique		2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	Moyenne
Saison de gel	Début	16-nov	03-nov	25-oct	30-oct	14-oct	21-oct	30-oct
	Fin	09-mai	11-mai	29-avr	31-mai	09-mai	07-mai	09-mai
	Durée	175	189	186	213	208	198	192
	Moyenne T°C	-13,80	-11,92	-15,67	-14,31	-12,68	-12,16	-12,76
	Indice de gel (FI)	2450	2294	2934	3130	2678	2430	2475
Saison de dégel	Début	10-mai	12-mai	30-avr	01-juin	10-mai	06-mai	10-mai
	Fin	02-nov	24-oct	29-oct	13-oct	20-oct	n.d.	29-oct
	Durée	176	165	182	134	163	n.d.	171
	Moyenne T°C	7,76	7,75	8,40	8,95	7,90	n.d.	8,21
	Indice de dégel (TI)	1390	1294	1545	1212	1302	n.d.	1421
Moyenne année climatique		-2,99	-2,75	-3,77	-5,31	-3,63	n.d.	-2,89
Ratio (FI/TI)		1,76	1,77	1,90	2,58	2,06	n.d.	1,77

Précipitations

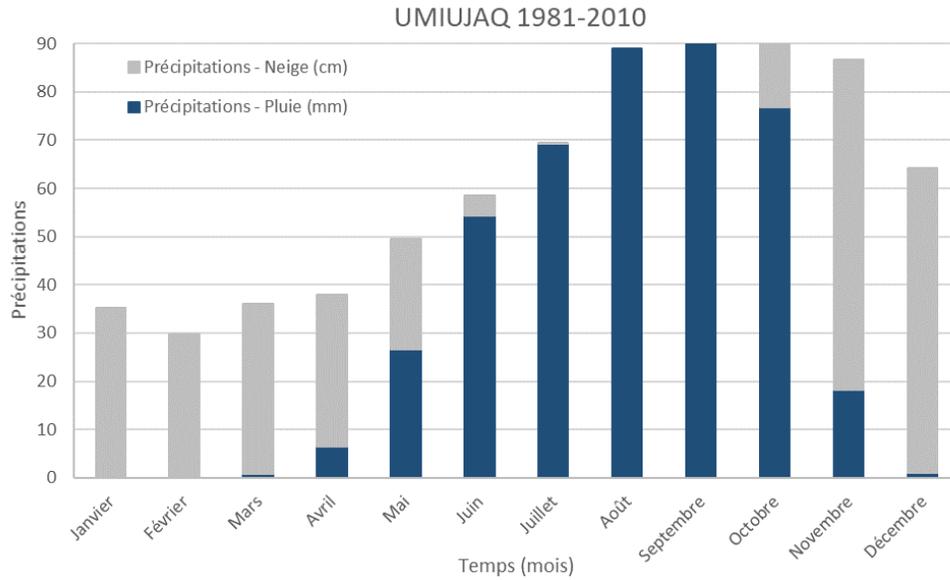


Figure 22 : Normale climatique des précipitations sous forme de pluie (mm) et de neige (cm) pour la période 1981-2010 dans la région d’Umiujaq, calculée à partir de quatre réanalyses (Charron, 2015).

Régime éolien

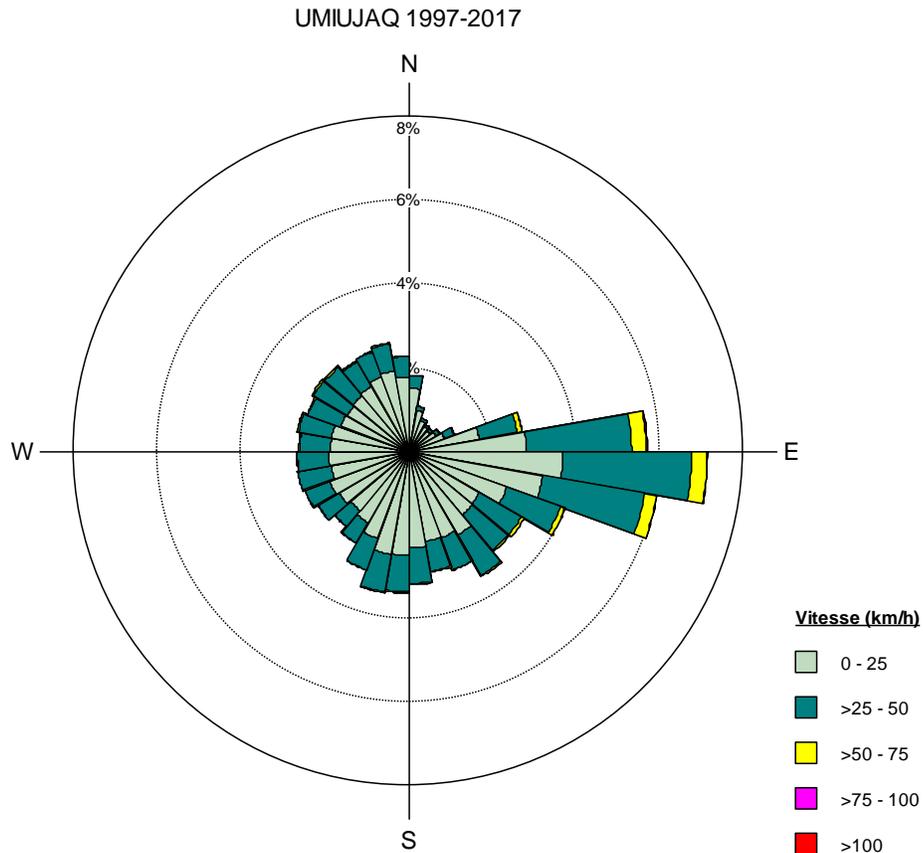


Figure 23 : Direction et vitesse des vents à la station climatique UMIROCA, localisée sur le versant côtier d’Umiujaq, pour la période de 1997 à 2017.

Profondeur maximale du dégel annuel

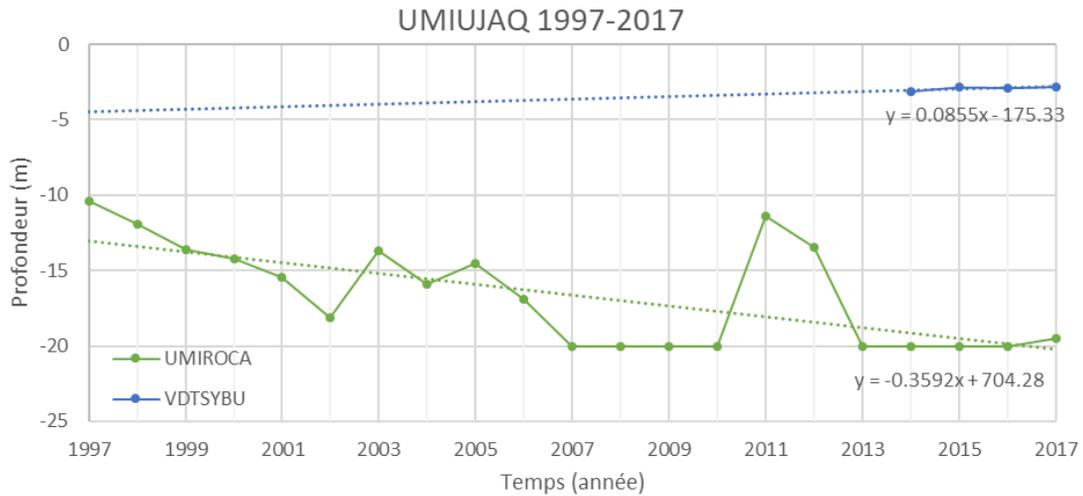


Figure 24 : Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel enregistrée aux câbles à thermistances UMIROCA et VDTSYBU à Umiujaq pour la période de 1997 à 2017. La couche active a dépassé 20 m d'épaisseur (profondeur de la plus profonde thermistance sur le câble) dans le roc (basalte) entre 2007 et 2010 et entre 2013 et 2016.

Régime thermique du roc

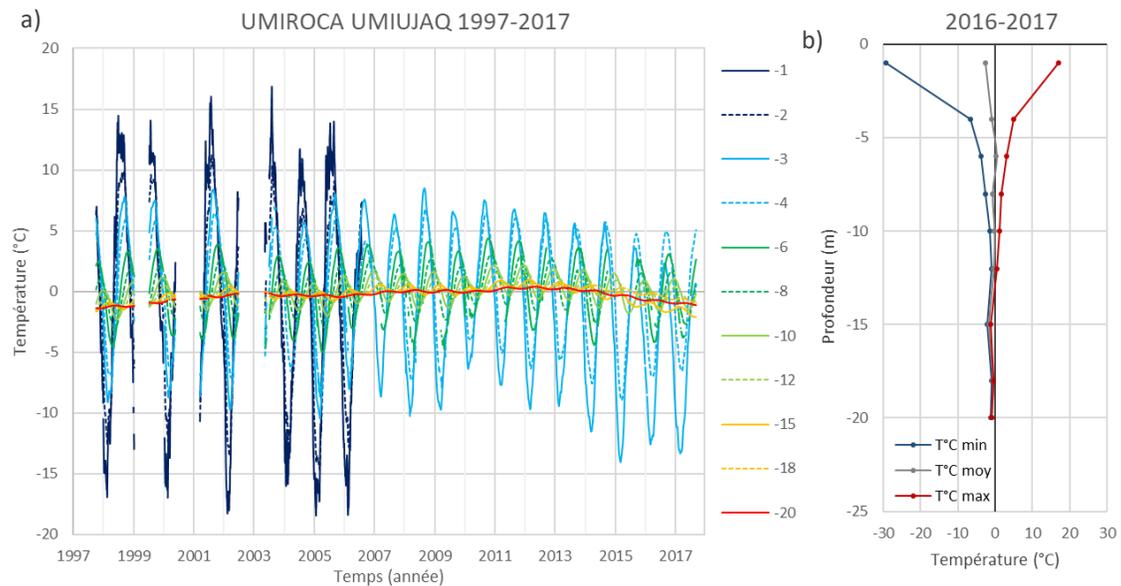


Figure 25 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 1997 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017 enregistrée au câble UMIROCA, localisé dans le roc, sur le versant côtier d'Umiujaq.

Régime thermique dans le silt sableux

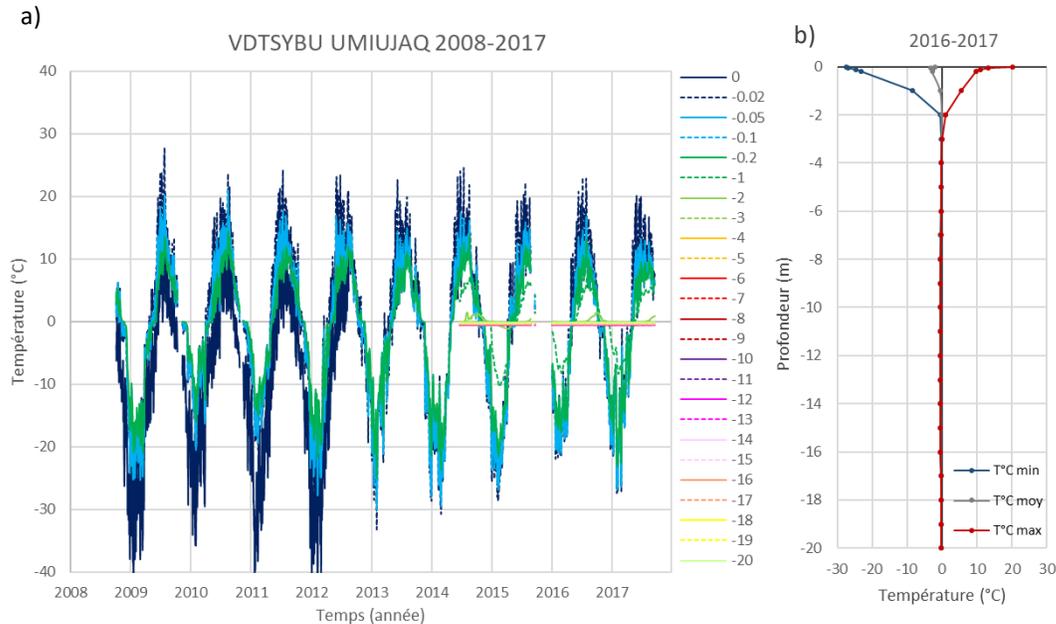


Figure 26 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2008 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017 enregistrée au câble VDTSYBU, localisé dans le silt sableux de la Vallée-des-Trois près du village d'Umiujaq.

Un fait important est à noter à Umiujaq, les profils thermiques dans le pergélisol sont déjà pratiquement isothermes (égale température sur toute la profondeur) à 0 °C ou très près. C'est le signe d'un état de dégradation très avancé. Dans le roc, il peut disparaître très vite des 20 premiers mètres comme cela est déjà arrivé dans les années récentes à cause de la conductivité thermique élevée du matériau et de la quasi-absence d'eau (**Figure 24**). Dans les dépôts silteux, c'est la forte teneur en glace de ségrégation qui ralentit le dégel à cause de la chaleur latente de fusion de la glace. Tant que la glace du sol n'est pas fondue, la température stagne à 0 °C. Le dégel complet peut prendre entre 10 et 30-40 ans.

3.2.2. Analyses prédictives du régime thermique du pergélisol (par câbles)

Températures historiques et simulées pour le village

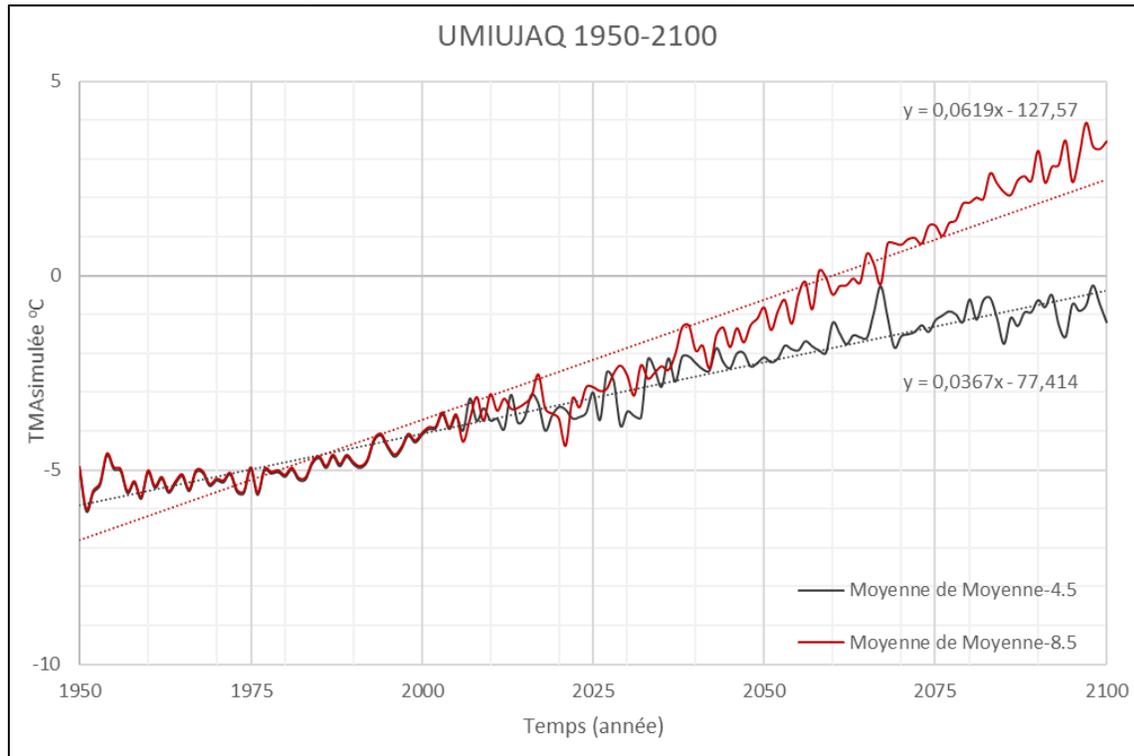


Figure 27 : Température moyenne annuelle de l'air (TMAA) simulée à partir de 10 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5 d'augmentation de gaz à effet de serre pour Umiujaq de 1950 à 2100.

Les projections climatiques suggèrent qu'advenant la réalisation du scénario RCP 4.5 moyen, une hausse de 1,5 °C serait observée en 2050 et les températures pourraient augmenter de 2,25 °C d'ici 2100. Les températures en 2100 oscilleraient près du point de congélation. Dans le cas du scénario RCP 8.5 moyen, la hausse des températures annuelles moyennes serait de l'ordre de 2,50 °C d'ici 2050, et de près de 7 °C d'ici 2100. Si un tel scénario venait à se réaliser, les températures annuelles moyennes dépasseraient les 0 °C dès le début des années 2060. Actuellement, la communauté d'Umiujaq est située entre la limite de pergélisol discontinu et de pergélisol sporadique. On pourrait donc s'attendre à la disparition du pergélisol dans la région. Dans le cas du scénario RCP 4.5 moyen, le pergélisol serait en forte dégradation (**Figure 27**).

Calibration du modèle

Les modèles climatiques reprennent la stratigraphie et les propriétés géotechniques de l'environnement des câbles à thermistances. Deux modèles ont été réalisés pour le village d'Umiujaq, soit un dans le roc (câble UMI-ROC) et un dans des silts et sables (câble UMI_VDTSB). La calibration de ces modèles a été réalisée à partir des températures du sol enregistrées par les thermistances (**Figures 28-29; Tableaux 10-11**).

Modèle climatique UMI_VDTSB

Il faut d'abord noter que le site UMI VDTSB est une butte isolée de faible dimension qui constitue une plaque de pergélisol entourée de terrain sans pergélisol. Compte tenu de la dégradation en cours dans le secteur, c'est déjà un vestige résiduel (Pelletier *et al.*, 2019). De plus, le modèle utilisé ne tient pas compte de la chaleur qui vient de l'eau souterraine dans le sol tout autour de la masse de pergélisol et en dessous.

Les projections selon les scénarios RCP 4.5 minimum et 8.5 minimum prévoient que le plafond du pergélisol devrait rester stable à une profondeur d'environ 1 m d'ici 2100, ce qui va à l'encontre des observations de terrain dans le secteur. Selon le scénario 4.5 moyen, le pergélisol commencerait à se dégrader rapidement dès le début des années 2020. De 2020 à 2050, le plafond du pergélisol pourrait s'approfondir de 3 m, passant ainsi de 3 à 6 m de profondeur en 30 ans. En 2090, le pergélisol disparaîtrait dans les onze premiers mètres du sol. Si le scénario RCP 8.5 moyen se réalise, le pergélisol se dégraderait beaucoup plus vite et sa disparition dans les onze premiers mètres du sol surviendrait autour des années 2070. Advenant le cas du scénario 4,5 maximum ou du 8,5 maximum, le pergélisol disparaîtrait dès 2030 (**Figures 30-31**).

Pour les raisons évoquées plus haut, le modèle de transfert de chaleur utilisé n'est guère réaliste à cause des facteurs de terrain qu'il ne peut prendre en compte (accroissement des arbustes, enneigement accru, apport adjectif de chaleur par l'eau souterraine).

Tableau 10 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble UMI_VDTSB, localisé en terrain naturel à Umiujaq.

Terrain naturel, Umiujaq						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m ³ /m ³
		Gelée	Non-gelée	Gelée	Non-gelée	
0 à 0,1	Matière organique	2154,7	2867,09	140	150	0,4
0,1 à 1	Silt et sable	2154,7	2867,09	140	290	0,35
1 à 2	Silt et sable +glace	2154,7	2867,09	140	290	0,9
2 à 10	Silt et sable (profondeur)	2154,7	2867,09	140	210	0,4
10 à 150	Roc	1000	1000	210	210	0

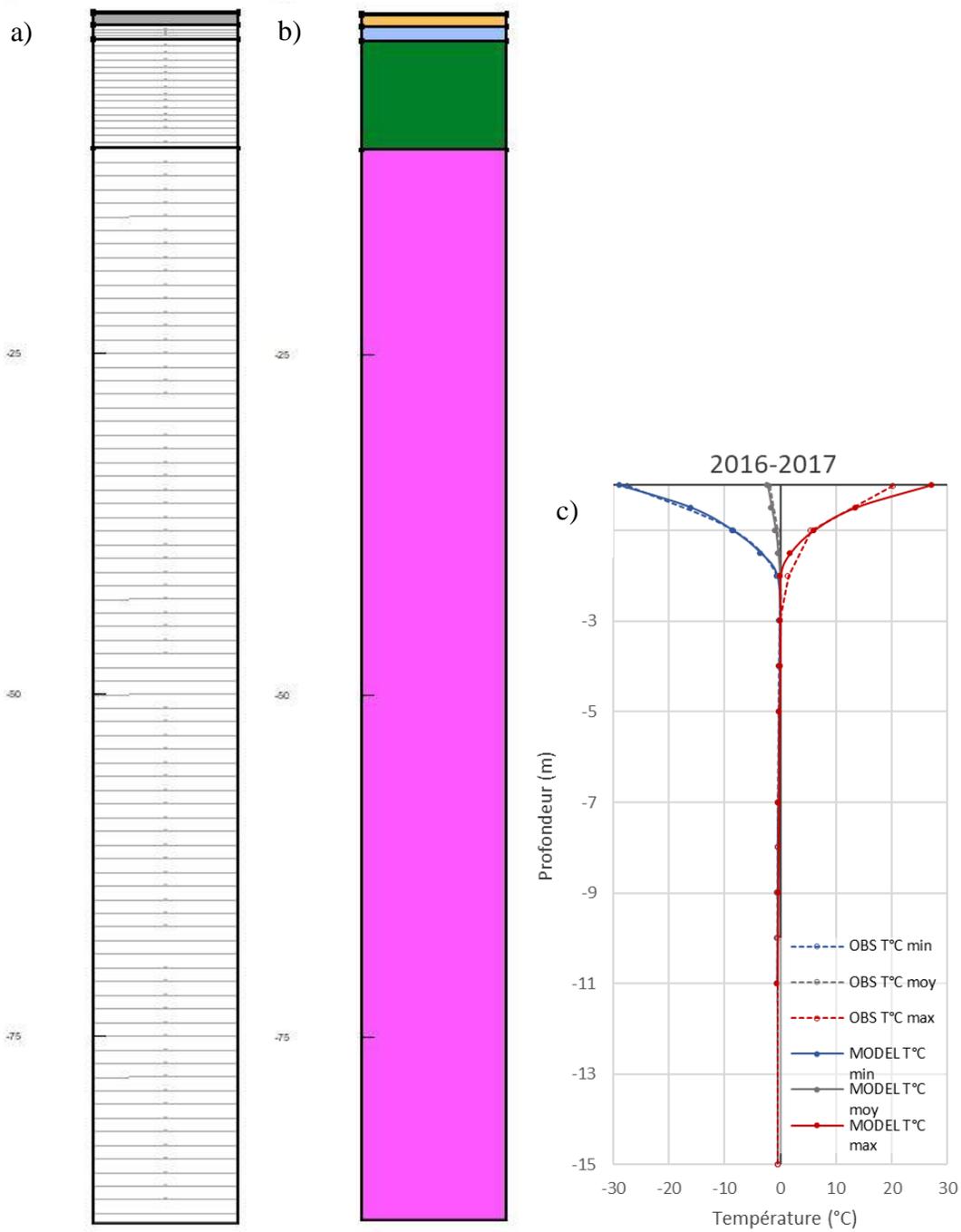


Figure 28 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans des silts et sables, à Umiujaq.

Modèle climatique UMI ROC

Advenant la réalisation du scénario 4.5 minimum, la profondeur de la couche active devrait rester stable à 2 m dans le roc jusqu'en 2100. Le scénario 8.5 minimum prévoit plutôt un approfondissement progressif de la couche active, jusqu'à 5 m d'ici 2100. Les scénarios 4.5 moyen et 8,5 moyen prévoient un approfondissement de la couche active beaucoup plus rapide et le pergélisol pourrait disparaître sur les 20 premiers mètres du sol dès la décennie 2030. Les scénarios 4.5 maximum et 8.5 maximum prévoient la disparition complète du pergélisol en quelques années seulement (**Figures 33-34**).

Tableau 11 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble UMI_ROC, localisé en terrain naturel près de l'aéroport.

Roc, Umiujaq						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m ³ /m ³
		Gelée	Non-gelée	Gelée	Non-gelée	
0 à 150	Roc	1000	1000	180	180	0

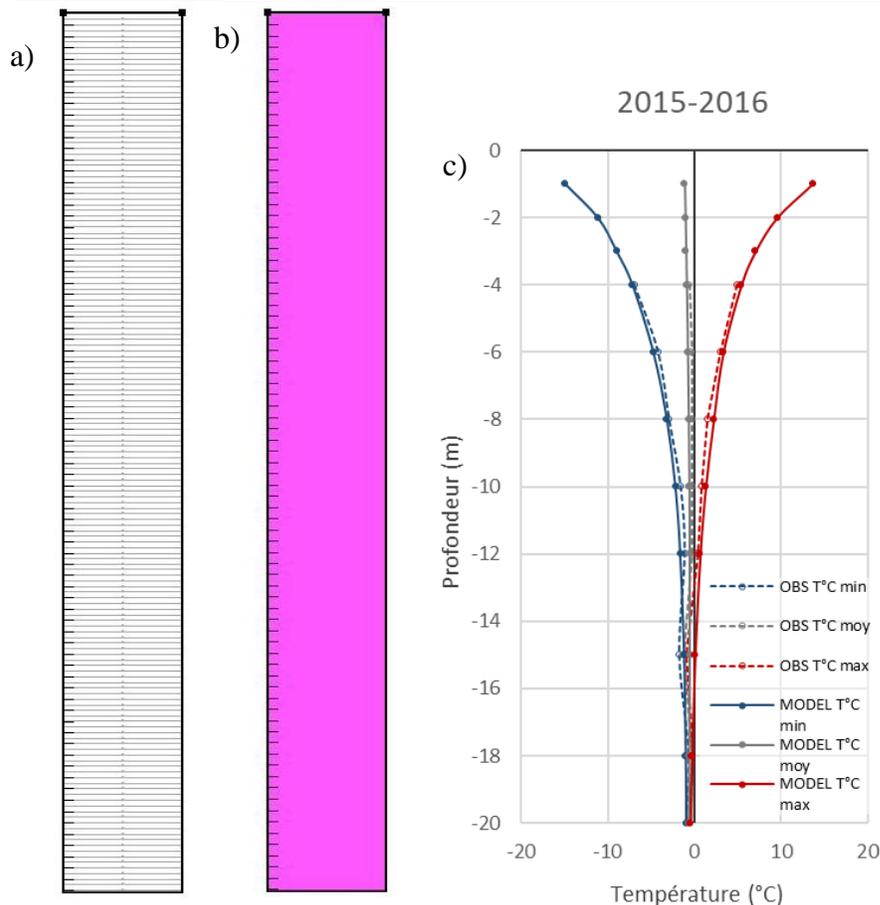
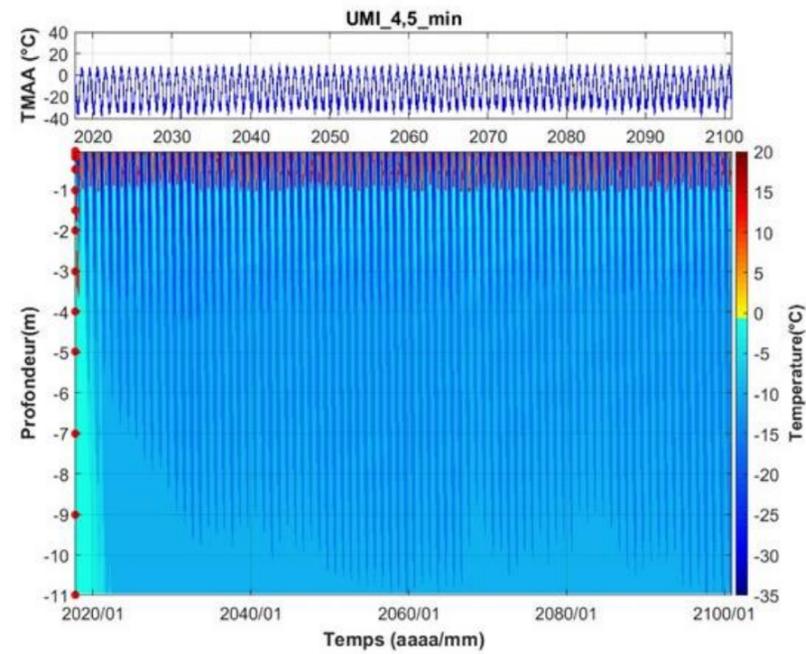


Figure 29 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans le roc, à Umiujaq.

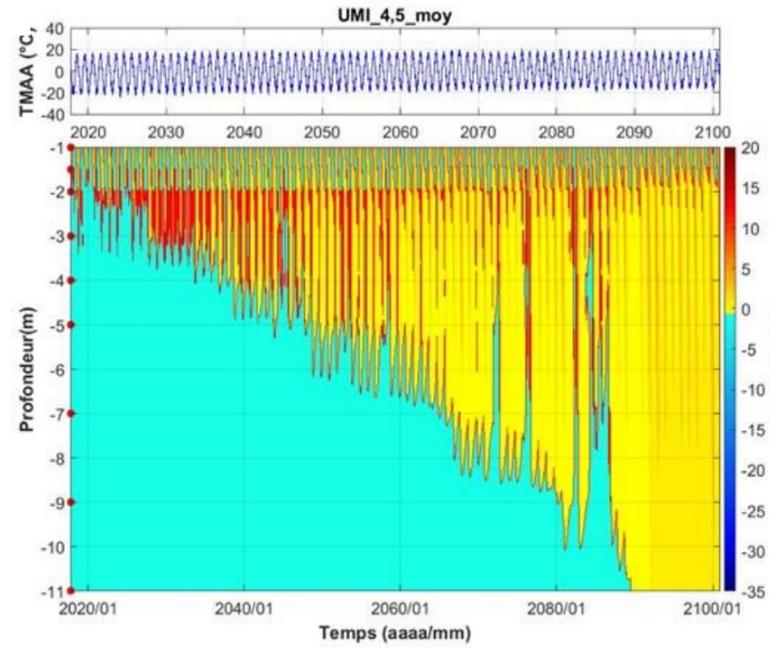
3.2.3. Projections et simulations climatiques

Modèle UMI_VDTSB

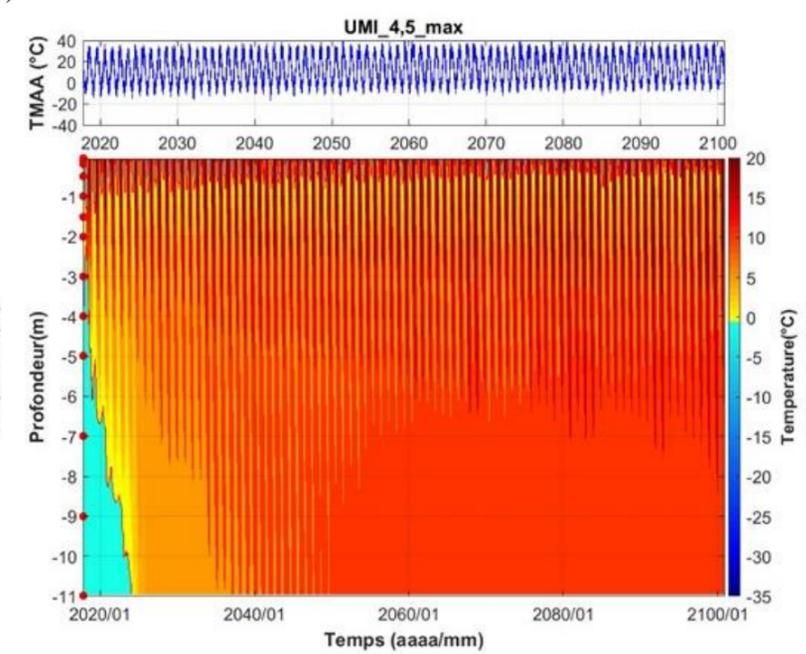
a) Scénario RCP 4.5



b)

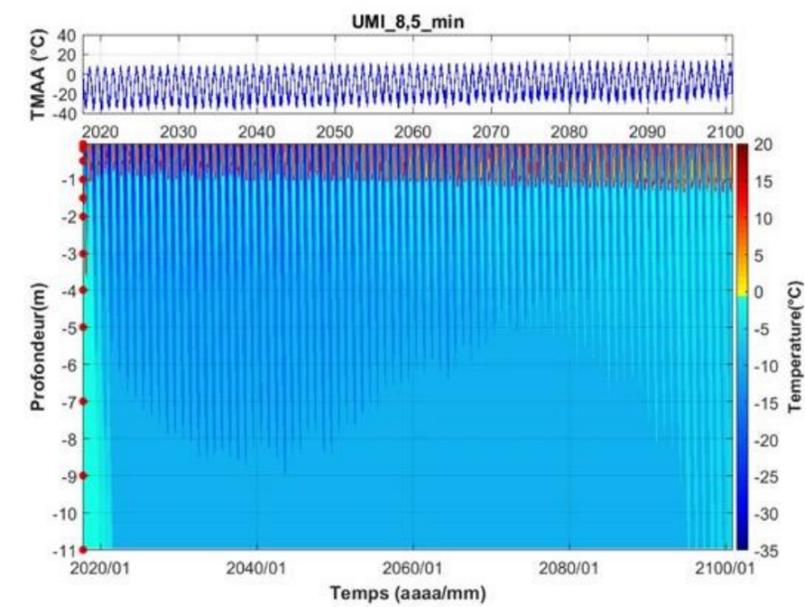


c)

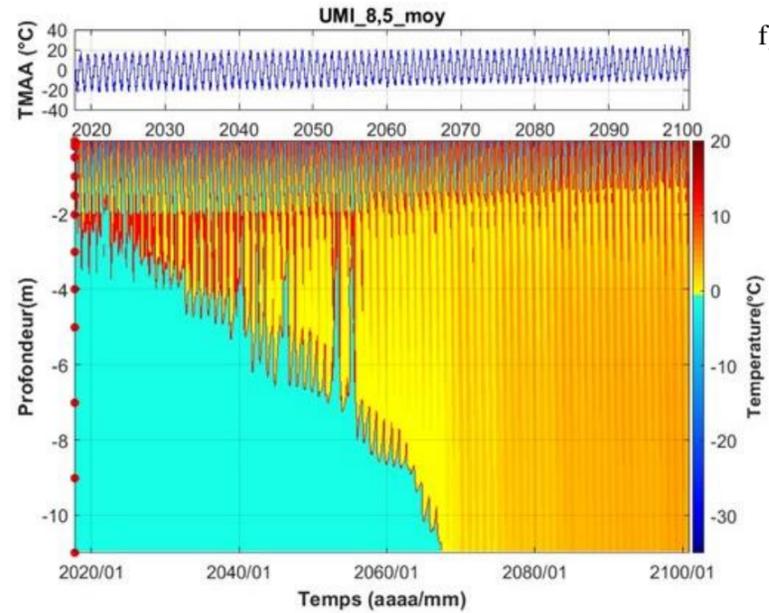


Scénario RCP 8.5

d)



e)



f)

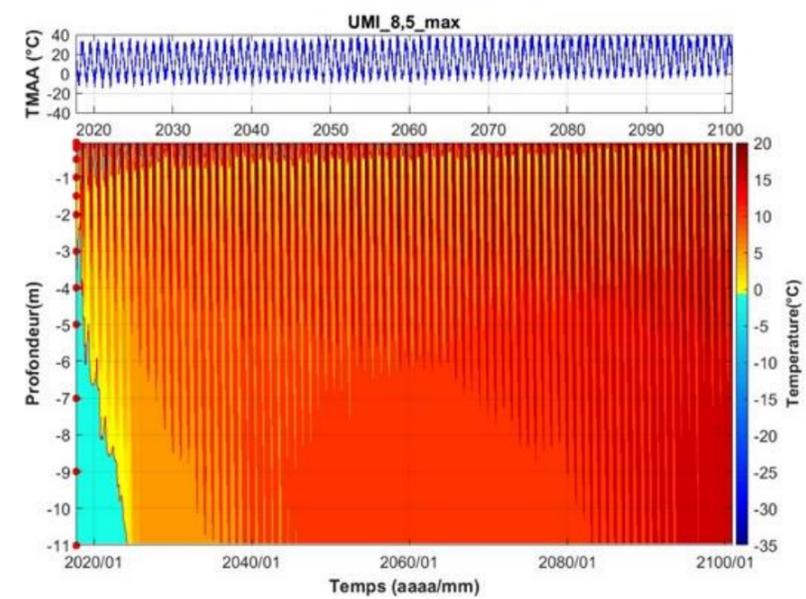
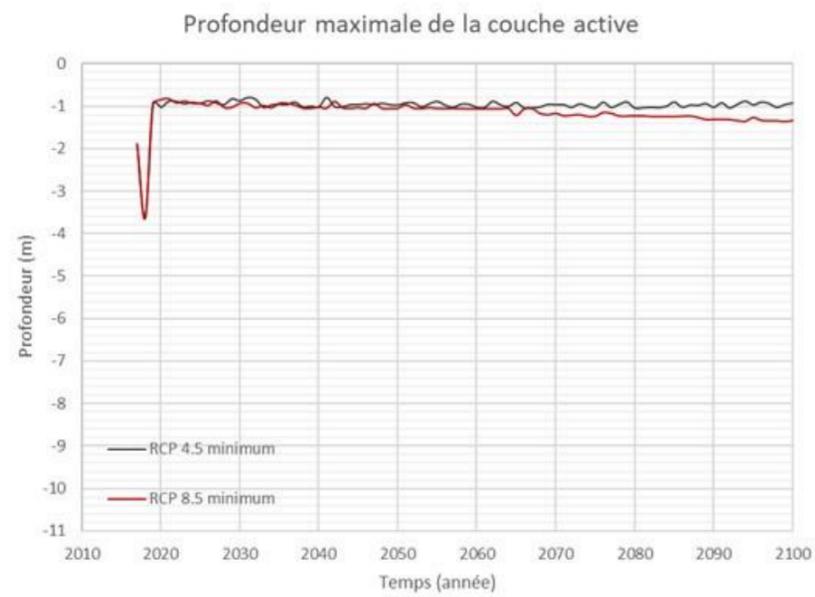


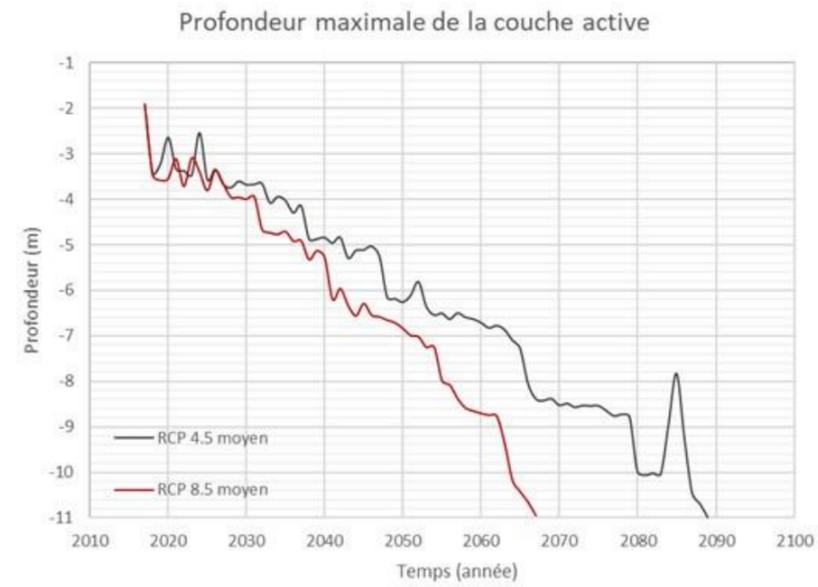
Figure 30 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle UMI_VDTSB de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen



RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum

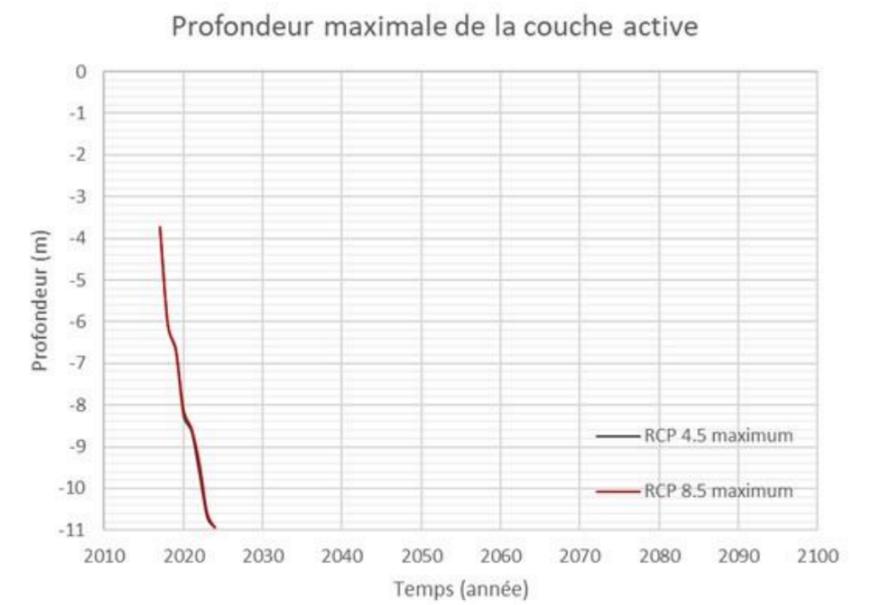


Figure 31 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle UMI_VDTSB.

Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x 2009-2010)

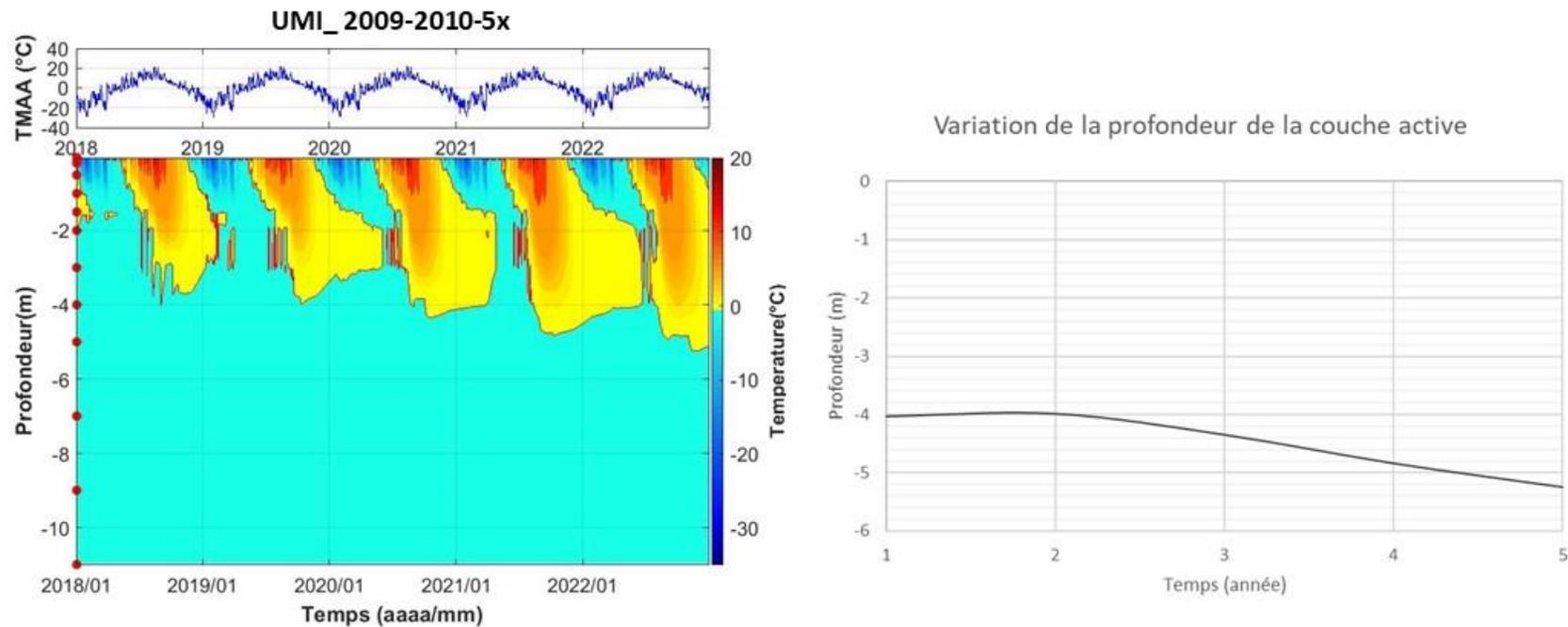


Figure 32 : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle UMI-VDTSB.

Modèle UMI-ROC

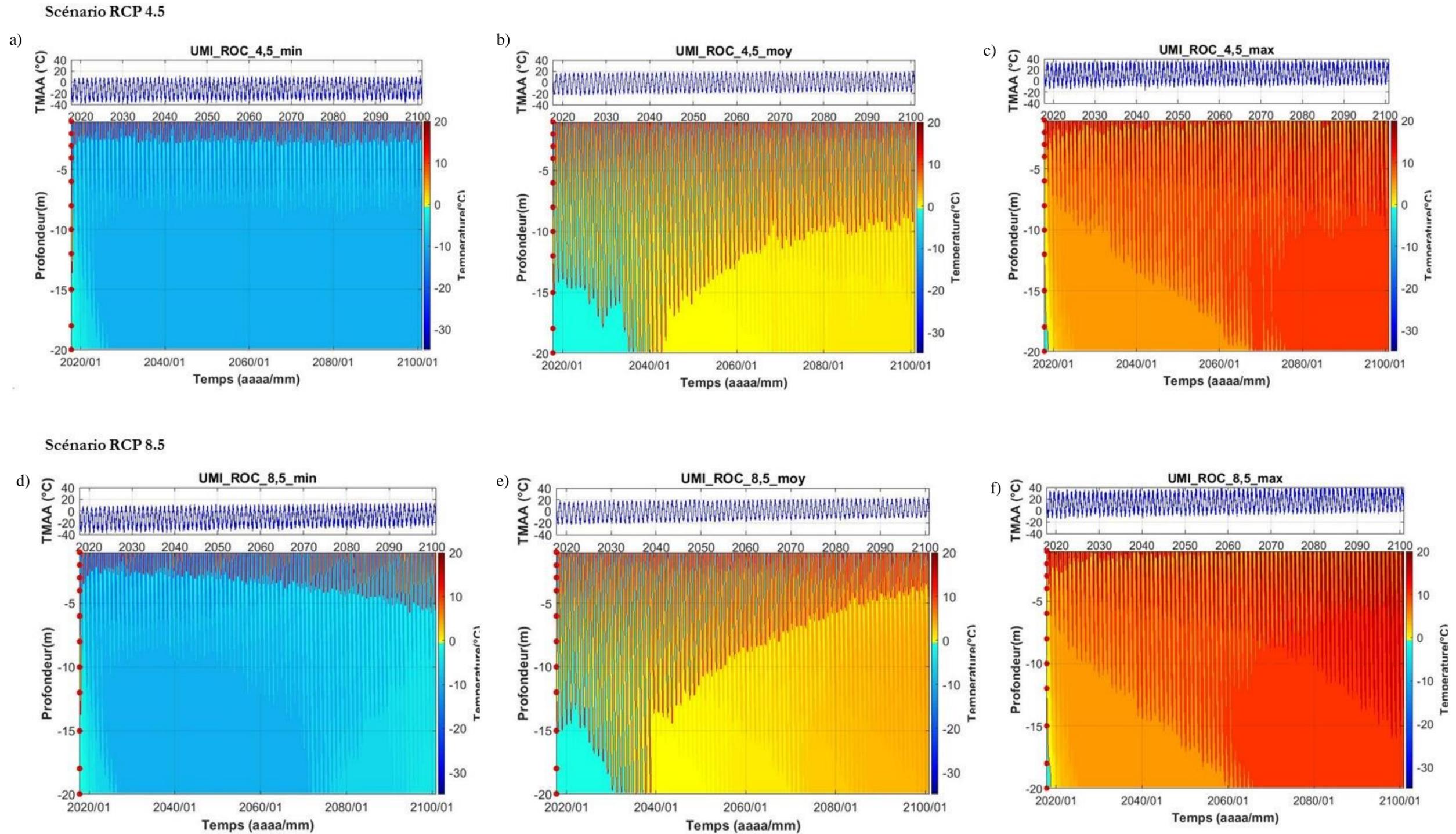
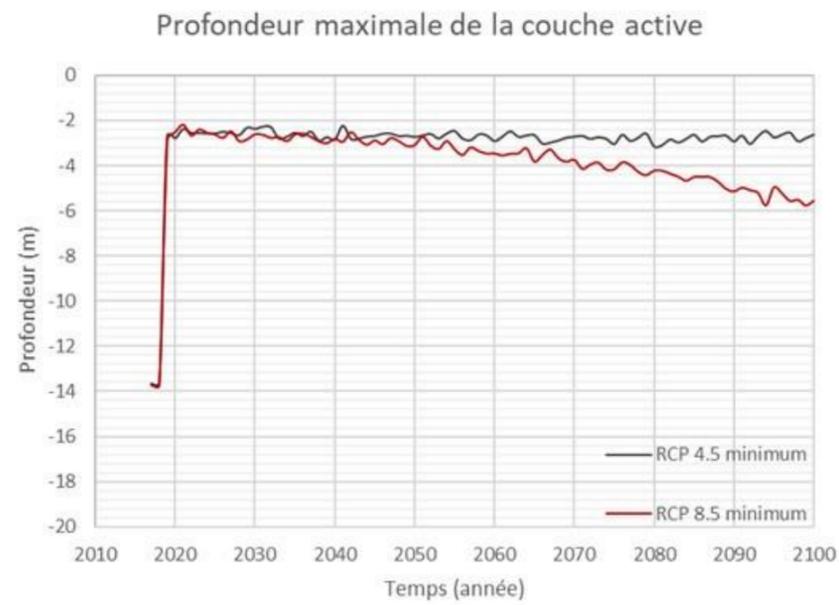


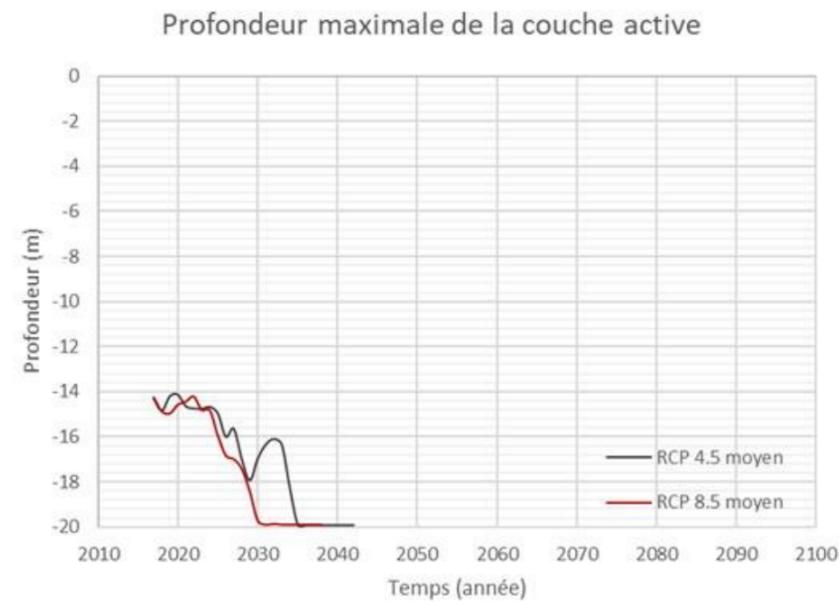
Figure 33 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle UMI_ROC de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen



RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum

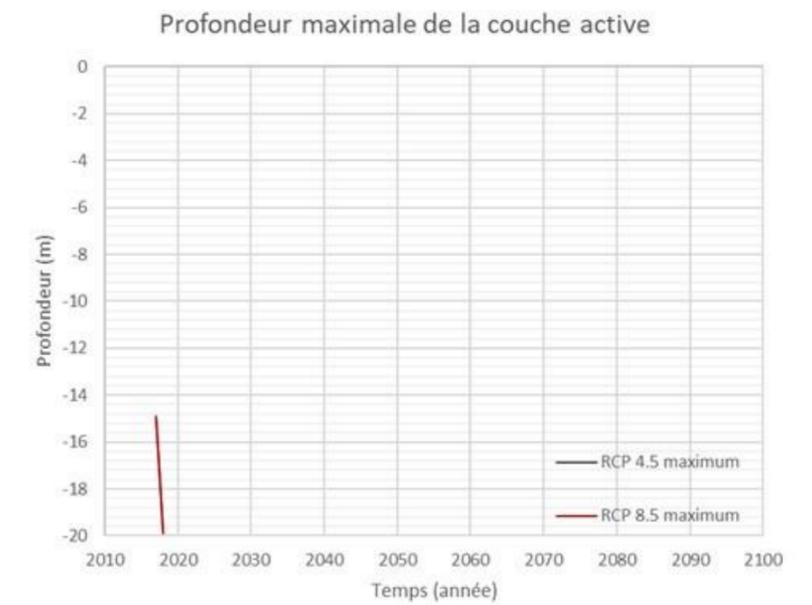


Figure 34 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle UMI_ROC.

Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x 2009-2010)

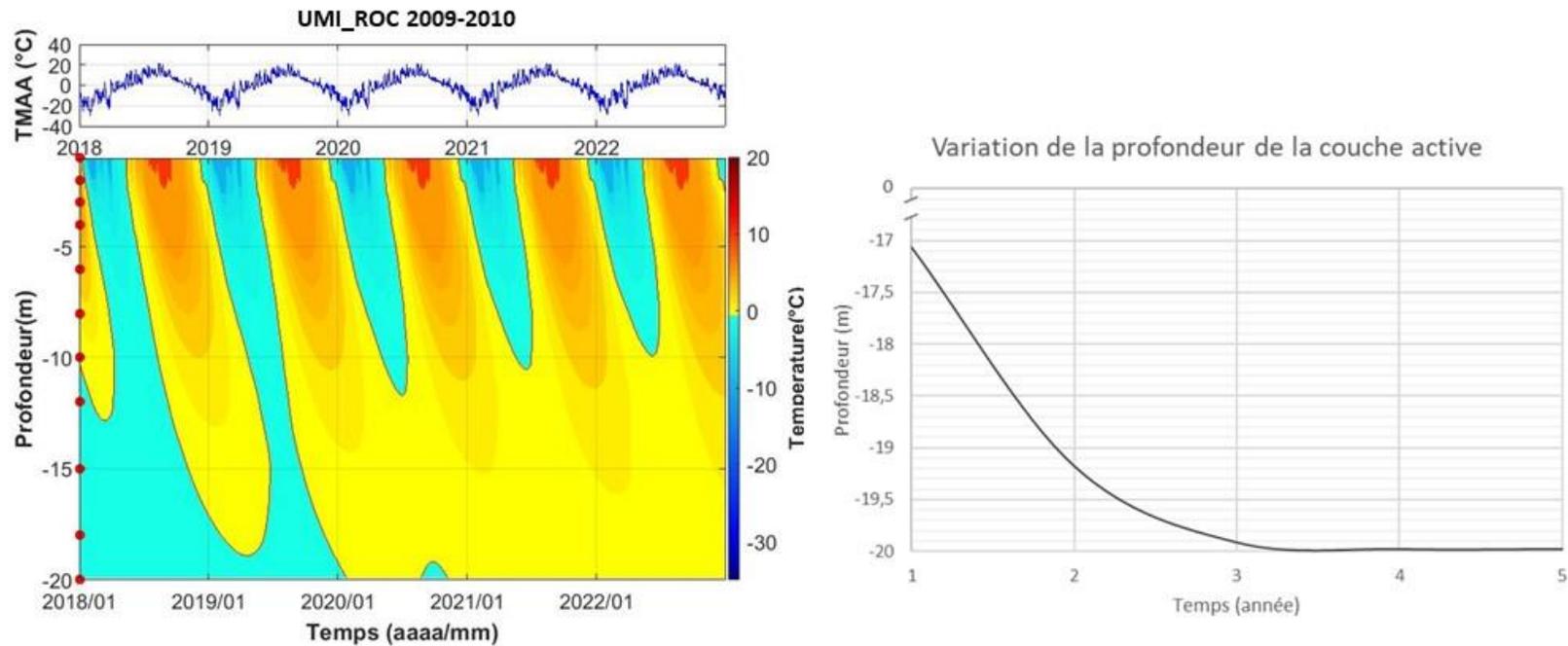


Figure 35 : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle UMI-ROC.

Impacts d'une hausse soudaine de température

Nous avons exploré les impacts et les risques associés à une série d'années particulièrement chaudes. Pour ce faire, nous avons utilisé les températures de l'année 2009-2010, correspondant à l'année la plus chaude jamais enregistrée au Nunavik. Ces températures ont été introduites dans le modèle après l'année 2019, et la simulation a roulé sur 5 ans (**Figures 32 et 35**). Dans le cas du pergélisol composé de silts et de sables, une série de 5 années particulièrement chaudes pourrait occasionner un approfondissement de la couche active d'environ 1 m, au terme de la série de 5 ans. Le roc étant plus conducteur, une série d'années particulièrement chaudes pourrait causer un approfondissement de la couche active de plusieurs mètres dès la première année. Dans le cas d'Umiujaq, ce scénario imaginé correspond aux observations de terrain de même qu'aux scénarios RCP 4.5 et 8.5 moyens tant dans le roc que dans les dépôts silteux riches en glace.

4. FAITS SAILLANTS

- État de la situation :
 - La cartographie des dépôts de surface réalisée en 2017 et appuyée par des observations abondantes de terrain et des profils de géoradar montre qu'il y a des terrains propices à la construction à Umiujaq, soit sur des dépôts sableux épais, mais surtout sur des affleurements rocheux, parfois recouverts de dépôts sableux minces.
 - Les dépôts pouvant contenir de la glace sont associés à l'épandage proglaciaire subaquatique mis en place lors de la déglaciation. Ils sont bien circonscrits cartographiquement dans les limites de la communauté.
 - Tant les profils mesurés de température dans le pergélisol dans les silts (isothermiques), les observations récentes des chercheurs et la simulation numérique (tant bien que mal) indiquent que les plaques de pergélisol discontinu autour d'Umiujaq sont déjà en voie de disparition.

- Possibilités de développement :
 - Il existe aux environs immédiats du milieu bâti des terrains solides capables d'accueillir de nouveaux développements, résidentiels et autres.

- Horizon d'action :
 - Le choix de sol stable pour une expansion est disponible maintenant.

- Recommandations :
 - Planifier la construction de préférence sur les terrains stables identifiés. En cas d'une nécessité autre, songer à l'utilisation de pieux au roc dans les dépôts d'épandage proglaciaire subaquatique.
 - Éviter les zones de silt argileux, la plupart sous forme de butte recouverte d'ostioles, car le pergélisol riche en glace qu'elles contiennent a déjà commencé à provoquer des affaissements de terrain et la formation de mares thermokarstiques. Ce processus va continuer de façon accélérée dans les prochains 10-20 ans.
 - Protéger par zonage le bassin hydrographique de surface qui sert à alimenter le village en eau potable.

RÉFÉRENCES

- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Hérault, E. et Vinet, F., 2007a. 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., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J. P. et Tarusov, A., 2007b. L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec et Ouranos. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 192 p.
- Allard, M., Mathon-Dufour, V., L'Hérault, E. et Sarrazin, D., 2018. Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures de transport du MTMDET au Nunavik dans le contexte des changements climatiques. Rapport d'étape 2 produit pour le compte du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 107 p.
- Allard, M., Sarrazin, D. et L'Hérault, E., 2009. Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25 à Kuujuaq. Réalisé pour le compte de Transports Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 132 p.
- Allard, M. et Seguin, M. K., 1987. Le pergélisol au Québec nordique : Bilan et perspectives. *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 141-152.
- Allard, M., Wang, B. et Pilon, J. A., 1995. Recent cooling along the Southern Shore of Hudson Strait, Québec, Canada, documented from permafrost temperature measurements. *Arctic and Alpine Research*, 27: 157-166.
- Annan, A.P., 2003. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors and Software GPR Manual. 278 p.
- Aubé-Michaud, S., Allard, M., L'Hérault, E., Mathon-Dufour, V. et Deslauriers, C., 2019. Identification des risques actuels et appréhendés sur le territoire des 14 communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques – phase 2. Rapport produit pour le compte du Ministère de la Sécurité publique du Québec, gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Bilodeau, S., 2019. Analyse géomorphologique par l'utilisation du géoradar en appui à l'aménagement du village d'Akulivik. Essai de baccalauréat. Géographie. Université Laval, 62 p.
- Boisson, A., 2019. Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik, Québec, Canada. Thèse de Doctorat, Université Laval, 290 p.
- Calmels, F., 2005. Genèse et structure du pergélisol : étude de formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada. Québec, Thèse de Doctorat, Université Laval, 169 p.

- Calmels, F. et Allard, M., 2004. Ice segregation and gas distribution in permafrost using tomodesitometric analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15(4), 367-378.
- 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, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 108 p.
- Centre d'études nordiques (CEN)., 2018. Réseau SILA. [En ligne] URL : <http://www.cen.ulaval.ca/sila.php> (page consultée le 17 novembre 2017).
- Charron, I., 2015. Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik, Ouranos, Montréal, 86 p.
- Environnement Canada., 2018. Données climatiques historiques. Gouvernement du Canada. [En ligne] URL : https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic (page consultée le 25 mars 2018).
- Fortier, R., Allard, M., Lemieux, J. -M., Therrien, R., Molson, J. et Fortier, D., 2011. Rapport de synthèse de la Phase I Stratégie de déploiement du réseau Immatsiak : Cartographie des dépôts quaternaires et des formes périglaciaires et compilations des informations disponibles des villages nordiques de Whapmagoostui-Kuujuarapik, Umiujaq, Salluit et Kuujuuaq. Réalisé pour le compte du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Centre d'Études nordiques, Université Laval, Québec. 126 p.
- GEOSLOPE International Ltd., 2014. *Thermal Modeling with TEMP/W: An Engineering Methodology*. Calgary, 163 p.
- Lajeunesse, P. et Allard, M., 2003. The Nastapoka drift belt, eastern Hudson Bay : implications of a stillstand of the Quebec-Labrador ice margin in the Tyrrell Sea at 8 ka BP. *Journal canadien des sciences de la Terre*, vol. 40, p. 65-76.
- Lavoie, C., 2006. Géomorphologie et quaternaire du lac Guillaume-Delisle (Nunavik), Canada. Thèse de Doctorat, Université Laval, 136 p.
- Lévesque, R., Allard, M. et Séguin, M. K., 1988. Le pergélisol dans les formations quaternaires de la région des rivières Nastapoka et Sheldrake, Québec Nordique. Collection Nordicana, Centre d'études nordiques, Université Laval, No. 51, 23 p.
- L'Hérault, E., 2009. Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Département de Géographie, Université Laval, Québec. Thèse (M. Sc.), 149 p.
- L'Hérault, E. et Allard, M., 2018. Production de la 2^{ième} approximation de la carte de pergélisol du Québec en fonction des paramètres géomorphologiques, écologiques, et des processus physiques liés au climat. Rapport final. Réalisé pour le compte du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 61 p.

- L'Hérault, E., Allard, M., Doré, G., Sarrazin, D. et Verreault, J., 2009. Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 1 : État d'avancement du projet et résultats préliminaires. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 71 p.
- 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 stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujjuaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 78 p.
- L'Hérault, E., Boisson, A., Allard, M., Aubé-Michaud, S., Sarrazin, D., Roger, J. et Barrette, C., 2017. Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat. Réalisé pour le compte du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 134 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.
- Mathon-Dufour, V. et Allard, M., 2015. Understanding permafrost processes under the Iqaluit airport: Final report. Rapport produit pour le compte du Gouvernement du Nunavut et Transports Canada, 160 p.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)., 2018. Données climatiques, Observations quotidiennes. Gouvernement du Québec. [En ligne] URL : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees> (page consultée le 9 février 2018).
- Ouranos., 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.
- Pelletier, M., Allard, M. et Lévesque, E., 2019. Ecosystem changes across a gradient of permafrost degradation in subarctic Québec (Tasiapik Valley, Nunavik, Canada). Arctic Science, 5(1), 1-26.

- Rogelj, J., Meinshausen, M. et Knutti, R., 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2 (4), 248–253.
- Société d’habitation du Québec (SHQ)., 2018. Construction d’habitations au Nunavik. Guide des bonnes pratiques. Gouvernement du Québec, 238 p.
- Statistique Canada., 2017. Profil du recensement, Recensement de 2016, produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. [En ligne], URL : www12.statcan.gc.ca/censusrecensement/2016/dppd/prof/index.cfm?Lang=F (page consultée le 14 février 2018).
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. et Masui, T., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109 (1-2), 5-31.
- Veilleux, S., Bhiry, N., et Decaulne, A., 2020. Talus slope characterization in Tasiapik Valley (subarctic Québec): Evidence of past and present slope processes. *Geomorphology*, 349 (106911), 15 p.

GLOSSAIRE

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.

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

Glaçage : Couches de glace qui se forment soit en surface du sol, soit dans le lit d'un cours d'eau ou d'un lac. Les glaçages peuvent atteindre quelques mètres d'épaisseur et s'étendre sur plusieurs centaines de mètres.

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 vides 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 structure 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.

Sol structuré : Terme général pour tout sol présentant en surface un patron morphologique ordonné plus ou moins symétrique. (Ex. : polygones à coins de glace, ostioles)

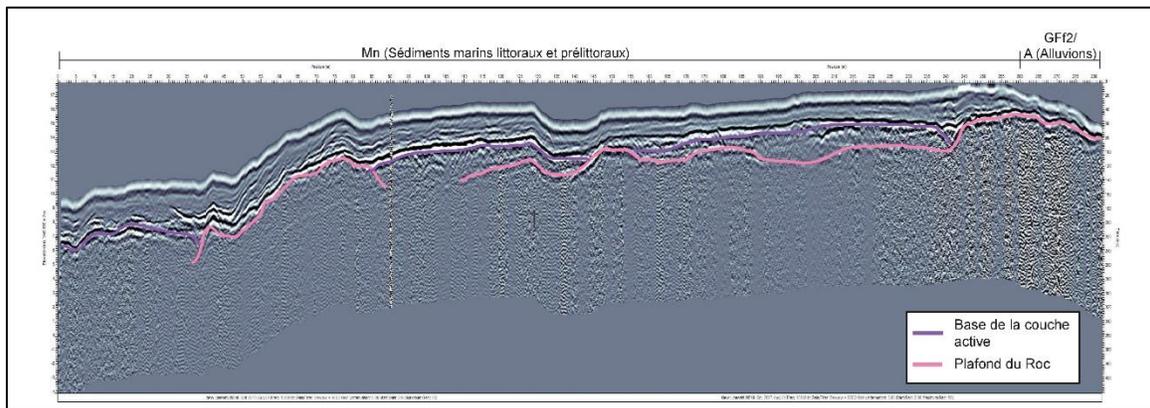
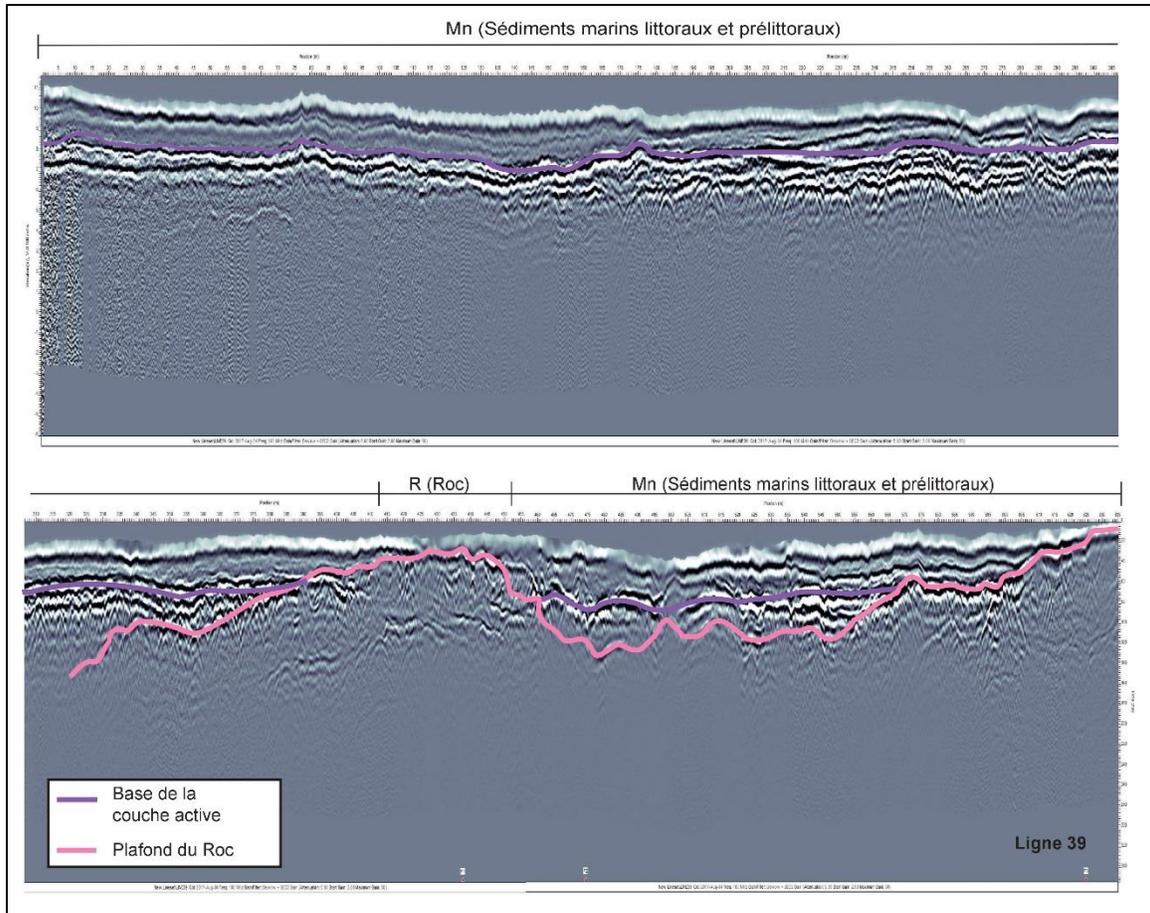
Surcote : Dépassement anormal du niveau de la marée haute ou du recul de la marée basse induit par des conditions météorologiques inhabituelles combinant leurs effets à ceux des marées induites par la lune et le soleil. Les surcotes peuvent être responsables d'inondations importantes en zone portuaire.

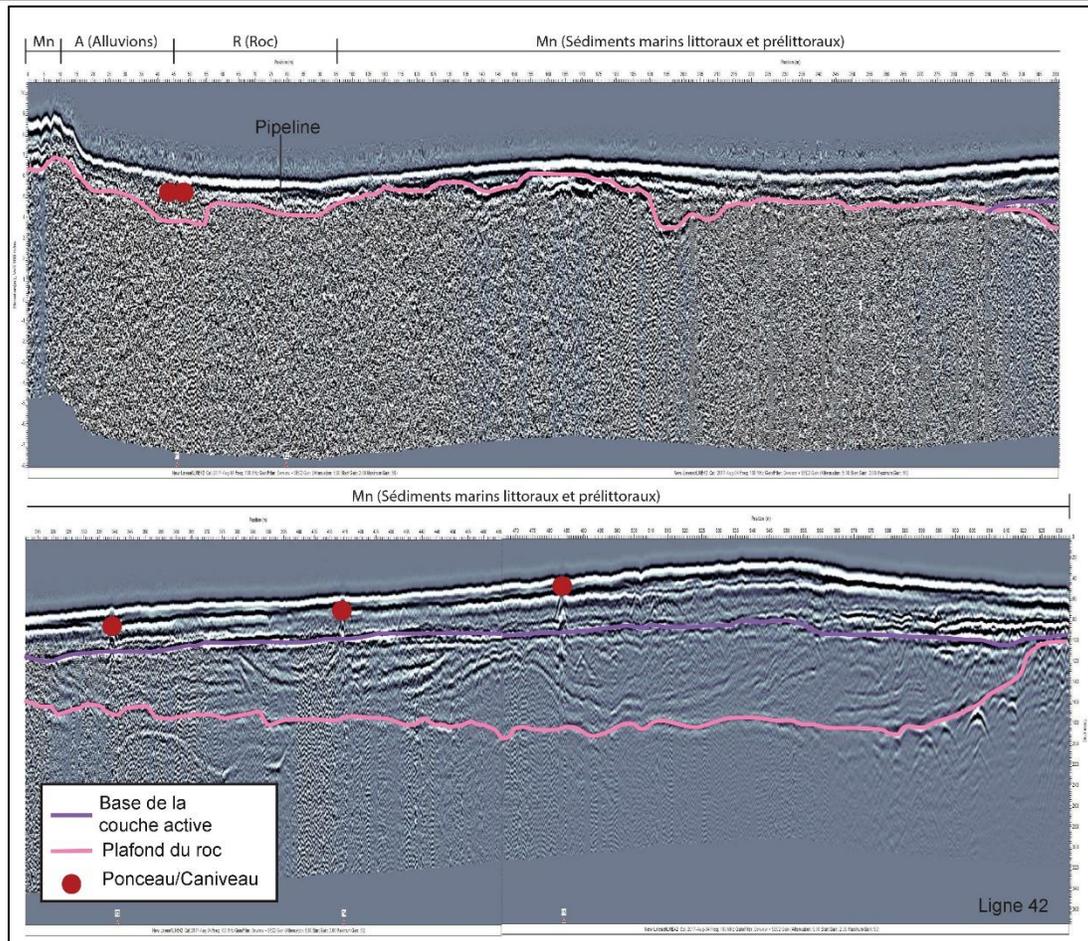
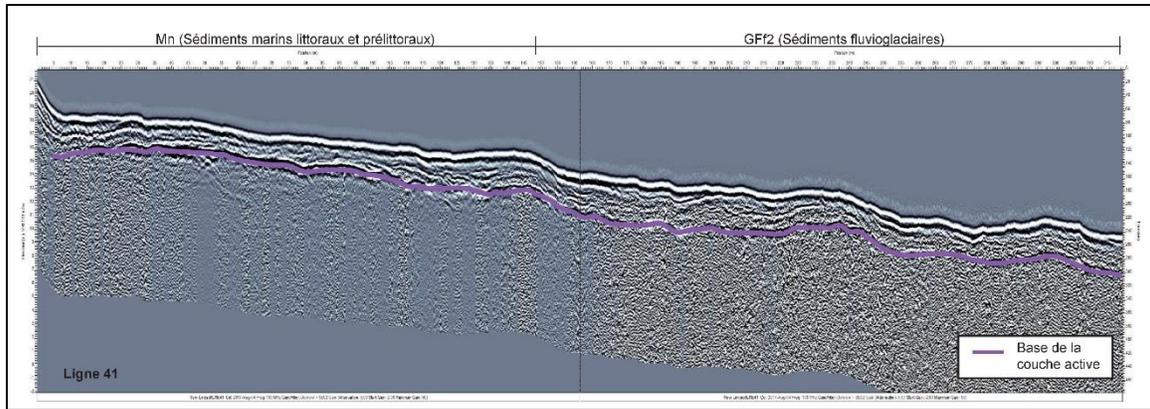
Talik : Couche ou partie de sol non gelée qui survient dans une zone de pergélisol en raison d'une anomalie locale dans les conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques.

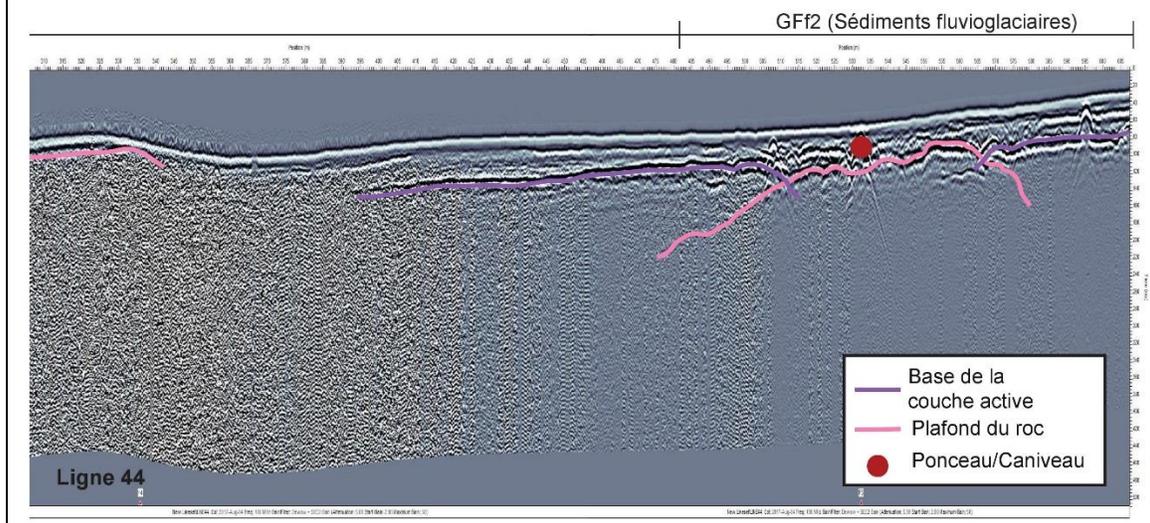
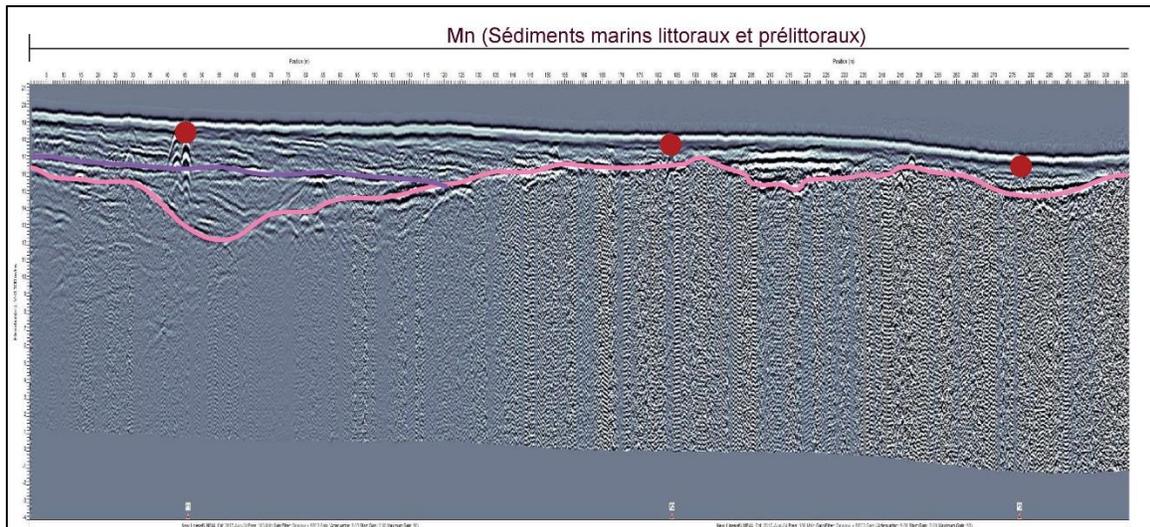
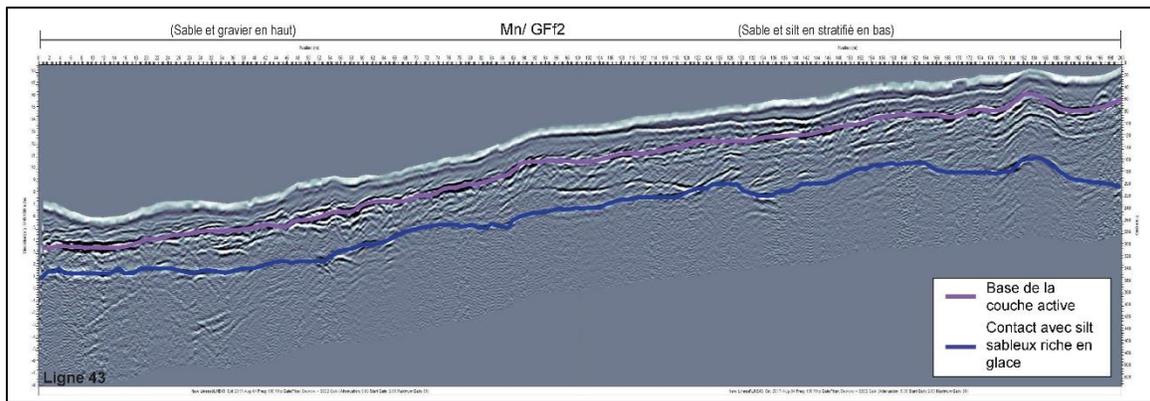
Thermokarst : Processus aboutissant à la fonte du pergélisol et à la formation d'une topographie irrégulière caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus à la perte de volume causée par la fonte de la glace. Cette fonte peut être généralisée et avoir une cause climatique (dégel 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.

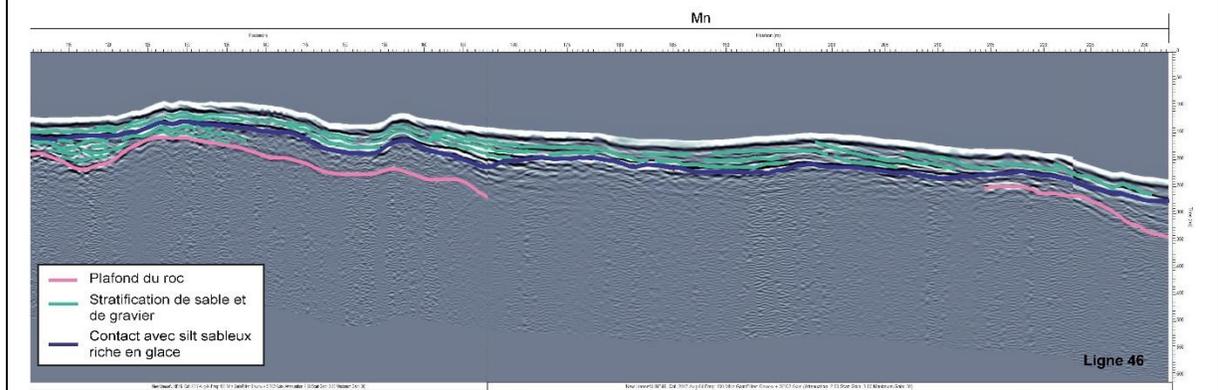
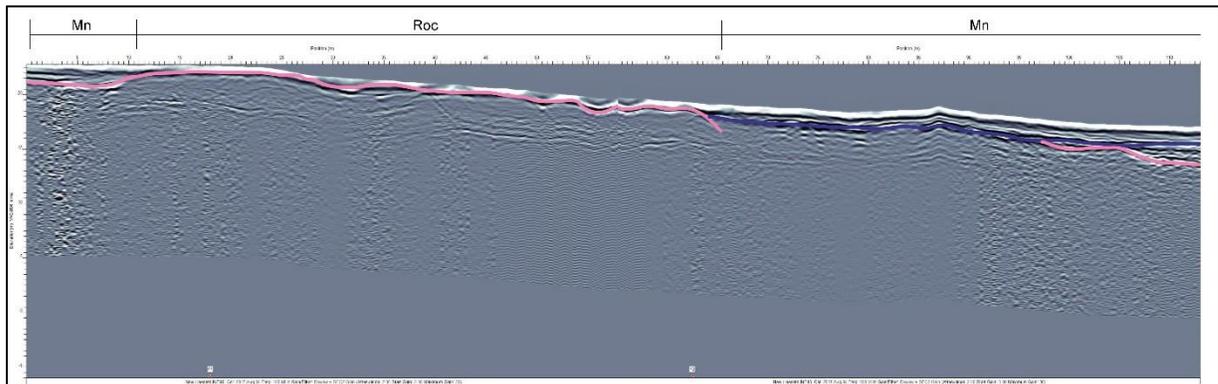
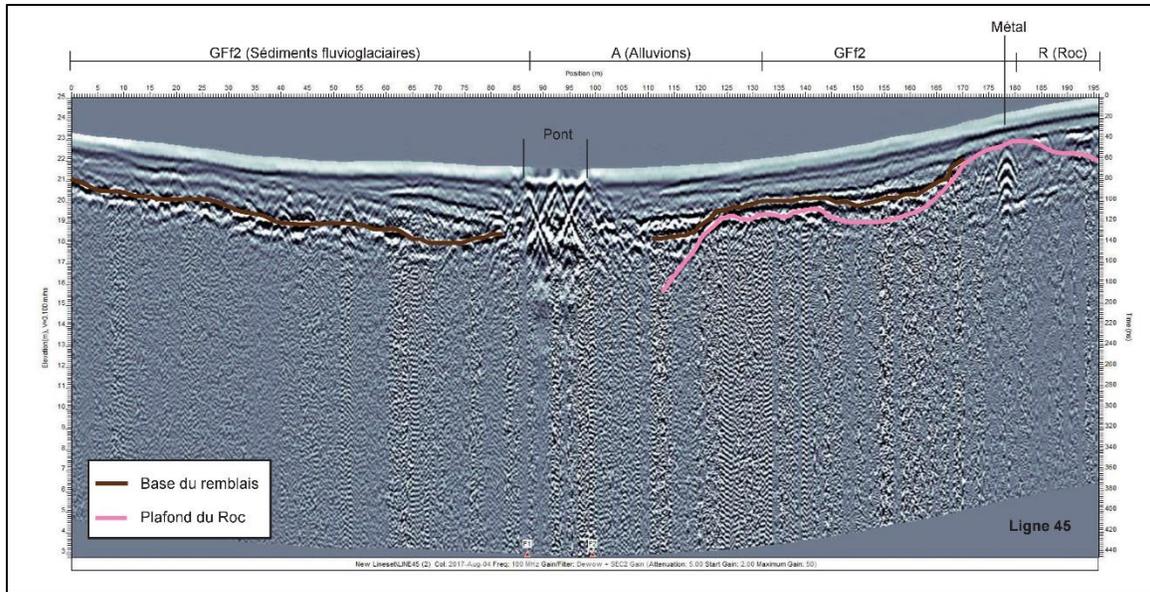
ANNEXES

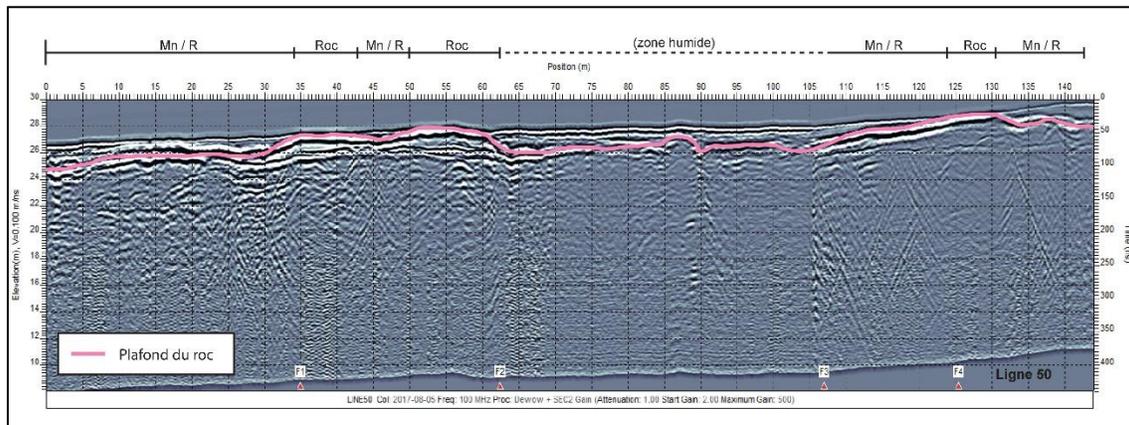
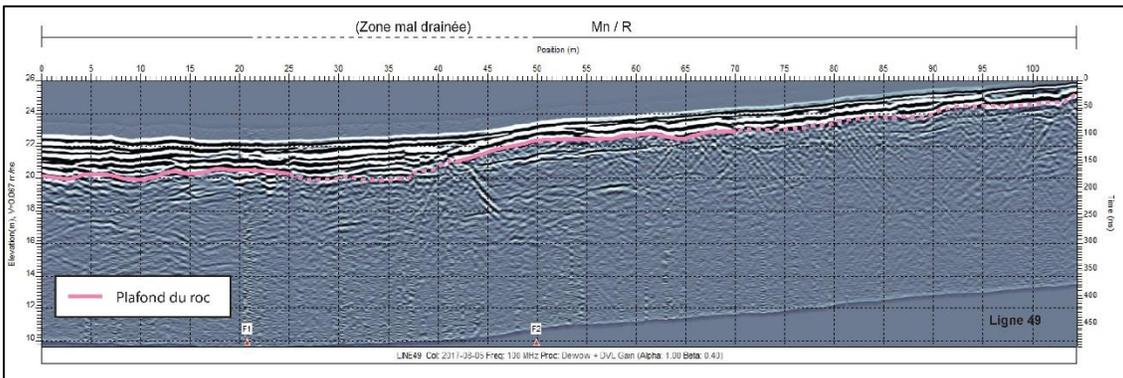
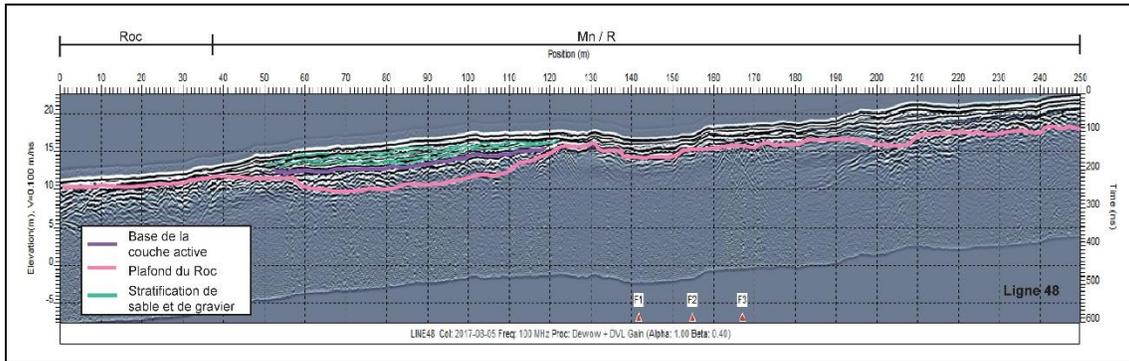
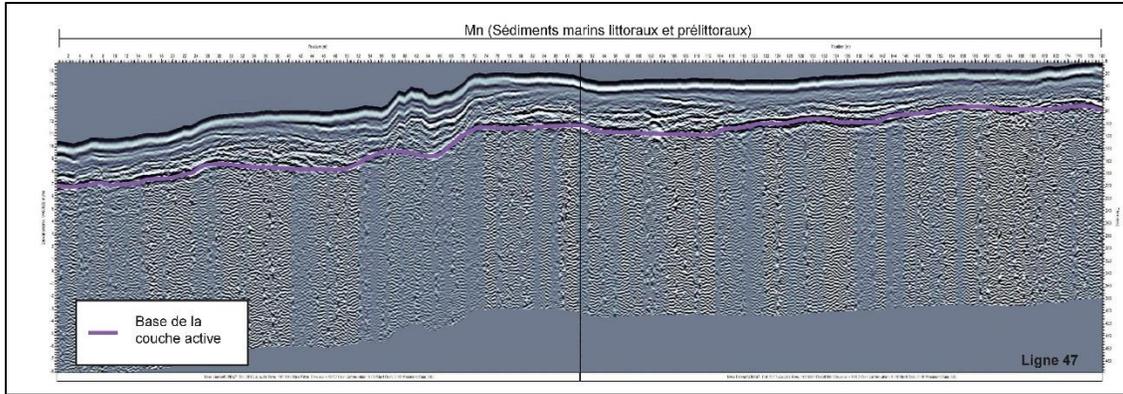
A. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE GÉORADAR

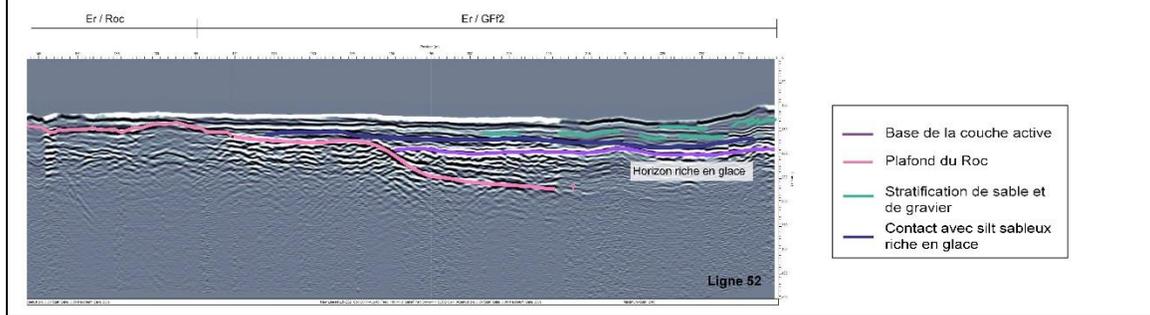
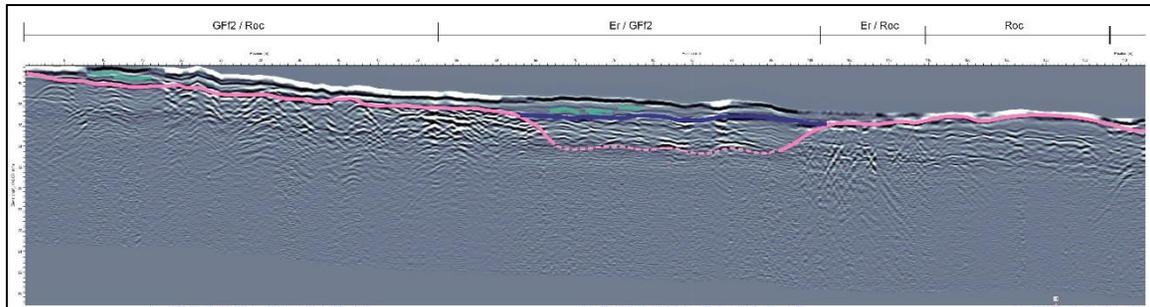
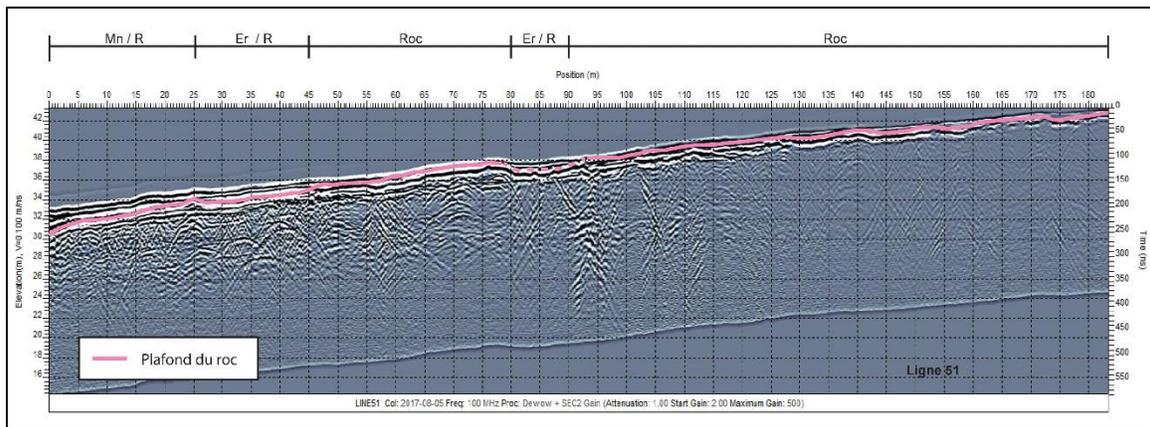


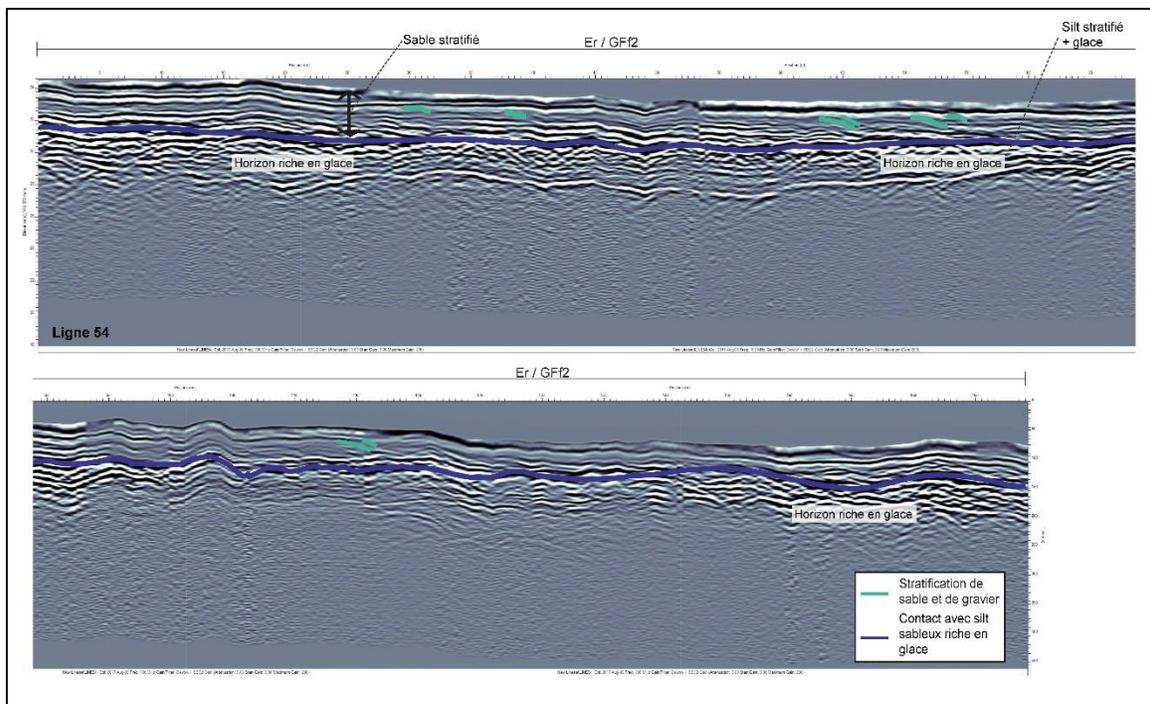
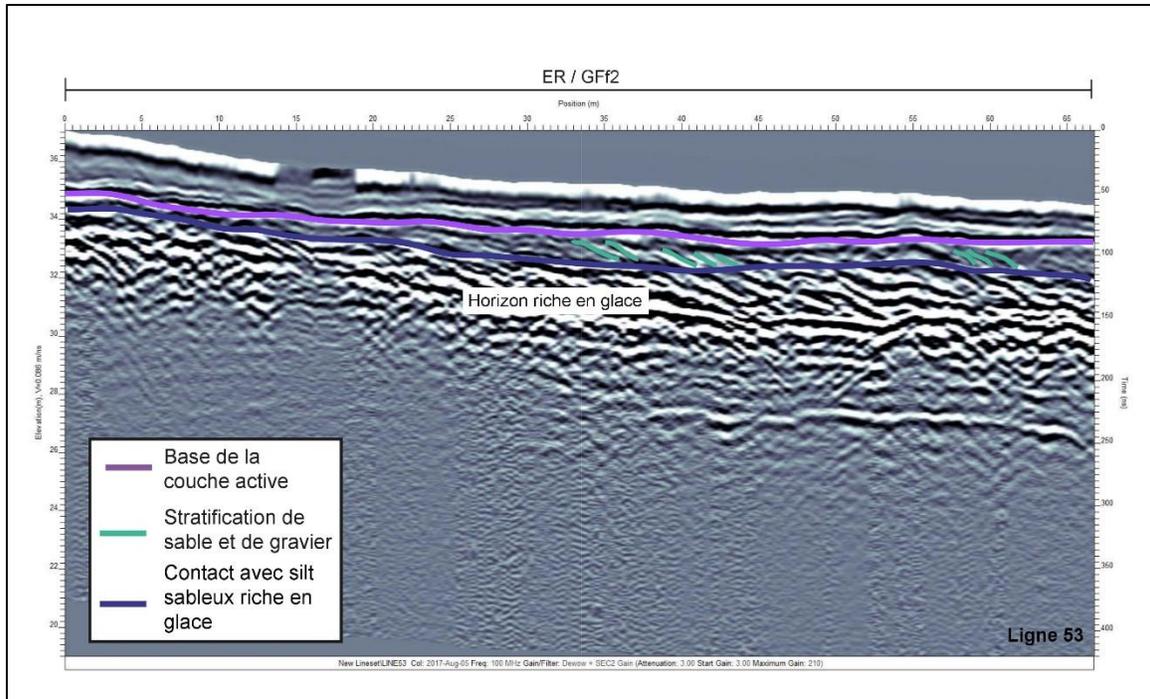


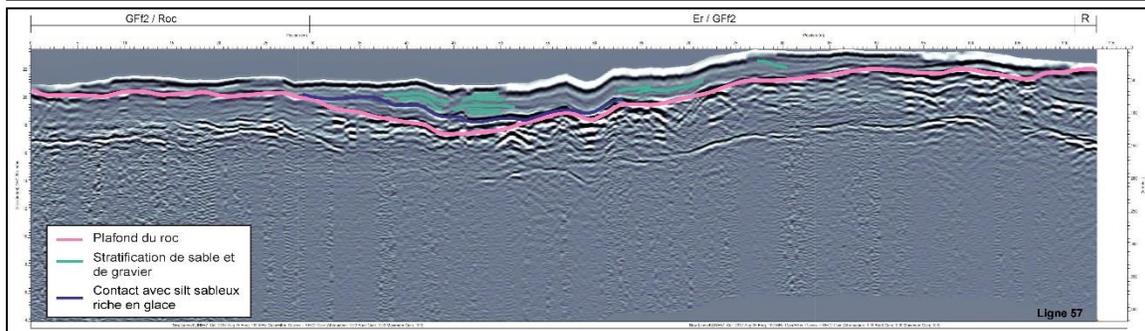
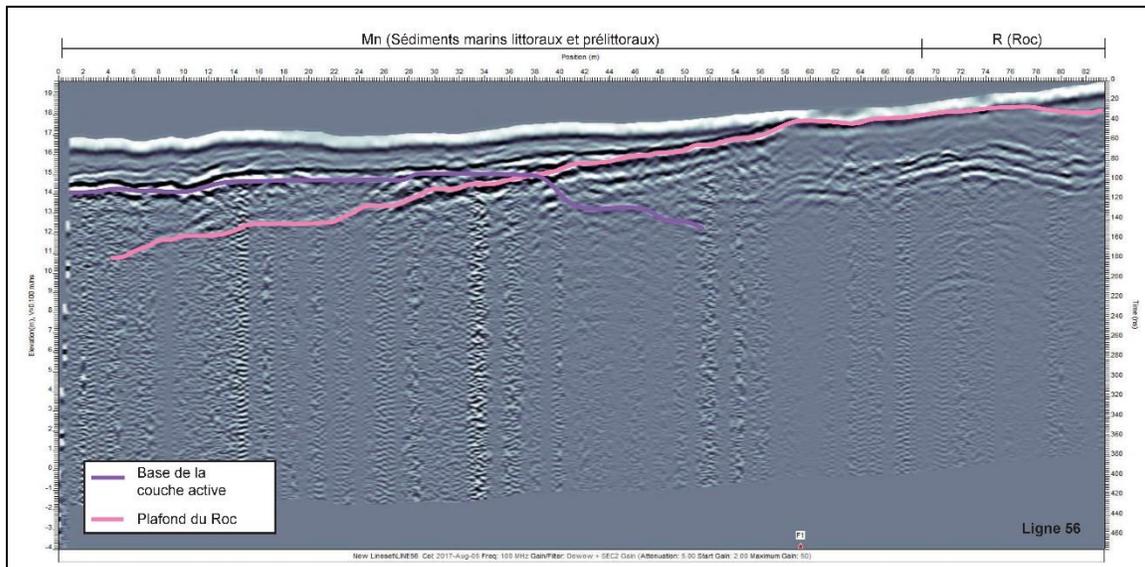
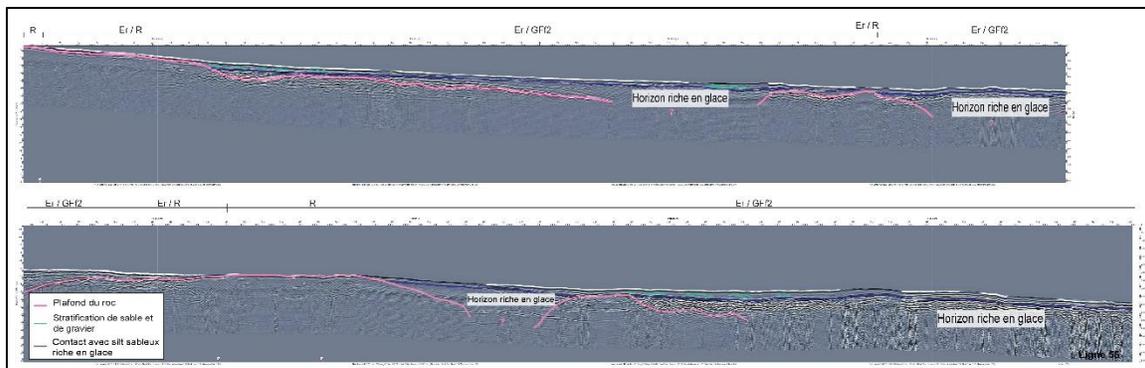


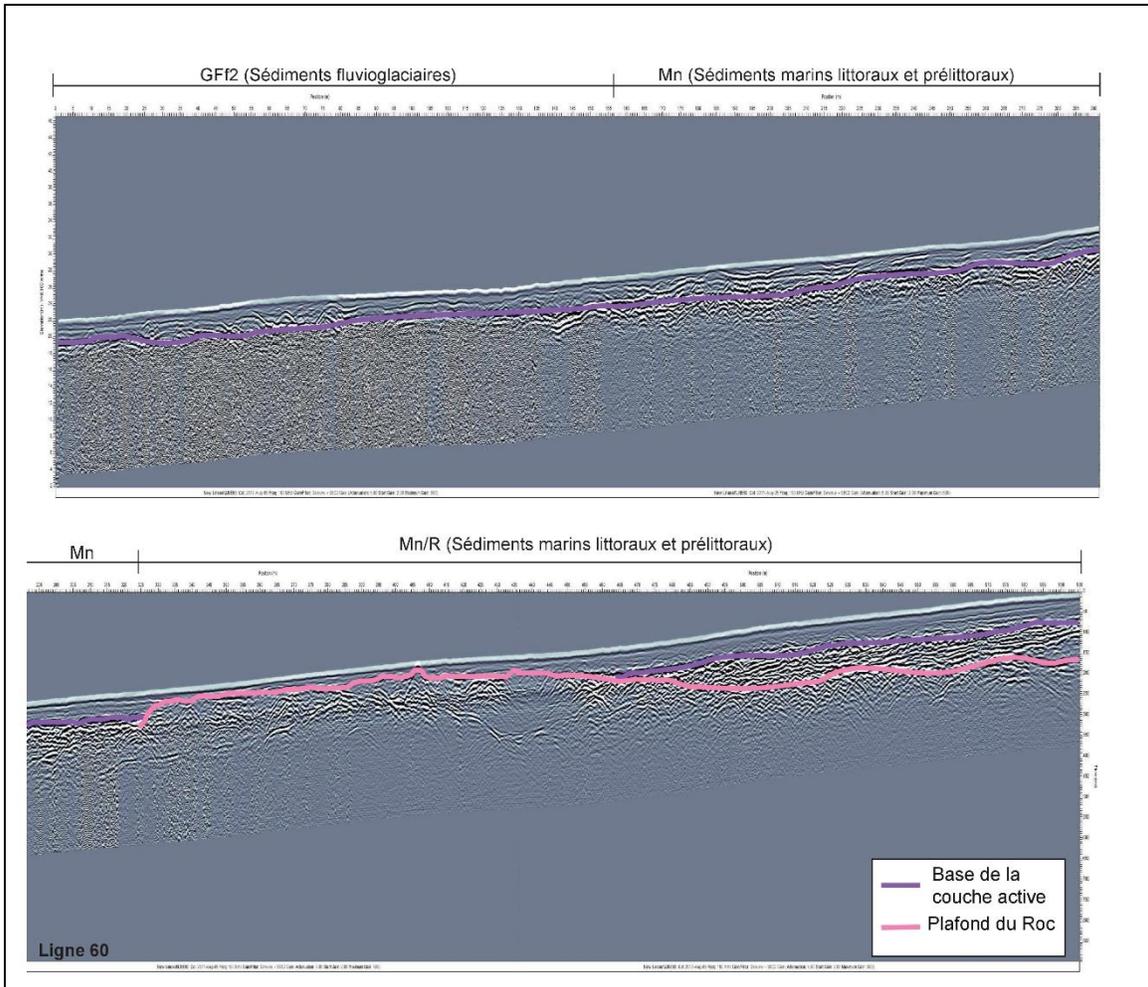
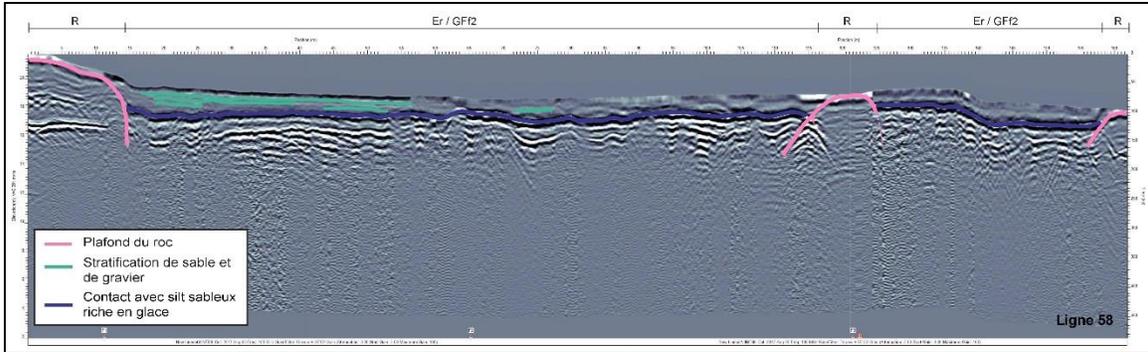


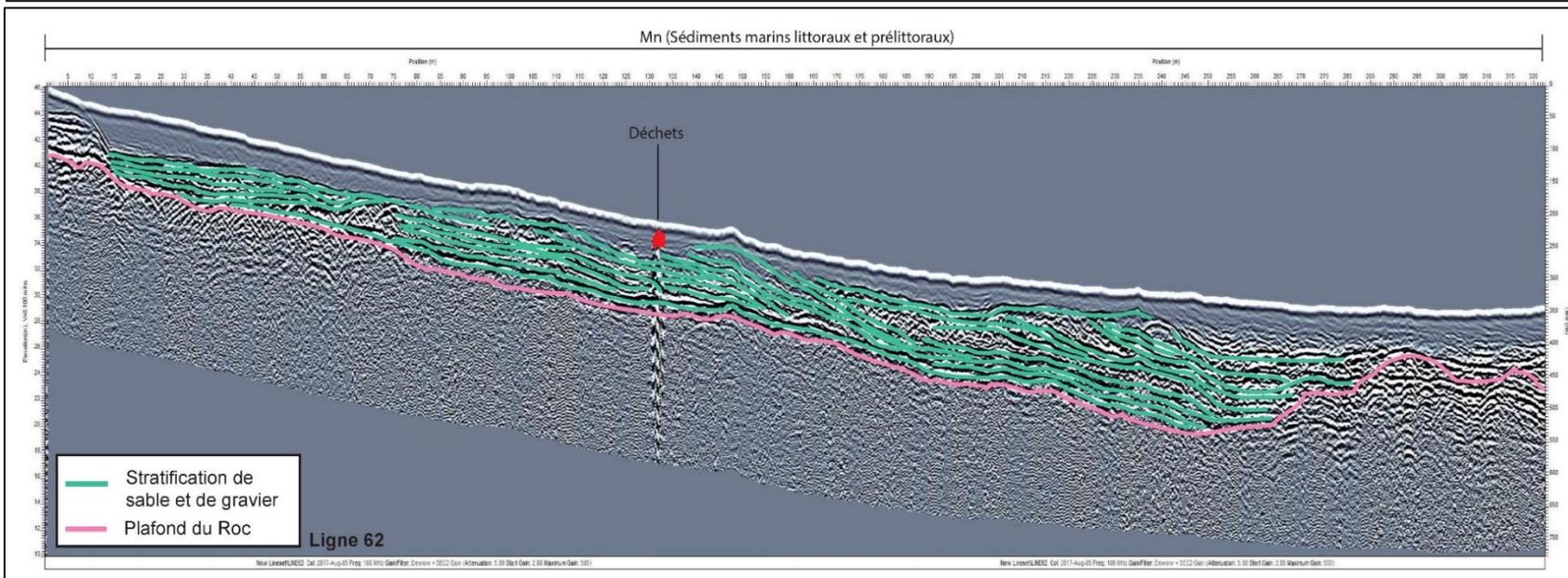
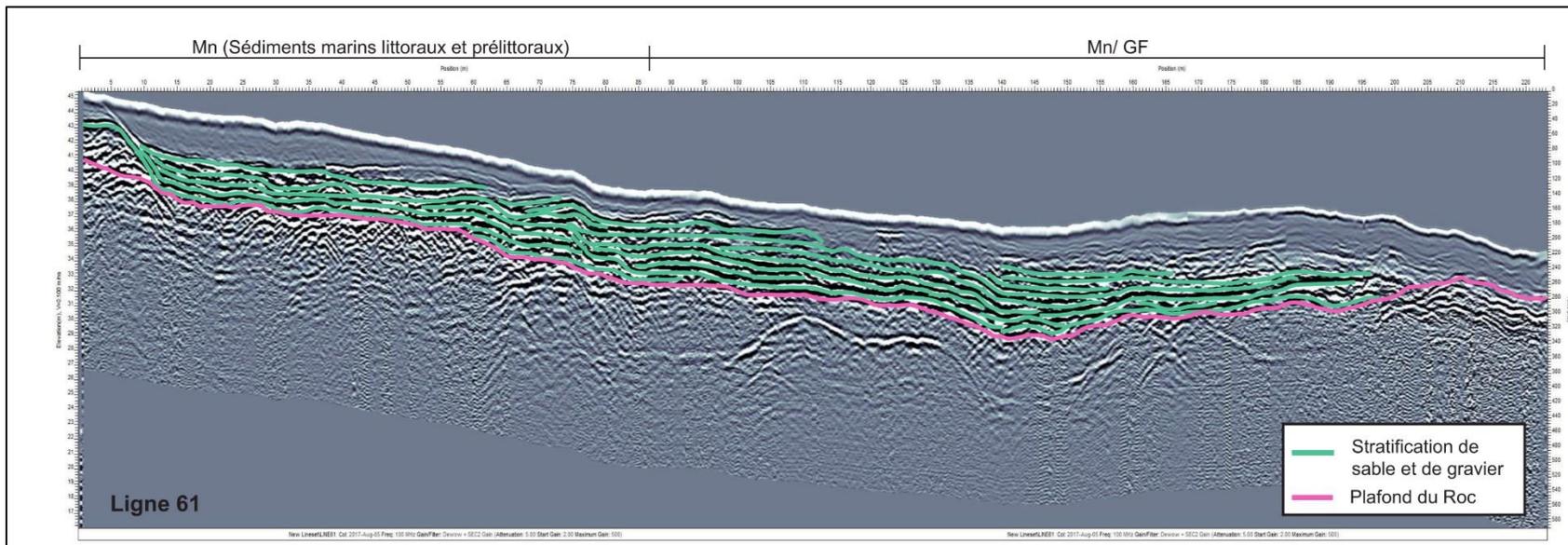


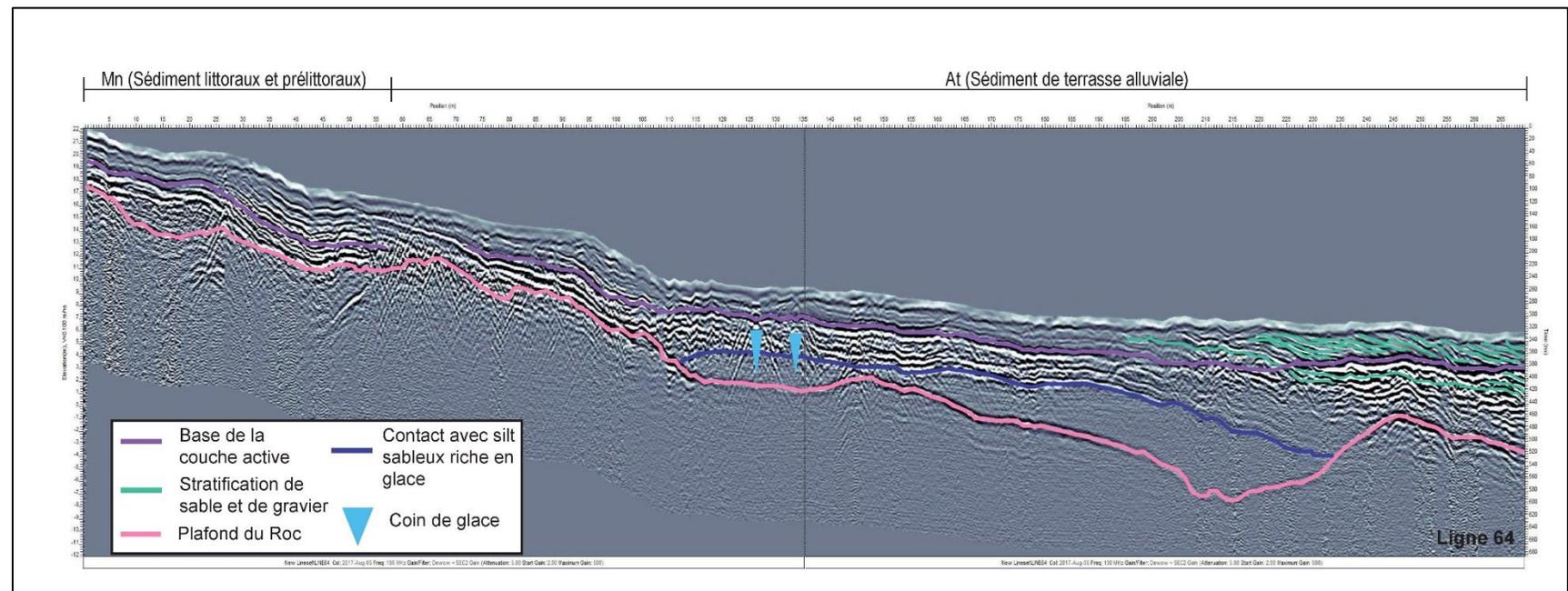
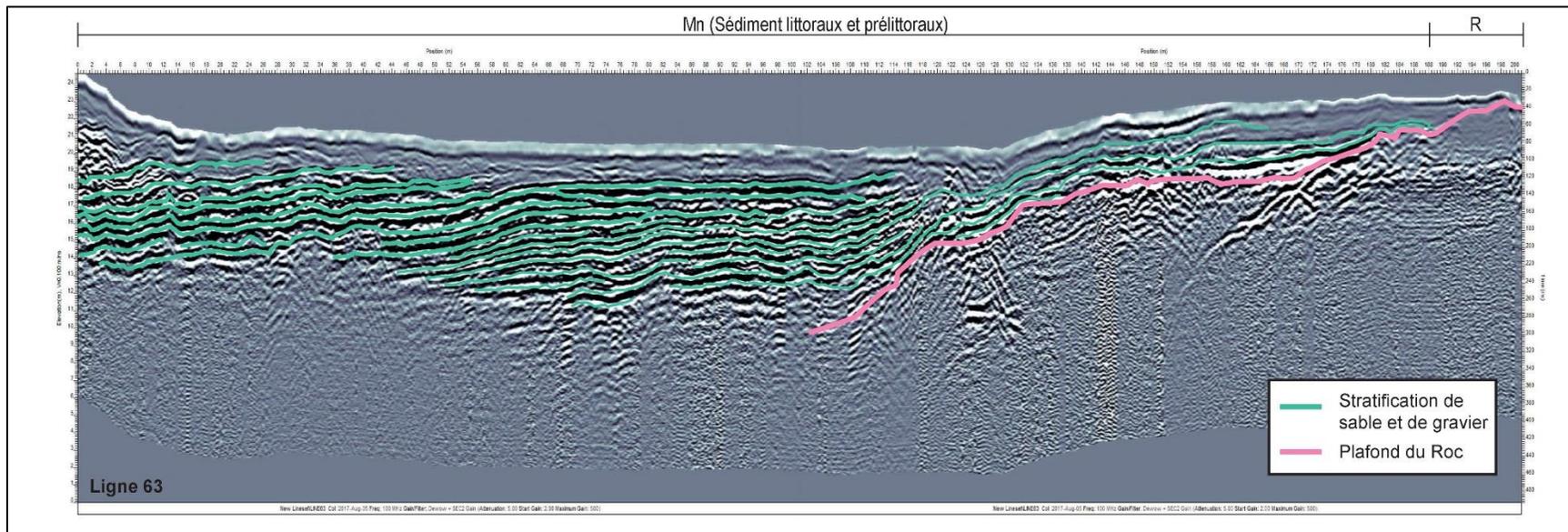


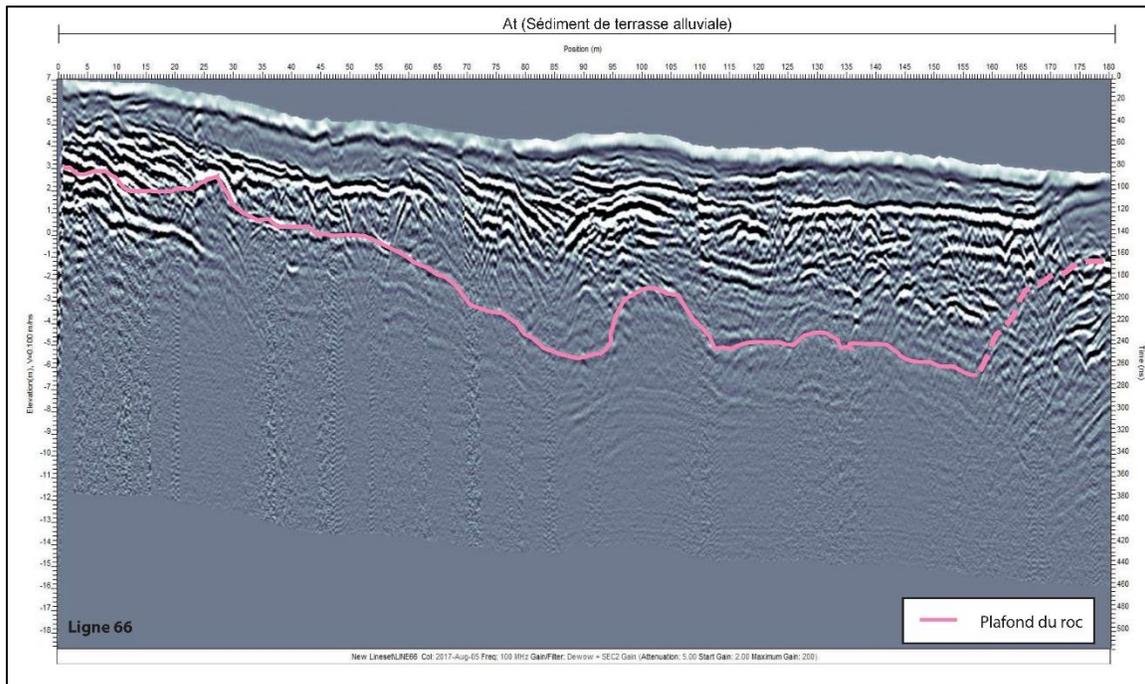
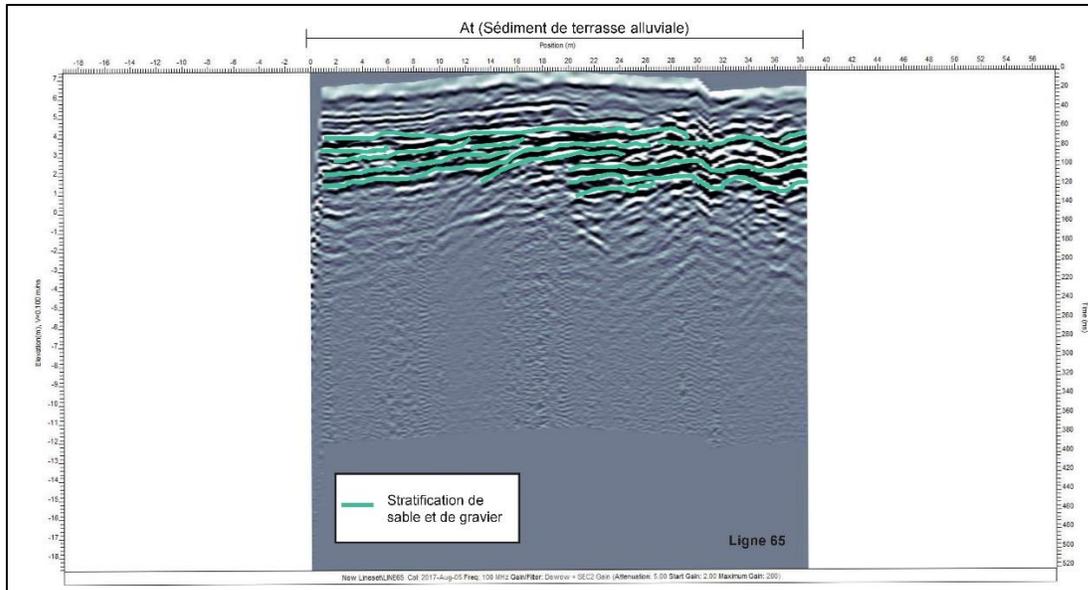












CARTES DE LA COMMUNAUTÉ

Carte des dépôts de surface

REFERENCES

Dessau-Soprin Inc. (2002). Alimentation en eau potable et épuration des eaux usées de Umiujaq. Rapport présenté à l'Administration Régionale Kativik, 53 p.

Dessau-Soprin Inc. (2006). Village d'Umiujaq. Étude pour l'aménagement des étangs localisés sur la piste près du dépôt. Rapport présenté à l'Administration Régionale Kativik, 151 p.

Résumé

Cette carte présente les dépôts de surface de la région d'Umiujaq. Ce village se situe au Nunavut, à 15 km à l'ouest de la Tasajuk, sur la côte est de la baie d'Hudson (56°33' N, 76°31' O).

Note

Cette carte a été compilée principalement par photo-interprétation et validée par un nombre limité d'observations de terrain, de sondages et de forages dans le pergélisol. Toute information pouvant améliorer la précision et éventuellement conduire à la production d'une mise à jour sera appréciée.

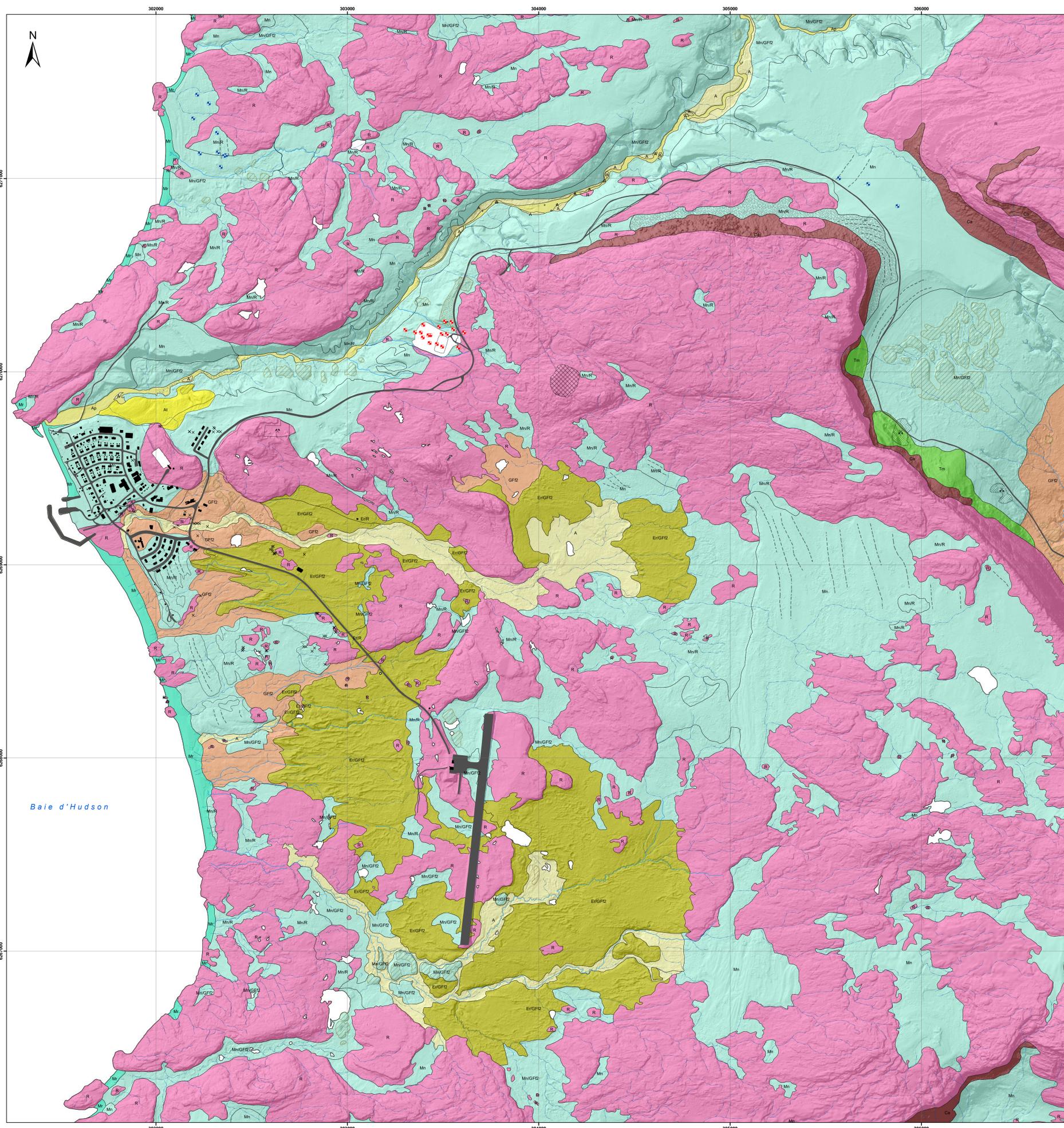


Système national de référence cartographique

Illustration de couverture : Umiujaq, Nunavut, Québec. Photographie par Emmanuel L'Hérault.

Centre d'études nordiques, Québec, 2018

DÉPÔTS DE SURFACE
UMIUJAJQ
Québec, Nunavut
1 : 8 000



Dépôts de surface

Quaternaire - Postglaciaire

Dépôts de versant

Ca DÉPÔTS D'ÉBOULIS : cailloux et blocs anguleux géofractés de taille métrique, formant des amas et/ou des tabliers au pied des escarpements rocheux.

Sédiments éoliens

Er SÉDIMENTS ÉOLIENS : sable fin bien trié mis en place par le vent sous forme de dunes paraboliques, mince couverture reposant principalement sur des sédiments de faible et moyenne épaisseur proglaciaire et subaquatique (GF2), localement développés sur des sédiments littoraux et pré-littoraux et sur la roche en place (R).

Sédiments alluviaux

A ALLUVIONS NON DIFFÉRENCIÉES : sable, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant parfois de la matière organique; marquées par des levées, barres alluviales et plaines alluviales.

Ap ALLUVIONS ACTUELLES : sables, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant parfois de la matière organique; marquées par des levées, barres et plaines alluviales actuelles.

At ALLUVIONS DES TERRASSES FLUVIALES : sable, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant occasionnellement de la matière organique; l'abaissement du niveau de base est visible par l'étagement des terrasses.

Sédiments marins

Mr SÉDIMENTS DES PLAGES ACTUELLES : sable moyen à grossier; présence de fragments de coquillages; sédiments actuellement influencés par des processus marins; de 0,5 à 2 mètres d'épaisseur.

Mn SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX : sable moyen à grossier avec présence de lits de minéraux lourds et de fragments de coquillages; mis en place en eau peu profonde lors de la phase prétransgressive et lors de l'exondation; surface fréquemment caractérisée par des terrasses marines et des plages soulevées; cette couche repose principalement sur des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique composés de silt et de sable fin, caractérisés par la présence de lentilles de glace pluricentimétriques dans le pergélisol.

Mb SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE : silt argileux et argile silteuse fossilifères de la mer de Tyrrell, interstratifiés avec des couches sableuses; contenant localement des cailloux détestés, 1 à 20 m d'épaisseur; riches en glace lorsque pergélisol.

Dernière glaciation

Sédiments fluvio-glaciaires

GF2 SÉDIMENTS D'ÉPANDAGE PROGLACIAIRE SUBAQUATIQUE : silt, sable silteux, sable et peu de graviers; de 1 à 25 m d'épaisseur; mis en place à l'embouchure de cours d'eau sous-glaciaires ou intraglaciaires dans la mer postglaciaire de Tyrrell; éventails sous-marins de contact glaciaire; couches de sable et de silt stratifiés, rythmés; caractérisés par un mauvais drainage; présence de nombreuses buttes saisonnières à noyau de glace.

Sédiments glaciaires

Tm TILL FORMANT UNE MORAINÉ : dépôt hétérométrique mal trié composé principalement de sable et de silt avec cailloux et blocs anguleux métriques; jusqu'à 25 m d'épaisseur; couches fossilifères; matériaux mis en place au front du glacier en contact avec la mer de Tyrrell; glacier appuyé sur les collines rocheuses de la vallée Tasajuk.

Pré-quaternaire

Substrat rocheux

R ROC : affleurements de roche nue ou avec un couvert épars de dépôts meubles.

CHAMPS DE BLOCS GLACIELS : concentrations importantes de cailloux et de blocs mis en place par l'action des glaces flottantes sur les littoraux de la mer postglaciaire de Tyrrell; de 0,5 à 3 m d'épaisseur; reposant sur le roc ou des sédiments marins à texture sableuse.

BUTTES CRYOGÈNES RICHES EN GLACE (LITHALES)

SABLIÈRES OU GRAVIERES (actives et inactives)

CARRIÈRES (actives et inactives)

REMLAI

DÉPOTOIR

BÂTIMENTS

INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

CONTACTS GÉOLOGIQUES

CRÊTES DE PLAGE

RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents

RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents

AFFLEUREMENTS ROCHEUX PONCTUELS

EXCAVATION (Dessau-Soprin Inc., 2006)

EXCAVATION (Dessau-Soprin Inc., 2002)

Notes : Les unités composées, par exemple ASMt, sont indiquées lorsque l'épaisseur de l'unité supérieure est faible par rapport à celle de l'unité sous-jacente (généralement inférieure à 2 m) ou lorsque la présence de l'unité sous-jacente est importante du point de vue de la géotechnique et des conditions du pergélisol.

Les codes de couleur et symboles proviennent de la Commission géologique du Canada et du Centre d'études nordiques.

Image en relief ombragé préparée par L'Hérault, E. dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec).
Illumination : azimut 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

Projection : MTM zone 9, NAD83

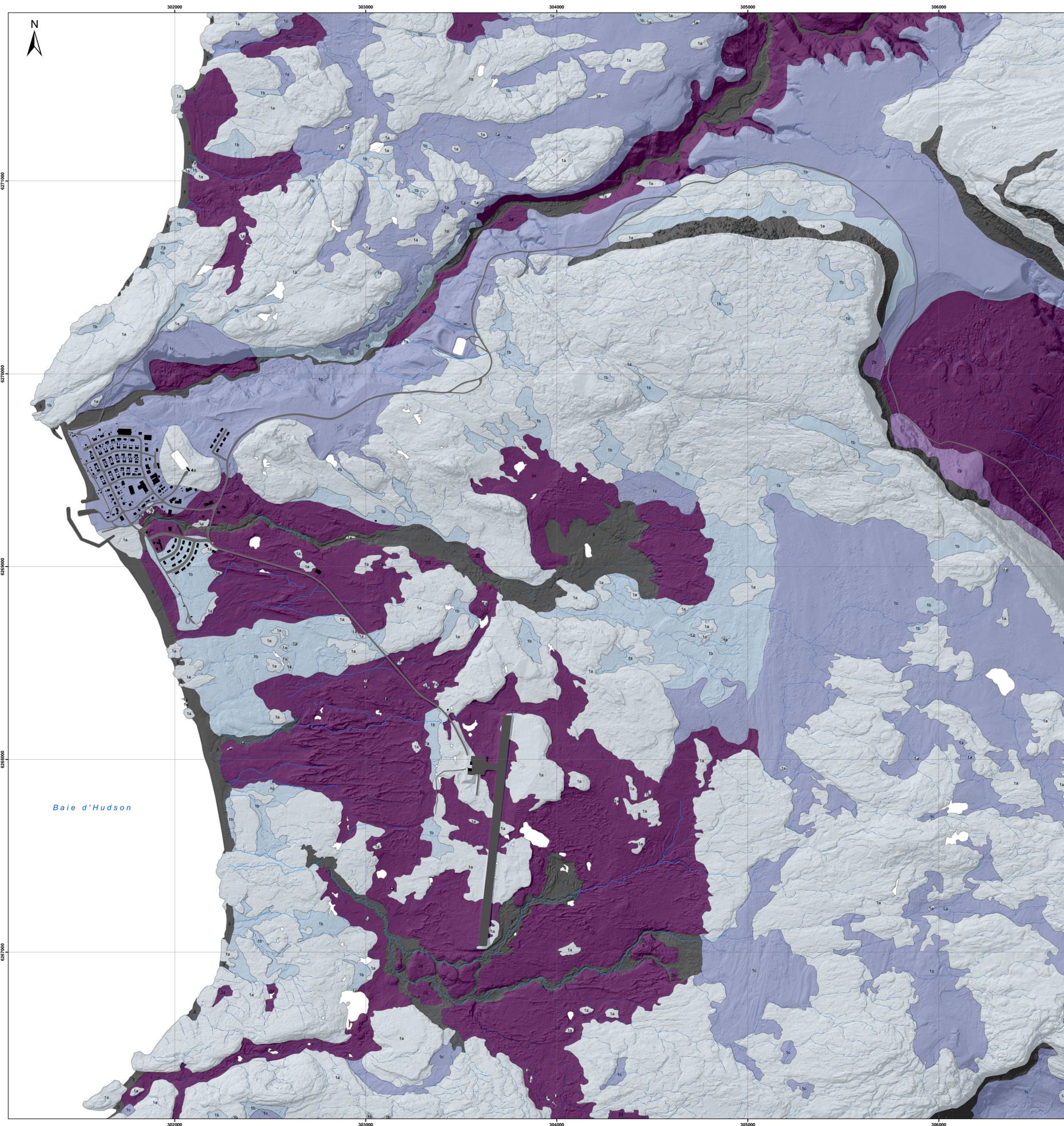
DÉPÔTS DE SURFACE
UMIUJAJQ
Québec, Nunavut
1 : 8 000



Auteurs : E. L'Hérault, S. Aubé-Michaud, A.-S. Carboneau, M. Allard et Poly-Géo inc.
Centre d'études nordiques, Université Laval, décembre 2018

Citation recommandée : L'Hérault, E., Aubé-Michaud, S., Carboneau, A.-S., Allard, M. et Poly-Géo inc., 2018. Dépôts de surface, Umiujaq, Québec, Nunavut; Centre d'études nordiques, échelle 1:8 000.

Carte des conditions de pergélisol



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

- 1a** Socle rocheux. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 4,5 et 6 m. Seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une faible quantité de glace.
- 1b** Dépôt de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle poreuse dont le contenu volumique en glace est généralement inférieur à 10 %.
- 1c** Dépôt de sable et gravier stratifié épais (> 2 m). La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériaux à granulométrie fine. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés.

Dépôts instables au dégel : dépôts meubles contenant beaucoup de glace

- 2a** Dépôt glaciaire (fil) en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. Contient de la glace interstitielle et sous forme de lentilles dans les couches de matériaux 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 à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur.
- 2b** Dépôt glaciaire (fil) en couverture épaisse (> 2 m) sur socle rocheux. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. Contient de la glace interstitielle et sous forme de lentilles dans les couches de matériaux 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.
- 2c** Dépôt à granulométrie fine d'origine marine en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux ou dépôts de sable et gravier épais. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur. Matériau sujet à des ruptures de pente sur les versants.
- 2d** Dépôt à granulométrie fine d'origine marine. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contient beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants lors de sa fonte.

Contraintes sévères : processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles

- 3** Contraintes sévères : processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles.

- BÂTIMENTS**
- INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT**
- RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents**
- RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents**

Résumé
 Cette carte présente les conditions de pergélisol de la région d'Umiujaq. Ce village se situe au Nunavik, à 15 km à l'ouest de la Tasuq Lake, sur la côte est de la baie d'Hudson (56°33' N, 76°31' O).

Note
 Cette carte a été compilée principalement par photo-interprétation et validée avec un nombre limité d'observations de terrain, de sondages et de forages dans le pergélisol. Toute information pouvant améliorer la précision et éventuellement conduire à la production d'une mise à jour sera appréciée.

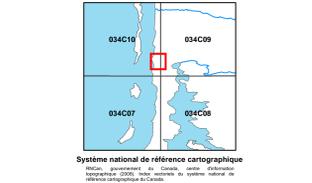


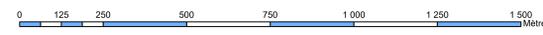
Illustration de couverture :
 Umiujaq, Nunavik, Québec.
 Photographie par Emmanuel L'Hérault.
 Centre d'études nordiques, Québec, 2018.

CONDITIONS DE PERGÉLISOL
UMIUJAJQ
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000



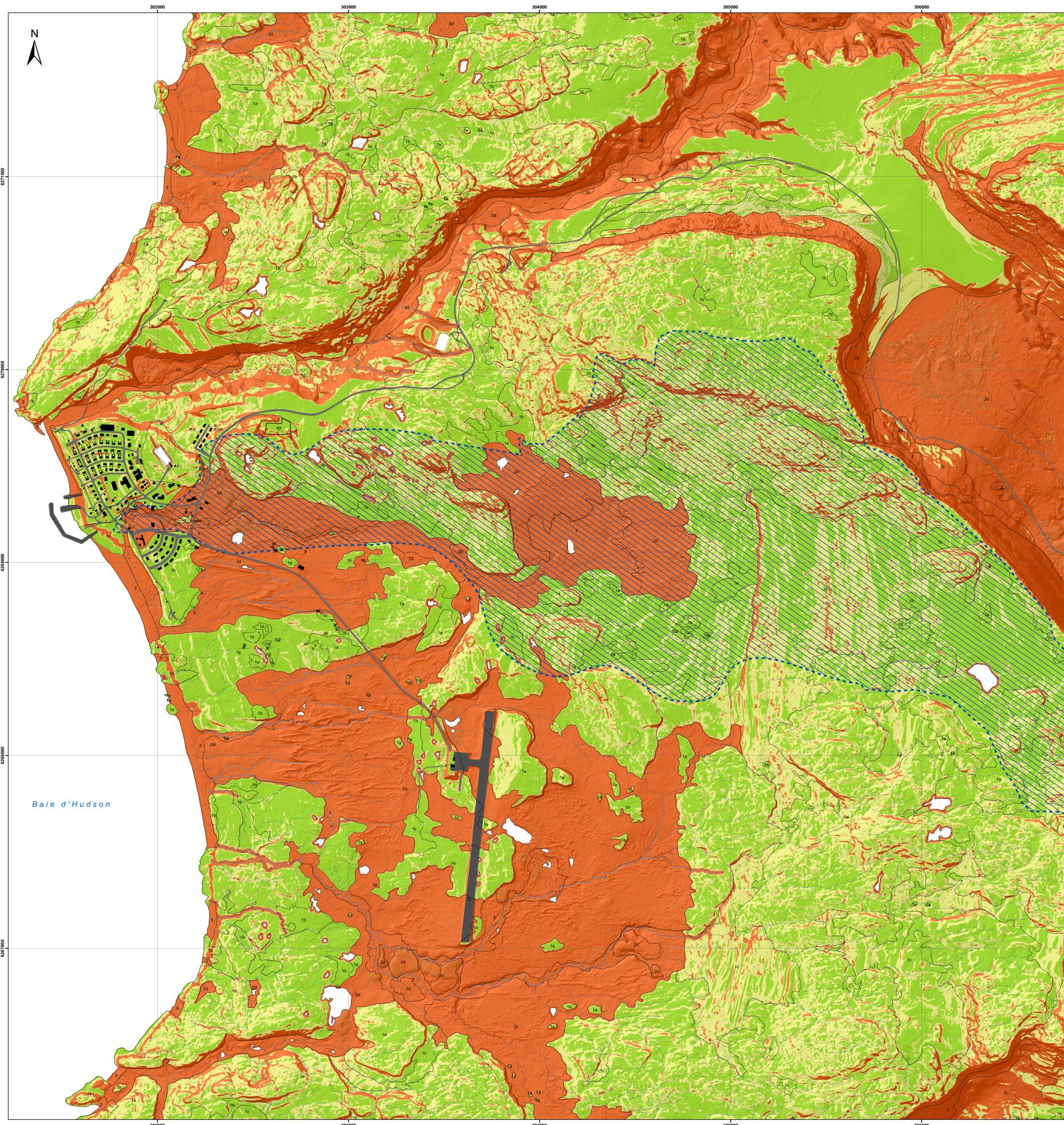
Image en relief ombragé préparée par L'Hérault, E. dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec).
 Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 2x
 Projection : MTM zone 9, NAD83

CONDITIONS DE PERGÉLISOL
UMIUJAJQ
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000



Auteurs : E. L'Hérault, S. Aubé-Michaud, A.-S. Carboneau, M. Allard et Poly-Géo inc.
 Centre d'études nordiques, Université Laval, décembre 2018.
 Citation recommandée :
 L'Hérault, E., Aubé-Michaud, S., Carboneau, A.-S., Allard, M. et Poly-Géo inc., 2018. Conditions de pergélisol, Umiujaq, Québec, Nunavik; Centre d'études nordiques, échelle 1:8 000.

Carte de potentiel de construction



Résumé
 Cette carte présente le potentiel de construction et les types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes de la région d'Umiujaq. Ce village se situe au Nunavut, à 15 km à l'ouest de la baie Tasujuaq, sur la côte est de la baie d'Hudson (66°35' N, 76°31' O).

Abstract
 This map shows the construction potential and foundation design options based on permafrost conditions and slopes of the Umiujaq region. This village is located 15 km to the west of the Tasujuaq Lake, on the eastern coast of the Hudson Bay (66°35' N, 76°31' W).

Note
 Cette carte a été compilée principalement par photo-interprétation et validée avec un nombre limité d'observations de terrain, de sondages et de forages dans le pergélisol. Toute information pouvant améliorer la précision et éventuellement conduire à la production d'une mise à jour sera appréciée.

Note
 This map was compiled mainly by air photo interpretation and validated by a limited number of terrain observations, probing and drill holes in the permafrost. Any information leading to an improvement of precision and, eventually, an update of the map will be received with thanks.

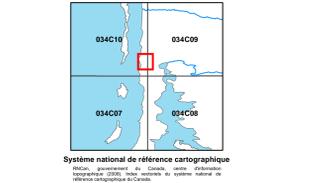


Illustration de couverture :
 Umiujaq, Nunavut, Québec.
 Photographie par Emmanuel L'Hérault.

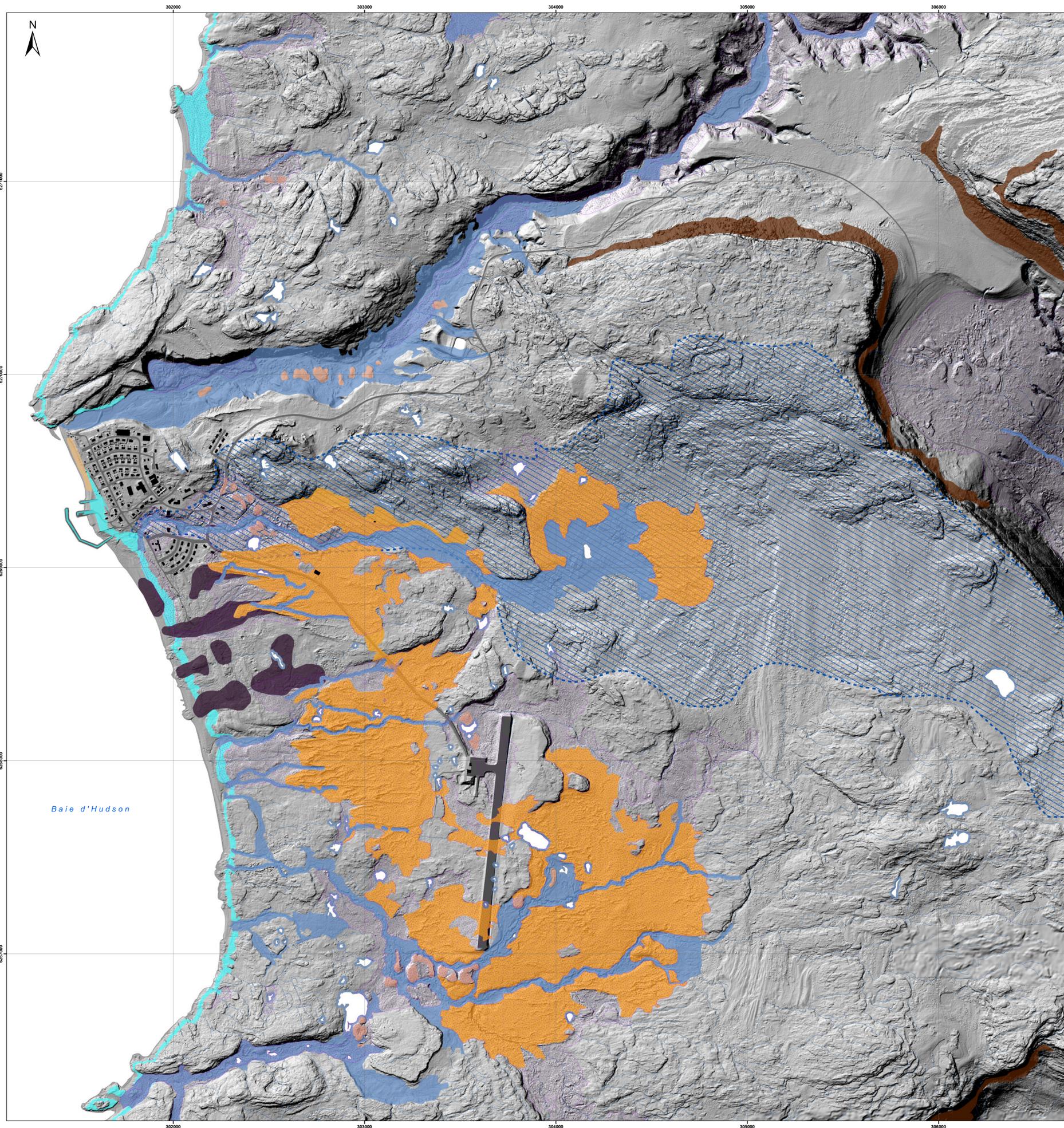
Centre d'études nordiques, Québec, 2018

Potentiel de construction et types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes
UMIUAQ
 Québec, Nunavut
 1 : 8 000



- DÉPÔTS STABLES AU DÉGEL - ROC ET DÉPÔTS CONTENANT TRÈS PEU OU PAS DE GLACE**
- 1a**
 - Socle rocheux constitué de roches volcano-sédimentaires de la province tectonique de Churchill, qui sont à l'origine d'un paysage de caudex. Ces caudex rocheux sont inclinés vers la baie d'Hudson et leurs sommets surplombent le lac Tasujuaq à une altitude pouvant atteindre 320 m. La couche active atteint une épaisseur d'environ 4 m. Seule sa structure de joints et de diaclases est susceptible de contenir une faible quantité de glace.
 - Fondations nordiques de tous types. Des adaptations à la topographie accidentée sont souvent nécessaires.
 - Terrains aménagés pour la construction (pente < 7,5°).
 - Terrains aménagés pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 7,5 et 15°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 15°).
- 1b**
 - Dépôt de sable et gravier en couverture mince sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise généralement entre 1,5 et 2,5 m. Contenu de la glace interstitielle est généralement inférieur à 10%.
 - Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préforage du couvert de sédiments géels).
 - Terrains aménagés pour la construction (pente < 7,5°).
 - Terrains aménagés pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 7,5 et 15°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 15°).
- 1c**
 - Dépôt de sable et gravier stratifié épais. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m. Les sables et graviers préfiltrés (SM) se présentent sous la forme de plaques isolaires ou de terrasses marines. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Contenu de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine.
 - Fondations nordiques sur radier et chevâtes ajustables ou pieux. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier pourraient requièrent des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermospions).
 - Terrains aménagés pour la construction (pente < 5°).
 - Terrains aménagés pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 5 et 10°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 10°).
- DÉPÔTS INSTABLES AU DÉGEL - DÉPÔTS QUATERNAIRES CONTENANT BEAUCOUP DE GLACE**
- 2a**
 - Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture mince sur socle rocheux (H). Composé principalement de sable et de silt avec quelques graviers et blocs. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. Contenu 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 20%. Présence d'ostioles et de coulées de gelifluxion sur les versants. Matériau sujet au fluage et à des tassements différentiels limités lors de sa fonte.
 - Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préforage du couvert de sédiments géels).
 - Terrains aménagés pour la construction (pente < 4°).
 - Terrains aménagés pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 4 et 8°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).
- 2b**
 - Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture épaisse sur socle rocheux (H). Composé principalement de sable et de silt avec quelques graviers et blocs. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc ou le dépôt quaternaire sous-jacent. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 2,5 et 3 m. Contenu 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 gelifluxion sur les versants. Matériau sujet au fluage et au tassement différentiel lors de sa fonte.
 - Fondations sur pieux possibles, mais requièrent des forages plus profonds pour l'installation. Fondations sur radier et chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermospions). Excavation à éviter.
 - Terrains aménagés pour la construction, mais requièrent la prudence (pente < 8°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).
- 2c**
 - Dépôt à granulométrie fine d'origine marine ou lacustre (sable fin, silt et argile) en couverture mince sur socle rocheux ou dépôt de sable et gravier épais. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc ou le dépôt quaternaire sous-jacent. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contenu beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30%. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants.
 - Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermospions).
 - Terrains aménagés pour la construction, mais requièrent la prudence (pente < 2°).
 - Terrains défavorables à la construction (pente > 2°).
- 2d**
 - Dépôt à granulométrie fine d'origine marine (sable fin, silt et argile) partiellement recouvert d'une couche mince de sols organiques, de sédiments alluviaux ou de sédiments littoraux. Dépôt mal drainé. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,5 m. Contenu beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30% et peut atteindre près de 100%. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés. Matériau sujet à des tassements différentiels importants et à des ruptures de pente sur les versants.
 - Fondations sur radiers et chevâtes ajustables possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la dégradation du pergélisol (ex. : thermospions). Excavation à éviter.
 - Terrains défavorables à la construction.
- 3**
CONTRAINTES SÈVÈRES - PROCESSUS PÉRGÉLISOL ET DE VERSANTS DYNAMIQUES, LITTORAUX ET PLAINES ALLUVIALES ACTUELLES
 - Dépôt contemporain soumis à des processus géomorphologiques actuels et dynamiques. Dépôt sujet à l'érosion, aux inondations et aux mouvements de versant.
 - Terrain problématique à éviter.
 - Terrains problématiques défavorables à la construction.
- SYMBOLS :**
 BUTTES CRYOGÈNES RICHES EN GLACE (LITHALESSES)
 CHAMPS DE BLOCS GLACIELS : concentrations importantes de cailloux et de blocs mis en place par l'action des glaces flottantes sur les littoraux de la mer postglacière de Tyrrell de 0,5 à 3 m d'épaisseur, reposant sur le roc ou des sédiments marins à texture sablonneuse.
 SABLIERES OU GRAVIERES (actives et inactives)
 CARRIÈRES (actives et inactives)
 BASSIN VERSANT : bassin versant de la source d'eau potable du village
 BÂTIMENTS
 INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT
 CONTACTS GÉOLOGIQUES
 RESEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents
 RESEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents
 AFFLEUREMENTS ROCHEUX PONCTUELS

Carte des aléas naturels actuels et appréhendés



MOUVEMENT DE MASSE / MASS WASTING	
AVALANCHE DE NEIGE / SNOW AVALANCHE 1/100 1/1000	
GLISSEMENT DE TERRAIN / LANDSLIDE 	
GÉLIFLUXION / GELIFLUCTION 	
COULÉE / FLOW 	
ÉBOULIS / FALLS 	
ÉROSION / EROSION	
ÉROSION CÔTIÈRE ET FLUVIALE / COASTAL AND FLUVIAL EROSION 	
ÉROSION PAR LE VENT / WIND EROSION 	
CLIMATIQUE / CLIMATIC	
FEU / WILDFIRE 	
TEMPÊTE DE VENT / WIND STORM 	
BLIZZARD / BLIZZARD 	
VERGLAS / ICE STORM 	
PROCESSUS PÉRIGLACIAIRES / PERIGLACIAL PROCESSES	
PERGÉLISOL RICHE EN GLACE / ICE-RICH PERMAFROST 	
GLAÇAGE / ICING 	
BUTTE SAISONNIÈRE À NOYAU DE GLACE / FROST BLUSTER 	
PROCESSUS LIÉS AU DÉGEL / THAW-RELATED PROCESSES	
AFFAISSEMENT THERMOKARSTIQUE / THERMOKARST SUDSIDENT 	
ÉROSION THERMIQUE / THERMAL EROSION 	
PROCESSUS HYDROLOGIQUES / HYDROLOGICAL PROCESSES	
DRAINAGE D'UN LAC / LAKE DRAINAGE 	
SURCOTE / STORM SURGE 	
CRUE SOUDAIN ET INONDATION / FLASH FLOOD AND FLOOD 	
EMBÂCLE ET DÉBÂCLE GLACIERS / ICE-JAM AND BREAK-UP 	
POUSÉE GLACIAIRE / ICE-PUSH 	
TREMBLEMENT DE TERRE / EARTHQUAKE	
TREMBLEMENT DE TERRE / EARTHQUAKE 	
HYDROLOGIE / HYDROLOGY	
RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents RILLS AND WATERTRACKS - running throughout all arctic summer 	
RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents RILLS AND WATERTRACKS - running occasionally during spring melt 	
BASSIN VERSANT - bassin versant de la source d'eau potable du village WATERSHED - watershed for the village's potable water 	
INFRASTRUCTURES / INFRASTRUCTURE	
BÂTIMENTS / BUILDING 	
INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT / TRANSPORT INFRASTRUCTURE 	

Résumé
 Cette carte présente les risques naturels actuels et appréhendés de la région d'Umiujaq. Ce village se situe au Nunavik, à 15 km à l'est du lac Tasujaq, sur la côte est de la baie d'Hudson (56°33' N, 76°31' O).

Abstract
 This map shows the actual and potential natural hazards of the Umiujaq region. This Nunavik village is located at 15 km to the east of the Tasujaq Lake, on the eastern coast of the Hudson Bay (56°33' N, 76°31' W).

Note
 Cette carte a été compilée principalement par photo-interprétation et validée avec un nombre limité d'observations de terrain, de sondages et de forages dans le pergélisol. Toute information pouvant améliorer la précision et éventuellement conduire à la production d'une mise à jour sera appréciée.

Note
 This map was compiled mainly by air photo interpretation and validated by a limited number of terrain observations, probing and drill holes in the permafrost. Any information leading to an improvement of precision and, eventually, an update of the map will be received with thanks.

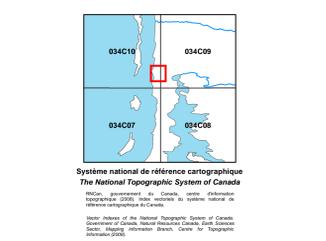


Illustration de couverture / Cover illustration:
 Umiujaq, Nunavik, Québec.
 Photographie par Emmanuel L'Hérault / Photocredits: Emmanuel L'Hérault

Centre d'études nordiques, Québec, 2019

ALÉAS NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS
ACTUAL AND POTENTIAL NATURAL HAZARDS
UMIUJAJQ
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000

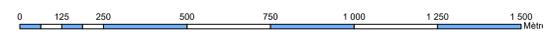


Image en relief ombragé préparée par L'Hérault, E. dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec).
 Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 2x

Hillshade created by L'Hérault, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec).
 Illumination: azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 1x

Projection : MTM zone 9, NAD83

ALÉAS NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS
ACTUAL AND POTENTIAL NATURAL HAZARDS
UMIUJAJQ
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000



Auteurs : S. Aubé-Michaud et M. Allard, Centre d'études nordiques, Université Laval, décembre 2019.
 Authors: S. Aubé-Michaud and M. Allard, Centre d'études nordiques, Université Laval, December 2019.

Citation recommandée :
 Aubé-Michaud, S. et Allard, M., 2019. Aléas naturels actuels et appréhendés, Umiujaq, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1 : 8 000.
 Recommended citation:
 Aubé-Michaud, S. and Allard, M., 2019. Actual and potential natural hazards, Umiujaq, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, scale 1 : 8 000.

PLANCHES SYNTHÈSES

**Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la
communauté d'Umiujaq**

Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la communauté d'Umiujaq



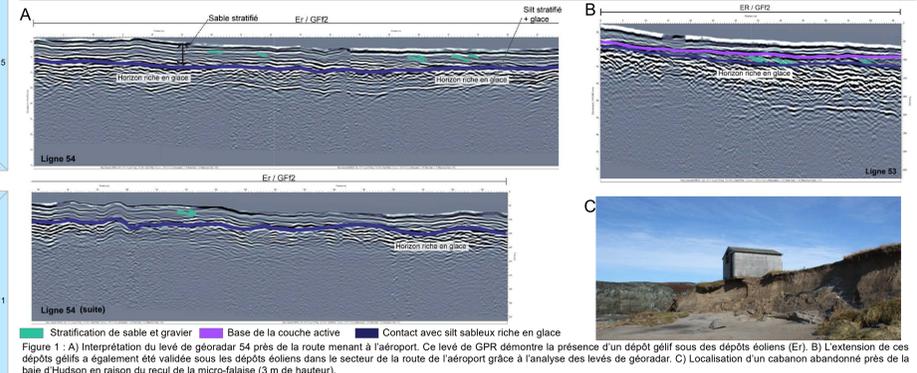
Légende

Dépôts de surface A : Alluvions non différenciées Ap : Sédiments de plaines alluviales Al : Alluvions des terrasses fluviales Er : Sédiments éoliens GF1 : Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique GF2 : Sédiments littoraux et pré littoraux Mn : Sédiments des plages actuelles R : Roc Affleurements rocheux en pentes supérieures à 15 degrés	Conditions de pergélisol 1a : Solc rocheux. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 4.5 et 6 m. 1b : Dépôt de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur solc rocheux. 2a : Dépôt de sable et gravier stratifié épais (> 2 m). 2b : Dépôt glaciaire (silt) en couverture mince (< 2 m) sur solc rocheux. 2c : Dépôt à granulométrie fine d'origine marine. 3 : Contraintes sévères. Processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles.	Aléas naturels actuels et appréhendés Erosion côtière Erosion par le vent Butte saisonnière à noyau de glace Affaissement thermokarstique Submersion côtière Crue et inondation
Potential de construction Terrains aménageables pour la construction Terrains aménageables, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants ou des investigations supplémentaires et des fondations spécialisées (ex. pieux) Terrains défavorables à la construction	Autres éléments Bâtiment infrastructure Voie de communication Levé de géoradar Observation de surface Affleurements rocheux isolés et ponctuels Sondage Délimitation du bassin versant de la source d'eau potable	

Cartographie : S. Aubé-Michaud, E. L'Héroult et A. Chiasson.

Observations et remarques

- Les terrains sur lesquels sont construites les infrastructures du village d'Umiujaq consistent en des sédiments marins littoraux grossiers et épais (classe 1c) stables au dégel. Des fondations de tous les types peuvent y être utilisées.
- Le roc (classe 1a), également présent au nord de la communauté, offre des terrains favorables et stables au dégel. Des affleurements rocheux sont également présents le long de la route d'accès à l'aéroport.
- Le territoire d'Umiujaq possède quelques terrains problématiques pour le développement de la communauté. Une partie des secteurs situés au sud du village sont composés de sédiments fins riches en glace et instables au dégel (GF2) (classe 2a). Par endroits, ces dépôts sont recouverts en surface d'un mince dépôt (< 2 m) de sable généralement stable (Er/GF2).
- Au sud du village, le drainage naturel du terrain provoque des suintements et crée des buttes saisonnières à noyau de glace. Ces processus reliés au pergélisol sont également à considérer lors de l'expansion de la communauté sur le territoire.



Aléas naturels actuels et appréhendés dans la région

Types d'aléas		Contraintes
Mouvements de masse	Éboulement rocheux	3B
Processus hydrologiques	Crue et inondation	2D
	Submersion côtière	3C
Processus reliés au pergélisol	Affaissement thermokarstique	5D
	Butte saisonnière à noyau de glace	5E
Climatique	Eolienne	1A, 5D
	Blizzard	3B, 5D
	Tempête de vent	3B, 5D
	Verglas	3B, 5D

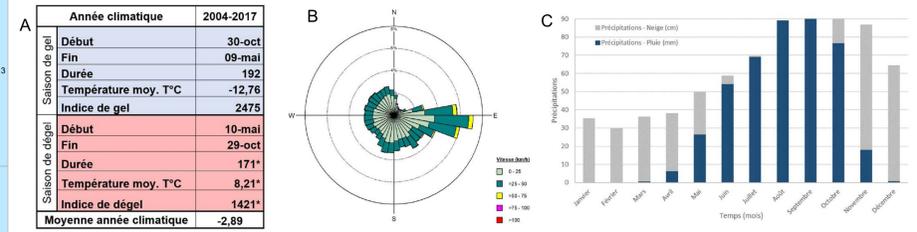
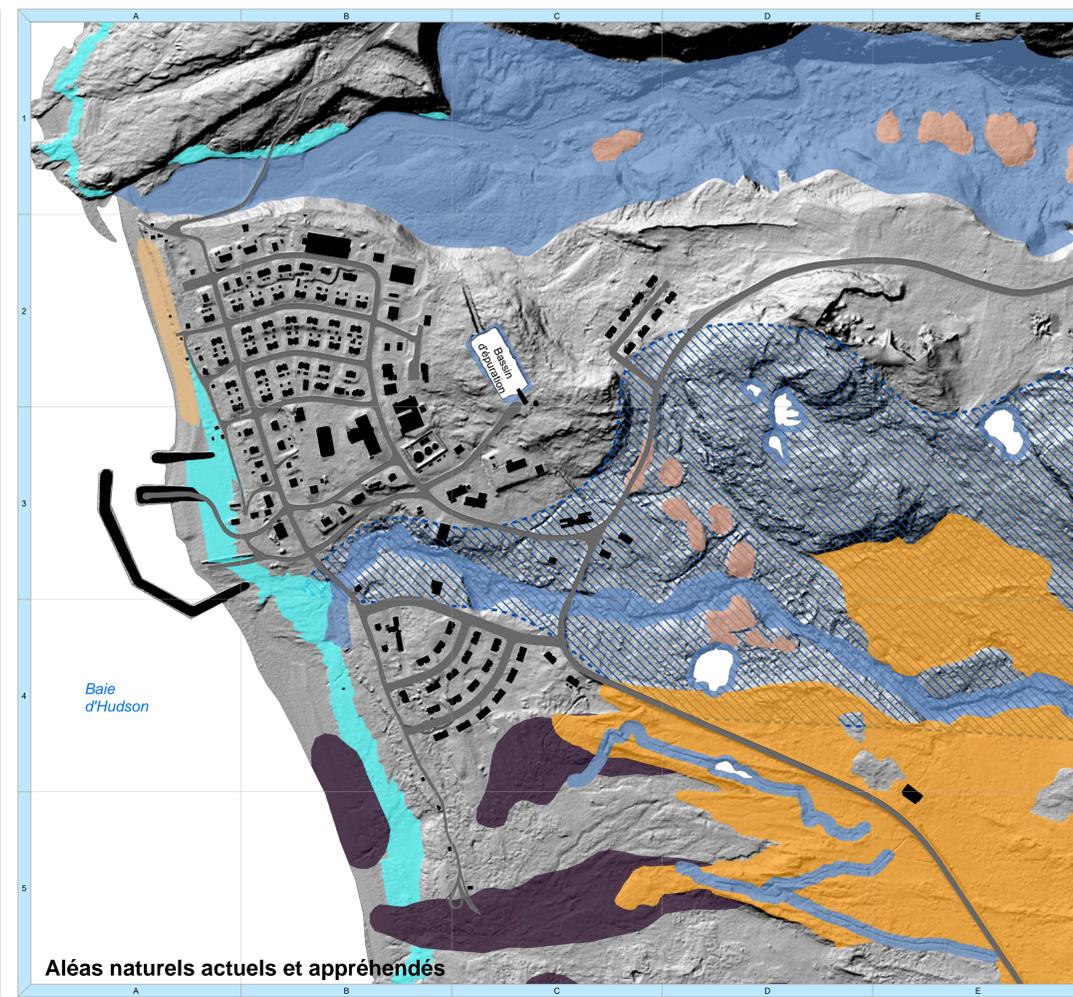
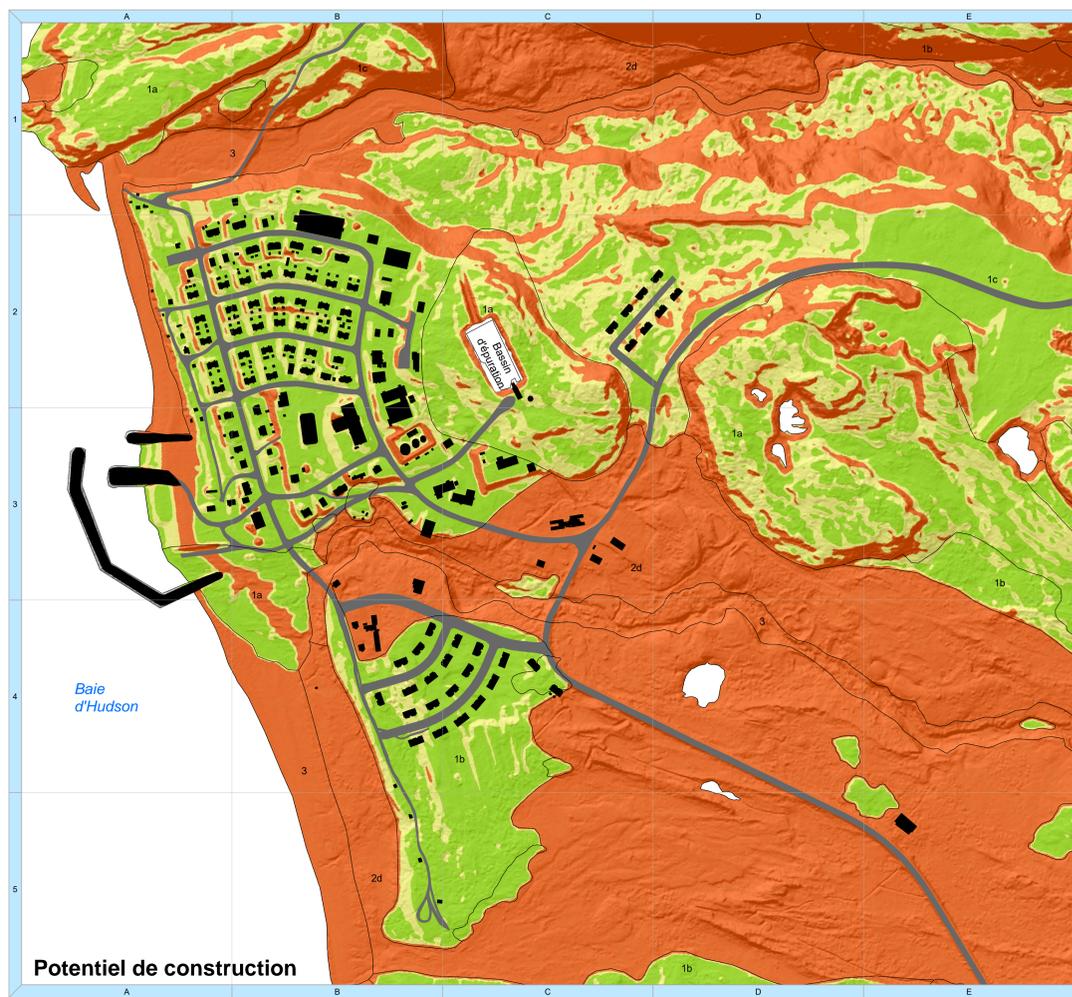
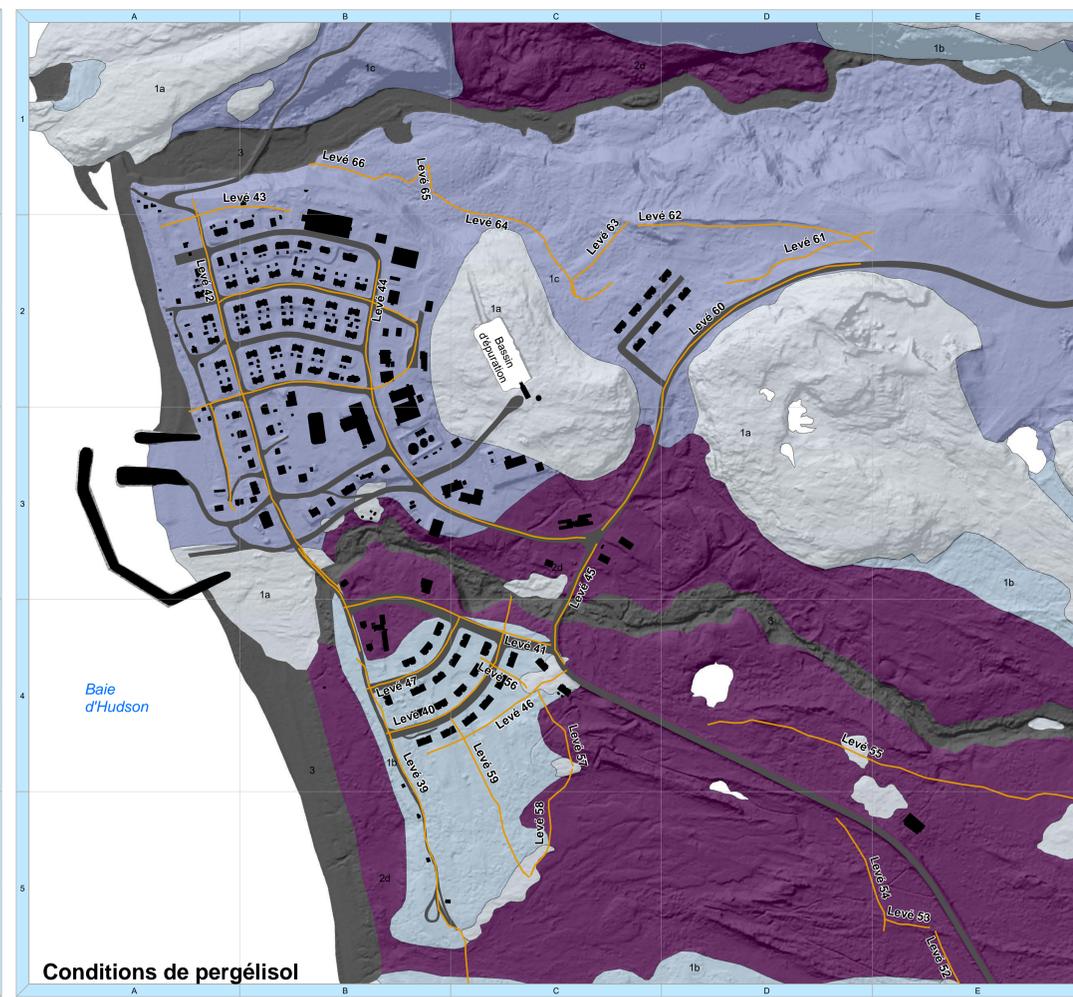
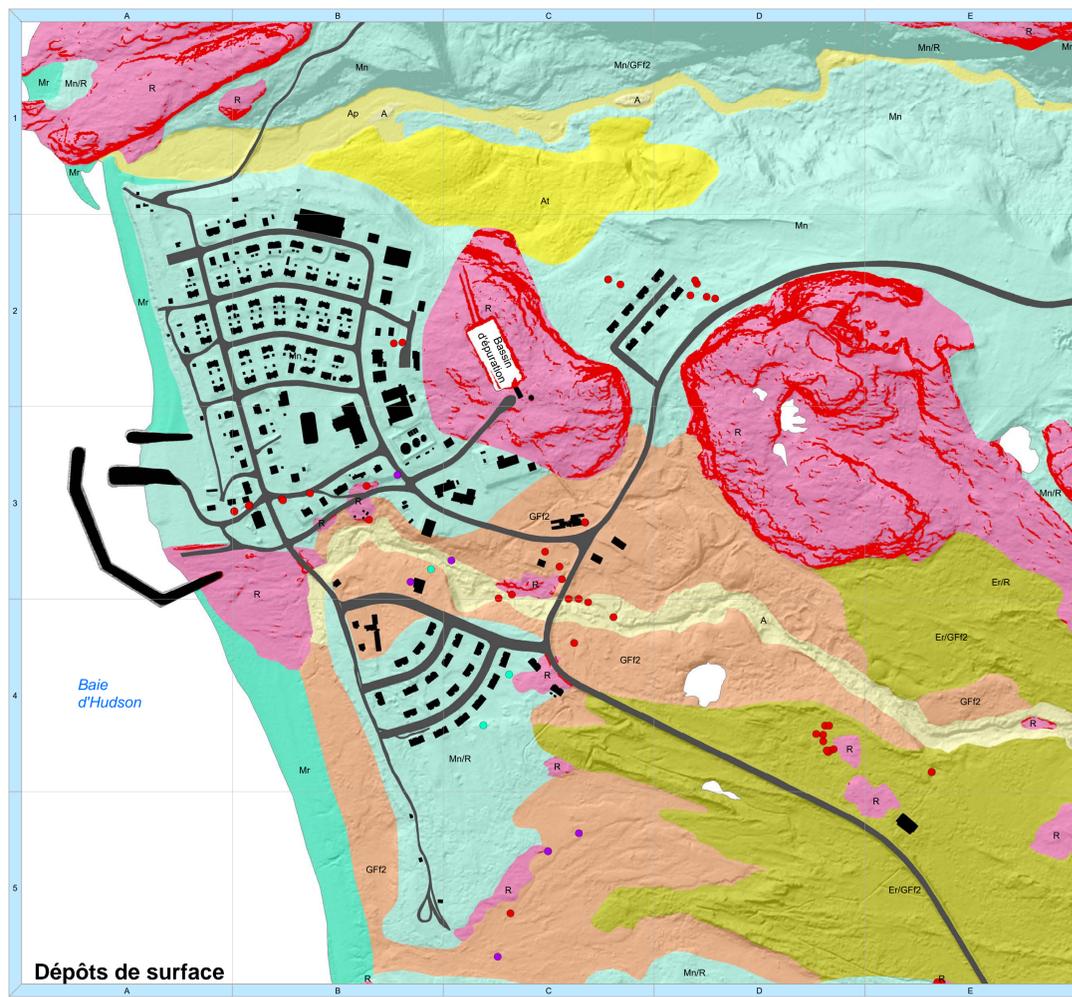


Figure 2 : A) Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station climatique UMIROCA pour la période de 2004 à 2017. Les données 2017 n'étaient pas complètes. B) Direction et vitesse des vents à la station climatique UMIROCA, localisée sur le versant côtier d'Umiujaq, pour la période de 1997 à 2017. C) Normale climatique des précipitations sous forme de pluie (mm) et de neige (cm) pour la période 1981-2010 dans la région d'Umiujaq, calculée à partir de quatre réanalyses (Charon, 2015). D) Température moyenne annuelle de l'air (TMAA) simulée à partir de 10 sorties du modèle MRCCS selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 d'augmentation de gaz à effet de serre pour Umiujaq de 1950 à 2100.



**Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la
communauté d'Umiujaq - Cartes synthèses**

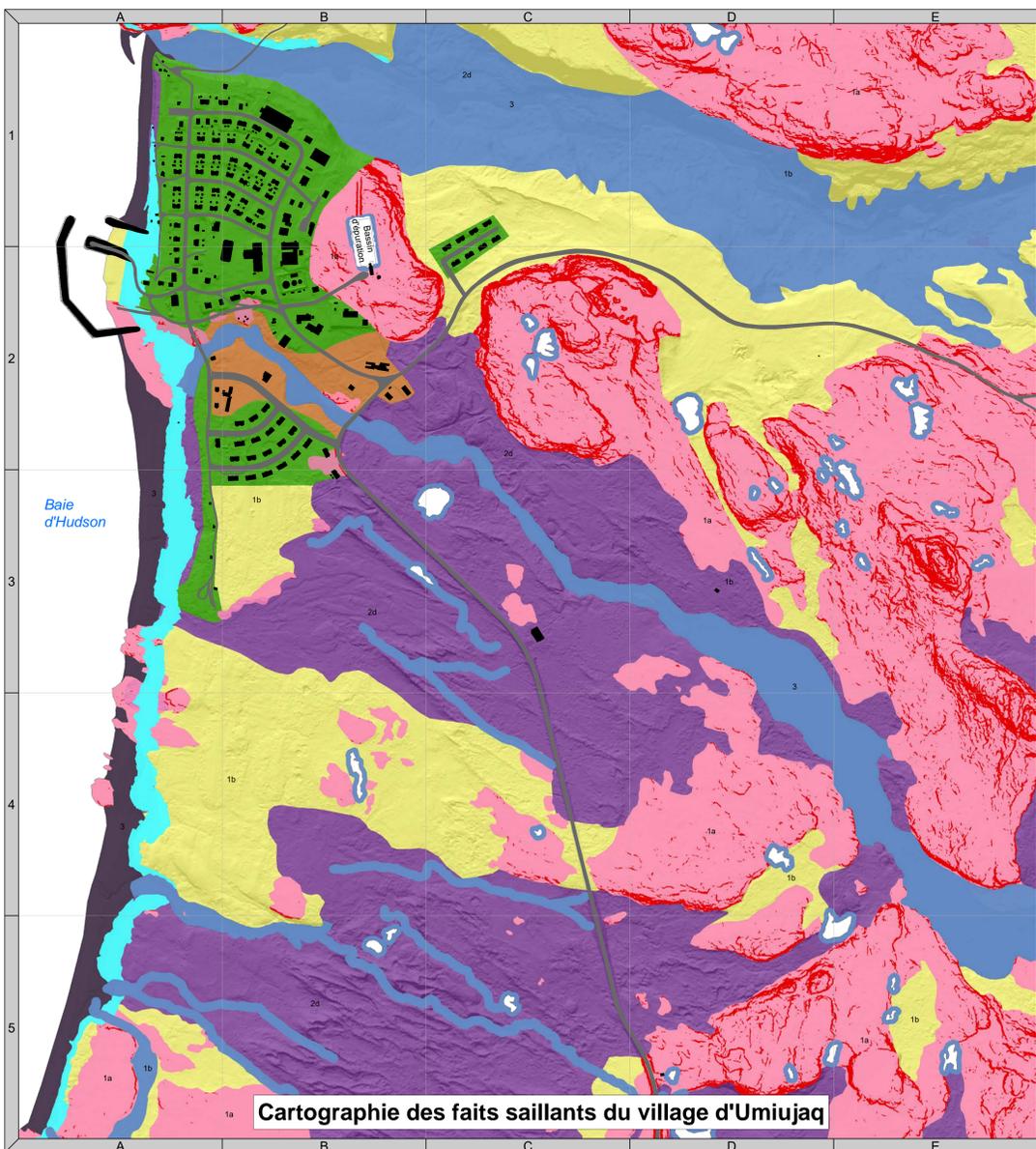


Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la communauté d'Umiujaq - Cartes synthèses

Légende

Cartographie des faits saillants du village d'Umiujaq

Dépôts de surface

- Roc en surface
- Affleurements rocheux en pentes supérieures à 15 degrés

Conditions de pergélisol et aménagement

- Zones de terrain stable construit (Mn, Mn/R)
- Zones de terrain sensible construit
- Zones de terrain sensible non construit
- Contraintes sévères à l'aménagement
- Terrains aménageables, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants ou des investigations supplémentaires et des fondations spécialisées (ex. : pieux)

Aléas naturels actuels et appréhendés

- Crue et inondation
- Submersion côtière

Bassin versant

- Délimitation du bassin versant de la source d'eau potable

Réseau routier et infrastructure

- Bâtiment / infrastructure
- Voie de communication

Bâtiments et voies de communication construits sur un socle instable ou stable au dégel

- Bâtiment construit sur un socle étant sujet à être stable lors du dégel
- Bâtiment construit sur un socle pouvant être instable au dégel
- Route construite sur un sol jugé instable au dégel

Cartographie : A. Chiasson, S. Aubé-Michaud et E. L'Hérault. Orthomosaïque : E. L'Hérault

Les cartes, les graphiques et les tableaux de cette planche synthèse sont des extraits du rapport *Caractérisation géotechnique et cartographie améliorée du pergélisol dans les communautés nordiques du Nunavik : Umiujaq*. Pour plus d'informations, il est recommandé de se référer au rapport.

Faits saillants

- Une fraction importante du village est déjà construite sur du roc ou des sols grossiers minces sur le roc. La possibilité de construire de nouvelles maisons sur un socle stable est élevée.
- La cartographie des dépôts de surface réalisée en 2017, appuyée par une multitude d'observations de terrain et de collecte de données, démontre qu'il y a des terrains propices à la construction à Umiujaq. Les terrains libres et stables sur des dépôts sableux épais et épars, mais surtout sur des affleurements rocheux, parfois recouverts de dépôts sableux minces sont abondants dans la région.
- Les dépôts pouvant contenir de la glace sont associés à l'épandage proglaciaire subaquatique mis en place lors de la déglaciation. Ils sont bien circonscrits cartographiquement dans les limites de la communauté (C3-C5).
- Tant les profils mesurés de température dans le pergélisol (isothermiques), les observations récentes des chercheurs et la simulation numérique indiquent que les plaques de pergélisol discontinu autour d'Umiujaq sont en voie de disparition.

Constats et commentaires

- Plus de 320* bâtiments (en vert) sont construits sur des sols stables au dégel (Mn, Mn/R ou R).
- Une infime fraction des maisons (< 25) (en rouge), cabanons y compris, ont été désignés sensibles à des problèmes et des instabilités reliés au dégel du pergélisol.
- Malgré la présence de sols gélifs au sud de la communauté, il existe un terrain propice à l'expansion urbaine (B4-C4), essentiellement composé de sédiments littoraux et pré-littoraux sur roc, qui s'avère très peu susceptible aux tassements et à la formation de processus thermokarstique par le dégel du pergélisol.
- De surcroît, la superficie du bassin hydrographique de la petite rivière dans laquelle la communauté pompe son eau pour remplir périodiquement (surtout pour l'hiver) son réservoir taillé dans le roc a été tracé sur la carte de stabilité des bâtiments (en tireté bleu). Ce territoire devrait être protégé de toute perturbation anthropique et de toute contamination.

