

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

Quaqtaq

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 : Quaqtq. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 76 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.....	VI
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	VII
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 profondeur de la couche active</i>	38
2.2.3. <i>Projections et simulations</i>	39
3. LE PERGÉLISOL, LES RISQUES NATURELS ET L'AMÉNAGEMENT DE QUAQTAQ.....	42
3.1. CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS GÉOMORPHOLOGIQUES ET DES PROPRIÉTÉS DU PERGÉLISOL.....	43
3.1.1. <i>Carte de la géologie de surface</i>	43
3.1.2. <i>Carte des conditions de pergélisol</i>	43
3.1.3. <i>Carte des aléas naturels</i>	44
3.1.4. <i>Carte de potentiel de construction</i>	45

3.2. RÉGIME THERMIQUE ACTUEL DU PERGÉLISOL ET ANALYSES PRÉDICTIVES EN FONCTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	47
3.2.1. <i>Climat et pergélisol</i>	47
3.2.2. <i>Analyses prédictives du régime thermique du pergélisol (par câbles)</i>	50
3.2.3. <i>Projections et simulations climatiques</i>	53
4. FAITS SAILLANTS	57
RÉFÉRENCES.....	58
GLOSSAIRE	61
ANNEXE.....	62
CARTES DE LA COMMUNAUTÉ.....	63
CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE	64
CARTE DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL	66
CARTE DE POTENTIEL DE CONSTRUCTION	68
CARTE DES ALÉAS NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS.....	70
PLANCHES SYNTHÈSES	72
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ DE QUAQTAQ	73
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ DE QUAQTAQ - CARTES SYNTHÈSES	75

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 observations de terrain réalisées à Quaqtqa à l'été 2014....	42

Figure 17 : Normale climatique des précipitations sous forme de pluie (mm) et de neige (cm) pour la période 1981-2010 dans la région de Quaqtq, calculée à partir de quatre réanalyses (Charron, 2015).	48
Figure 18 : Moyenne horaire de la direction et de la vitesse des vents selon l'échelle de Beaufort pour la période de 2014 à 2015 à la station d'Environnement Canada à Quaqtq	48
Figure 19 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2004 à 2018, b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018 et c) profondeur maximale atteinte par le front de dégel pour la période de 2004 à 2018, enregistré au câble HT-156, dans le sable et gravier littoraux sur roc de l'aéroport de Quaqtq.	49
Figure 20 : 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 Quaqtq de 1950 à 2100.	50
Figure 21 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans des sables et graviers, à l'aéroport de Quaqtq.	52
Figure 22 : 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 QUA-HT-156 de 2018 à 2100.....	53
Figure 23 : 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 QUA-HT-156.....	54
Figure 24 : 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 2009-2010, pour le modèle HT-156.....	55

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 de Quaqtq (Tiré de Aubé-Michaud et al., 2019).	45
Tableau 9 : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station HT-156, localisée dans le terrain naturel à l'aéroport de Quaqtq, pour la période de 2004 à 2018.	47
Tableau 10 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble HT-156, localisé à l'aéroport de Quaqtq.	51

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 Puvirnituq (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, construits 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 Kangiqsujaq, 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, Puvirnituk et de Quaqtak 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, Kangiqsujaq, 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.

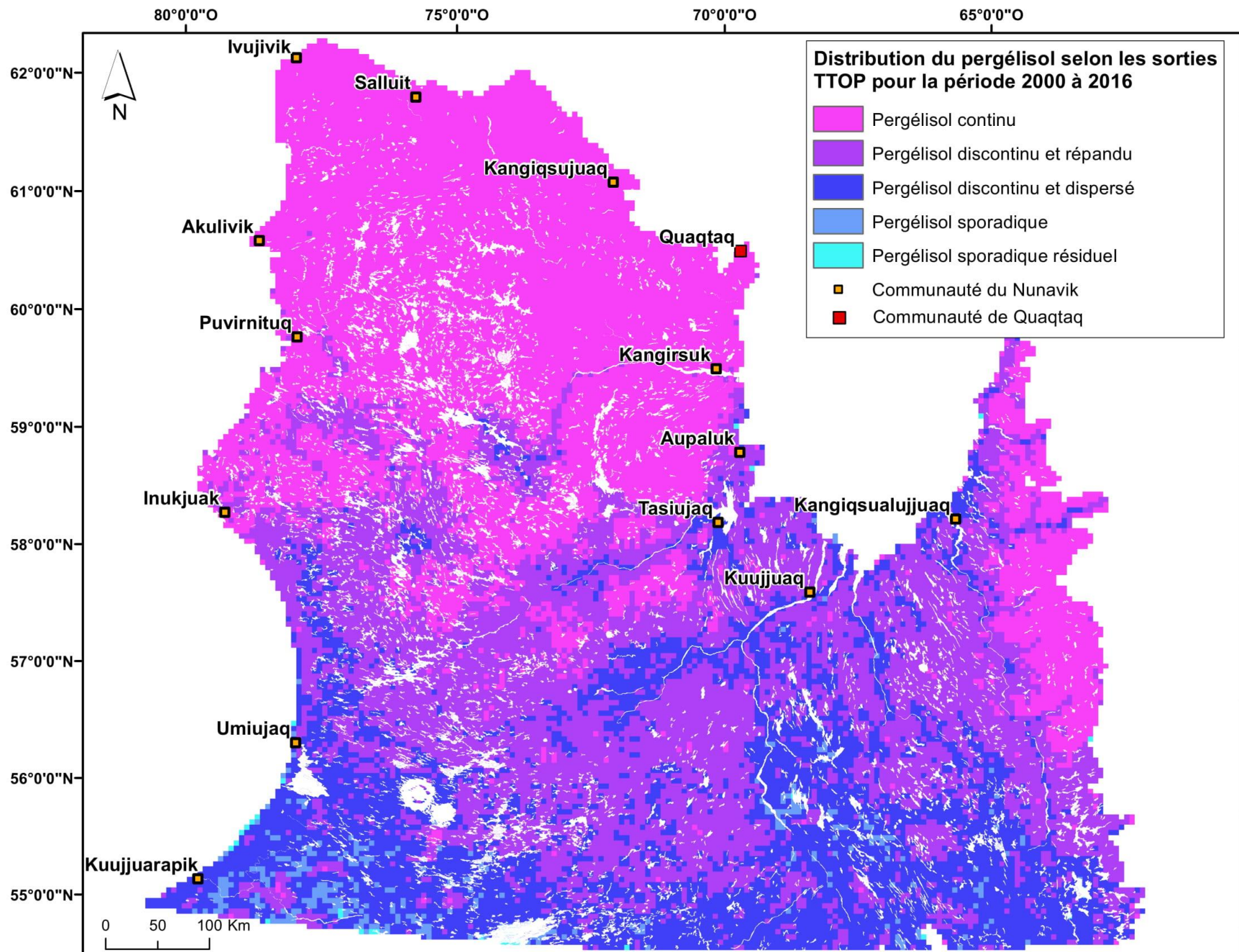


Figure 1 : Carte de distribution du pergélisol et localisation des communautés au Nunavik (modifiée de L'Hérault et Allard, 2018).

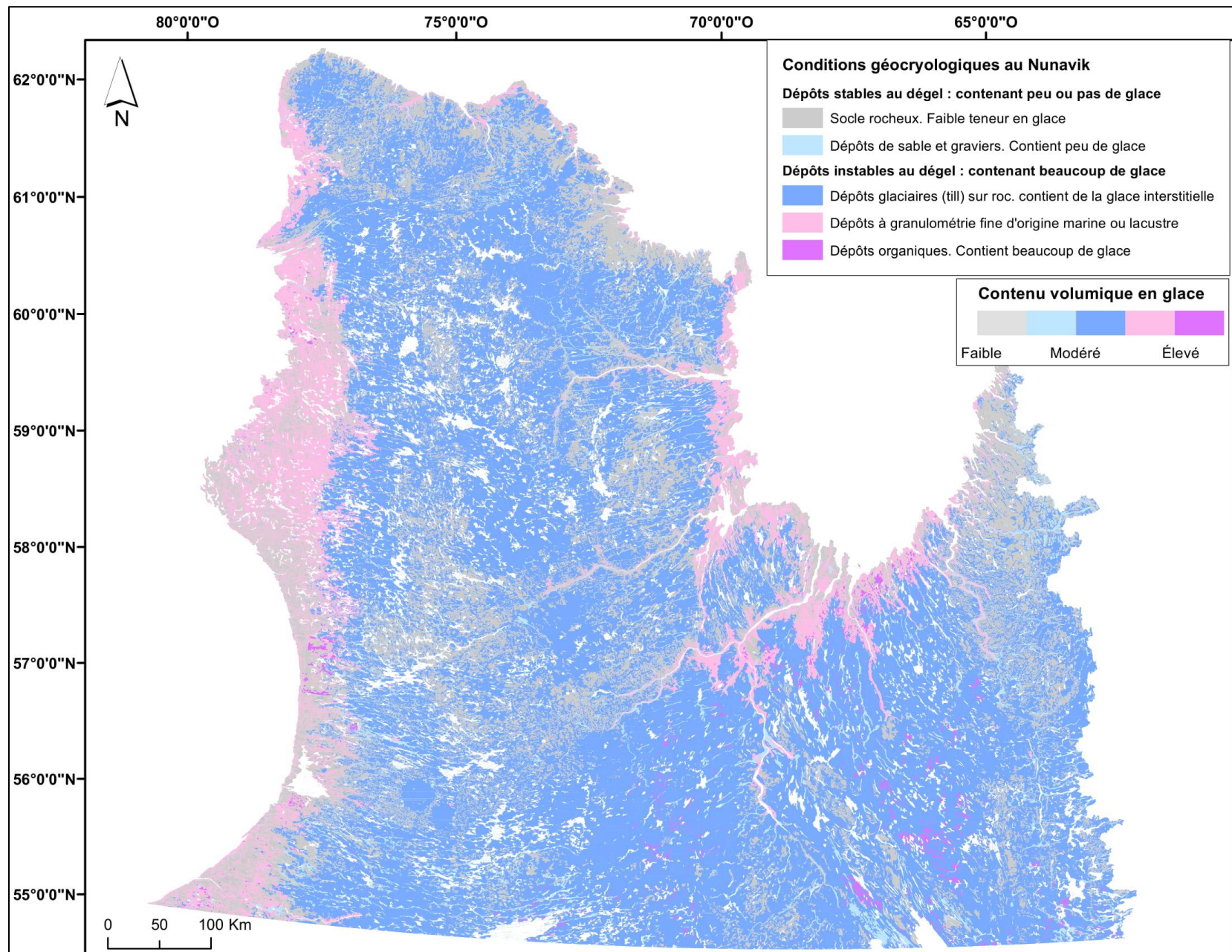


Figure 2 : Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik (adapté de L'Héroult *et al.*, 2017 et L'Héroult et Allard, 2018).

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																							
Tasiujaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer						Orange			Orange																				
Kangiqsujuaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																													
Salluit	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																													
Inukjuak	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																													
Umiujaq	Michel Allard, Emmanuel L'Hérault, Sarah Aubé-Michaud, Marianne Taillefer																													
Calendrier des travaux de terrain 2018																														
Akulivik	Michel Allard, Sarah Aubé-Michaud, Alexandre Chiasson, Samuel Bilodeau																													
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
Kangiqsualujuaq	5	-	-	-	18	5,67	-	23
Tasiujaq	4	-	-	-	13	-	-	17
Kangiqsujuaq	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 tomodynamométrique 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**.

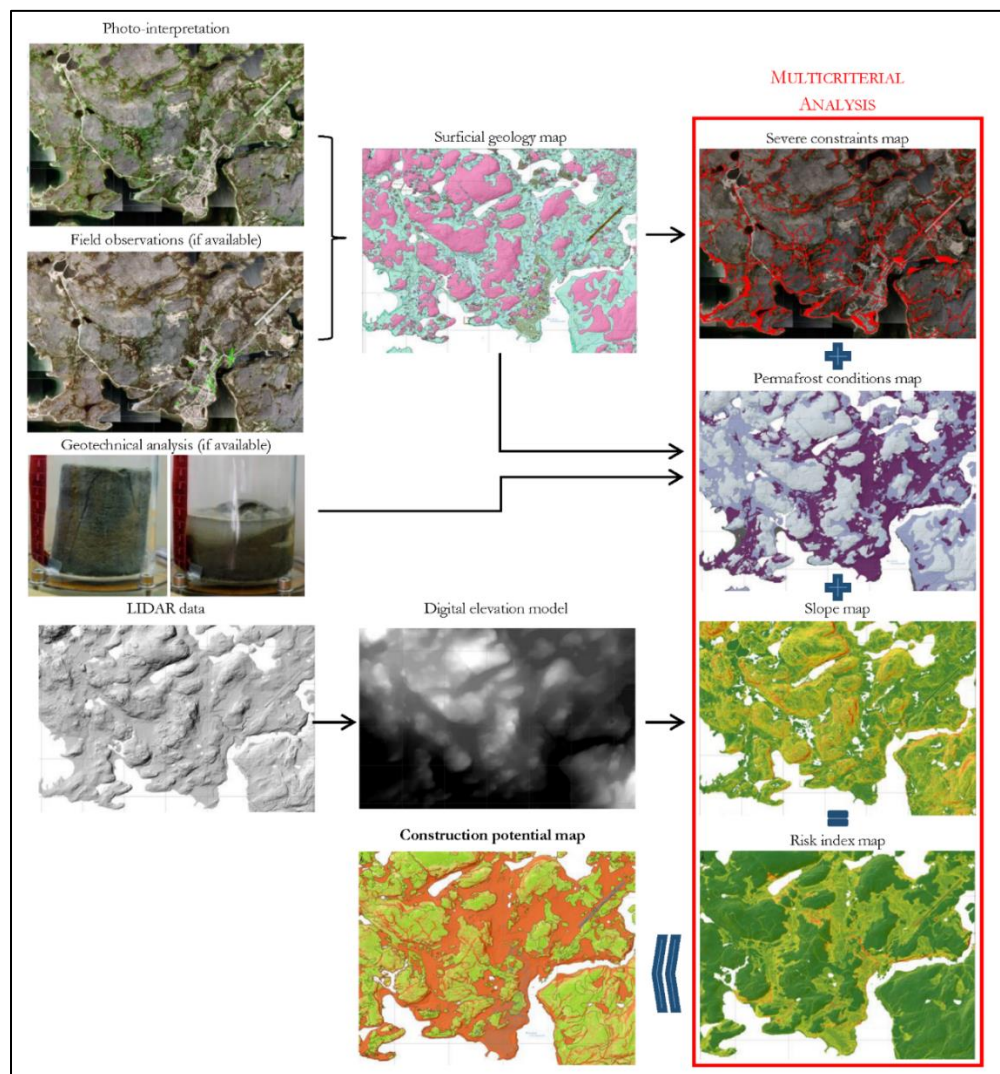


Figure 5 : Diagramme synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées dans l'analyse matricielle en vue de produire des cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes (tirée de L'Hérault *et al.*, 2013).

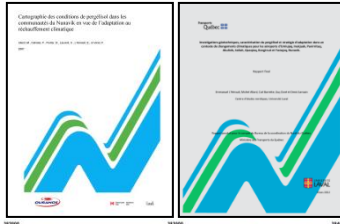
2.1.7. Production des cartes de conditions de pergélisol et de contraintes sévères à l'aménagement

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

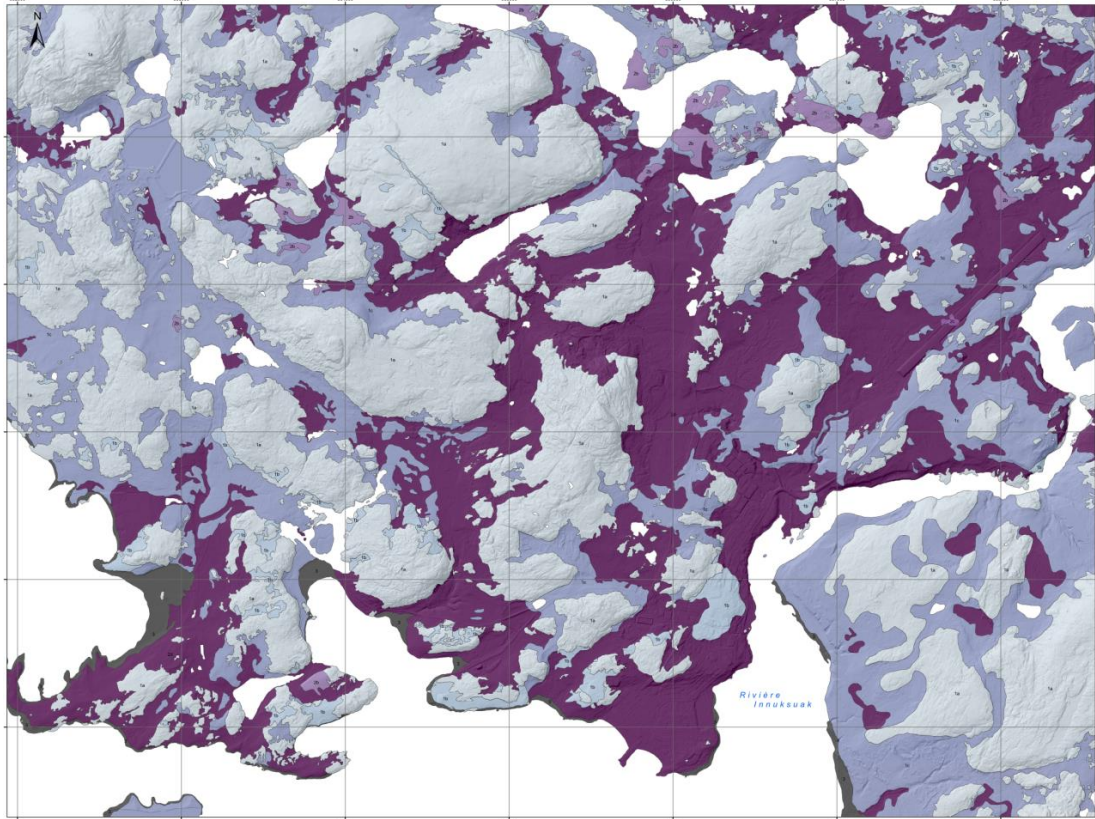
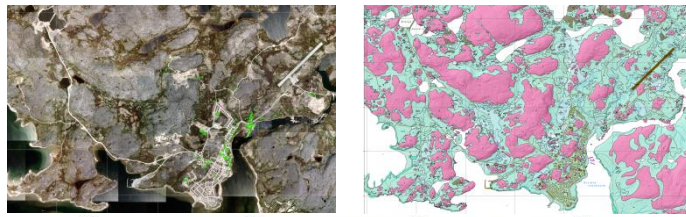
lobes de gélifluxion ou des sols triés. Le recensement par photo-interprétation de mouvements de masse en lien avec les conditions du pergélisol en place a notamment été utilisé pour déterminer ces valeurs de pente critiques (L'Hérault *et al.*, 2013; Carbonneau *et al.*, 2015).

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).

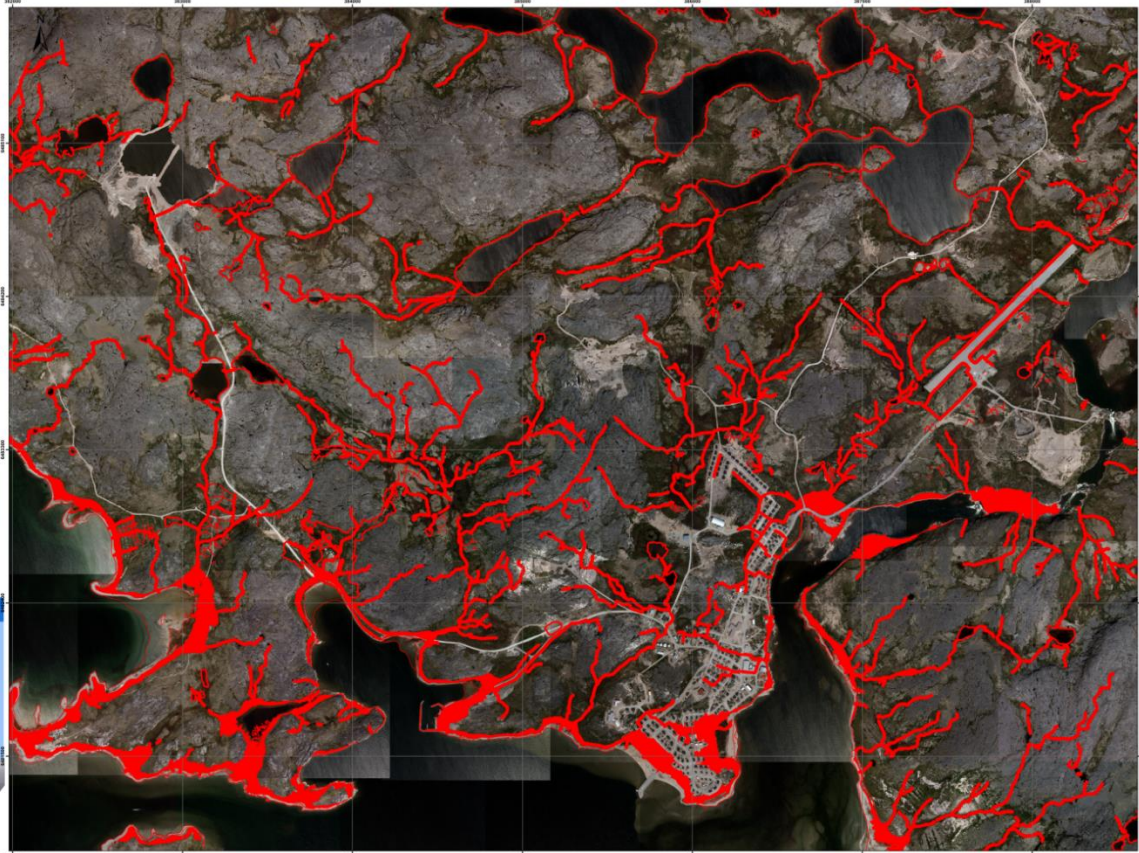


Figure 7 : Carte des contraintes sévères à l'aménagement pour la communauté d'Inukjuak. La couleur rouge identifie les endroits non constructibles, à savoir le littoral marin, les zones intertidales, les plaines alluviales actuelles, les berges de lacs et les ruisseaux.

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'enveloppe 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).

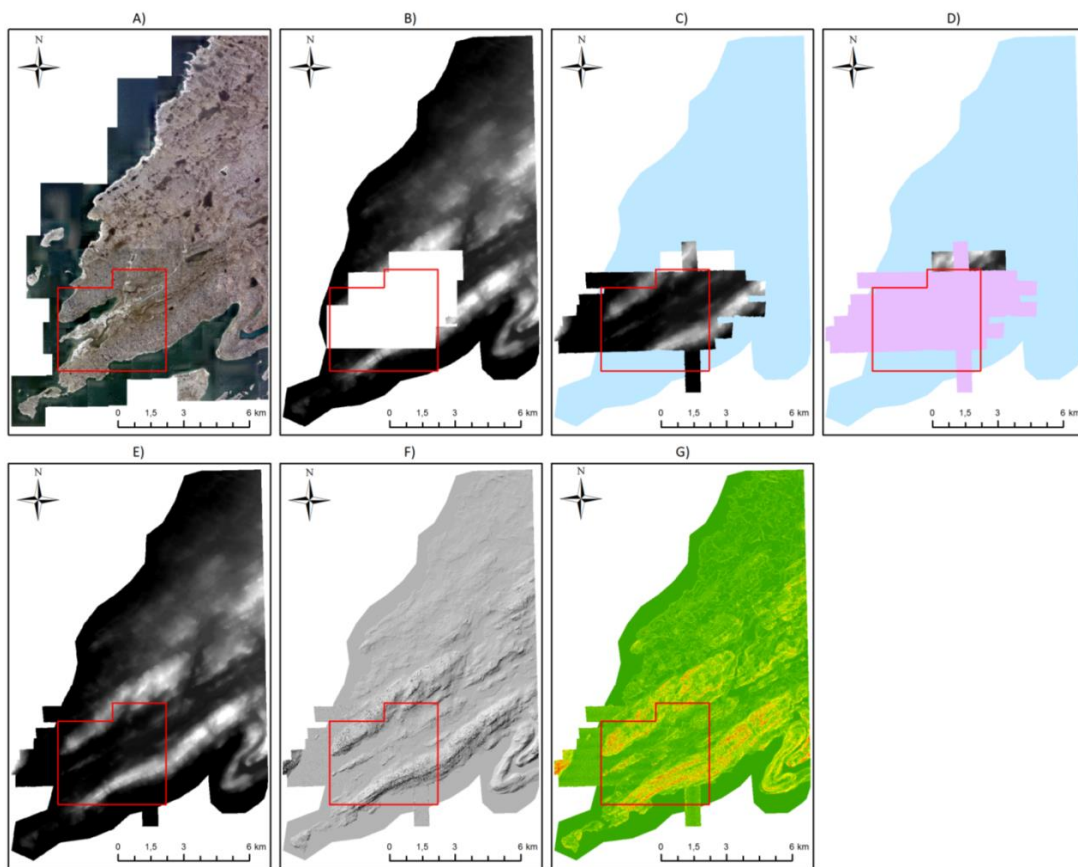


Figure 8 : A) Orthomosaïque générée à partir des photographies aériennes prises en 2010. B) MNE de 2010 de faible résolution (4 m x 4 m) disponible pour la zone en périphérie du milieu bâti. C) Superposition du MNE haute résolution (1 m x 1 m) produit à partir des données LIDAR de 2010 sur le MNE faible 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).

2.1.9. Analyses multicritères et production des cartes indicelles 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 donnée. 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).

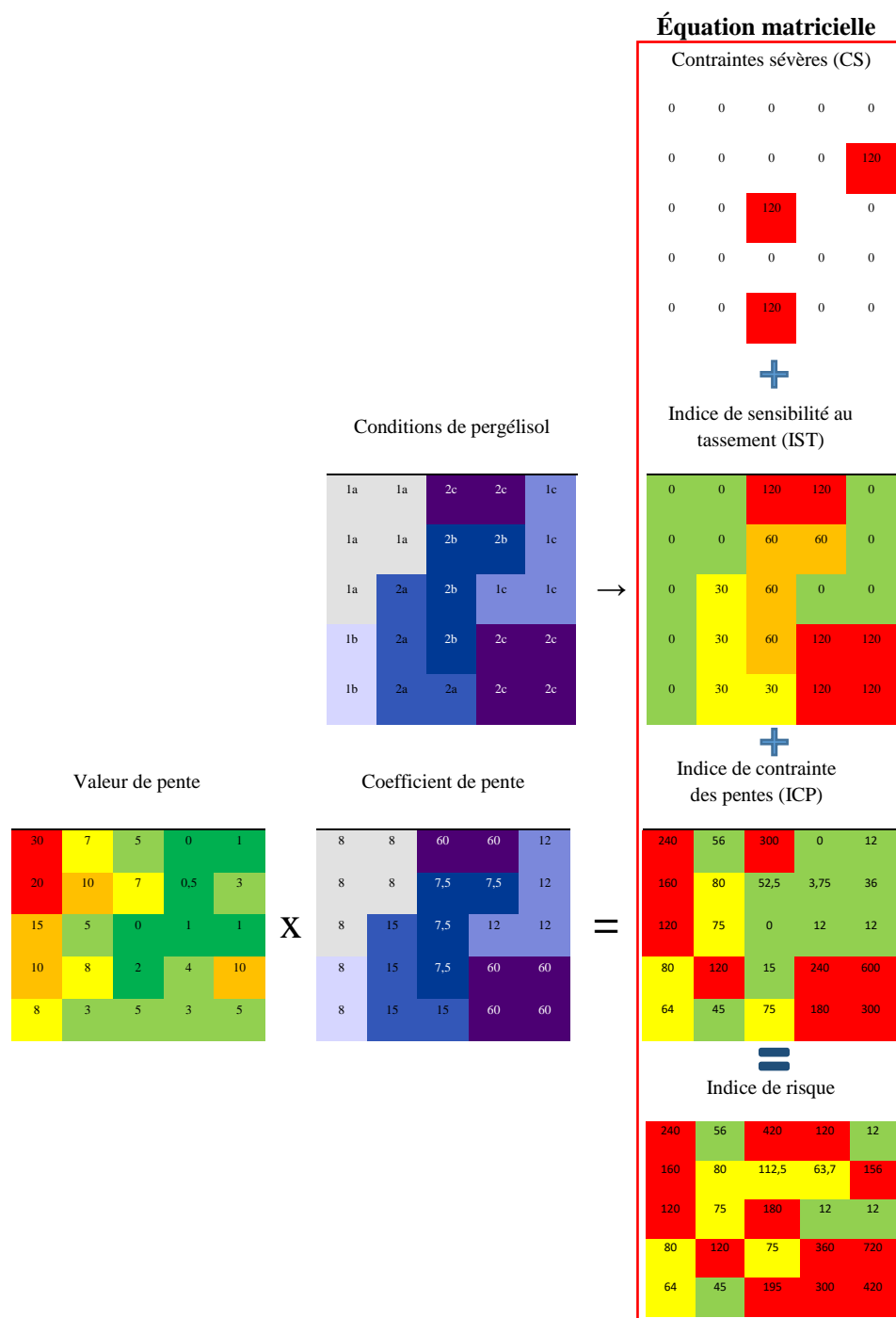


Figure 9 : Structure et pondération de l'information géospatiale à l'intérieur de l'équation matricielle utilisée pour calculer l'indice de risque. Tiré de Carbonneau *et al.* 2015.

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		
<p>R</p> <p>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.</p>	<p><i>1a</i></p> <p>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.</p>	<p>Fondations nordiques de tous types. Des adaptations à la topographie accidentée sont souvent nécessaires.</p>	<p>15° et plus</p>		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°).	
<p>Mn/R</p> <p>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.</p>	<p><i>1b</i></p> <p>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 %.</p>	<p>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).</p>	<p>15° et plus</p>		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°).	
<p>At</p> <p>Gf</p> <p>Gfp</p> <p>Gmf</p> <p>Mn</p> <p>Mnf</p> <p>Ev</p> <p>Dépôts de sable et gravier stratifiés épais. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m.</p>	<p><i>1c</i></p> <p>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.</p>	<p>Fondations nordiques sur radier et chevalets ajustables ou pieux. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier pourraient requièrent des techniques élaborées de protection contre la fonte du pergélisol (ex. : thermosyphons).</p>	<p>10° et plus</p>		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°).	
					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°).	
<p>Tv+R</p> <p>TxR</p> <p>TmR</p> <p>T</p> <p>Tm</p> <p>Tx</p> <p>L/ Mn</p> <p>L/ R</p> <p>O/ Mn</p> <p>O/ R</p> <p>M/ R</p> <p>MhR</p> <p>L</p> <p>O</p> <p>O/ Mb</p> <p>AvM</p> <p>MnM</p> <p>Mit</p> <p>Mb</p> <p>GMd</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p>	<p><i>2a</i></p> <p>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 géelifluxion sur les versants. Matériau sujet au fluage et à des tassements différentiels limités lors de sa fonte en raison de sa faible épaisseur.</p> <p><i>2b</i></p> <p>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 géelifluxion sur les versants. Matériau sujet au fluage et au tassement différentiel lors de sa fonte.</p> <p><i>2c</i></p> <p>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.</p> <p><i>2d</i></p> <p>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.</p>	<p>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).</p> <p>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.</p> <p>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).</p> <p>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.</p>	<p>8° et plus</p> <p>8° et plus</p> <p>2° et plus</p> <p>2° et plus</p>		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°).	
					Terrains aménageables pour la construction, mais requiert la prudence (pente < 8°).	
					Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).	
					Terrains aménageables pour la construction, mais requiert la prudence (pente < 2°).	
					Terrains défavorables à la construction (pente > 2°).	
					Terrains défavorables à la construction.	
					Terrains défavorables à la construction.	
					Terrains défavorables à la construction.	
	Terrains défavorables à la construction.					
CONTRAINTES SEVERES : PROCESSUS PERIGLACIAIRES ET DE VERSANTS DYNAMIQUES, LITTORAUX ET PLAINES ALLUVIALES ACTUELLES						
<p>C</p> <p>Ap</p> <p>Mi</p> <p>Mr</p> <p>Dépôts contemporains soumis à des processus géomorphologiques actuels et dynamiques. Inondations et mouvements de versant (ex. : éboulis).</p> <p>Cicatrices d'ancien glissement, sillons de polygones à coin de glace, buttes saisonnières à noyau de glace, etc.</p>	<p>3</p> <p>Processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles</p>	<p>Terrain problématique à éviter</p>	<p>N.A</p>		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.

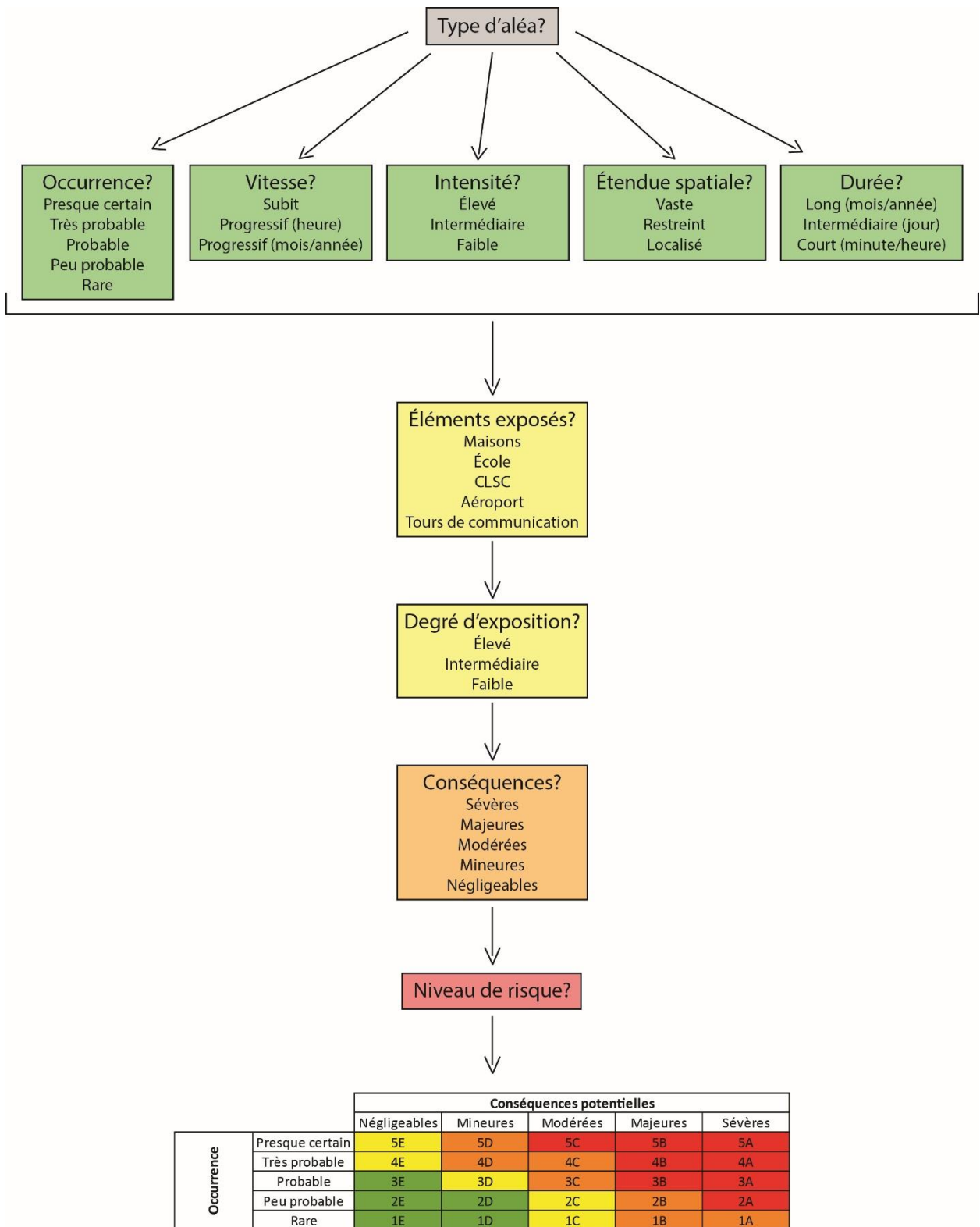


Figure 10 : Détermination du niveau de risque par l'intermédiaire de huit catégories de critères.

		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, Quaataq 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**.

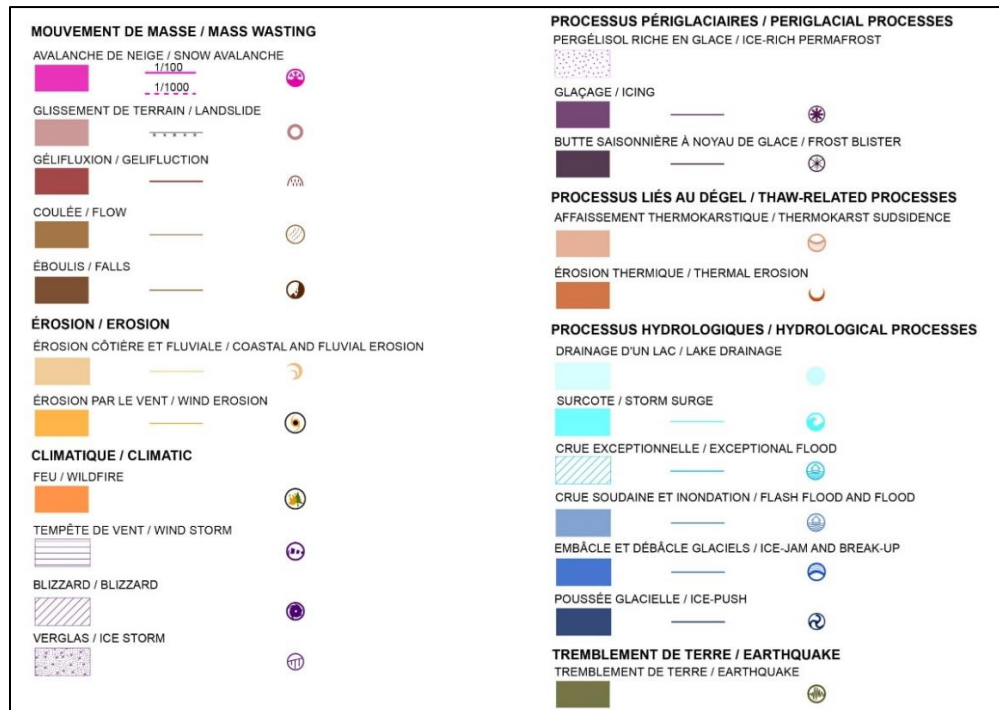


Figure 12 : Légende des cartes des aléas naturels actuels et appréhendés dans les villages du Nunavik.

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 donnée 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 Kangiqsuaq. 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.

2.1.1.1. 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.

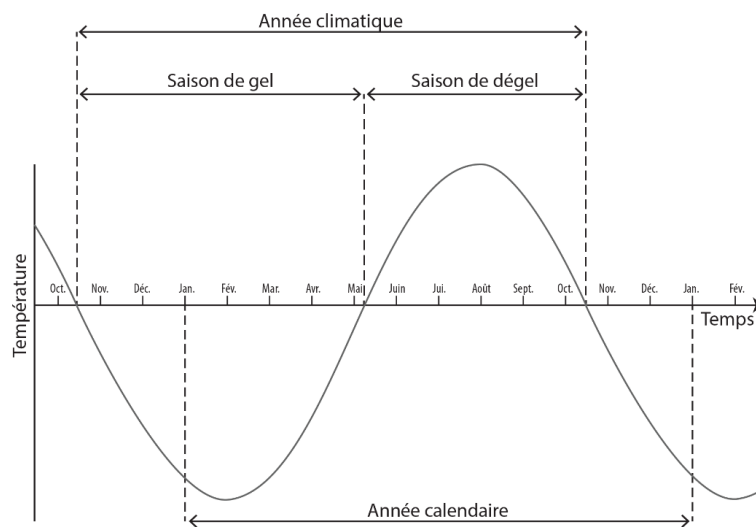


Figure 13 : Comparaison d'une année climatique, formée du couplet des saisons de gel et de dégel, et d'une année calendaire, du 1^{er} janvier au 31 décembre, en fonction du temps (Allard *et al.*, 2018 – adapté de Mathon-Dufour, 2014).

2.2.2. Modélisation géothermique du pergélisol et simulation numérique des variations de profondeur 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) fourni 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

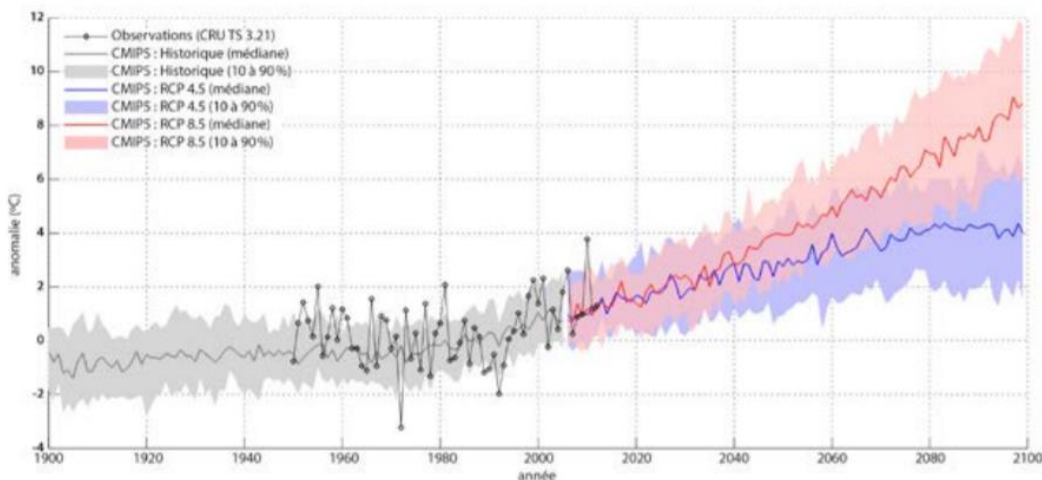


Figure 14 : Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29) pour la sous-région du Nord-du-Québec (tiré de Ouranos, 2015).

La fourchette de prévisions climatiques et la variabilité de chacune permettront 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	<i>GCESS</i>	<i>BNU-ESM</i>	7	<i>IPSL</i>	<i>IPSL- CM5B-LR</i>
		4.5			4.5
		8.5			8.5
2	<i>CCCMA</i>	<i>CanESM2</i>	8	<i>MOHC</i>	<i>HadGEM2</i>
		4.5			4.5
		8.5			8.5
3	<i>CMCC</i>	<i>CMCC- CMS</i>	9	<i>MPI-M</i>	<i>MPI-ESM</i>
		4.5			4.5
		8.5			8.5
4	<i>CSIRO- BOM</i>	<i>ACCESS1.3</i>	10	<i>NCC</i>	<i>NorESM</i>
		4.5			4.5
		8.5			8.5
5	<i>INM</i>	<i>INM-CM4</i>	11	<i>NOAA</i>	<i>GFDL- ESM2M</i>
		4.5			4.5
		8.5			8.5
6	<i>IPSL</i>	<i>IPSL- CM5A-LR</i>			
		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 DE QUAQTAQ

Le village de Quaqtac est localisé sur la rive est de la baie Diana sur une péninsule qui avance dans le détroit d'Hudson ($61^{\circ} 02'55,7''$ N, $69^{\circ} 37'27,7''$ O). En 2016, la population totale était de 403 habitants; elle avait connu une augmentation de 7,2 % par rapport à 2011 ($n = 376$). Le nombre de logements disponibles en 2016 était de 130, dont 30 logements étaient occupés par 5 personnes ou plus. La taille moyenne des ménages privés atteint 3,1 personnes par logement (**Figure 16**).

Entre 2004 et 2018, la température moyenne annuelle climatique oscillait autour de $-5,68^{\circ}\text{C}$. Les précipitations totales annuelles moyennes sont de 602 mm, dont environ la moitié, soit 29,8 cm, tombe sous forme de neige. Le village est construit en zone de pergélisol continu.



Figure 16 : Localisation des observations de terrain réalisées à Quaqtac à l'été 2014.

3.1. Cartographie des conditions géomorphologiques et des propriétés du pergélisol

3.1.1. Carte de la géologie de surface

On distingue à Quaqtq trois grandes unités géologiques de surface : des affleurements rocheux (R), des dépôts littoraux et pré-littoraux le plus souvent très minces (Mn, Mn/R) et un peu de sédiments glaciaires (Tx, Mn/Tx). Les affleurements rocheux, composés de gneiss granitique de la formation géologique de Churchill, sont omniprésents dans l'ensemble du territoire. Le roc est couvert de façon discontinue par des sédiments marins littoraux et pré-littoraux, principalement sur les terrains plats des fonds de vallées. Plusieurs forages effectués lors d'études antérieures dans le secteur de l'aéroport révèlent que l'épaisseur de ces dépôts est seulement de deux à trois mètres. Un dépôt hétérométrique mal trié dans une petite dépression rocheuse, sous des dépôts littoraux, en bordure de la piste d'atterrissage a été interprété comme un till (Tx).

La communauté est majoritairement bâtie sur les sédiments littoraux et pré-littoraux (Mn) déposés sur les terrains plats des fonds de vallées, entre les collines rocheuses à proximité du littoral. Dans la partie la plus ancienne du village, ces dépôts sont bien drainés et composés de sable et gravier brun avec présence de coquilles. Ces dépôts reposent principalement sur le roc (Mn/R), et dans une moindre mesure, sur le till (Mn/Tx) retrouvé le long de la rivière et dans le fond de la vallée (L'Hérault *et al.*, 2012; Carbonneau *et al.*, 2015). Les affleurements rocheux occupent de très grandes superficies dans la région de Quaqtq et leur altitude augmente progressivement vers l'est pour atteindre 80 m.

3.1.2. Carte des conditions de pergélisol

Les zones correspondant aux affleurements rocheux (classe 1a), recouverts par endroits d'une mince couche de sable et gravier (classe 1b) ainsi que les dépôts sableux et graveleux épais (classe 1c) ne sont pas impactés en cas de dégel. Les sédiments littoraux et pré-littoraux constituent un substrat stable au dégel, puisque de manière générale, ils contiennent peu de glace de ségrégation tandis que la glace interstitielle n'excède pas la porosité du sol en raison de leur granulométrie grossière. Ils offrent ainsi une stabilité pour le développement d'infrastructures.

Les dépôts instables au dégel (classe 2b, 2c) sont localisés dans le fond des vallées, dans l'arrière-pays et à proximité de la piste d'atterrissage. En effet, une partie de la piste, près de l'aérogare, repose sur le roc tandis que la moitié sud de la piste repose sur des dépôts meubles. Des parcelles de terrain au sud de la piste ont été catégorisées en 1b représentant des îlots de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.

3.1.3. Carte des aléas naturels

La principale contrainte physique au développement du village de Quaqtq est la présence de plaines alluviales et de milieux humides mal drainés dans les fonds entre les collines rocheuses. Déjà mal drainés, ces terrains sont à risque d'être inondés lors d'une crue printanière en raison d'une pluie abondante et/ou de la fonte rapide du couvert neigeux. La plaine alluviale bordant le ruisseau Imirtaviup est à risque d'être inondée. Ce processus hydrologique d'étendue spatiale restreinte a une intensité faible et peu d'infrastructures seraient touchées. Le niveau de risque d'inondation dans le milieu bâti est donc estimé bas (2E) (**Tableau 8**).

Les berges qui longent le ruisseau Imirtaviup, particulièrement celles à proximité du pont principal du village, sont à risque d'érosion (3D). En période de redoux, le littoral et les infrastructures maritimes sont à risque de subir des poussées glacielles. Le niveau de probabilité d'occurrence de poussées glacielles sur le littoral de Quaqtq est probable et ses conséquences seraient modérées. Le niveau de risque de cet aléa est donc estimé élevé (3C).

Comme ce fut le cas en octobre 2010, la zone littorale est à risque d'être exposée à des surcotes en cas de conditions climatiques extrêmes. Toutefois, les infrastructures sont en dehors de la zone balayée par une surcote (Massé et Gallant, 2016; Boisson, 2019). Ses conséquences potentielles sont alors négligeables. Le risque est donc estimé modéré (3E).

Certains secteurs de Quaqtq sont exposés à des risques d'avalanches de neige sèche. Elles sont spatialement localisées au nord du CLSC et de l'ancienne Coop. Seulement deux cabanons sont susceptibles d'être touchés par des avalanches. La probabilité d'occurrence de cet aléa est probable et ses conséquences sont modérées. Le niveau de risque d'avalanche de neige sèche à Quaqtq est donc estimé élevé (3C). De plus, quelques versants sont sujets à des éboulements rocheux. Ce type de mouvements de masse est localisé hors du milieu bâti, mais la probabilité d'occurrence de cet aléa est probable. Le niveau de risque d'éboulement rocheux sur le territoire de Quaqtq est donc estimé modéré (3D).

Au sud-est de la communauté, derrière l'ancien bâtiment de la Coop, un glaçage causé par le suintement d'eau de ruissellement a été observé. Ce secteur ne semble pas à première vue particulièrement mal drainé en été. Des observations effectuées en hiver par Allard montrent qu'une vaste congère de plusieurs mètres d'épaisseur s'accumule dans ce secteur entre le bâtiment et le versant rocheux abrupt derrière. Dans ces conditions, le sol en dessous ne peut geler et la présence d'un talik est assumée. En hiver l'eau contenue dans ce talik mise sous pression suinte sous les bâtiments et dans la rue. Il n'existe pas de moyen de stopper ce processus. L'observation de buttes saisonnières à noyau de glace dans la vallée au de là de l'extrémité sud de la piste d'atterrissage indique la présence d'un écoulement d'eau dans la couche active en hiver avec une pression suffisante pour percer

en surface. Par ailleurs, cette zone est aussi susceptible aux inondations. Ces processus reliés à l'hydrologie du pergélisol sont à considérer lors de l'expansion de la communauté sur le territoire, malgré leur niveau de risque estimé modéré (5E). Il est préférable d'éviter toute construction sur ces terrains mal drainés en été, sujets à des suintements hivernaux et pouvant être inondés en été.

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

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

3.1.4. Carte de potentiel de construction

La carte de potentiel de construction présentée en annexe souligne la présence de plusieurs secteurs stables au dégel et dotés d'une excellente capacité de support à Quaqtac. Hormis les secteurs de dépôts marins mal drainés qui tapissent le fond des vallées, les zones correspondant aux affleurements rocheux (classe 1a), aux endroits recouverts d'un dépôt sableux et graveleux (classe 1b), et aux dépôts marins sableux épais bien drainés (1c), sont des terrains propices à la construction. L'abondance du substrat rocheux et de vastes superficies en pente faible offrent la possibilité d'utiliser tous les types de fondations. Par exemple, l'assise rocheuse au sud de l'hôtel Coop fournit un grand terrain adéquat à l'implantation d'infrastructures. Toutefois, comme les ressources granulaires sont pratiquement épuisées dans les environs de Quaqtac, il serait préférable d'opter pour des

fondations sur pieux forés à quelques mètres de profondeur dans le roc, qui ont l'avantage de réduire la quantité nécessaire de ressources granulaires de remblayage. Des fondations sur semelles de béton seraient aussi envisageables sur le roc.

Au nord de l'aréna, la vallée offre également des terrains favorables à l'expansion du village (classe 1a, 1b). Cependant, des fentes de gel, avec présence probable de coins de glace, ont été cartographiées au nord de la vallée. D'autres analyses géotechniques devraient être envisagées afin de connaître la teneur en glace de ces dépôts.

Concernant les bâtiments, environ 280 sont sur des terrains stables au dégel, alors que près de 14 bâtiments sont construits sur un sol de classe 2b ou 2d, c'est-à-dire sensibles au dégel. Par exemple, les réservoirs de carburant sont localisés sur un dépôt de sable et gravier recouvrant un dépôt de till (Mn/Tx) (classe 2b). Ces types de terrain sont à risque de tassements différentiels en cas de dégel. Il est à noter que les fondations d'un même bâtiment peuvent se trouver en partie sur un sol stable, potentiellement stable et instable. De ce fait, une partie d'une maison peut se trouver sur un sol sensible au dégel du pergélisol alors que l'autre moitié peut être construite sur un sol stable

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

3.2.1. Climat et pergélisol

Les températures annuelles et saisonnières, ainsi que les indices de gel et de dégel sont présentées au **tableau 9**, pour la période comprise entre 2004 et 2018. La température moyenne annuelle pour cette période est de -5,68 °C. Les deux années les plus chaudes sont l'année 2009-2010 (-3,1 °C) et l'année 2005-2006 (-4,24 °C). À l'inverse, les années les plus froides sont l'année 2014-2015 (-7,84 °C) et l'année 2017-2018 (-7,07 °C). Les mois les plus pluvieux sont août et septembre avec plus de 66 mm de précipitations (**Figure 17**).

L'intensité et la direction des vents pour la période de 2014 à 2015 sont présentées à la **figure 18**. Pour cette période, les vents dominants soufflaient du nord-ouest à des vitesses pouvant atteindre 88 km/h.

Température de l'air : principaux indices climatiques

Tableau 9 : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station HT-156, localisée dans le terrain naturel à l'aéroport de Quaqaq, pour la période de 2004 à 2018.

Année climatique		2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012
Saison gel	Début	29-oct	28-oct	23-oct	18-oct	13-oct	13-oct	02-nov	08-oct
	Fin	17-mai	26-mai	02-juin	15-mai	02-juin	24-mai	31-mai	31-mai
	Durée	200	210	222	210	232	223	210	236
	Moyenne T°C	-14.28	-10.94	-10.89	-14.61	-12.52	-9.24	-11.20	-11.10
	Indice de gel (FI)	-2873	-2320	-2431	-3084	2927	2074	2374	2647
Saison dégel	Début	18-mai	27-mai	03-juin	16-mai	03-juin	25-mai	01-juin	01-juin
	Fin	27-oct	22-oct	17-oct	12-oct	12-oct	01-nov	07-oct	06-oct
	Durée	162	148	136	149	131	160	128	127
	Moyenne T°C	4.47	5.25	4.88	4.68	4.45	5.43	4.89	6.23
	Indice de dégel (TI)	738	786	674	706	594	876	634	800
Moyenne année climatique		-5.88	-4.24	-4.89	-6.60	-6.38	-3.10	-5.10	-5.02
Ratio (FI/TI)		3.89	2.95	3.61	4.37	4.93	2.37	3.74	3.31

Année climatique		2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	Moyenne
Saison gel	Début	07-oct	22-oct	12-oct	08-oct	07-oct	17-oct	17-oct
	Fin	05-juin	17-mai	01-juin	05-juin	25-mai	12-juin	28-mai
	Durée	241	207	232	241	230	238	229
	Moyenne T°C	-10.52	-14.93	-14.29	-12.18	-11.83	-12.55	-12.03
	Indice de gel (FI)	2555	3107	3337	2956	2741	3004	2772
Saison dégel	Début	06-juin	18-mai	02-juin	06-juin	26-mai	13-juin	29-mai
	Fin	21-oct	11-oct	07-oct	06-oct	16-oct	n.d.	15-oct
	Durée	137	146	127	122	143	n.d.	136
	Moyenne T°C	4.17	5.03	3.91	5.15	4.75	4.73	4.89
	Indice de dégel (TI)	581	753	507	636	685	527	674
Moyenne année climatique		-5.18	-6.67	-7.84	-6.34	-5.46	-7.07	-5.68
Ratio (FI/TI)		4.40	4.13	6.58	4.65	4.00	5.70	4.23

Précipitations

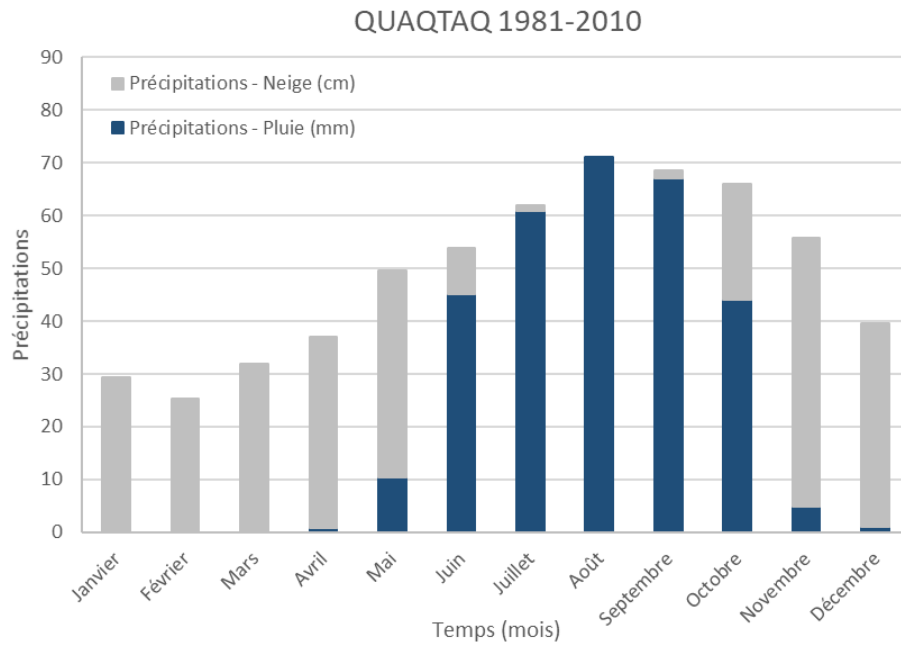


Figure 17 : Normale climatique des précipitations sous forme de pluie (mm) et de neige (cm) pour la période 1981-2010 dans la région de Quaqtaq, calculée à partir de quatre réanalyses (Charron, 2015).

Régime éolien

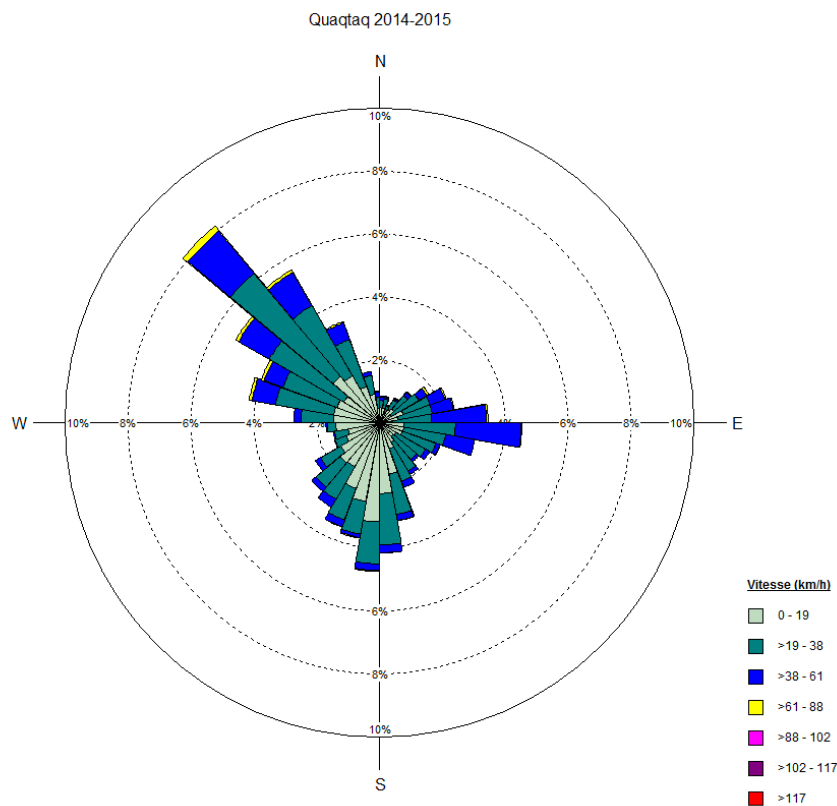


Figure 18 : Moyenne horaire de la direction et de la vitesse des vents selon l'échelle de Beaufort pour la période de 2014 à 2015 à la station d'Environnement Canada à Quaqtaq

Régime thermique dans le sable et gravier littoral sur roc (Mn/R)

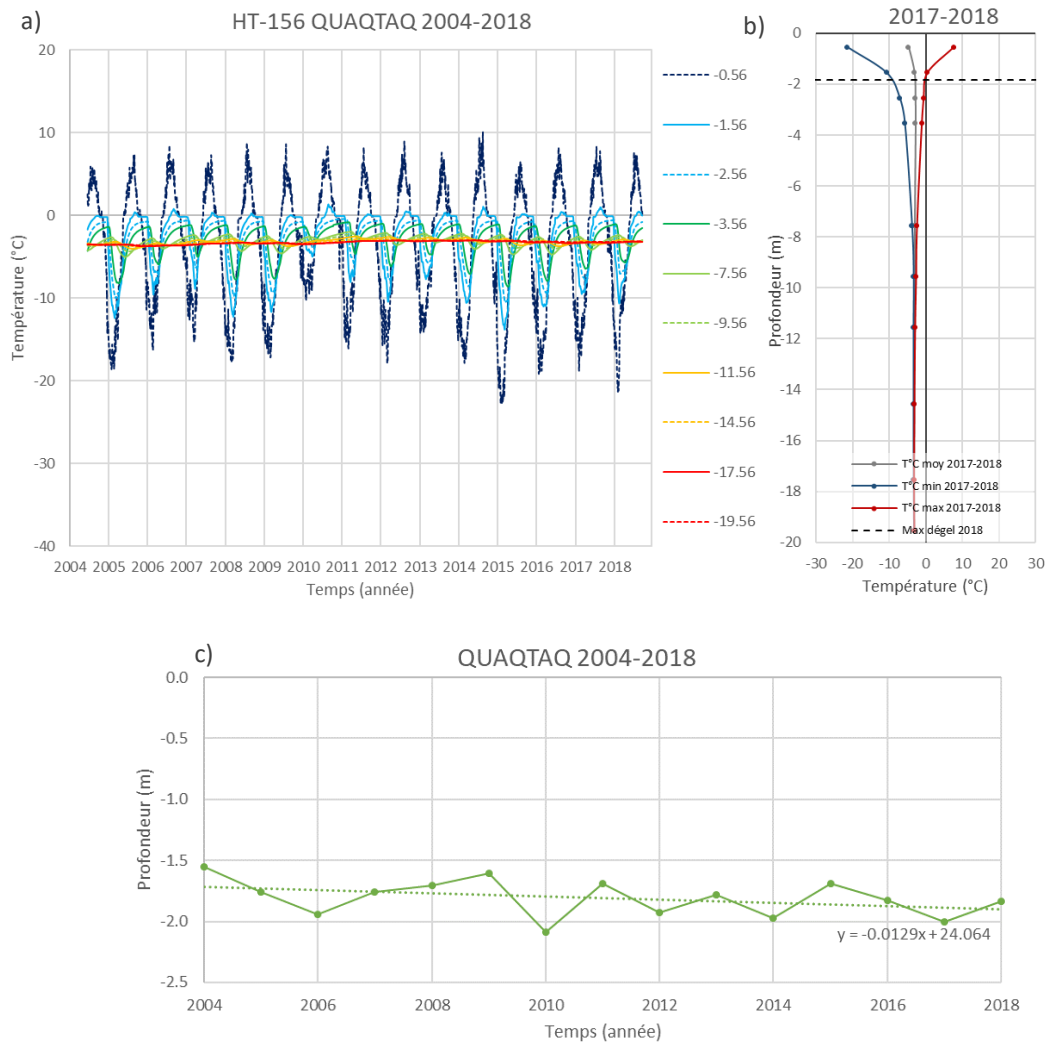


Figure 19 : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2004 à 2018, b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018 et c) profondeur maximale atteinte par le front de dégel pour la période de 2004 à 2018, enregistré au câble HT-156, dans le sable et gravier littoraux sur roc de l'aéroport de Quaqtaq.

La **figure 19** illustre dans un premier temps l'évolution des températures du sol de 2004 à 2018 (**Figure 19a**), accompagné d'un diagramme trompette pour l'année 2017-2018 (**19 b**). La **figure 19c** illustre les variations d'épaisseur de la couche active dans un dépôt de sable et gravier sur roc (HT-156) à proximité de l'aéroport de Quaqtaq. Depuis l'année d'acquisition des données en 2004, on constate que la profondeur maximale atteinte par le front de dégel s'est légèrement accrue en réponse aux changements climatiques. Depuis 2010, la couche active oscille entre 1,75 et 2 m de profondeur.

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

Températures historiques et simulées pour le village

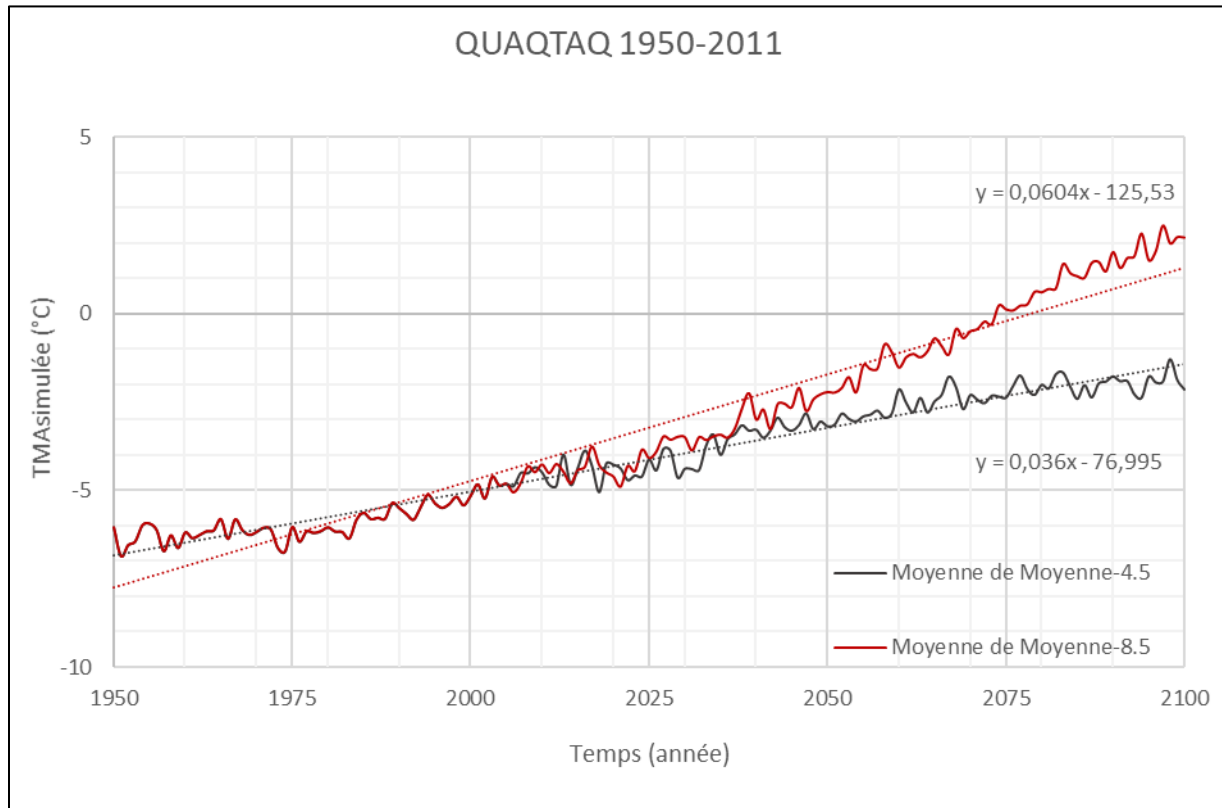


Figure 20 : Température moyenne annuelle de l'air (TMAA) simulée à partir de 10 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5 d'augmentation de gaz à effet de serre pour Quaqtac de 1950 à 2100.

Les projections climatiques selon un scénario moyen pour Quaqtac suggèrent une augmentation de 1 °C d'ici 2050 pour le RCP 4.5. Une augmentation de la température annuelle moyenne de 2,25 °C serait à prévoir d'ici 2100. Advenant la réalisation d'un tel scénario, la température annuelle moyenne de Quaqtac serait alors de l'ordre de -2 °C. La région serait alors en zone climatique typique du pergélisol discontinu et les zones de sédiments littoraux et pré-littoraux faibles en glace seraient possiblement dégelées. Dans le cas du scénario 8.5 moyen, le réchauffement serait plus important, soit de 2 °C d'ici 2050, et de près de 6,5 °C d'ici 2100. Dans un tel cas, la température moyenne annuelle de Quaqtac serait au-dessus du point de congélation à partir de 2075 (**Figure 20**).

Calibration du modèle

Ce modèle du régime thermique du pergélisol utilise la stratigraphie et les propriétés géotechniques de l'environnement du câble à thermistances HT-156, situé en terrain naturel, à proximité de l'aéroport, pour définir les propriétés thermiques du sol (L'Hérault *et al.*, 2012). Les données climatiques pour la période de 2004 à 2018 ont été utilisées pour créer et calibrer le modèle. La calibration du modèle a été réalisée à l'aide des températures enregistrées par le câble à thermistances (**Figure 21**; **Tableau 10**).

Tableau 10 : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble HT-156, localisé à l'aéroport de Quaqaq.

HT-156 Aéroport de Quaqaq, terrain naturel						
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 1,56	Sable et gravier	2550	2350	120	140	0,01
1,56 à 3,56	Sable et gravier (riche en glace)	2350	2400	120	140	0,95
3,56 à 5	Sable et gravier (pergélisol)	1900	2000	170	160	0,08
5 à 150	Roc	1000	1000	200	200	0

Modèle unidimensionnel HT-156 : Sable et gravier littoral, sur roc

Les scénarios RCP 4.5 minimum, 4,5 moyen et 8.5 minimum prévoient une stabilité dans la profondeur de la couche active d'ici 2100. Associée à la forte teneur en eau des sols dans les sols grossiers des dépressions situées au plafond du pergélisol (entre 1,56 et 3,56 m), la haute teneur en glace des premiers mètres du pergélisol explique la stabilité des températures du sol à une profondeur avoisinant 2 m. Le scénario RCP 8.5 moyen prévoit un approfondissement progressif de la couche active de 2070 à 2085, après quoi l'approfondissement de la couche active devrait s'accélérer pour atteindre plus de 18 mètres autour de 2090. Les scénarios RCP 4.5 maximum et 8.5 maximum prévoient la disparition du pergélisol dès la décennie 2020 (**Figures 22-23**).

Modèle HT-156

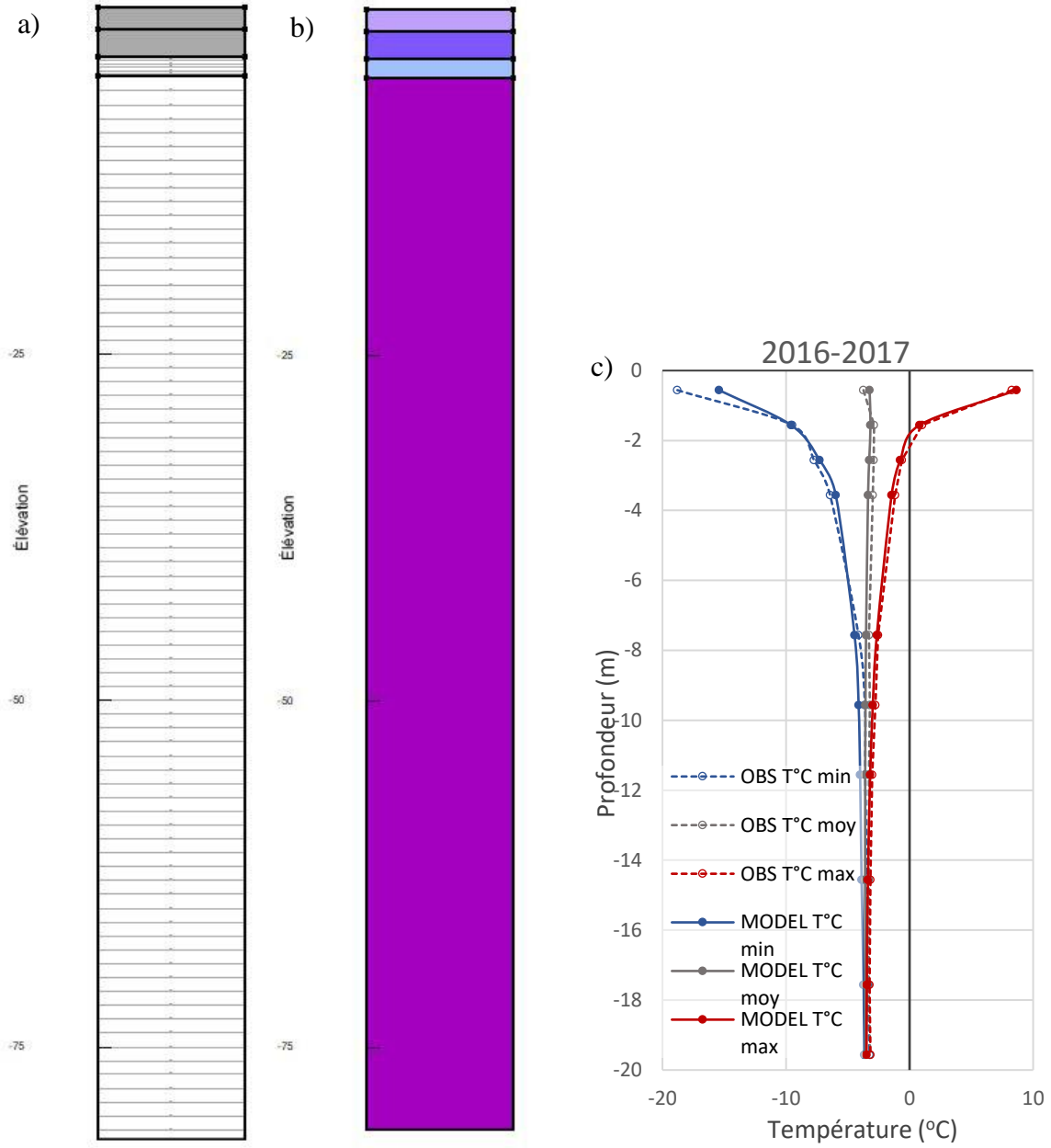
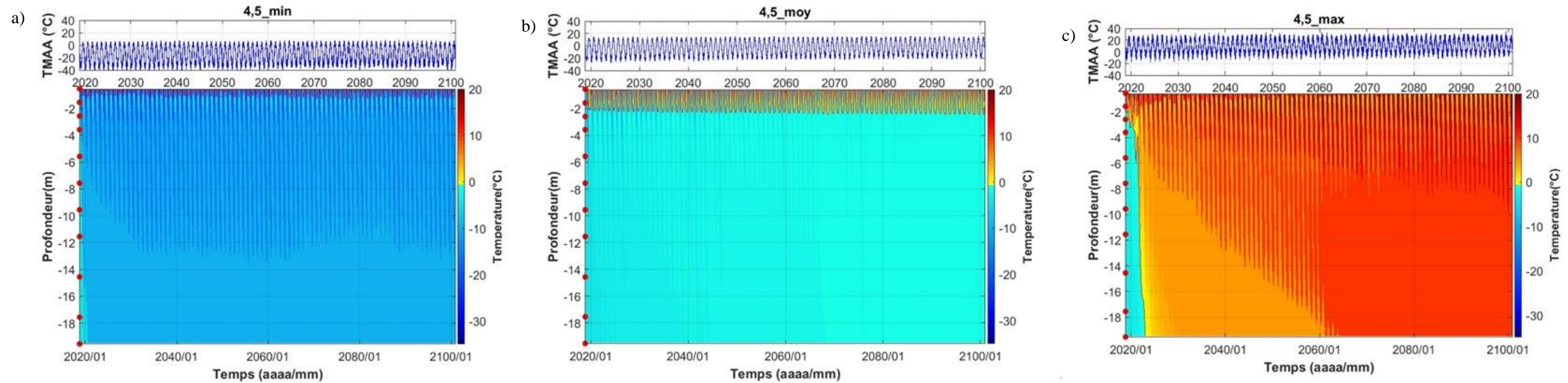


Figure 21 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) propriétés géothermiques du modèle théorique, localisé dans des sables et graviers, à l'aéroport de Quaqtaq.

3.2.3. Projections et simulations climatiques

Modèle HT-156

Scénario RCP 4.5



Scénario RCP 8.5

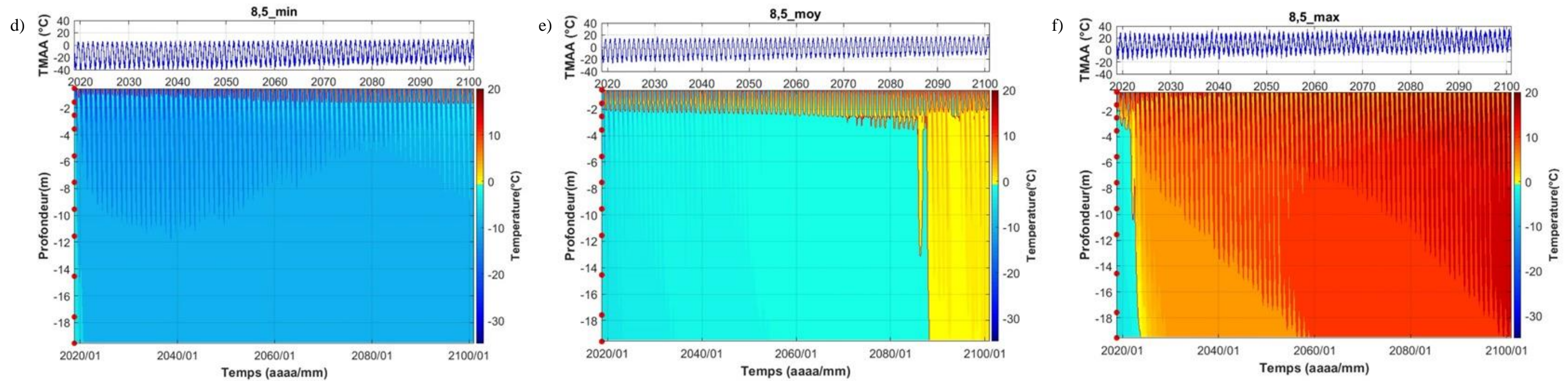
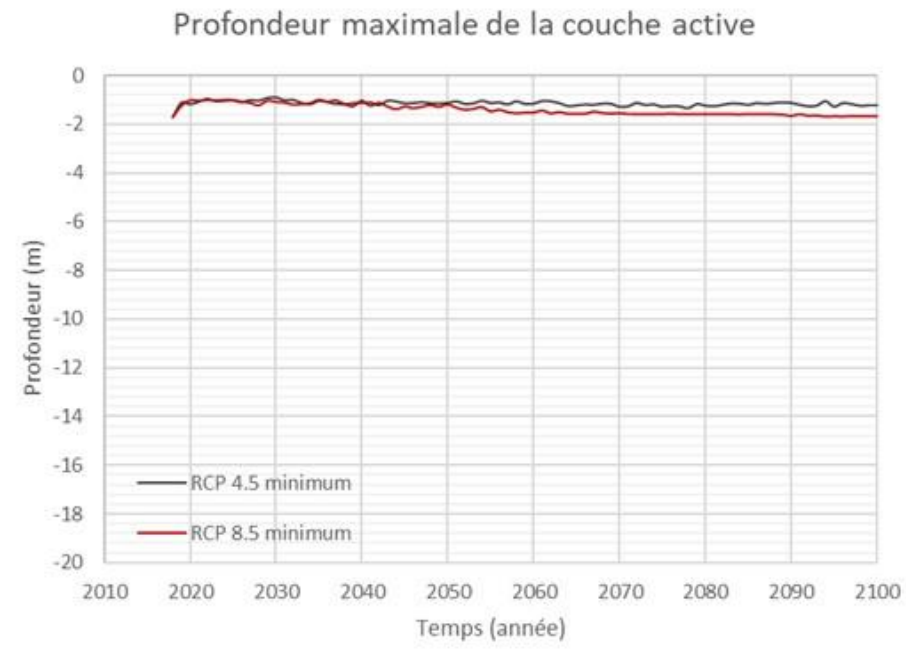


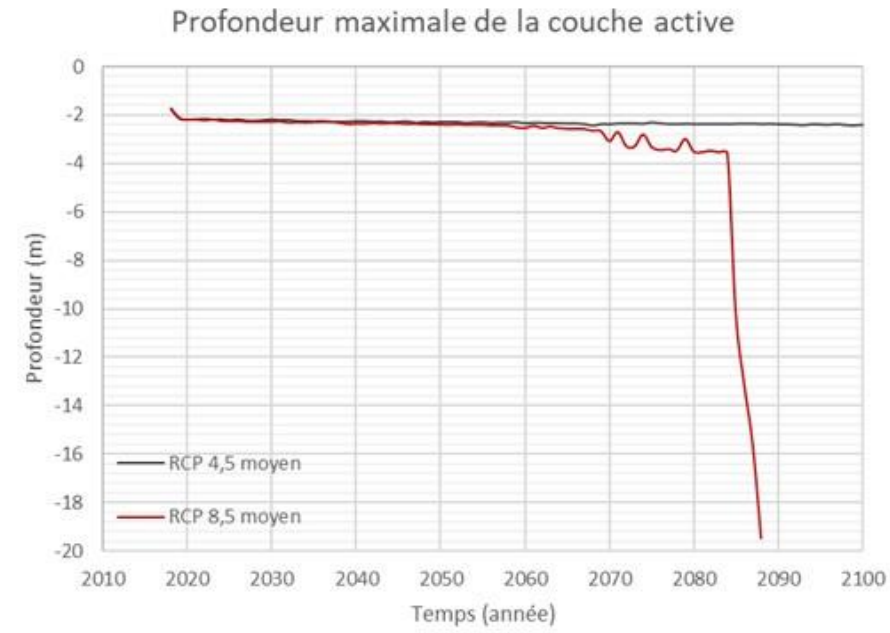
Figure 22 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4,5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4,5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8,5 minimum d'augmentation 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 QUA-HT-156 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

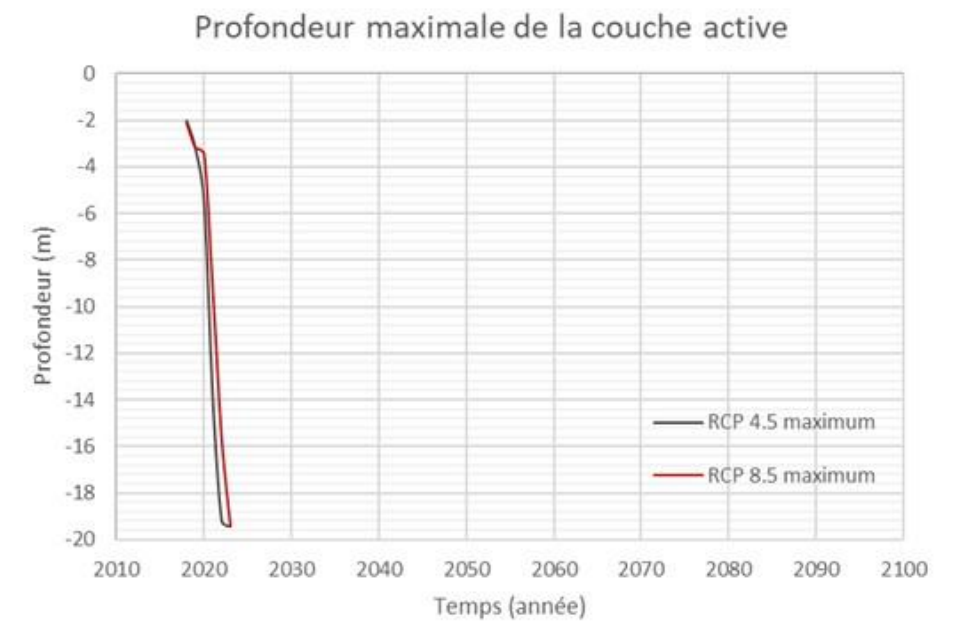


Figure 23 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle QUA-HT-156.

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)

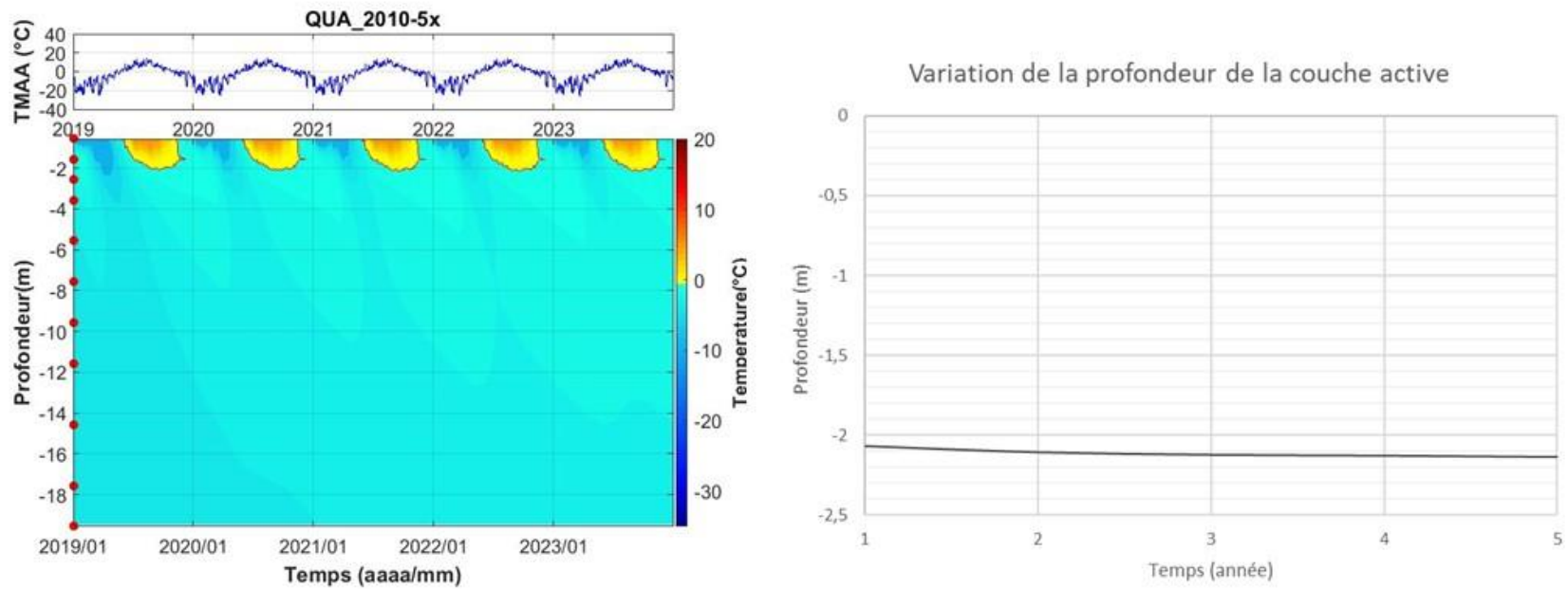


Figure 24 : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2009-2010, pour le modèle HT-156

Impacts d'une hausse soudaine de température

Nous avons exploré l'effet d'une série de 5 années particulièrement chaudes sur la température du pergélisol. À cet effet, nous avons utilisé les températures de l'année la plus chaude jamais enregistrée au Nunavik, soit 2009-2010, puis les avons introduites dans le modèle après l'année 2018. La simulation a ensuite roulé sur 5 ans (**Figure 24**). Nous avons cherché à estimer l'impact et le risque associé à une variation à court terme du climat, soit un pic exceptionnel sur la courbe de tendance climatique à long terme. Pour Quaqtq, l'impact d'une telle série d'années chaudes serait assez limité. On pourrait en effet n'observer qu'un très léger approfondissement de la couche active dans les sols naturels, de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Cette résistance au dégel s'explique par la saturation en glace du sol au plafond du pergélisol. Cet exercice théorique impliquant une succession peu probable d'années exceptionnellement chaudes invalide la possibilité de réalisation des scénarios RCP 4.5 et 8.5 maximum.

Les dépôts de surface qui seront affectés en raison du réchauffement climatique sont en général localisés dans des terrains humides au mauvais drainage printanier et estival, voire soumis à des inondations. La modélisation suggère que leur dégel sera progressif et relativement lent, possiblement jusque dans les années 2070.

4. FAITS SAILLANTS

- État de la situation
 - Le pergélisol dans le village de Quaqtac et ses environs est majoritairement contenu dans les affleurements rocheux qui occupent de vastes superficies (c.-à.-d. les températures du roc sont négatives).
 - Une portion importante du territoire de la communauté se trouve aussi dans des sédiments marins minces mal drainés, localisés dans les terrains bas et par endroits sujets à des écoulements d'eau printaniers en surface.
 - Tel que modélisé, le dégel vertical du pergélisol sera ralenti dans les dépôts marins grossiers dans les années à venir.
 - Le réchauffement climatique, en créant des zones humides éparses et des nappes d'eau confinées dans le sol en hiver dans les terrains qui gèleront difficilement, aura pour conséquence probable l'augmentation des zones de glaçage et de buttes saisonnières à noyau de glace dans le paysage en hiver. Ce phénomène pratiquement incontrôlable survient déjà à un endroit dans le village. Il faudra continuer d'éviter les terrains mal drainés qui deviendront encore plus problématiques en hiver.
 - Les affleurements rocheux ont déjà commencé à servir de terrains pour de nouvelles constructions. Considérant en plus qu'il n'y a pratiquement plus de ressources granulaires dans les dépôts meubles à Quaqtac pour construire des radiers, la construction sur roc est maintenant la meilleure option.

- Possibilités de développement :
 - La croissance est possible sur les affleurements rocheux et les dépôts minces sur roc.

- Horizon d'action :
 - La communauté poursuit déjà cette stratégie efficace.

- Recommandation
 - Continuer à exploiter le roc comme fondation et comme source de matériaux granulaires par l'exploitation de carrières.

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., 2007 b. 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 tomographic 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).
- GEOSLOPE International Ltd., 2014. *Thermal Modeling with TEMP/W: An Engineering Methodology*. Calgary, 163 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 Kangiqsualujuaq, 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.
- 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.

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.

ANNEXE

CARTES DE LA COMMUNAUTÉ

Carte des dépôts de surface

RÉFÉRENCES

Journeaux, Bédard et Assoc. Inc., 1995. Approvisionnement en eau potable et l'étude des bancs d'emprunt, village de Quaqtaq. Rapport S-95-642-2, présenté à l'Administration Régionale Kativik, 35 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. Révisé pour le compte du ministère des Transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 252 p.

Résumé

Abstract

Cette carte présente les dépôts de surface de la région de Quaqtaq. Ce village se situe au Nunavik, sur le rivage de la baie Diana, formée par une péninsule sur la côte ouest de la baie d'Ungava et qui se prolonge dans le détroit d'Hudson (61.04° N ; 69.57° W).

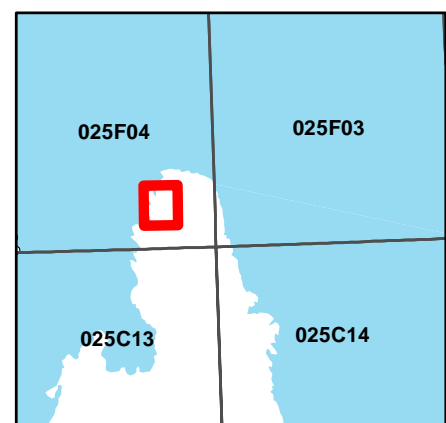
This map shows the surficial geology of the Quaqtaq region. This Nunavik village is located on the shore of Diana Bay, at the junction of the Hudson Bay and Hudson Strait (61.04° N ; 69.57° W).

Note

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.

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.

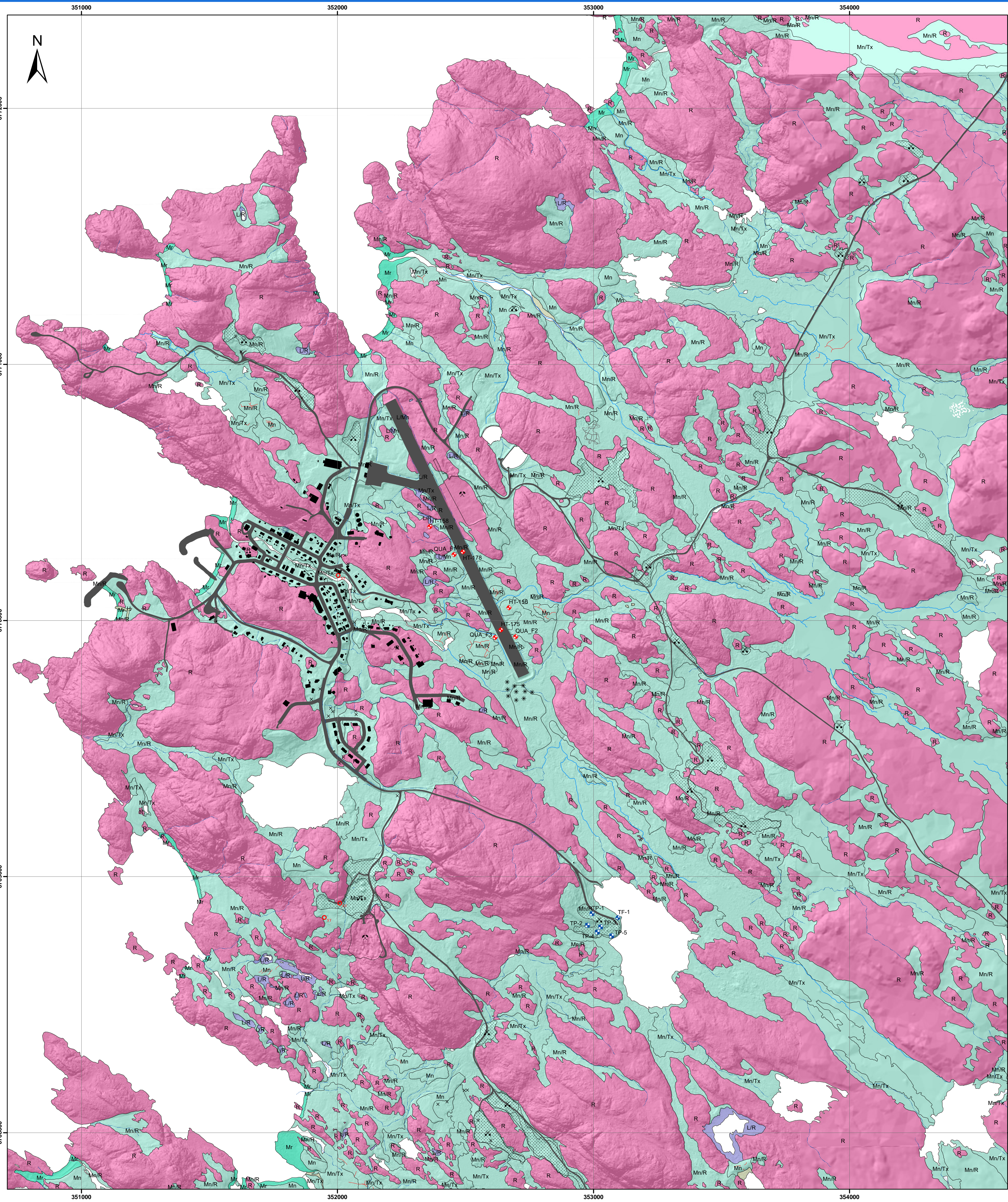


Système national de référence cartographique
SNCM, gouvernement du Canada, année d'édition 2008. Voir le site du système national de référence cartographique du Canada.

Illustration de couverture :
Quaqtaq, Nunavik, Québec.
Photographie par Emmanuel L'Hérault

Centre d'études nordiques, Québec, 2018

DÉPÔTS DE SURFACE
QUAQTAQ
Québec, Nunavik
1 : 8 000



Dépôts de surface

Quaternaire - Postglaciaire

Sédiments lacustres

L SÉDIMENTS LACUSTRES EN COUVERTURE MINCE ET DISCONTINUE : sables, graviers et silts en couverture mince (< 2 m d'épaisseur) reposant principalement sur la roche en place.

Sédiments marins

Mr SÉDIMENTS DE PLAGE ACTUELLES : sable, silt sableux, sable graveleux, graviers, galets ébroués et quelques blocs glaciaires; mis en place au niveau des hautes mers actuelles.

Mn SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX : sable et gravier ou sable fin silteux dans les zones mal drainées; en couverture relativement mince (2-3 m d'épaisseur) reposant sur un till remanié ou sur la roche en place; partiellement recouvert de végétations herbacées et de mousses dans les secteurs mal drainés et inondés lors de la fonte des neiges; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénaire et lors de l'exondation; surface parfois marquée par des crêtes de plage; présence de sols structurés et de quelques fentes de gel.

Dernière glaciation

Sédiments glaciaires

Tx TILL REMANIÉ : dépôt hétérométrique grisâtre mal trié composé principalement de sable et silt avec un peu de graviers anguleux; épaisseur variant généralement entre 1 à 2 m; diamion dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et les courants lors de la phase marine.

Pré-quaternaire

Substrat rocheux

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

Dépôts non cartographiés ou perturbés

H ANTHROPIQUE : Aire de perturbation anthropique (ex. : dépotier, dépôt de matériaux, etc.).

SOLS STRUCTURÉS : cercles de pierres

OSTIOLES

CARRIÈRES (actives et inactives)

SABLIERES OU GRAVIERES (actives et inactives)

BÂTIMENTS

INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

FENTES DE GEL - présence de coins de glace probable

RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents

RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents

BUTTES SAISONNIÈRES À NOYAU DE GLACE

GLAÇAGE (ICING)

AFFLEUREMENTS ROCHEUX PONCTUELS

COUPES STRATIGRAPHIQUES (CEN, 2014)

FORAGE AVEC RÉCUPÉRATION (L'Hérault et al., 2012)

FORAGE AVEC RÉCUPÉRATION (Journeaux, Bédard et Assoc. Inc., 1995)

EXCAVATION (Journeaux, Bédard et Assoc. Inc., 1995)

Notes : Les unités composées, par exemple AT/Mt, 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.

DÉPÔTS DE SURFACE

QUAQTAQ

Québec, Nunavik

1 : 8 000

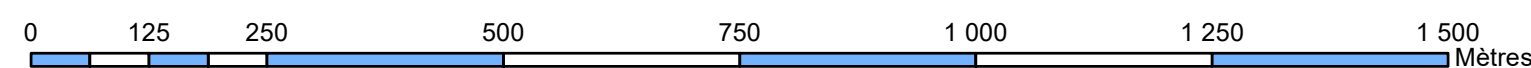


Image en relief ombragé préparée par L'Hérault, E. dérivée des données LIDAR 2010 (MIRNF 2010, gouvernement du Québec).
Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

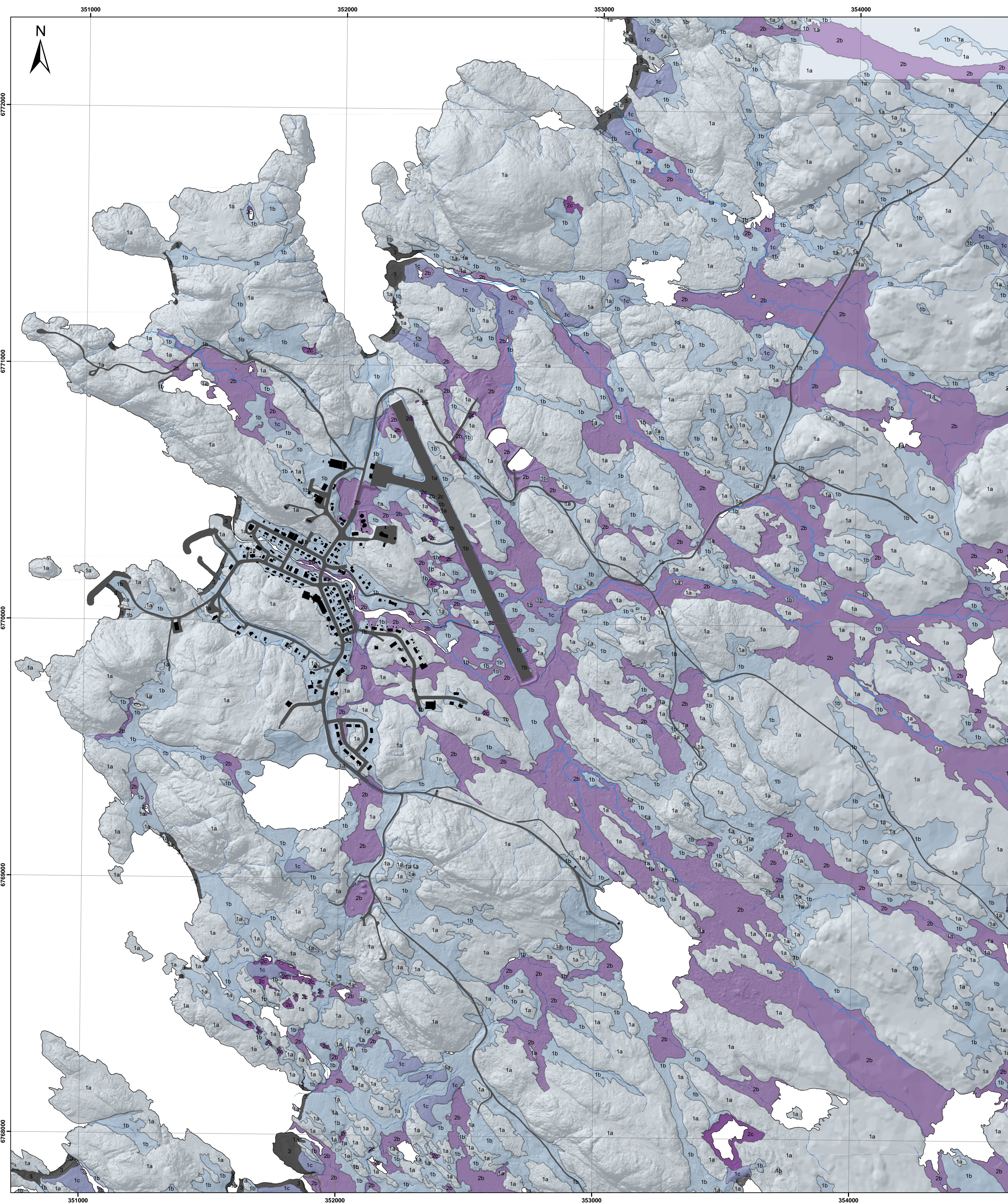
Projection : MTM zone 7, NAD83

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

Sablères et carrières par : Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles

Citation recommandée :
Carboneau, A.-S., L'Hérault, E., Doyon, J., Aubé-Michaud, S. et Allard, M., 2018. Dépôts de surface, Quaqtaq, Québec, Nunavik; 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 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 %. Surface fréquemment recouverte 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 %. Surface fréquemment recouverte 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 de Quaqtaq. Ce village se situe au Nunavik, sur le rivage de la baie Diana, formée par une péninsule sur la côte ouest de la baie d'Ungava et qui se prolonge dans le détroit d'Hudson (61.04° N ; 69.57° O).

Abstract

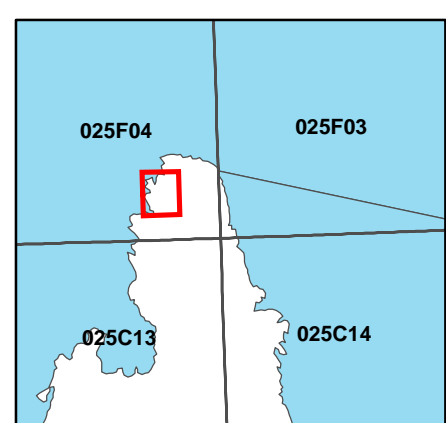
This map shows the permafrost conditions of the Quaqtaq region. This Nunavik village is located on the shore of Diana Bay, at the junction of the Hudson Bay and Hudson Strait (61.04° N ; 69.57° W).

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.



Système national de référence cartographique
©2016, gouvernement du Québec, sous réserve de droits
 topographiques (2016) sous réserve du système national de
 référence cartographique du Canada.

Illustration de couverture :
 Quaqtaq, Nunavik, Québec.
 Photographie par Emmanuel L'Hérault

Centre d'études nordiques, Québec, 2018

**CONDITIONS DE PERGÉLISOL
 QUAQTAQ**
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000



**CONDITIONS DE PERGÉLISOL
 QUAQTAQ**
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000

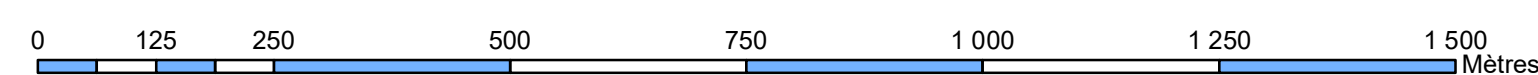


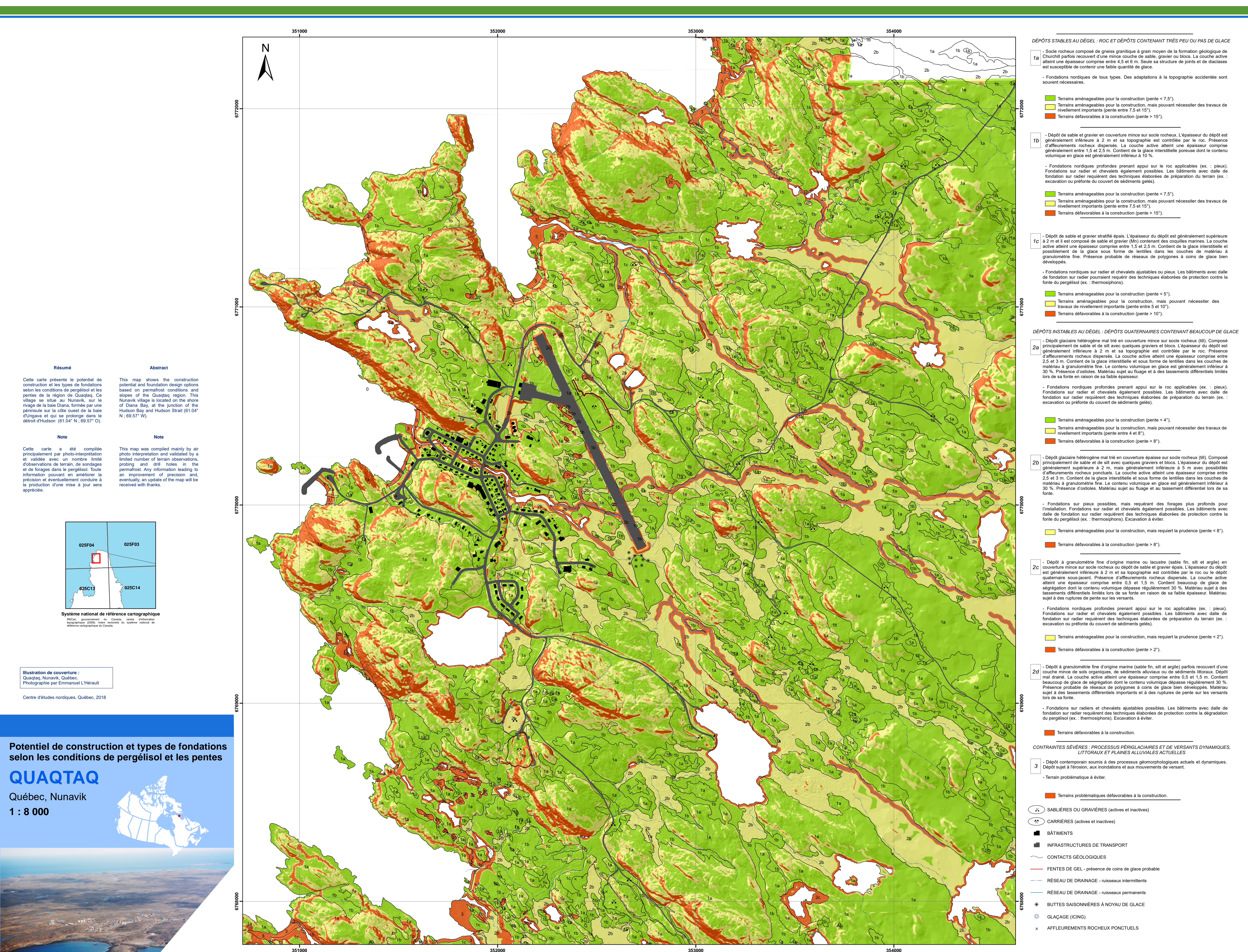
Image en relief ombragé préparée par L'Hérault, E. dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec).
 Illumination : azimut 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

Projection : MTM zone 7, NAD83

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

Citation recommandée :
 Carboneau, A.-S., L'Hérault, E., Doyon, J., Aubé-Michaud, S. et Allard, M., 2018. Conditions de pergélisol, Quaqtaq, Québec, Nunavik. Centre d'études nordiques, échelle 1: 8 000.

Carte de potentiel de construction

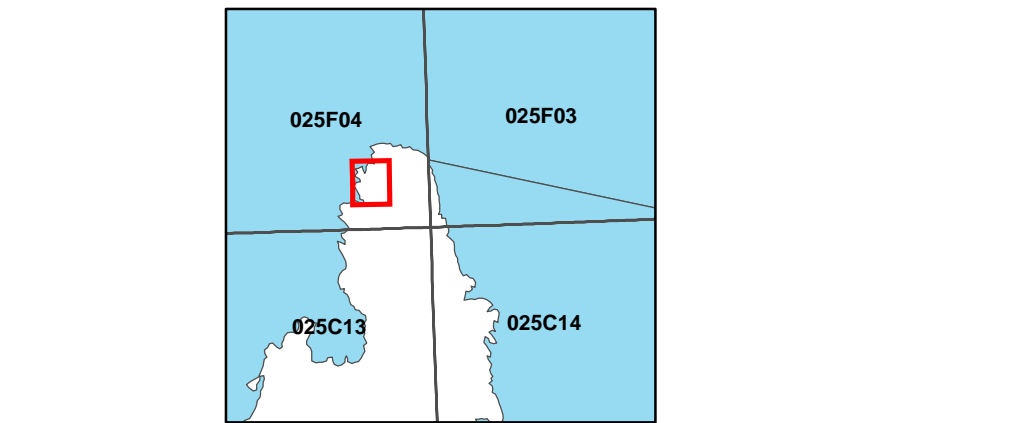


Résumé
 Cette carte présente le potentiel de construction et les types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes de la région de Quaqtaq. Ce village se situe au Nunavik, sur le rivage de la baie Diana, formée par une péninsule sur la côte ouest de la baie d'Ungava et qui se prolonge dans le détroit d'Hudson (61.04° N ; 69.57° O).

Abstract
 This map shows the construction potential and foundation design options based on permafrost conditions and slopes of the Quaqtaq region. This Nunavik village is located on the shore of Diana Bay, at the junction of the Hudson Bay and Hudson Strait (61.04° N ; 69.57° 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.



Système national de référence cartographique
 98CAN, gouvernement du Canada, 2008. © Éditions Topographique (2008). Tous droits réservés du système national de référence cartographique du Canada.

Illustration de couverture :
 Quaqtaq, Nunavik, 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

QUAQTAQ

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 1x

Projection : MTM zone 7, NAD83

UNIVERSITÉ LAVAL

Potentiel de construction et types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes

QUAQTAQ

Québec, Nunavik
 1 : 8 000

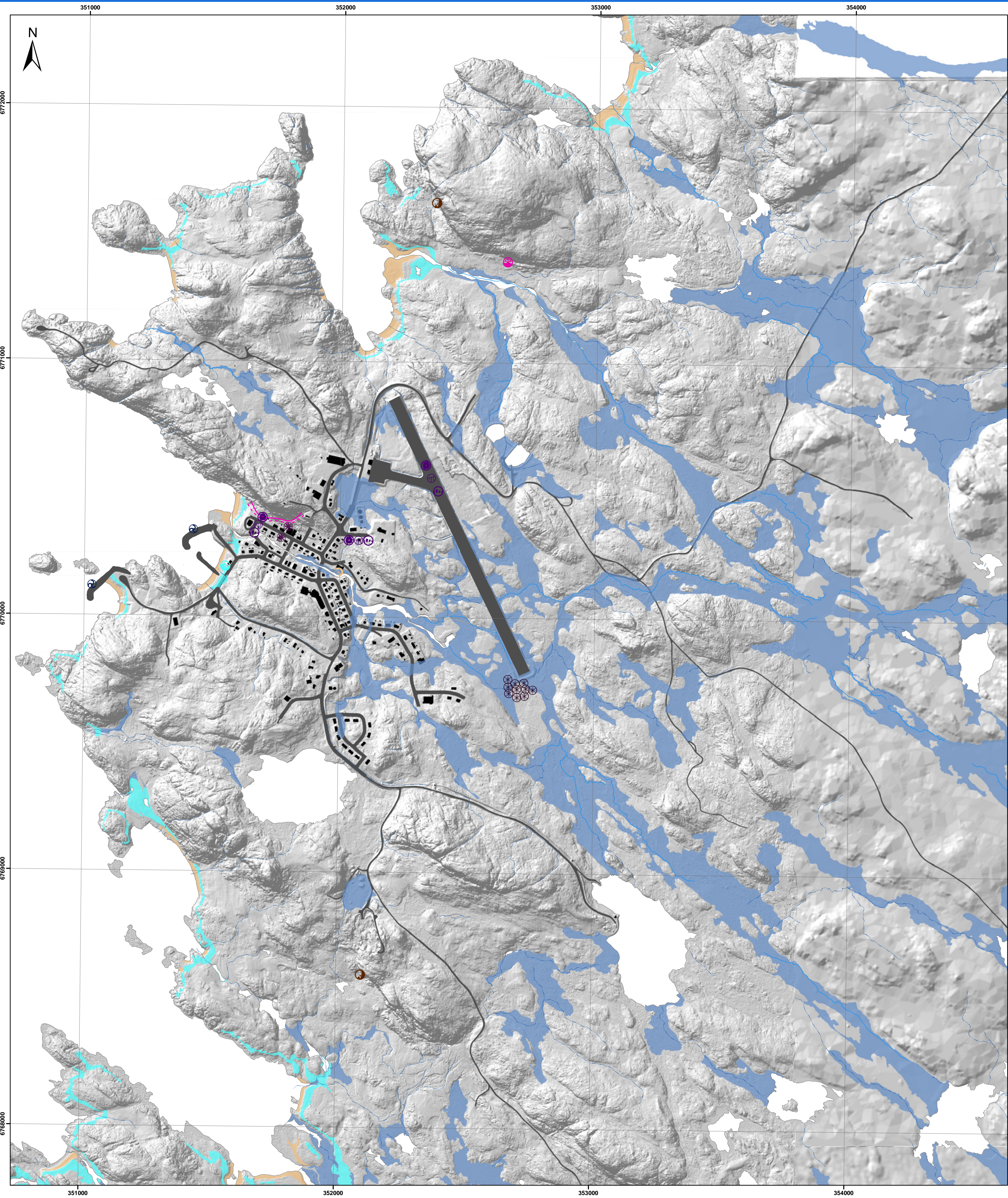
- DÉPÔTS STABLES AU DÉGEL : ROC ET DÉPÔTS CONTENANT TRÈS PEU OU PAS DE GLACE**
- 1a** - Socle rocheux composé de gneiss granitique à grain moyen de la formation géologique de Churchill parfois recouvert d'une mince couche de sable, gravier ou blocs. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 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.
- 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 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 chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfonte du couvert de sédiments gelés).
- 1c** - Dépôt de sable et gravier stratifié épais. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m et il est composé de sable et gravier (M_z) contenant des coquilles 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. Présence probable de réseaux de polygones à coins de glace bien développés.
- Fondations nordiques sur radier et chevâtes ajustables ou pieux. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier pourraient requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfonte du couvert de sédiments gelés).
- DÉPÔTS INSTABLES AU DÉGEL : DÉPÔTS QUATÉRIAIRES CONTENANT BEAUCOUP DE GLACE**
- 2a** - Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture mince sur socle rocheux (III). 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 30 %. Présence d'ostioles. 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 chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfonte du couvert de sédiments gelés).
- 2b** - Dépôt glaciaire hétérogène mal trié en couverture épaisse sur socle rocheux (III). Composé principalement de sable et de silt avec quelques graviers et blocs. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m, mais généralement inférieure à 5 m avec possibilités d'affleurements rocheux ponctuels. 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. 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. : thermosiphons). Excavation à éviter.
- 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 de la glace interstitielle et sous forme de lentilles dans les couches de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 %. 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 chevâtes également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou préfonte du couvert de sédiments gelés).
- 2d** - Dépôt à granulométrie fine d'origine marine (sable fin, silt et argile) parfois 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 %. 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 lors de sa fonte.
- 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. : thermosiphons). Excavation à éviter.
- 3** - 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.
- CONTRAINTES SÉVÈRES : PROCESSUS PÉRIGLACIAIRES ET DE VERSANTS DYNAMIQUES, LITTORAUX ET PLAINES ALLUVIALES ACTUELLES**
- Terrain problématique défavorable à la construction.
- SABLIÈRES OU GRAVIÈRES (actives et inactives)**
- CARRIÈRES (actives et inactives)
- BÂTIMENTS**
- INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT**
- CONTACTS GÉOLOGIQUES**
- FENTES DE GEL** - présence de coins de glace probable
- RÉSEAU DE DRAINAGE** - ruisseaux intermittents
- RÉSEAU DE DRAINAGE** - ruisseaux permanents
- BUTTES SAISONNIÈRES À NOYAU DE GLACE**
- GLAÇAGE (ICING)**
- AFFLEUREMENTS ROCHEUX PONCTUELS**

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

Sablères et carrières par : Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles

Citation recommandée :
 Carboneau, A.-S., L'Hérault, E., Doyon, J., Aubé-Michaud, S. et Allard, M., 2018. Potentiel de construction et types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes, Quaqtaq, Québec, Nunavik; Centre d'études nordiques, échelle 1 : 8 000.

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

- Symbol: Dashed line with circles

GÉLIFLUXION / GELIFLUCTION

- Symbol: Solid line with circles

COULÉE / FLOW

- Symbol: Solid line with circles

ÉBOULIS / FALLS

- Symbol: Solid line with circles

ÉROSION / EROSION

ÉROSION CÔTIÈRE ET FLUVIALE / COASTAL AND FLUVIAL EROSION

- Symbol: Dashed line with circles

ÉROSION PAR LE VENT / WIND EROSION

- Symbol: Dashed line with circles

CLIMATIQUE / CLIMATIC

FEU / WILDFIRE

- Symbol: Flame icon

TEMPÊTE DE VENT / WIND STORM

- Symbol: Wind icon

BLIZZARD / BLIZZARD

- Symbol: Snowflake icon

VERGLAS / ICE STORM

- Symbol: Ice icon

PROCESSUS PÉRIGLACIAIRES / PERIGLACIAL PROCESSES

PERGÉLISOL RICHE EN GLACE / ICE-RICH PERMAFROST

- Symbol: Dotted pattern

GLAÇAGE / ICING

- Symbol: Ice icon

BUTTE SAISONNIÈRE À NOYAU DE GLACE / FROSTBLISTER

- Symbol: Ice icon

PROCESSUS LIÉS AU DÉGEL / THAW-RELATED PROCESSES

AFFAISSEMENT THERMOKARSTIQUE / THERMOKARST SUDSIDENCE

- Symbol: Dotted pattern

THERMO-ÉROSION / THERMAL EROSION

- Symbol: Ice icon

PROCESSUS HYDROLOGIQUES / HYDROLOGICAL PROCESSES

DRAINAGE D'UN LAC / LAKE DRAINAGE

- Symbol: Lake icon

SURCOTE / STORM SURGE

- Symbol: Wave icon

CRUE SOUDAINE ET INONDATION / FLASH FLOOD AND FLOOD

- Symbol: Flood icon

EMBÂCLE ET DÉBÂCLE GLACIÈRES / ICE-JAM AND BREAK-UP

- Symbol: Ice icon

POUSSÉE GLACIÈRE / ICE-PUSH

- Symbol: Ice icon

TREMBLEMENT DE TERRE / EARTHQUAKE

- Symbol: Earthquake icon

HYDROLOGIE / HYDROLOGY

- Symbol: Blue line
- Text: RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents / RILLS AND WATERTRACKS - running throughout all arctic summer

- Symbol: Blue line
- Text: RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents / RILLS AND WATERTRACKS - running occasionally during spring melt

INFRASTRUCTURES / INFRASTRUCTURE

- Symbol: Black square
- Text: BÂTIMENTS / BUILDING

- Symbol: Black square
- Text: INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT / TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Résumé

Cette carte présente les risques naturels actuels et appréhendés de la région de Quaqtaq. Ce village se situe au Nunavik, sur le rivage de la baie Diana, formée par une péninsule sur la côte ouest de la baie d'Ungava et qui se prolonge dans le détroit d'Hudson (61.04° N ; 69.57° 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.

Les risques naturels sont représentés par un symbole ponctuel, linéaire ou zonale, en fonction de leur échelle et de leur géométrie.

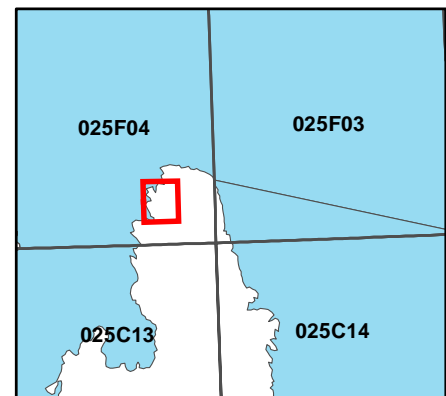
Abstract

This map shows the actual and potential natural hazards of the Quaqtaq region. This Nunavik village is located on the shore of Diana Bay, at the junction of the Hudson Bay and Hudson Strait (61.04° N ; 69.57° W).

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.

Natural hazards are presented according to their scale and geometry: polygons, lines or points.



Système national de référence cartographique / The National Topographic System of Canada

©NCS, gouvernement du Canada, source d'information topographique (2005). Infos: système national de référence cartographique du Canada.

Natural Address of the National Topographic System of Canada, Government of Canada, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Mapping Information Branch, Centre for Topographic Information (2005).

Illustration de couverture / Cover illustration: Quaqtaq, Nunavik, Québec. Photographie par Emmanuel L'Hérault / Photocredits: Emmanuel L'Hérault. Centre d'études nordiques, Québec, 2016.

RISQUES NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS / ACTUAL AND POTENTIAL NATURAL HAZARDS
QUAQTAQ
 Québec, Nunavik
 1 : 8 000



RISQUES NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS / ACTUAL AND POTENTIAL NATURAL HAZARDS

QUAQTAQ

Québec, Nunavik
 1 : 8 000

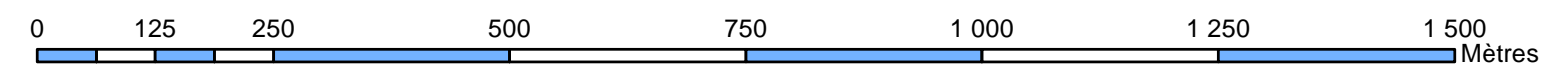


Image en relief ombragé dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec) préparée par L'Hérault, E. Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 2x.

Hillshade created by L'Hérault, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec). Illumination: azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 2x.

Projection : MTM zone 7, NAD83

Auteurs : S. Aubé-Michaud, M. Allard et E. L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, décembre 2016.

Authors: S. Aubé-Michaud, M. Allard and E. L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, December 2016.

Citation recommandée : Aubé-Michaud, S., Allard, M. et L'Hérault, E., 2016. Aléas naturels actuels et appréhendés, Quaqtaq, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1: 8 000.

Recommended citation: Aubé-Michaud, S., Allard, M. and L'Hérault, E., 2016. Actual and potential natural hazards, Quaqtaq, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, scale 1: 8 000.

PLANCHES SYNTHÈSES

**Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la
communauté de Quaqaq**

Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la communauté de Quaqtq



Légende

Dépôts de surface

- H: Dépôts anthropiques
- L: Sédiments lacustres en couverture mince et discontinue
- Mn: Sédiments littoraux et pré-littoraux
- M: Sédiments de plages actuelles
- R: Roc
- Affluements rocheux en pentes supérieures à 15 degrés

Conditions de pergélisol

- 1a: Solis rocheux. La couche active atteint une profondeur comprise entre 4.5 et 6 m.
- 1b: Dépôt de sable et gravier en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux.
- 1c: Dépôt de sable et gravier stratifié épais (> 2 m).
- 2b: Dépôt glaciaire (B) en couverture épaisse (> 2 m) sur socle rocheux.
- 2c: Dépôt à granulométrie fine d'origine marine en couverture mince (< 2 m) sur socle rocheux ou dépôt de sable et gravier épais.
- 3: Contraintes sévères. Processus périglaciaires et de versants dynamiques, littoraux et plaines alluviales actuelles.

Potentiel 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

Aléas naturels actuels et appréhendés

- Erosion côtière et fluviale
- Submersion côtière
- Crue et inondation
- Bizarrid
- Tempête de vent
- Glacage
- Poussée glaciaire
- Glacage
- Butte saisonnière à noyau de glace

Limite de la zone d'avalanche

- Zone d'avalanche centennale (1/100)
- Zone d'avalanche décennale (1/1000)

Réseau routier et infrastructure

- Bâtiment / infrastructure
- Voie de communication
- Crue et inondation
- Affaissement rocheux isolé et ponctuel
- Croix géodésique
- Sondage
- Autre
- Localisation du câble à thermistances HT-156

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

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 : Quaqtq*. Pour plus d'informations, il est recommandé de se référer au rapport.

Observations et remarques

- La communauté est majoritairement bâtie sur les sédiments littoraux et pré-littoraux (Mn) déposés sur les terrains plats des fonds de vallées, entre les collines rocheuses à proximité du littoral.
- Les zones correspondant aux affluements rocheux (classe 1a), recouverts par endroits d'une mince couche de sable et gravier (classe 1b) ainsi que les dépôts sableux et graveleux épais (classe 1c) ne sont pas impactés en cas de dégel du pergélisol.
- La principale contrainte physique au développement du village de Quaqtq est la présence de plaines alluviales et de milieux humides mal drainés dans les fonds de vallées entre les collines rocheuses. Déjà mal drainés, ces terrains sont à risque d'être inondés lors d'une crue printanière en raison d'une pluie abondante et/ou de la fonte rapide du couvert neigeux.
- De plus, les berges qui longent le ruisseau Imirtaviup, particulièrement celles à proximité du pont principal du village, sont à risque d'érosion.
- Les dépôts instables au dégel (classe 2b, 2c) sont localisés dans le fond des vallées, dans l'arrière-pays et à proximité de la piste d'atterrissage. En effet, une partie de la piste, près de l'aérogare, repose sur le roc tandis que la pointe sud de la piste repose sur des dépôts meubles.



Figure 1 - A) Sédiments littoraux et pré-littoraux retrouvés dans les secteurs déprimés et mal drainés. Ces dépôts ont été légèrement remaniés et délavés en surface par l'écoulement fluvial diffus. B) Dépôts littoraux et pré-littoraux (Mn), d'une épaisseur variant entre 2 et 3 mètres retrouvés sur le territoire de Quaqtq. C) Affluements rocheux sur le territoire de Quaqtq (D3) (tiré de Carboneau et al., 2015).

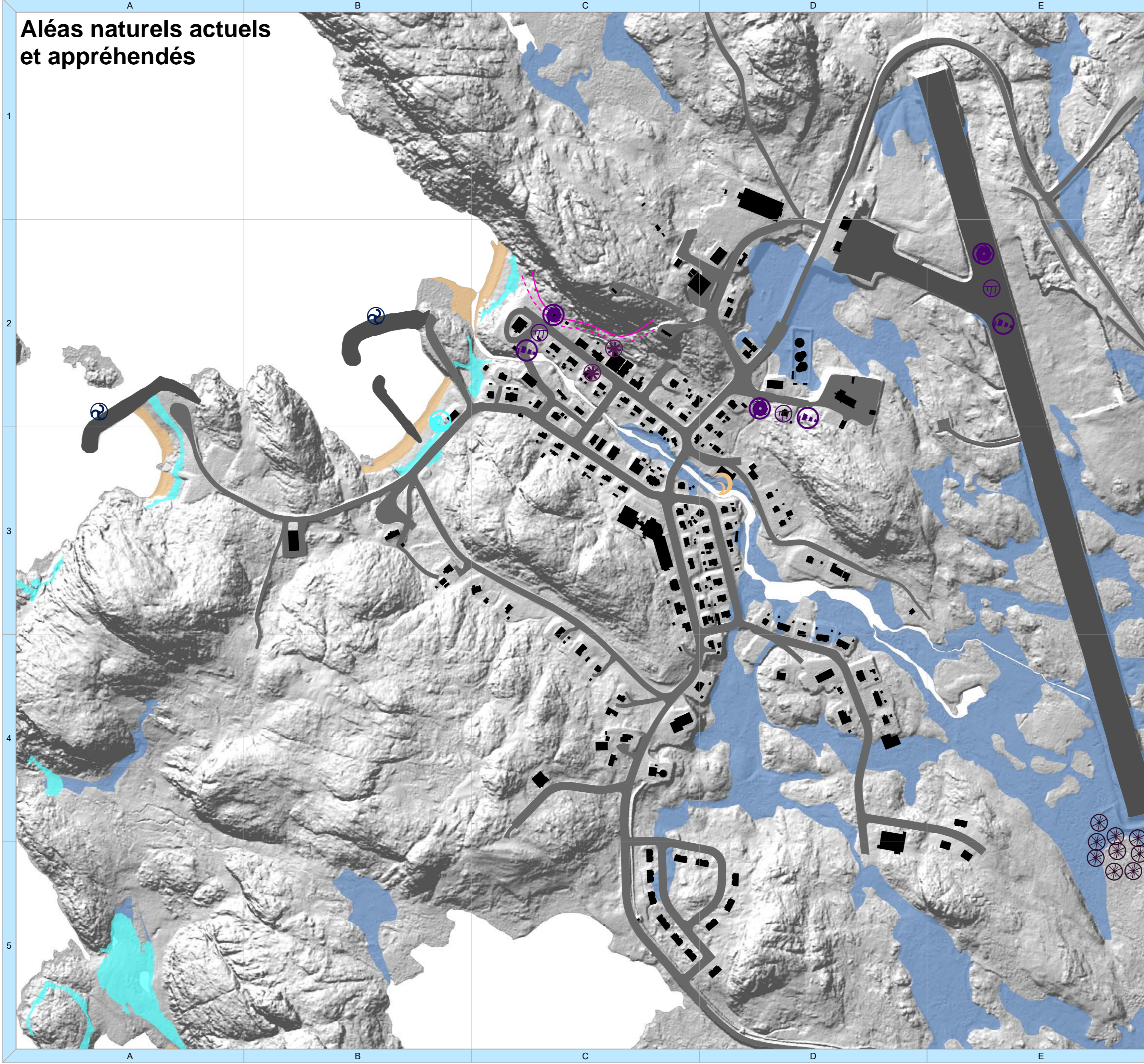
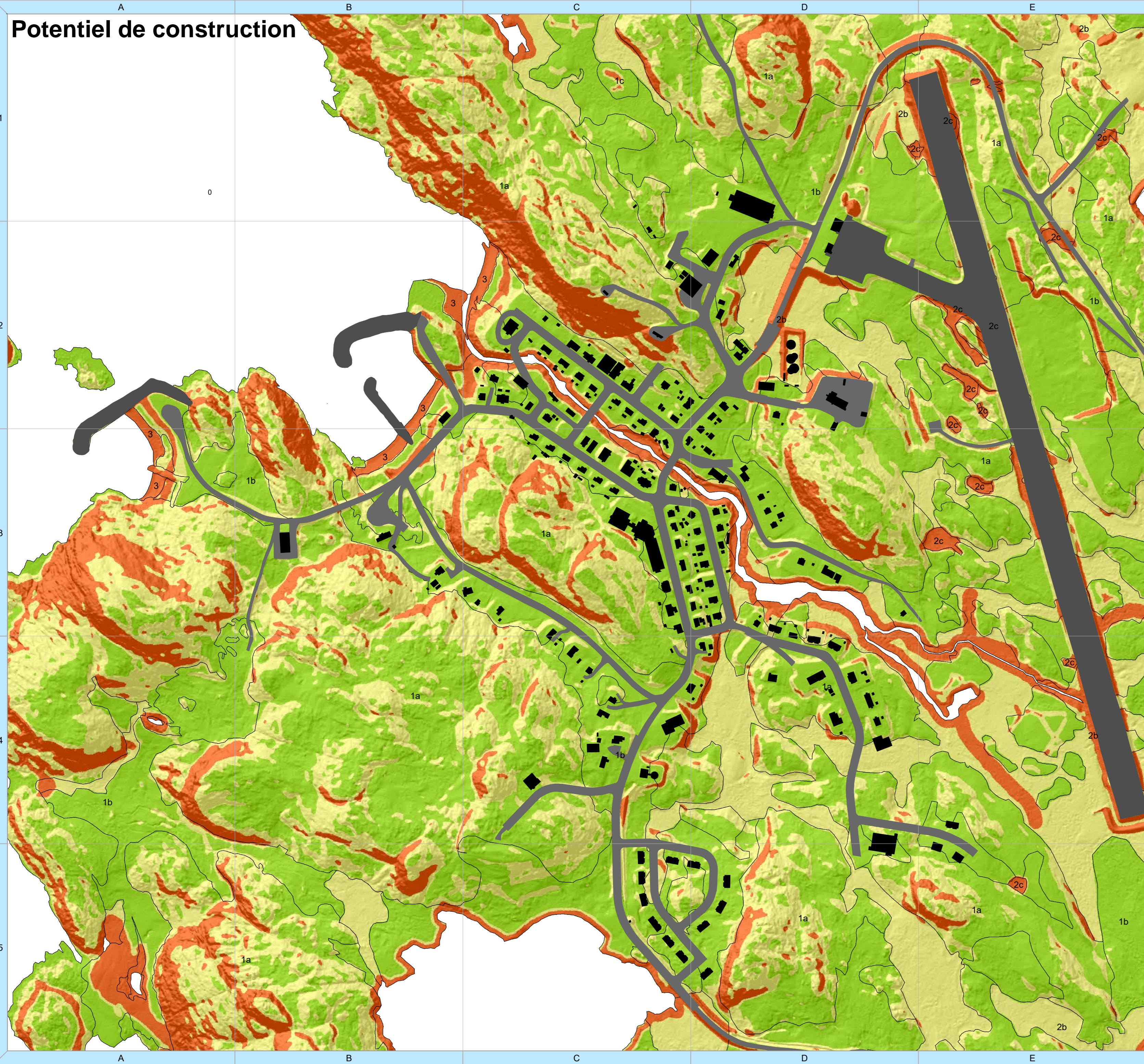
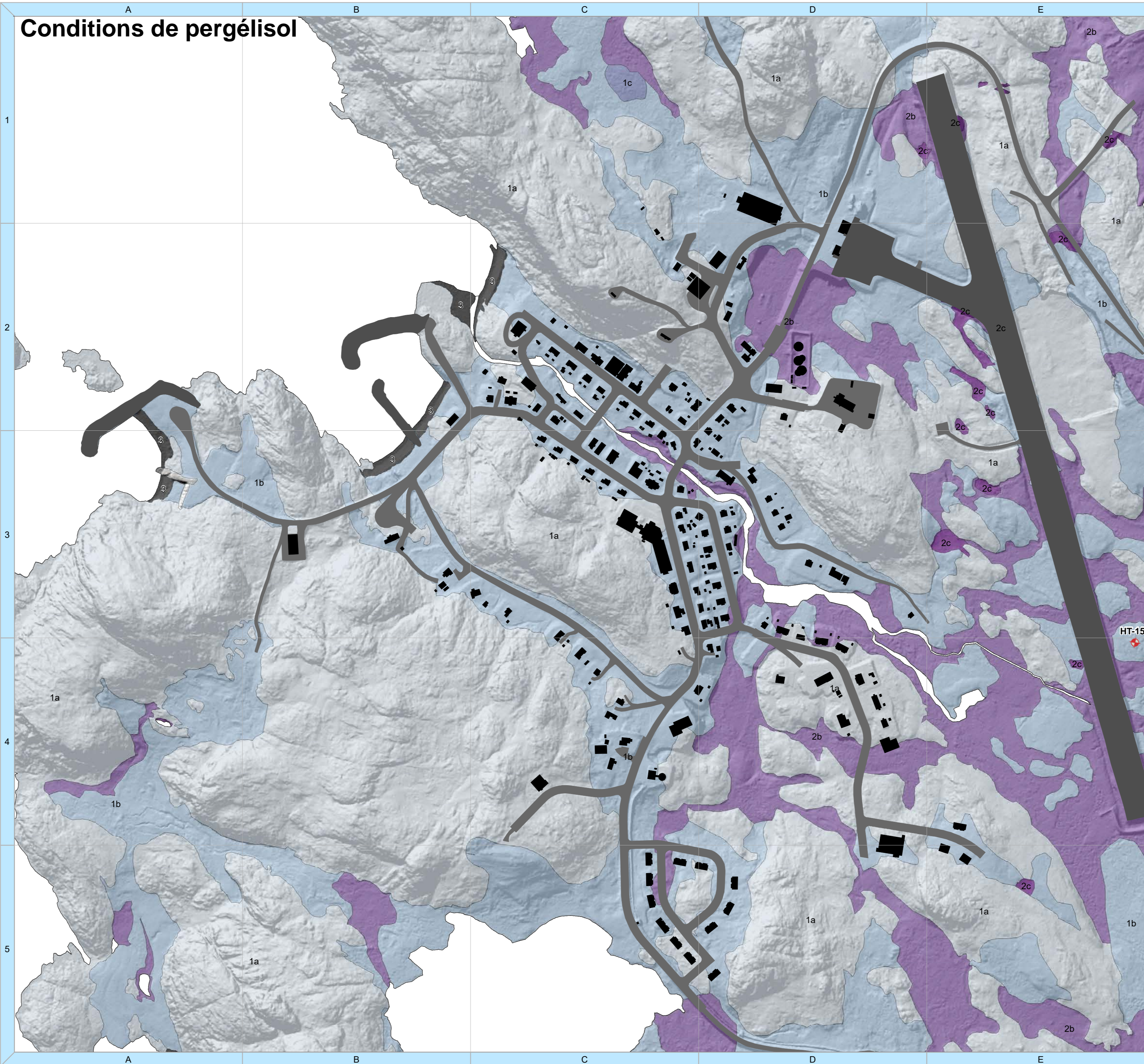
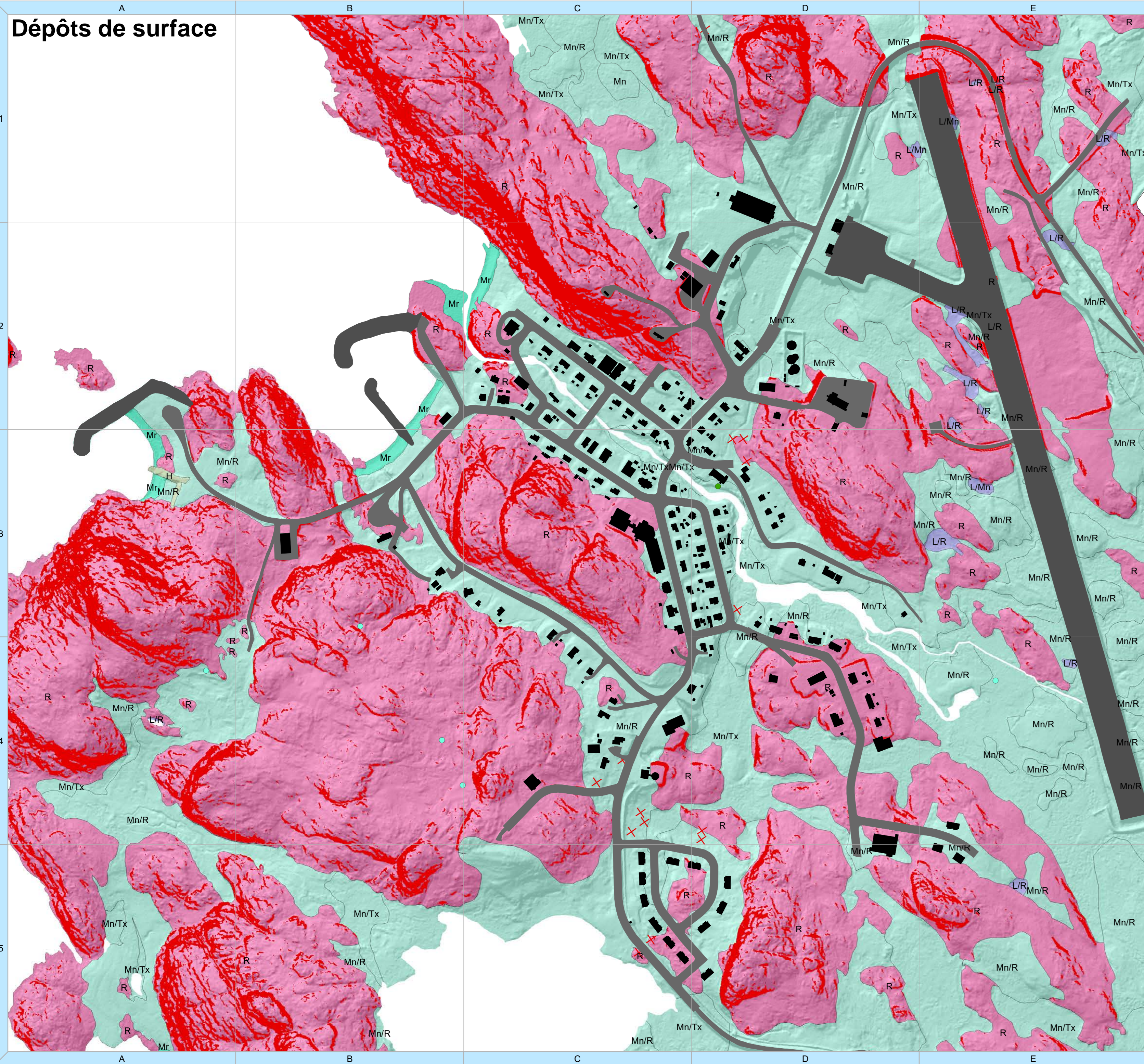
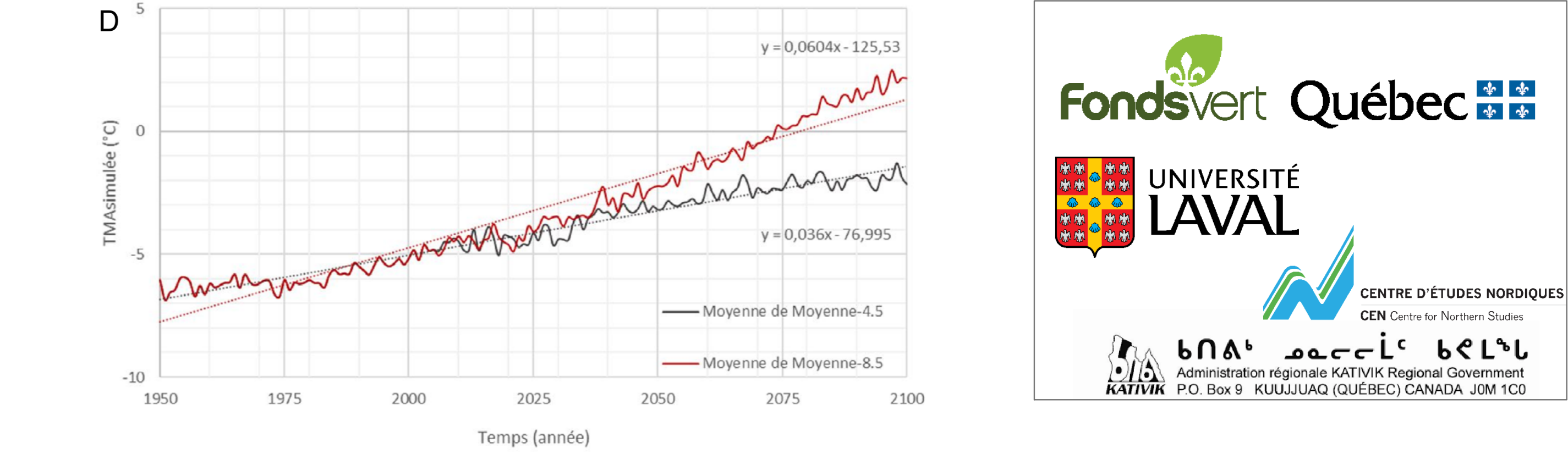
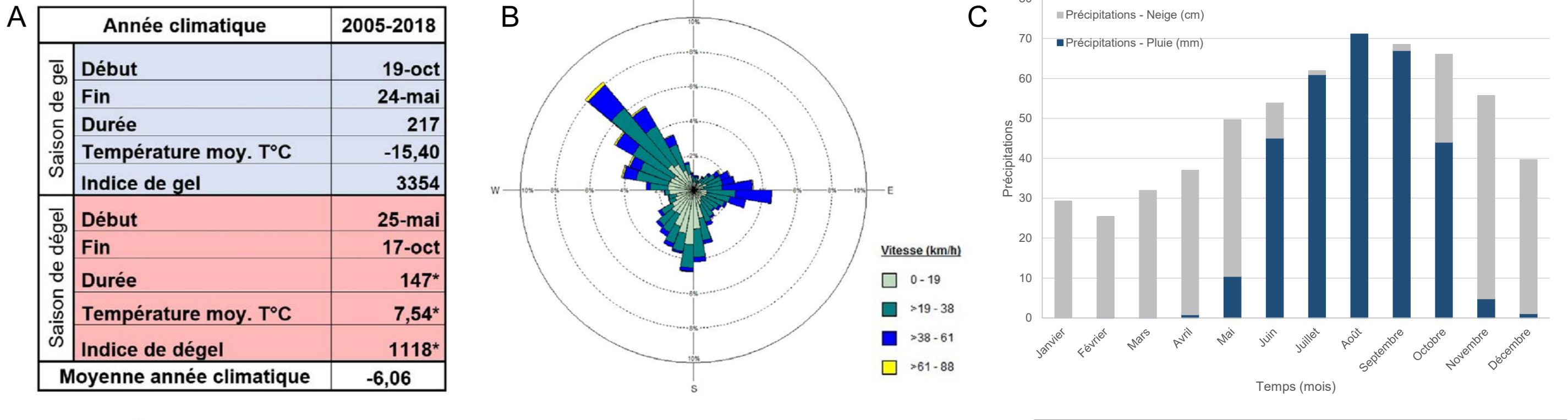
Aléas naturels actuels et appréhendés dans la région

Types d'aléas		Contraintes
Mouvements de masse	Eboulement rocheux	3D
	Avalanche (sèche ou humide)	3C
Processus hydrologiques	Crue et inondation	2D
	Submersion côtière	3E
	Poussée glaciaire	3C
Processus reliés au pergélisol	Glacage	5E
	Butte saisonnière à noyau de glace	5E
Érosion	Côtière	3D
	Fluviale	3D
Climatique	Bizarrid	3B 5D
	Tempête de vent	3B 5D
	Verglas	3B 5D

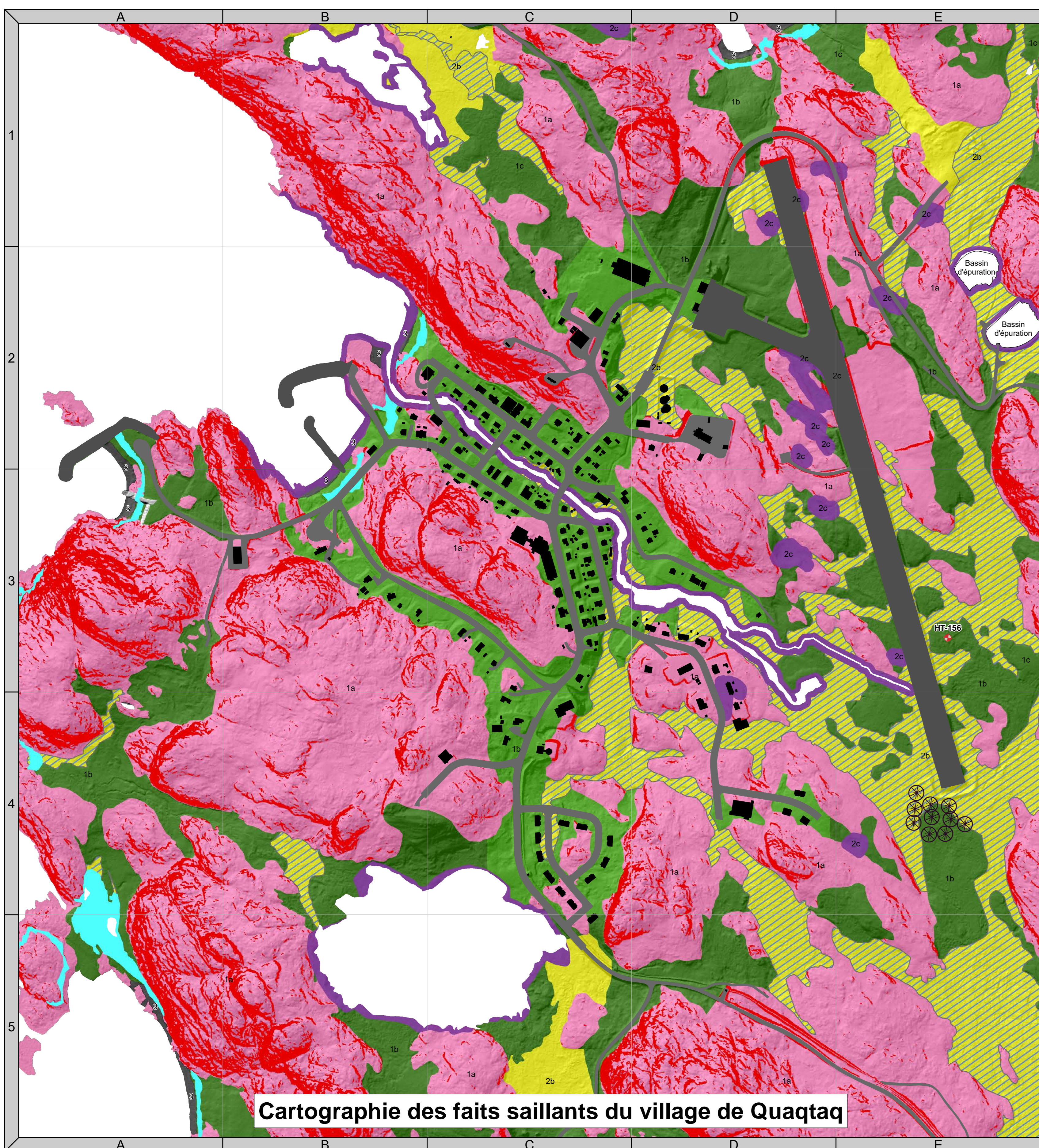
2 : Probabilité d'occurrence très faible (1 %). Peut se produire en moyenne 1 fois aux 100 ans.
 3 : Probabilité d'occurrence faible (3 %). Peut se produire en moyenne 1 fois aux 30 ans.
 5 : Probabilité d'occurrence élevée (50 %). Peut se produire en moyenne 1 fois aux 2 ans.

Conséquences

Majeures (B) : Infrastructures et équipements endommagés. Coût économique élevé et impact environnemental d'ordre moyen.
 Modérées (C) : Infrastructures et équipements peu endommagés. Coût économique moyen et impact environnemental faible.
 Mineures (D) : Peu ou pas d'impact environnemental. Coût économique faible.
 Négligeables (E) : Pas d'impact environnemental. Coût économique très faible.



**Planche synthèse des données géotechniques et climatiques de la
communauté de Quaqtq - Cartes synthèses**



Légende

Cartographie des faits saillants du village de Quaqtāq

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

Aléas naturels actuels et appréhendés

- Submersion côtière
- Cruet et inondation
- Butte saisonnière à noyau de glace

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 sol aménageable, mais pouvant nécessiter des travaux
- Bâtiment construit sur un socle pouvant être instable au dégel
- Route construite sur un socle jugé instable au dégel et en zone inondable

Instrumentation

- Localisation du câble à thermistances HT-156

0 125 250 m Cartographie : A. Chiasson, S. Aubé-Michaud et 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 : Quaqtāq*. Pour plus d'informations, il est recommandé de se référer au rapport.

Faits saillants

Le pergélisol dans le village de Quaqtāq et ses environs est majoritairement contenu dans les affleurements rocheux (c.-à-d. les températures du roc sont négatives). Une portion importante se trouve aussi dans des sédiments marins minces mal drainés, localisés dans les terrains bas et par endroits sujets à des écoulements printaniers en surface.

Les affleurements rocheux ont déjà commencé à servir de terrains pour de nouvelles constructions. Considérant en plus qu'il n'y a pratiquement plus de ressources granulaires dans les dépôts meubles à Quaqtāq pour construire des radiers, la construction sur roc est maintenant la meilleure option.

Tel que modélisé, le dégel vertical du pergélisol sera ralenti dans les dépôts marins grossiers. Toutefois, le réchauffement climatique, en créant des zones humides éparses qui gèleront difficilement en hiver, aura pour conséquence probable l'augmentation des zones de glaçage et de buttes saisonnières à noyau de glace dans le paysage en hiver. Ce phénomène pratiquement incontrôlable survient déjà à un endroit dans le village (E4). Il faudra continuer d'éviter les terrains mal drainés qui deviendront encore plus problématiques en hiver.

Constats et commentaires

- ◆ Près de 280* bâtiments (en vert) sont construits sur des sols stables au dégel (Mn, Mn/R ou R).
- ◆ Près de 14* bâtiments (en rouge), principalement des cabanons, ont été désignés sensibles à des problèmes et des instabilités reliés au dégel du pergélisol. Le risque de crues ou d'inondations ainsi que d'érosion en marge du ruisseau Imritaviup, où sont localisés ces cabanons, est très probable.
- ◆ Environ 26* bâtiments (en orange) sont construits sur un sol appartenant à la classe de conditions du pergélisol 2b. Malgré tout, ces sols disposent d'un potentiel de construction non négligeable, mais la prudence est requise avant d'y entreprendre l'implantation d'infrastructures en raison de la présence de plaines alluviales. Les secteurs aux dépôts marins humides peuvent offrir un certain potentiel pour l'implantation d'infrastructures, pourvu qu'une attention particulière soit portée à la canalisation des eaux de ruissellement.
- ◆ La communauté de Quaqtāq possède déjà d'excellents terrains solides et stables au dégel qui devraient être priorités avant la construction d'infrastructures sur les plaines alluviales.

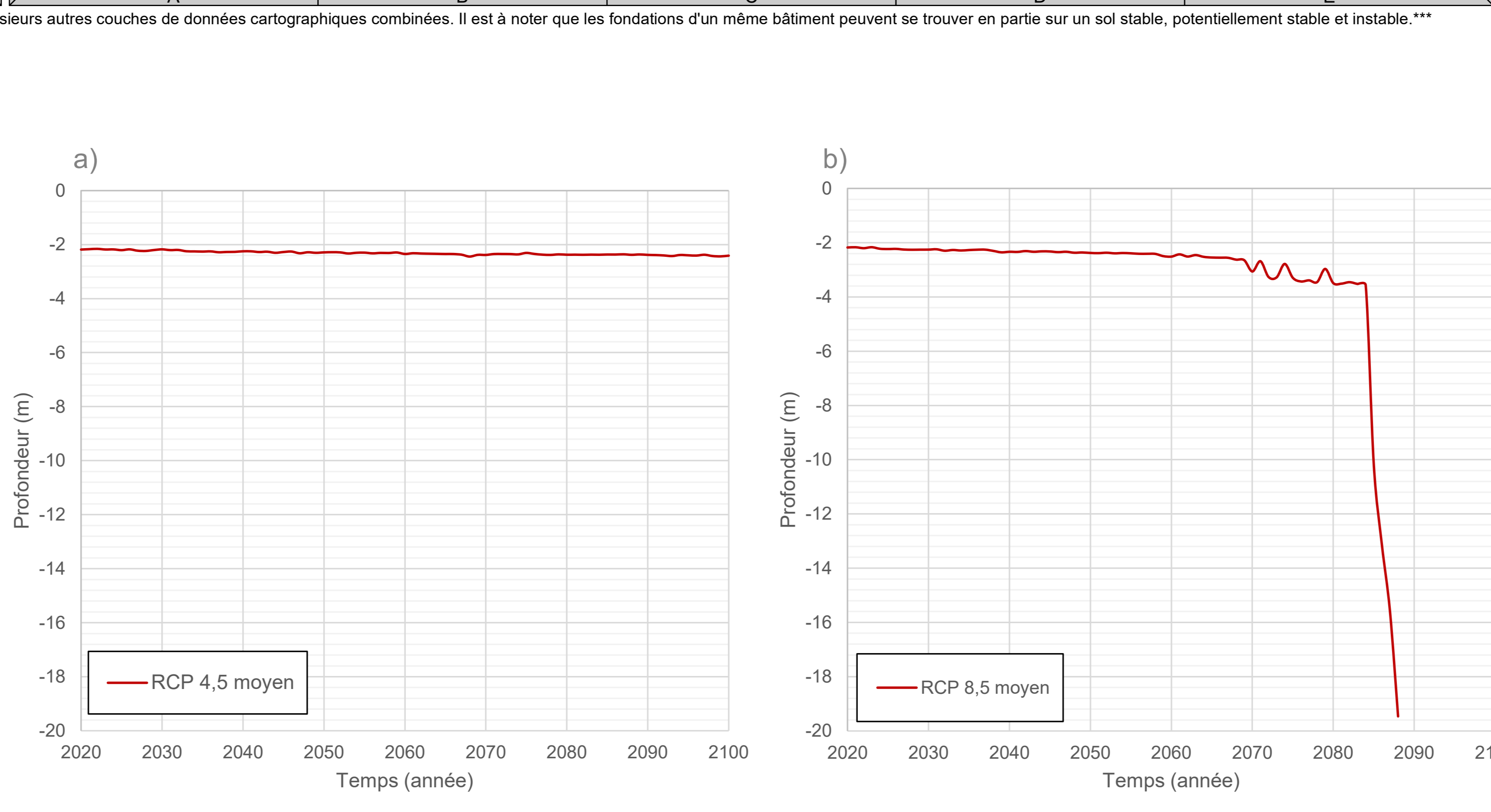
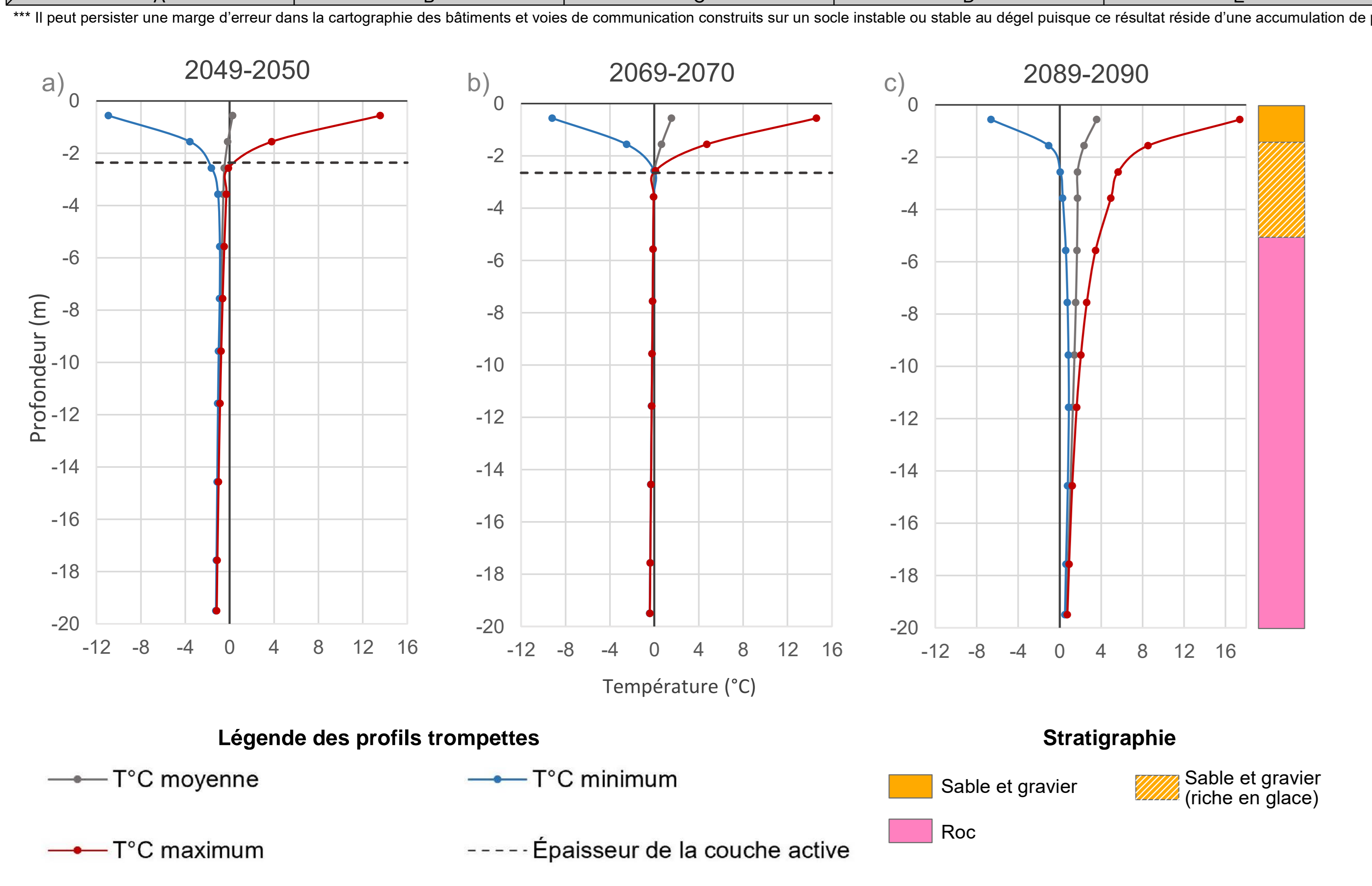


Figure 2 : Évolution de l'épaisseur de la couche active à partir du modèle MRCC5 selon les scénarios a) RCP 4,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, b) RCP 8,5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre pour le modèle HT-156 de 2020 à 2100.

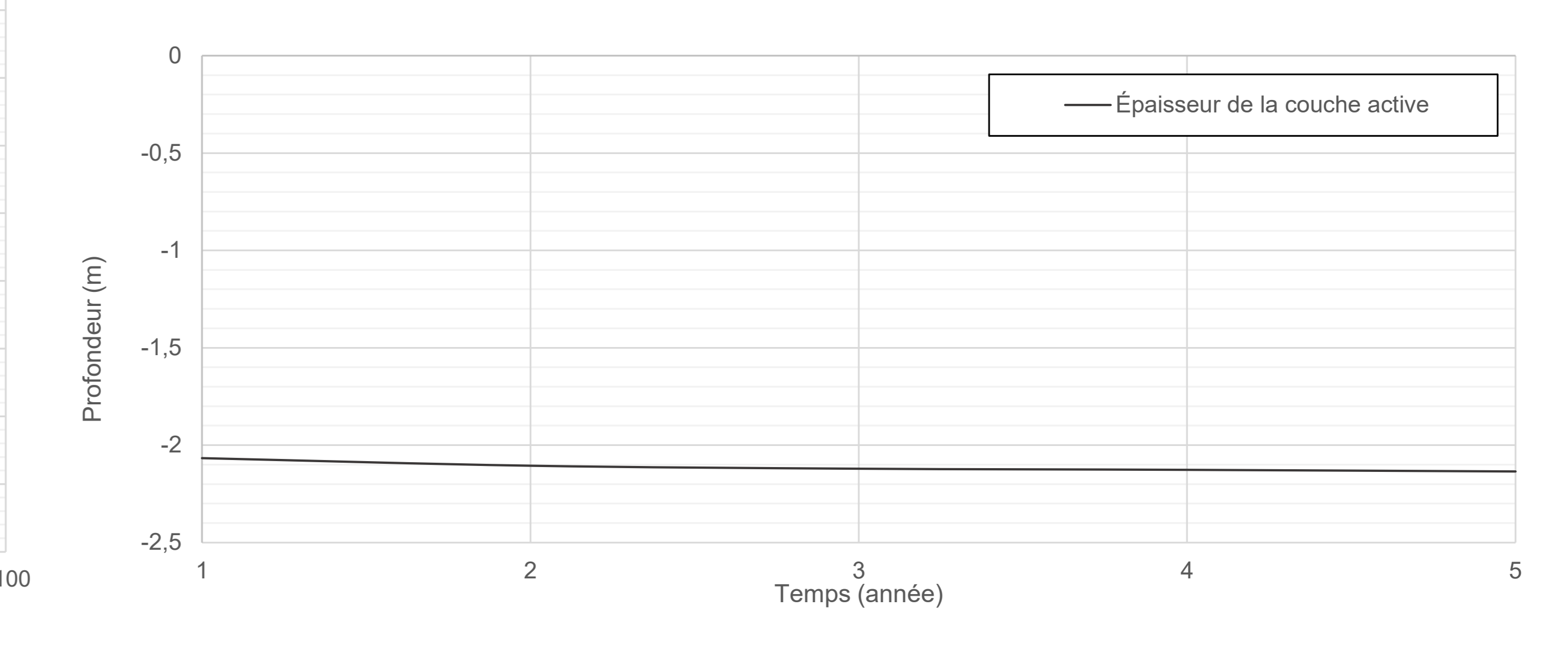


Figure 3 : Variation de la température du pergélisol et de l'épaisseur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année climatique de 2009-2010 pour le modèle HT-156, situé en terrain naturel à proximité de l'aéroport. À l'endroit de la station, cinq années chaudes consécutives auraient un impact limité sur l'approfondissement de la couche active.

Figure 1 : Profils de la température projetée moyenne, minimum et maximum du sol pour la station HT-156 selon le scénario RCP 8.5. a) L'épaisseur maximale atteinte par la couche active pour l'année climatique 2049-50, b) pour l'année climatique 2069-70 et c) celle de 2089-90. Entre les années 2070 et 2089, le dégel du sol dépasse les 20 mètres de profondeur.