

**SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE
PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES
INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU
NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES- RAPPORT FINAL**
Projet CC02.2

Valérie Mathon-Dufour, Denis Sarrazin et Michel Allard
Centre d'études nordiques, Université Laval

Réalisé pour le compte de la
Direction générale des projets et de l'exploitation aéroportuaire,
Ministère des Transports du Québec

Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du
Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Mars 2021

REMERCIEMENTS ET NOTE DES AUTEURS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Transports du Québec (MTQ) pour la confiance et le financement accordés en vue de la réalisation de ce projet de recherche. Nous soulignons également la collaboration de l'Administration Régionale Kativik tout au long des travaux de terrain afin de faciliter l'accès aux installations aéroportuaires. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu de la part des employés de Kativik Transport lors des visites aux aéroports.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

Note spéciale :

Le chercheur principal tient à souligner le travail exceptionnel de M. Denis Sarrazin, professionnel de recherche qui a effectué les tournées de récupération de données et d'entretien de l'instrumentation durant toute la durée du projet. De façon exceptionnelle, il a effectué en 2020 ce périple en solitaire sur une durée d'un mois sous des conditions climatiques difficiles tout en devant respecter les strictes règles sanitaires et les limitations de contacts imposées par la pandémie de Covid-19. Sans son travail, ce rapport final et ses conclusions importantes n'auraient pas été possibles.

Auteurs :

- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Valérie Mathon-Dufour, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Denis Sarrazin, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

Citation recommandée :

Valérie Mathon-Dufour, Denis Sarrazin et Michel Allard (2021) Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik dans le contexte des changements climatiques. Rapport final au Ministère des Transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 171 p.

Collaborateurs :

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

- Anick Guimond, coordonnatrice du projet de recherche, DGPEA, MTQ
- Simon Carpentier, chargé de projet, DGPEA, MTQ

**SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE
TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

© Université Laval, 2021

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET DES RECOMMANDATIONS

Le réseau d'instruments mis en place depuis le début des années 1990 lors d'une collaboration entre le Centre d'études nordiques (CEN) et le ministère des Transports du Québec (MTQ) a permis de faire un suivi du régime thermique du pergélisol sous les pistes d'atterrissage et dans le terrain avoisinant et ainsi de monitorer l'impact des changements climatiques (CC) sur la stabilité du sol qui supporte ces infrastructures. Les connaissances acquises sur l'impact du climat sur les conditions de pergélisol et la façon dont se comportent les pistes éclairent les prises de décision actuelles et futures pour le maintien de ces infrastructures essentielles. Depuis 2008, la succession d'années chaudes et froides ou proches de la moyenne observée des températures de l'air a fait varier l'épaisseur de la couche active sous les remblais des pistes déneigées en hiver et en terrain naturel non perturbé. Les températures atmosphériques généralement plus froides que la moyenne durant la période 2011-2019 ont été favorables à un certain regel et au maintien du pergélisol sous les pistes en comparaison avec les années 1995-2010, ce qui ne peut qu'avoir contribué à leur stabilité. Certaines années plus chaudes, telles que 2016-2017 et 2019-2020, ont néanmoins ralenti le processus de regel observé. Le suivi des températures effectué sous les talus et au pied du remblai des pistes révèle que le pergélisol s'est fortement dégradé à ces endroits à cause de l'isolation provoquée par l'accumulation de neige en hiver en bordure des pistes et de l'apport de chaleur dû à la rétention de flaques d'eau en été dans les dépressions causées par le dégel du pergélisol. C'est effectivement en bordure des pistes qu'on observe la majorité des tassements qui les affectent et qui requièrent des réparations et l'adoption de solutions d'ingénierie pour les stabiliser.

La conductivité thermique élevée des matériaux rocheux utilisés pour les remblais, leur géométrie et l'absence de neige et d'eau limitant les effets de chaleur latente dans le sol sont les principaux facteurs qui expliquent que le pergélisol se maintient en général sous le centre des pistes contrairement aux accotements et aux terrains naturels voisins. Néanmoins, suite à un été chaud, la profondeur maximale atteinte par le front de dégel en 2020 a dépassé de quelques centimètres le seuil critique (i.e. le plafond du pergélisol au moment de la construction ou la profondeur maximale observée dans les suivis antérieurs) sous deux pistes, soit celles de Kangirsuk et de Tasiujaq, sans conséquence observable sur les pistes (aucun tassement observable à l'œil) mais indiquant un risque pour les années à venir si cela continue. Dans ces deux cas, cela survient dans des secteurs construits en déblai ou avec d'une épaisseur de matériaux de remblai moins grande. Autrement, les signes de dégradation du pergélisol observés aux aéroports et qui ont engendrés des tassements ou un endommagement sur les infrastructures touchent principalement les accotements et les pieds de remblai. D'ailleurs, on observe à ces sites une couche active particulièrement épaisse, comportant nécessairement une teneur en eau liquide et qui ne regèle que très tardivement

au cours de l'hiver suivant à cause principalement de l'effet de chaleur latente dans le sol; ainsi, c'est le cas à Inukjuak et à Akulivik).

Les sections de pistes construites en remblais minces, ainsi qu'en déblai, de même que les talus et les pieds de remblais constituent donc des secteurs particulièrement sensibles au dégel du pergélisol et deviennent les éléments clés dans le suivi des températures du sol en vue d'en évaluer la stabilité à long terme. Il est donc primordial de conserver et de préserver l'instrumentation de suivi en place notamment lors des travaux de réfection et de mise à niveau des infrastructures, ainsi que lors des opérations de déneigement. De même, il s'avère essentiel d'améliorer le suivi thermique du pergélisol sous et en périphérie des infrastructures aéroportuaires afin d'anticiper et mieux comprendre les phénomènes qui influencent les variations thermiques à venir, lesquelles sont susceptibles d'affecter l'intégrité des infrastructures. L'impact thermique de la neige en pied de remblai mérite d'être mieux documenté avec des données qui permettraient de mieux calculer à chaque site l'effet thermique tampon (« buffer layer effect ») de la neige par la détermination de facteurs-n. La prise de décision pour planifier les travaux préventifs d'adaptation et les interventions en entretien futurs s'en trouvera facilitée.

Afin de poursuivre ou, dans certains cas, d'améliorer le suivi de l'évolution des conditions de pergélisol des aéroports du Nunavik, et par le fait même de réduire le risque pour les infrastructures de transport du MTQ, les actions suivantes sont recommandées :

| Aéroports du MTQ | Recommandations |
|-------------------------|--|
| INUKJUAK | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de câbles à thermistances dans la piste et le terrain naturel, à des chaînages à convenir avec le MTQ • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements de la piste et en pied de remblai. • Ajouter quelques capteurs de température en surface pour pouvoir calculer des facteurs-n, en vue de gérer mieux les accumulations de neige dans le futur. • Améliorer les fossés de drainage pour éviter l'accumulation d'eau. • Éviter les accumulations importantes de neige en pied de remblai • Élaguer les arbustes en bordure de piste |
| PUVIRNITUQ | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de câbles à thermistances dans la piste (stratégiquement localisés pour détecter de potentielles zones d'advection de chaleur par infiltration d'eau souterraine) • Remplacer le câble PUV-FOR1a • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les bermes à convection et à leurs pieds). |
| AKULIVIK | <ul style="list-style-type: none"> • Réajuster la profondeur des thermistances du câble HT-162 • Ajout de capteurs de température de surface pour pouvoir calculer des facteurs-n en vue de gérer mieux les accumulations de neige dans le futur |

SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

| | |
|-----------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements de la piste, dans le fossé et sur les pieds de remblai, aux endroits où la neige s'accumule sur des épaisseurs proches du niveau critique • Reprofiler les fossés de drainage pour prévenir les accumulations d'eau • Éviter les accumulations importantes de neige • Remplir les sillons de coin de glace de sable ou de tourbe près de la piste |
| SALLUIT | <ul style="list-style-type: none"> • Réparer le câble HT-172 dans la piste • Ajout d'un câble à thermistances en terrain naturel, dans les dépôts meubles, en remplacement du câble HT-155 maintenant sous le tarmac suite à son agrandissement. • Ajout des capteurs de température de surface • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements et les pentes tronquées de la piste • Éviter les accumulations importantes de neige • Assurer la fonctionnalité du réseau de drainage déjà en place. |
| QUAQTAQ | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de capteurs de température de surface pour calculer des facteurs-n • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements et la pente douce tronquée le long de la piste • Maintenir la qualité du drainage dans les fossés pour éviter l'accumulation d'eau |
| KANGIRSUK | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout d'un câble à thermistances de référence en terrain naturel (sur le sommet de la colline de till surplombant la piste) • Ajout de capteurs de température de surface (facteurs-n) • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige au pied du versant et dans le fossé dans la zone de la piste en déblai. • Maintenir la fonctionnalité du drainage dans le secteur en déblai. |
| AUPALUK | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de capteurs de température de surface pour calculer des facteurs-n • Vérifier la qualité du drainage pour prévenir l'infiltration d'eau sous la piste (présence de coins de glace) • Remplir les sillons de coin de glace de sable ou tourbe près de la piste |
| TASIUJAQ | <ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre les mesures et suivis des mesures d'adaptation prises lors de la rénovation de l'aéroport en 2019-2020 |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| LISTE DES TABLEAUX..... | 11 |
| LISTE DES PLANCHES SYNTHÈSES..... | 12 |
| LISTE DES FIGURES | 12 |
| GLOSSAIRE..... | 15 |
| 1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE | 19 |
| 2. OBJECTIFS | 22 |
| 2.1 Objectifs généraux..... | 22 |
| 2.2 Objectifs spécifiques..... | 22 |
| 3. MÉTHODOLOGIE..... | 23 |
| 3.1 Récupération des données annuelles et relevé des dégradations: Calendrier des visites sur le terrain | 23 |
| 3.2 Suivi climatique..... | 24 |
| 3.2.1 Acquisition des données : température de l'air..... | 24 |
| 3.2.2 Traitement des données : température de l'air..... | 24 |
| 3.2.3 Données de précipitations | 26 |
| 3.3 Suivi thermique du pergélisol | 27 |
| 3.3.1 Acquisition des données : température du pergélisol | 27 |
| 3.3.2 Traitement des données : température du pergélisol | 28 |
| 4. RÉSULTATS..... | 31 |
| 4.1 Inukjuak | 31 |
| 4.1.1 Caractéristiques générales des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 31 |
| 4.1.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol à l'aéroport d'Inukjuak | 34 |
| 4.1.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 35 |
| 4.1.4 Signes de dégradation | 37 |
| 4.2 Puvirnitug..... | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.1 | Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 39 |
| 4.2.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Puvirnituq..... | 42 |
| 4.2.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 43 |
| 4.2.4 | Signes de dégradation | 45 |
| 4.3 | Akulivik | 48 |
| 4.3.1 | Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 48 |
| 4.3.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport d'Akulivik | 51 |
| 4.3.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 53 |
| 4.3.4 | Signes de dégradation | 55 |
| 4.4 | Salluit..... | 59 |
| 4.4.1 | Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 59 |
| 4.4.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Salluit. | 62 |
| 4.4.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 63 |
| 4.4.4 | Signes de dégradation | 65 |
| 4.5 | Quaqtaq..... | 66 |
| 4.5.1 | Caractéristiques des dépôts de surface et détail de l'instrumentation..... | 66 |
| 4.5.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Quaqtaq | 69 |
| 4.5.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 71 |
| 4.5.4 | Signes de dégradation | 72 |
| 4.6 | Kangirsuk..... | 75 |
| 4.6.1 | Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 75 |
| 4.6.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Kangirsuk..... | 78 |
| 4.6.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé | 79 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.6.4 | Signes de dégradation..... | 81 |
| 4.7 | Aupaluk..... | 82 |
| 4.7.1 | Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation..... | 82 |
| 4.7.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport d'Aupaluk..... | 84 |
| 4.7.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé..... | 85 |
| 4.7.4 | Signes de dégradation..... | 87 |
| 4.8 | Tasiujaq..... | 88 |
| 4.8.1 | Caractéristiques des dépôts de surface et détail de l'instrumentation..... | 88 |
| 4.8.2 | Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Tasiujaq..... | 91 |
| 4.8.3 | Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé..... | 92 |
| 4.8.4 | Signes de dégradation..... | 95 |
| 5. | ÉTAT DE L'INSTRUMENTATION ET RÉPARATIONS EFFECTUÉES DE 2017 À 2020..... | 99 |
| 5.1 | Aéroport d'Inukjuak :..... | 99 |
| 5.2 | Aéroport de Puvirnituq..... | 99 |
| 5.3 | Aéroport d'Akulivik..... | 101 |
| 5.4 | Aéroport de Salluit..... | 102 |
| 5.5 | Aéroport de Quaqaq..... | 103 |
| 5.6 | Aéroport de Kangirsuk..... | 104 |
| 5.7 | Aéroport d'Aupaluk..... | 105 |
| 5.8 | Aéroport de Tasiujaq..... | 105 |
| 6. | DISCUSSION ET PERSPECTIVES..... | 107 |
| 6.1 | Synthèse de l'évolution du régime thermique du pergélisol des aéroports du MTQ au Nunavik..... | 108 |
| 6.1.1 | Comparaison du régime thermique : en milieu naturel, en périphérie et sous les pistes d'atterrissage..... | 111 |
| 6.1.2 | Impact de la neige sur le talus et pied de remblai..... | 112 |
| 6.2 | Seuils critiques de dégel des pistes d'atterrissage ainsi que des talus et pieds de remblai..... | 119 |
| 6.3 | Synthèse des facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol, des impacts anticipés sur l'infrastructure et des recommandations..... | 120 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 7. CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 123 |
| 8. RÉFÉRENCES | 125 |
| <i>ANNEXE 1</i> | 130 |
| <i>ANNEXE 2</i> | 134 |
| <i>ANNEXE 3</i> | 163 |
| <i>ANNEXE 4</i> | 172 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tableau 1 | Calendrier des visites des aéroports du MTQ au | 23 |
| Tableau 2 | Épaisseur de la couche active (CA), épaisseur de remblai et de déblai, maximum historique atteint par la couche active et seuil critique pour la piste de Tasiujaq..... | 94 |
| Tableau 3 | Mesures (cm) de rehaussement des tubes des câbles à thermistances. N.B. Les mesures correspondent à la distance entre la surface du sol et un point de référence sur le tube. Lorsque les valeurs ne changent pas au fil du temps, cela indique qu'il n'y a pas de soulèvement gélival. | 106 |
| Tableau 4 | Variation de la profondeur de dégel maximum aux aéroports du MTQ au Nunavik pour la période de 2008 à 2020. En bleu : amincissement de la couche active; en orangé épaissement de la couche active..... | 107 |
| Tableau 5 | Mesures d'épaisseur de neige en fonction des sites localisés en pied de remblai et en périphérie des pistes d'atterrissage prises par l'équipe du MTQ de 2008 à 2016 aux aéroports d'Inukjuak, Salluit, Quaqtuaq, Kangirsuk et Tasiujaq. Les valeurs en rouges indiquent que l'épaisseur dépasse le seuil critique de 0,50 m pour Inukjuak, de 1 m à Salluit et de 0,80 m pour les autres villages. | 113 |
| Tableau 6 | Indices calculés de gel et de dégel de l'air (FI et TI Tair), du sol (FI et TI Tsol à 5 cm de profondeur), ainsi que le facteur-n de gel et de dégel (Fn Gel et Fn dégel), et épaisseur de neige (données fournies par le MTQ) | 117 |
| Tableau 7 | Seuils de risque critiques des pistes d'atterrissage ainsi que des talus et pieds de remblai du MTQ au Nunavik. En gras, les seuils ayant déjà été atteints. | 119 |
| Tableau 8 | Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol, des impacts anticipés sur les infrastructures et des recommandations pour chacun des aéroports du MTQ..... | 121 |

LISTE DES PLANCHES SYNTHÈSES

| | |
|-------------------------------------|----|
| Planche synthèse 1, Inukjuak | 33 |
| Planche synthèse 2, Puvirnituk..... | 41 |
| Planche synthèse 3, Akulivik | 50 |
| Planche synthèse 4, Salluit..... | 61 |
| Planche synthèse 5, Quaqtaq..... | 68 |
| Planche synthèse 6, Kangirsuk..... | 77 |
| Planche synthèse 7, Aupaluk..... | 83 |
| Planche synthèse 8, Tasiujaq..... | 90 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 Localisation des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik possédant de l'instrumentation pour suivre le régime thermique du pergélisol | 20 |
| Figure 2 Comparaison d'une année climatique, formée du couplet saisons de gel et de dégel, et d'une année calendaire, du 1er janvier au 31 décembre, en fonction du temps | 25 |
| Figure 3 Schéma général des dispositifs instrumentaux de suivi aux aéroports du Nunavik. A) Dispositif type pour un câble à thermistances dans la piste avec un système d'acquisition de données à la base du remblai dans l'épaulement. B) Dispositif type pour un câble et système à la base du remblai dans l'épaulement. C) Dispositif type pour un câble et système en terrain naturel.. | 28 |
| Figure 4. Présence d'eau en pied de remblai et dans le terrain adjacent au câble INU-F2 | 37 |
| Figure 5. Présence d'eau dans le fossé de drainage à proximité du câble INU-F3 | 38 |
| Figure 6. Présence d'eau et d'arbustes dans le fossé de drainage au câble INU-F4 | 38 |
| Figure 7. Le câble HT-303 (dans le roc)..... | 46 |
| Figure 8. Aucune dégradation à proximité du câble PUV-F2..... | 46 |
| Figure 9. Présence d'eau en pied de remblai à proximité du câble PUV-F5... | 47 |
| Figure 10. Site du câble PUV-FOR1a (au centre) soumis à un soulèvement gélique du tubage évalué à 1,5 m. | 47 |
| Figure 11 Aucune dégradation à proximité du câble AKU-F1 | 56 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 12 | Aucune dégradation à proximité du câble HT-162..... | 56 |
| Figure 13 | Aucune dégradation à proximité du câble HT-183..... | 57 |
| Figure 14 | Présence d'eau en pied de remblai à proximité du câble AKU-F2. (câble dans l'eau) | 57 |
| Figure 15 | Aucune dégradation à proximité du câble AKU-F4 | 58 |
| Figure 16. | Aucune dégradation de la piste et du rebord du remblai à proximité du câble SAL-F3..... | 65 |
| Figure 17. | Aucune dégradation à proximité du câble HT-156..... | 73 |
| Figure 18. | Aucune dégradation à proximité du câble QUA2015-F3 | 74 |
| Figure 19. | Présence de neige accumulée dans le fossé de drainage à proximité du câble KANGIR-F2B..... | 81 |
| Figure 20. | Aucune dégradation de la piste à proximité du câble HT-294 | 87 |
| Figure 21. | Aucune dégradation du terrain naturel à proximité du câble HT-299 | 87 |
| Figure 22. | Aucune dégradation à proximité du câble HT-180..... | 95 |
| Figure 23. | Tassement différentiel transversal à la piste et rigoles aux environs du chaînage 5+250 à environ une cinquantaine de mètres du câble HT-181. | 96 |
| Figure 24. | Aucune dégradation à proximité des câbles TAS-F2 (à droite) et HT-181 (à gauche) | 96 |
| Figure 25. | Aucune dégradation à proximité du câble HT-304. Noter la nouvelle pente douce du remblai de la piste à l'arrière-plan..... | 97 |
| Figure 26: | Accumulation d'eau en périphérie de l'aire de stationnement. Noter qu'il y avait déjà un lac avant la construction. | 98 |
| Figure 27 | Température moyenne annuelle du sol selon la profondeur et en fonction de leur emplacement, aux câbles à thermistances installés aux aéroports du MTQ pour l'année 2019-2020. | 112 |
| Figure 28 | Facteur-n de gel en fonction de l'épaisseur de neige (à une densité de 250 kg/m ³) et de la température moyenne annuelle de l'air..... | 115 |
| Figure 29 : | Température moyenne annuelle à la surface du sol en fonction de l'épaisseur du couvert neigeux à l'aéroport de Tasiujaq en 2005 (Allard <i>et al.</i> , 2007) | 116 |
| Figure 30 : | Température moyenne annuelle à la surface du sol en fonction de l'épaisseur et la densité du couvert neigeux dans la vallée de Salluit pour l'année 2002-2003 (Allard <i>et al.</i> , 2004)..... | 116 |
| Figure 31 | Corrélation entre la température de l'air et à la surface du sol (5 cm de profondeur) enregistrée au câble INU-F2, localisé du côté nord-ouest de la piste à 2 m du pied de remblai..... | 118 |

Figure 32 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle A) à l'aéroport de Puvirnituk (HT-303) à environ 100 m du côté est de la piste et à environ 3 m à l'ouest de la route d'accès, en terrain naturel (dans le roc) et B) à l'aéroport d'Akulivik (HT-232) du côté nord de la piste, au chaînage 5+492 m, à environ 43 m de la piste dans les sédiments marins sableux, pour la période de 2017 à 2020. 173

Figure 33 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle à l'aéroport de Salluit C) (SAL-F4) du côté est de la piste, au chaînage 2+185 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai et D) (HT-160) à 25 m de la piste en terrain naturel (till mince sur du roc) au chaînage 2+900 m, pour la période de 2017 à 2020. 174

Figure 34 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle E) à l'aéroport de Salluit (HT-179) à 10 m du bord dans le remblai de la piste au chaînage 2+900 m, ainsi qu'à F) l'aéroport de Quaqtak (HT-158) du côté ouest de la piste, dans le roc, à la hauteur du chaînage 1+150 m à 54 m du pied du remblai en terrain naturel, pour la période de 2017 à 2020. 175

GLOSSAIRE

Base du pergélisol ou plancher du pergélisol. : Limite inférieure du pergélisol au-dessus de laquelle les températures se maintiennent en bas de 0 °C et au-dessous de laquelle les températures demeurent supérieures à 0 °C.

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 qui a percolé dans le pergélisol permet la croissance du coin de glace.

Congère : Amas de neige entassée par le vent.

Consolidation due au dégel : Compression du sol résultant du dégel du pergélisol et du drainage consécutif de l'eau interstitielle.

Couche active : Couche de sol en surface soumise au cycle annuel de gel et de dégel. La profondeur de la base de la couche active correspond à la profondeur maximale du dégel dans une année, déterminé par la profondeur atteinte par l'isotherme de 0 °C. Synonyme : mollisol.

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

Cryostratigraphie : Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

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

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

Degré-jour : Degré d'écart entre la température moyenne d'une journée et une température de référence donnée. Les degrés-jours de gel et les degrés-jours de dégel sont calculés par rapport à 0 °C.

Épaisseur du pergélisol : Distance verticale entre le plafond du pergélisol et la base du pergélisol.

Érosion thermique : Érosion d'un pergélisol à haute teneur en glace par la combinaison de l'action thermique et mécanique de l'eau courante.

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

Fente de contraction thermique : Fissure de traction résultant de contraintes thermiques qui s'exercent dans sol lors de basses températures.

Front de dégel : Limite mouvante entre le sol dégelé et le sol gelé. Utilisé pour parler du dégel annuel du sol.

Front de gel : Limite mouvante entre le sol gelé (ou le sol partiellement gelé) et le sol non gelé. Utilisé pour parler du regel annuel du sol.

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. Se dit aussi pour du roc qui se fracture facilement sous l'action du gel et du dégel.

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

Glace interstitielle : Glace contenue dans les pores du sol.

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

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

Indice de dégel (Ti) : Nombre cumulatif de degrés-jours au-dessus de 0 °C pour une période donnée.

Indice de gel (Fi) : Nombre cumulatif de degrés-jours au-dessous de 0 °C pour une période donnée.

Lentille de glace : Glace formant une lentille surtout horizontale et de dimensions variables

Mare de thermokarst : Mare occupant une dépression fermée qui s'est formée à la suite d'un tassement du sol causé par la fonte de la glace de sol.

Ostioles : Petites buttes ou flaques de terre fraîche formées par l'action du gel. Elles correspondent à des remontées de boue dans la couche active qui se produisent par le biais du soulèvement gélocal et de la cryoturbation. Elles se forment habituellement dans des sédiments à grain fin reposant sur du pergélisol. Lorsqu'ils sont entourés d'un petit bourrelet de cailloux et de végétation, on parle **d'ostioles à bourrelets**

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

Période zéro : Période au cours de laquelle la température demeure près du point de congélation lors du regel annuel (et parfois au cours du dégel) de la couche active.

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

Profondeur de dégel : Distance entre la surface du sol et le front de dégel à un moment donné durant la période de dégel annuel.

Relèvement isostatique : remontée graduelle, suite à la déglaciation, des masses terrestres antérieurement déprimées sous le poids des glaciers.

Soulèvement dû au gel ou Soulèvement gélival : Soulèvement vertical ou déplacement latéral de la surface du sol (ou d'objets se trouvant sur ou dans le sol) causé par la formation de glace dans le sol.

Profil thermique : Terme général désignant la distribution de la température en fonction de la profondeur dans le sol. Nous parlons généralement des températures de surface à partir de la surface du sol, dans la couche active et au niveau du plafond du pergélisol et de températures en profondeur dans le pergélisol.

Régime thermique : Changements dans le profil thermique en fonction des fluctuations journalières, saisonnières et annuelles de la température en surface du terrain.

Seuil critique : Condition limite au-delà de laquelle un changement pourrait survenir ou un aléa se produire. Dans le présent rapport, il s'agit de la profondeur de dégel de la couche active avant construction des pistes. Si le dégel annuel surpassait cette profondeur originale sous une piste, on peut s'attendre à la fonte de glace du sol, ce qui provoquerait un tassement. Dans le cas d'une section de piste construite en déblai, le niveau de ce seuil a été associé à la plus grande profondeur déjà observée au cours des années de suivi. En pied de remblai enneigé, ce seuil est difficile à déterminer clairement, mais il est considéré dépassé lorsque l'épaisseur de neige en pied de remblai est suffisante pour faire en sorte que la température moyenne annuelle en surface du sol dépasse 0 °C; à ce stade le pergélisol commence à se dégrader localement. Pour estimer cette épaisseur en l'absence de mesures, une valeur de densité de la neige de 0,25 a été arbitrairement utilisée.

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.

Tassement dû au dégel : Abaissement de la surface du sol et compression du sol dus à la consolidation résultant du dégel.

Tassements différentiels : Tassements inégaux du sol dû à la variabilité spatiale de ses propriétés.

Teneur en eau : Quantité d'eau contenue dans un sol.

Teneur en glace : Quantité de glace contenue dans un sol.

Teneur en eau volumétrique ou gravimétrique : Rapport entre le volume ou la masse d'eau contenue dans un sol et le volume ou la masse de la fraction solide.

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.

1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Les infrastructures aéroportuaires du ministère des Transports du Québec (MTQ) au Nunavik sont des liens essentiels vers les villes du sud pour le transport des personnes et des marchandises. Elles jouent un rôle important notamment dans le développement économique, la sécurité publique et la qualité de vie des habitants de ces communautés isolées du Nord-du-Québec.

Lors de la construction des infrastructures du MTQ au Nunavik, entre les années 1980 et 1990, le climat était relativement stable, voire même en refroidissement, et le pergélisol était considéré comme un substrat solide et permanent. Or, depuis le début des années 1990, un réchauffement climatique important est observé au Nunavik. En effet, le climat s'est réchauffé d'environ 2 °C et la tendance est appelée à se poursuivre. La hausse attendue de la température annuelle moyenne de l'air pour la période 2040 à 2064 varie entre 2,8 et 5,7 °C et sera combinée à une augmentation de 0,24 à 0,89 mm/jour des précipitations moyennes annuelles, en fonction des régions couvertes par cette étude (Barette *et al.*, sous presse). L'augmentation de la température de l'air et des précipitations a un impact considérable sur le pergélisol, car ces deux facteurs principaux influencent le régime thermique du sol et l'épaisseur de la couche active. Lorsque l'épaisseur de la couche active augmente, le dégel du pergélisol entraîne notamment des tassements différentiels en fonction des propriétés géotechniques variables du sol (p. ex. teneur en glace et type de sédiments).

Parallèlement au réchauffement climatique, la construction d'infrastructures de transport sur pergélisol entraîne des modifications des conditions initiales du milieu, tel que l'écoulement d'eau en surface et sous la surface du sol et la répartition de la couverture de neige. L'albédo des surfaces est aussi modifié. Ces changements ont pour effet de modifier le régime thermique du pergélisol sous l'infrastructure et à sa marge. Ainsi, la présence des infrastructures vient donc amplifier, dans une boucle de rétroaction positive, le processus de dégradation du pergélisol, ce qui a eu pour effet d'endommager prématurément certaines infrastructures construites sur des sols sensibles au dégel (Lévesque *et al.*, 1990; Allard *et al.*, 1993; Tremblay et Doré, 1988; Beaulac et Doré, 2006; Beaulac, 2006; Savard, 2006; Allard et Sarrazin, 2007; Allard *et al.*, 2007; *idem.*, 2009; *idem.*, 2010; L'Hérault *et al.*, 2012; *idem.*, 2012; Sarrazin *et al.*, 2012; Allard *et al.*, 2013; *idem.*, 2013; Gravel *et al.*, 2013; L'Hérault *et al.*, 2014; Verreault, 2015, Roger *et al.*, 2016; Allard *et al.*, 2017, Allard *et al.*, 2018; Mathon-Dufour *et al.*, 2019; Mathon-Dufour *et al.*, 2020). Les dégradations observées, telles que des tassements différentiels et des fissures de tension dépendent notamment de la sensibilité locale du pergélisol au dégel, elle-même attribuable aux caractéristiques géotechniques du sol, de la variabilité climatique (température de l'air et précipitations), des conditions de drainage et de surface, ainsi que des méthodes d'ingénierie appliquées lors de la construction.

Afin de recueillir des données de température du sol, de suivre l'évolution du régime thermique du pergélisol, ainsi que d'évaluer les vulnérabilités potentielles pour les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik, un réseau d'instruments a été mis en place dès le début des années 1990 par le Centre d'études nordiques. Au total, 32 sites de mesure instrumentés d'un câble à thermistance automatisé ont été installés dans 8 des aéroports du MTQ au Nunavik, entre 1987 et 2017 (figure 1).

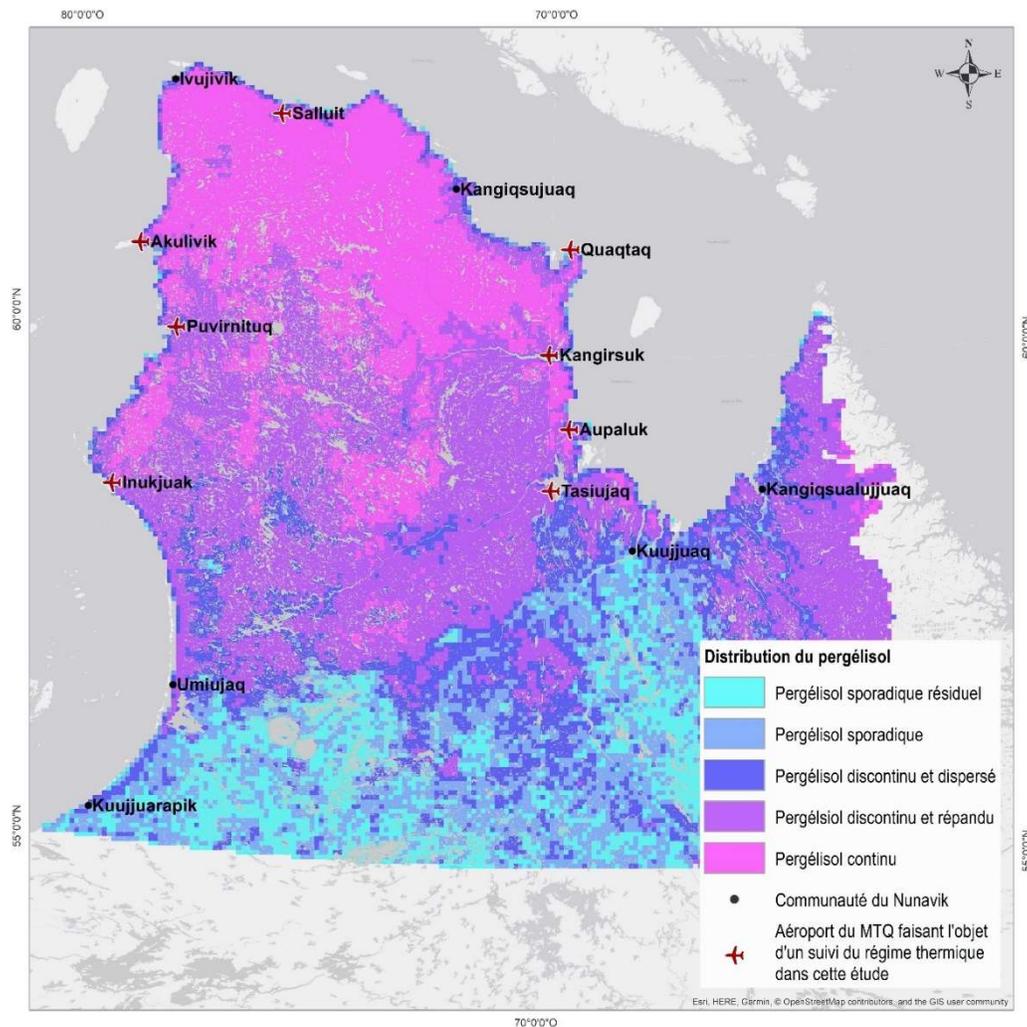


Figure 1 Localisation des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik possédant de l'instrumentation pour suivre le régime thermique du pergélisol
(Adapté de L'Hérault et al., 2017)

Les données recueillies jusqu'en octobre 2020 et interprétées permettront au MTQ de mieux comprendre le contexte environnemental propre à chaque site

aéroportuaire, de valider les hypothèses ayant contribué aux décisions d'adaptation en regard des risques naturels potentiels ainsi que d'anticiper et d'estimer le niveau de risque pour les infrastructures, en lien avec le dégel du pergélisol dans le contexte des changements climatiques. Elles permettront de déterminer le comportement des infrastructures en fonction des variations du climat à court et moyen termes et d'établir une stratégie de maintien des aéroports en fonction du changement climatique sur le long terme.

2. OBJECTIFS

2.1 Objectifs généraux

Les principaux objectifs du projet de recherche sont :

1. Pour la période 2017-2020, suivre l'évolution du régime thermique du pergélisol sur les sites d'infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqaq, Akulivik, Salluit, Puvirnituk et Inukjuak;
2. Évaluer et anticiper les risques actuels et potentiels pour ces ouvrages dans un contexte de CC;

2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

1. Acquérir, archiver, traiter et interpréter les données de températures du pergélisol et de l'air sur les sites d'infrastructures aéroportuaires;
2. Recueillir des observations sur le comportement des ouvrages en lien avec le dégel du pergélisol et le milieu environnant (drainage naturel, enneigement, etc.);
3. Effectuer l'entretien des systèmes d'acquisition de données existants afin d'assurer leur bon fonctionnement;
4. Effectuer un bilan de l'évolution des conditions thermiques et mécaniques du pergélisol;
5. Évaluer l'impact prévisible des CC sur l'évolution des conditions thermiques et mécaniques du pergélisol sur les sites d'infrastructures;
6. Déterminer les facteurs critiques (profondeurs de dégel estival, épaisseurs de neige, températures, etc.) qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol;
7. Analyser et évaluer les risques actuels et potentiels des modifications des conditions de pergélisol sur le comportement des infrastructures dans un contexte de CC;

3. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée fait appel au dispositif intégré d'instrumentation que le CEN a installé stratégiquement sous et en marge des infrastructures aéroportuaires du MTQ de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqtaq, Akulivik, Salluit, Puvirnituk et Inukjuak au Nunavik. (Allard et Sarrazin, 2007; Allard et al., 2007; *idem.*, 2009; *idem.*, 2011; L'Hérault et al., 2012; *idem.*, 2012; Sarrazin et al., 2012; Allard et al., 2013; *idem.*, 2013; L'Hérault et al., 2014; Mathon-Dufour, 2014; Mathon-Dufour et Allard, 2015; Mathon-Dufour et al., 2016; Roger et al., 2016; Allard et al., 2017; Mathon-Dufour et Allard, 2018; Mathon-Dufour et al., 2018, Mathon-Dufour et al., 2019; Mathon-Dufour et al., 2020).

3.1 Récupération des données annuelles et relevé des dégradations: Calendrier des visites sur le terrain

À chaque année l'entretien de l'instrumentation et la collecte des données ont été réalisés à la fin de l'été ou au début de l'hiver, moment où les profondeurs de dégel dans le sol sont à leur maximum. Certaines années, des réparations à l'instrumentation ont été effectuées au milieu de l'été. En 2020, la tournée des sites aéroportuaires a été effectuée du 1^{er} au 26 octobre. Les huit aéroports ont été visités pour télécharger les données des systèmes d'acquisition automatique (tableau 1). Lors de cette mission, la procédure standard déjà appliquée les années antérieures et prévue dans la méthodologie du projet a été suivie à chaque aéroport. De même, lors de la visite, un relevé des dégradations observables autour des câbles a été effectué par le personnel du CEN. Les sites de mesure et les dégradations ont été pris en photo et ajoutés dans la section résultat pour chaque aéroport. Ils aideront notamment à interpréter les phénomènes observés lors de l'analyse de la température du sol. La section 5 quant à elle énumère la liste des réparations effectuées sur l'instrumentation des aéroports du MTQ depuis le début du présent projet.

Tableau 1 Calendrier des visites des aéroports du MTQ au Nunavik pour les missions de terrain en octobre 2020.

| 2020 | Octobre | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|--|---|---|--|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | ... | 24 | 25 | 26 | | | | | |
| Inukjuak | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Puvirnituk | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ |
| Akulivik | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salluit | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| Kangirsuk | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | |
| Quaqaq | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | |
| Aupaluk | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | |
| Tasiujaq | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | |

3.2 Suivi climatique

3.2.1 Acquisition des données : température de l'air

À chaque site aéroportuaire, l'acquisition de températures de l'air est effectuée à l'aide d'une thermistance sous un abri radiatif et branchée à un système d'acquisition de données. La programmation des systèmes d'acquisition fait en sorte qu'une lecture est faite toutes les minutes et que les moyennes horaires sont ensuite enregistrées. Aux sites où Environnement Canada (Inukjuak et Salluit) publie des données climatiques, nos lectures sont comparées et complétées en cas de manques avec celles de cet organisme public (gouvernement du Canada, 2020).

3.2.2 Traitement des données : température de l'air

3.2.2.1 Prétraitement des données de température de l'air

Toutes les séries de données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes. Pour le calcul des moyennes quotidiennes, un manque de plus de 5 heures dans une journée ou de 3 heures consécutives menait à l'exclusion de la donnée. Cette procédure a été appliquée pour les fins statistiques.

3.2.2.2 Détermination des années calendaires et climatiques

Dans le but 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 2). L'utilisation de l'année calendaire, débutant le premier janvier et se terminant le 31 décembre, coupe 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.

La saison de gel débute lorsque les températures moyennes journalières s'abaissent et se maintiennent en dessous de 0 °C et se termine lorsque ces dernières redeviennent supérieures et se maintiennent au-dessus de 0 °C (généralement en milieu d'année calendaire). Commence alors la saison de dégel. Or, le début et la fin des saisons de gel et de dégel varient de quelques jours d'une année à l'autre et lors de la transition elle-même. En effet, il est possible que la température oscille autour de 0 °C pour une période allant jusqu'à quelques semaines, rendant difficile la délimitation de la saison climatique. Afin de déterminer une date précise pour le début et la fin de l'année climatique, les données journalières ont été lissées à l'aide d'une moyenne mobile centrée d'ordre 9. De cette façon, les fluctuations moins significatives lors de la période de transition sont atténuées, tout en prenant compte du poids relatif de ces dernières, nécessaires au calcul des indices de gel et de dégel.

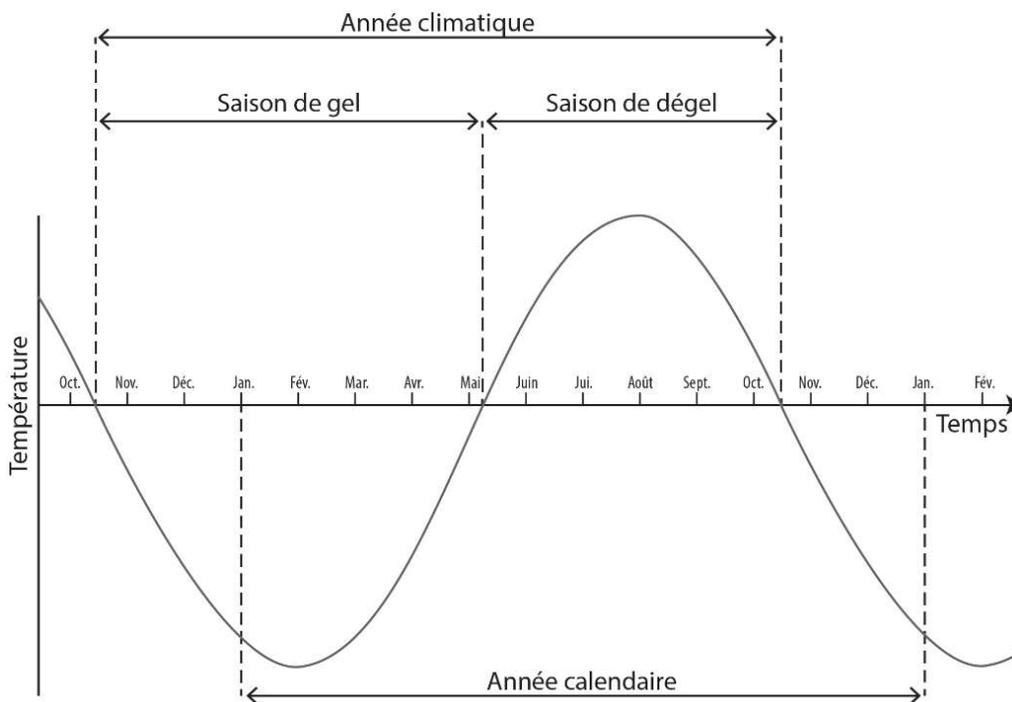


Figure 2 Comparaison d'une année climatique, formée du couplet saisons de gel et de dégel, et d'une année calendaire, du 1er janvier au 31 décembre, en fonction du temps

(Adapté de Mathon-Dufour, 2014)

3.2.2.3 Calcul des moyennes journalière, saisonnière et annuelle de la température de l'air

Les moyennes (\bar{x}) (arithmétiques) journalières, saisonnières (gel et dégel) et annuelles (climatique et calendaire) sont calculées en faisant la somme des valeurs numériques (°C) divisé par le nombre de ces valeurs numériques (n).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Les moyennes mensuelles ne sont pas analysées dans ce présent rapport, mais elles ont été placées sous forme de tableaux en annexe pour des fins de références.

3.2.2.4 Calcul des degrés-jours de gel et dégel

Les indices de gel (F_i) et de dégel (T_i) correspondent au nombre cumulatif des degrés-jours pour une année par rapport à une température de référence (0 °C) (Harris et al., 1988). L'indice de gel a été calculé en faisant la somme des degrés-jour négatifs (DJG_a) d'une saison de gel à l'intérieur d'une année climatique. De même, l'indice de dégel a été obtenu en faisant la somme des degrés-jours positifs (DJD_a) d'une saison de dégel à l'intérieur d'une année climatique.

$$Fi = \sum DJG_a \quad (2)$$

$$Ti = \sum DJD_a \quad (3)$$

Le ratio entre les indices de gel et de dégel (Fi/Ti) permet de déterminer l'importance du nombre de degrés-jours de gel par rapport au nombre de degrés-jours de dégel. Cet indice constitue un indice du bilan thermique des températures de l'air pour ainsi évaluer l'apport calorifique emmagasiné par le sol durant une année climatique. Plus ce rapport est élevé, plus les températures annuelles seront basses (moins le sol aura emmagasiné de chaleur) et, à l'inverse, plus ce rapport est faible, moins les températures sont basses (plus le sol aura emmagasiné de chaleur) durant cette année climatique.

3.2.2.5 Calcul du facteur-n

Plusieurs facteurs influencent le régime thermique du sol, notamment les conditions atmosphériques (températures de l'air, vitesse du vent, précipitations, radiation solaire, etc.), la nature même de la surface (albédo, émissivité et conductivité thermique des matériaux constituant la surface), le couvert végétal et le couvert nival. Comme bon nombre de ces facteurs varient au fil du temps, et qu'ils ont un impact les uns sur les autres, il est très difficile de mesurer ou d'estimer la contribution exacte de chacune de ces conditions de surface sur le régime thermique du sol. Pour cette raison, un facteur de transition (n) est calculé afin d'évaluer l'impact de l'ensemble des conditions sur les températures du sol. Le facteur-n correspond au rapport entre la somme des degrés-jours en surface du sol et la somme des degrés-jours dans l'air (Harris, 1981). Ainsi, plus le facteur-n est élevé, plus le transfert de chaleur entre le sol et l'atmosphère est efficace. À l'inverse, un facteur-n entre 0 et 1 indique que le transfert thermique est atténué par des facteurs de surface. Comme le facteur-n varie en fonction des saisons, il a été calculé pour le gel (n_g) et le dégel (n_d).

Le facteur-n (n), le facteur-n de gel (n_g) et le facteur-n de dégel (n_d) sont calculés à l'aide des formules suivantes :

$$n = \frac{\sum DJ_s}{\sum DJ_a} \quad (4)$$

$$n_g = \frac{\sum DJG_s}{\sum DJG_a} \quad (5)$$

$$n_d = \frac{\sum DJD_s}{\sum DJD_a} \quad (6)$$

3.2.3 Données de précipitations

À l'heure actuelle, il n'y a pas de données de précipitations enregistrées dans les villages du Nunavik, à l'exception de Salluit et d'Inukjuak, où elles sont partielles et irrégulières. Or, étant donné le fort potentiel isolant de la neige, il

est possible d'évaluer l'impact de cette dernière sur le régime thermique du pergélisol à l'aide des températures de surface enregistrées par les câbles à thermistances. Ainsi, lorsque les fluctuations de la température de l'air sont atténuées, il est possible d'en déduire que le couvert neigeux y est important. À l'inverse, lorsque les températures de surface fluctuent de façon synchrone à celles de l'air, il est possible d'en déduire que le couvert neigeux y est mince ou absent.

Notons aussi qu'une accumulation de neige affectant le régime thermique du pergélisol résulte le plus souvent d'une redistribution de la neige au sol par le vent et par les opérations de déneigement, sans qu'il y ait un lien réel avec les précipitations.

3.3 Suivi thermique du pergélisol

3.3.1 Acquisition des données : température du pergélisol

À chaque site aéroportuaire, l'acquisition de températures du sol est effectuée à l'aide de câbles à thermistances installés à même l'infrastructure et en périphérie et branchés à un système d'acquisition de données (figure 3). La programmation des systèmes d'acquisition fait en sorte que la lecture de la température est faite toutes les minutes. Tous les câbles à thermistances qui font l'objet d'un suivi dans le présent rapport sont localisés sur un plan et documentés quant à la distribution verticale des thermistances et le type de système d'acquisition de données dans les sections résultats propres à chaque aéroport.

Afin d'optimiser la couverture spatiale des câbles à thermistances, ces derniers ont été répartis selon le lieu, mais aussi selon le positionnement par rapport à l'infrastructure : 1) dans la zone d'emprise de l'infrastructure, qui comprend la piste (1.1) (déneigée en hiver), le talus ou épaulements (1.2) ainsi que le pied de remblai (1.3), qui correspondent approximativement à la zone d'accumulation de neige, et 2) dans le terrain naturel servant de référence.

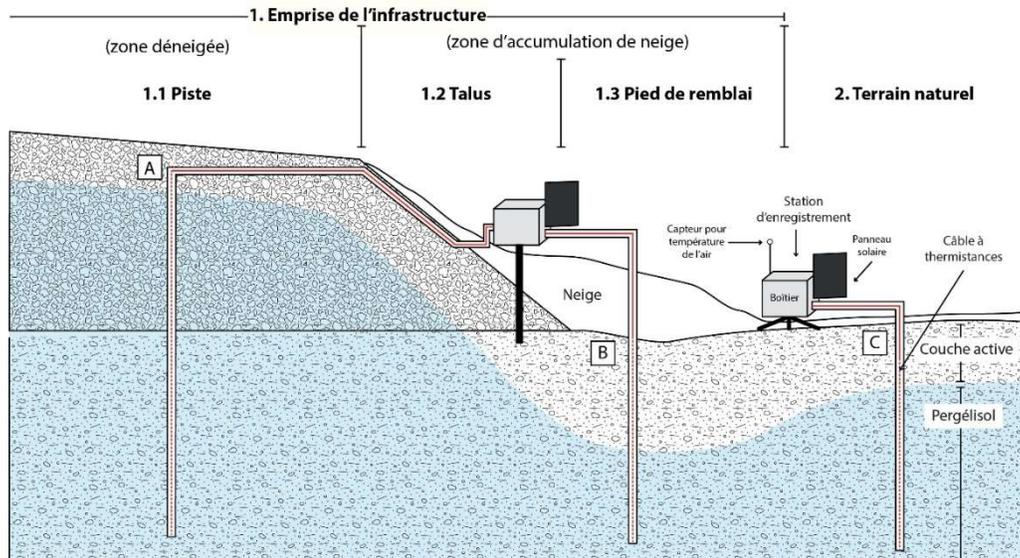


Figure 3 Schéma général des dispositifs instrumentaux de suivi aux aéroports du Nunavik. A) Dispositif type pour un câble à thermistances dans la piste avec un système d'acquisition de données à la base du remblai dans l'épaulement. B) Dispositif type pour un câble et système à la base du remblai dans l'épaulement. C) Dispositif type pour un câble et système en terrain naturel.

3.3.2 Traitement des données : température du pergélisol

3.3.2.1 Prétraitement des données de température du pergélisol

Toutes les données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes à l'aide d'un filtre numérique. Pour le calcul des moyennes quotidiennes, un manque de plus de 5 heures dans une journée menait à l'exclusion de la donnée. Cette procédure a été appliquée pour les fins statistiques.

3.3.2.2 Traitement, analyse et interprétation des données

Les données de température du sol obtenues à l'aide des câbles à thermistances ont été analysées et ont servi à déterminer le régime thermique du pergélisol. Elles ont été utilisées afin d'établir la date d'amorce du dégel, la durée et le regel de la couche active, la profondeur maximale de dégel saisonnier, les températures moyennes en fonction de la profondeur ainsi que l'existence d'anomalies dans le régime thermique du pergélisol, telles que l'impact de la présence ou d'un écoulement d'eau dans le sol ou encore de l'effet isolant de l'accumulation de neige. Les données de températures du sol ont été représentées notamment à l'aide de diagrammes et de graphiques mettant en relation la température selon le temps, la profondeur et l'emplacement par rapport à l'infrastructure.

3.3.2.3 *Calcul de la variation interannuelle de l'épaisseur de la couche active*

Le calcul de la variation interannuelle de la couche active (Δ m), soit la profondeur maximum atteinte par le front de dégel, correspond à la différence entre la profondeur maximum atteinte par le front de dégel de l'année précédente et celle de l'année d'observation. Les valeurs négatives indiquent une diminution de l'épaisseur de la couche active comparativement à l'année précédente alors que les valeurs positives indiquent une augmentation de l'épaisseur de la couche active comparativement à l'année précédente. La variation interannuelle en pourcentage du maximum atteint par la couche active (Δ %) quant à elle a été obtenue faisant le rapport ramené sur 100 entre la variation interannuelle de l'année cible et l'épaisseur de la couche active de l'année précédente.

3.3.2.4 *Calcul des seuils critiques*

Le seuil critique est un indicateur qui a été déterminé empiriquement à l'aide des données disponibles sur les aéroports du MTQ au Nunavik. Il se veut un outil simple et facile d'utilisation, généralisant les conditions propres à chaque site, afin d'aider à prévoir les dégradations possibles. En effet, lorsque ce seuil est atteint, la profondeur maximale de dégel se trouve alors dans le pergélisol. De manière générale, c'est lorsque le dégel atteint cette limite dans un pergélisol sensible au dégel que les dégradations observées, telles que les tassements, sont les plus fréquentes et importantes.

Le seuil critique pour une piste donnée correspond à la profondeur, par rapport à la surface du remblai actuel, de la base de la couche active pré-construction, dans le terrain naturel. Les valeurs originales de profondeur de la couche active proviennent de rapports préliminaires effectués par les consultants avant la construction des ouvrages. Dans les cas où cette valeur a déjà été atteinte ou dépassée, le nouveau seuil correspond à la profondeur historique maximale observée de la couche active au cours des années de suivi. Ce dernier seuil sera donc valide tant que le climat ne réchauffera pas à nouveau et que la couche active ne dépassera pas ce dernier.

Le seuil critique des talus et pieds de remblai de la piste ne peut être déterminé de la même manière que dans la piste d'atterrissage, car ces derniers sont soumis à une dynamique complexe régie par la présence d'eau, de neige et de végétation le long de la piste, facteurs variables en fonction de l'entretien fait par l'opérateur tout au long de l'année. Aussi, la profondeur de la couche active sous la majorité des talus et des pieds de remblai a déjà largement dépassé la profondeur maximale atteinte par la couche active pré-construction et ceux-ci sont déjà dans un équilibre thermique précaire. De telle manière, un seuil critique d'enneigement sur les talus et pieds de remblai a donc plutôt été fixé à l'aide de l'épaisseur de neige qui peut être facilement mesurée sur le terrain ou à l'aide de caméra automatique. Ce seuil correspond à une épaisseur de neige maximale au-delà de laquelle le pergélisol commence à dégeler. En l'absence de mesures récentes de neige, pour la préparation de ce rapport, ces valeurs

ont été extraites de la littérature pertinente au Nunavik pour les cas où il en existait. Dans les autres cas la relation mathématique élaborée par Riseborough et Smith (1998) entre l'épaisseur de neige en fin d'hiver, le facteur-n de gel et la température moyenne de l'air locale a été utilisée pour estimer cette épaisseur critique. Cette relation s'applique pour une valeur de densité de la neige de 0,25.

3.3.2.5 Température du pergélisol

Dans le cadre de ce rapport, les termes pergélisol chaud et froid sont utilisés afin de décrire sommairement le type de régime thermique du pergélisol. Ainsi, lorsque le pergélisol se trouve en dessous de -2 °C, il est considéré comme froid et entre -2 et 0 °C, il est considéré comme chaud. Un pergélisol chaud est considéré comme plus sensible au dégel, particulièrement si la teneur en particules fines est élevée et s'il est salin.

4. RÉSULTATS

Pour chaque village, une brève description des caractéristiques générales des dépôts de surface et le détail de l'instrumentation ont été ajoutés en début de section afin de mettre le lecteur en contexte et de faciliter la compréhension des résultats. Ces derniers ont été synthétisés sous forme de planches avec un fond de photographie aérienne sur lequel l'instrumentation est localisée tandis que les résultats et tendances sont présentés en graphiques et en tableaux. Un résumé sous forme de points saillants est présenté à la fin afin de faire ressortir les tendances, phénomènes, anomalies, etc. observés au cours de l'année et depuis le début du suivi des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik. Par souci de clarté, seules les données récentes, c'est-à-dire celles des 11 dernières années, sont présentées sur les planches synthèses, sans toutefois limiter l'analyse de l'évolution du régime thermique et climatique à cette période de temps.

4.1 Inukjuak

4.1.1 *Caractéristiques générales des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation*

4.1.1.1 *Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

L'aéroport d'Inukjuak ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1987. La piste d'atterrissage d'une longueur de 1190 m et d'une largeur de 44 m est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (043-223° N) à une altitude moyenne de 29 m (Allard *et al.*, 2007).

Les sols rencontrés à Inukjuak sont généralement sableux, avec des proportions variables de silt et de gravier (L'Hérault *et al.*, 2012 ; Verreault, 2015). Les dépôts sableux se présentent souvent sous la forme de vastes terrasses. Il s'agit d'anciennes plages marines laissées dans le paysage à la suite du relèvement isostatique. À proximité de la piste, plusieurs zones de dépôts sableux mal drainés ont été observées en surface. Il en résulte que des fossés longent la piste sur les deux côtés. Les analyses granulométriques pratiquées sur les échantillons de sol ont révélé une quantité significative de silt et d'argile dans ces sédiments superficiels, suggérant un sol plutôt sensible au gel (Allard *et al.*, 2007 ; L'Hérault *et al.*, 2012). D'après les forages géotechniques réalisés en 2008 à l'aéroport, la profondeur du socle rocheux varie entre 4,64 et 10,91 m à proximité de la piste (L'Hérault *et al.*, 2012).

4.1.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Inukjuak comprend trois câbles à thermistances automatisés (Planche synthèse 1, tableau 1):

- **INU-F2** : Le câble INU-F2 a été installé en 2008. Il est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+210 m, à 2 m du pied de remblai. Il comporte 15 thermistances situées entre 0,05 et 12 m dans le sol naturel et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 (Campbell Scientific Inc.).
- **INU-F3** : Le câble INU-F3 a été installé en 2015. Il est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+704 m, à 4 m du pied de remblai. Il comporte 14 thermistances situées entre 0,05 et 8 m dans le sol naturel. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **INU-F4** : Le câble INU-F4 a été installé en 2015. Il est localisé du côté sud-est de la piste, au chaînage 6+006 m, à 1 m du pied de remblai. Il comporte 14 thermistances situées entre 0,05 et 8 m, dont les 4 premières sont situées dans le remblai d'environ 0,8 m d'épaisseur et les 10 dernières dans le sol naturel sous-jacent. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Inukjuak.

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|---|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| INU-F2 | Pied de remblai | 12,0 | 15 | 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12 | 2008-10-07 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| INU-F3 | Pied de remblai | 8,0 | 14 | 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 | 2015-10-21 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| INU-F4 | Pied de remblai | 8,0 | 14 | 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 | 2015-10-22 | automatisée/CR1000 | température du sol |

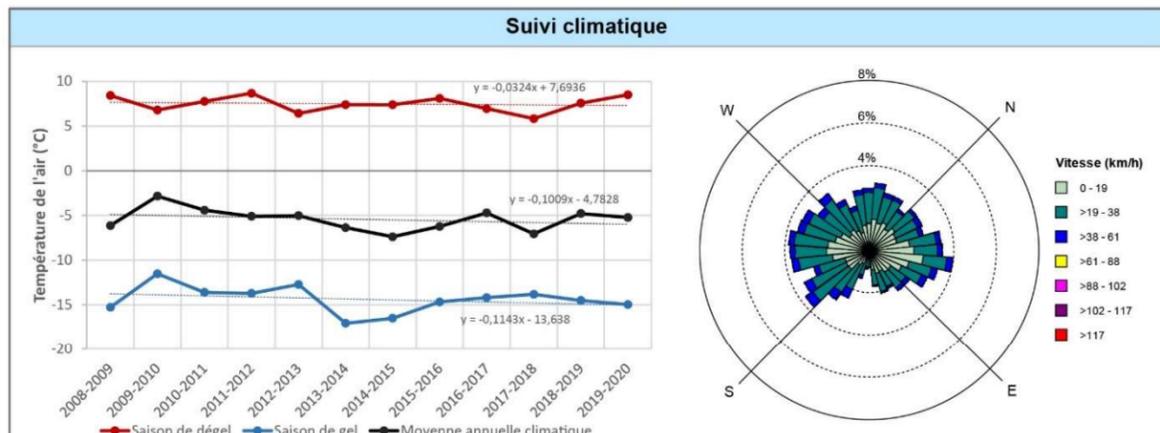


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020.

Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période de 1992 à 2016.

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 29-oct | 19-oct | 13-nov | 23-oct | 13-oct | 26-oct | 29-oct | 10-oct | 12-oct | 25-oct | 09-oct | 30-oct | 21-oct |
| Fin | 03-juin | 11-mai | 27-mai | 28-mai | 26-mai | 20-mai | 30-mai | 25-mai | 08-mai | 10-juin | 12-mai | 23-mai | 24-mai |
| Durée | 217 | 204 | 195 | 218 | 225 | 206 | 213 | 228 | 208 | 228 | 215 | 206 | 214 |
| Moyenne T°C | -15,27 | -11,53 | -13,60 | -13,72 | -12,72 | -17,06 | -16,50 | -14,67 | -14,19 | -13,82 | -14,51 | -14,96 | -14,38 |
| Indice de gel (FI) | 3329 | 2363 | 2666 | 3004 | 2874 | 3532 | 3360 | 2952 | 3165 | 3165 | 3134 | 3098 | 3084 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 04-juin | 12-mai | 28-mai | 29-mai | 27-mai | 21-mai | 31-mai | 26-mai | 09-mai | 11-juin | 13-mai | 24-mai | 25-mai |
| Fin | 18-oct | 12-nov | 22-oct | 12-oct | 25-oct | 28-oct | 09-oct | 11-oct | 24-oct | 08-oct | 29-oct | 17-oct | 19-oct |
| Durée | 136 | 184 | 147 | 136 | 151 | 160 | 131 | 138 | 168 | 119 | 169 | 146 | 149 |
| Moyenne T°C | 8,42 | 6,80 | 7,76 | 8,68 | 6,42 | 7,40 | 7,39 | 8,09 | 6,95 | 5,84 | 7,56 | 8,50 | 7,48 |
| Indice de dégel (TI) | 1153 | 1258 | 1148 | 1189 | 976 | 1191 | 975 | 1092 | 1175 | 701 | 1285 | 1249 | 1116 |
| Moyenne annuelle climatique | -6,13 | -2,83 | -4,41 | -5,10 | -5,02 | -6,36 | -7,39 | -6,23 | -4,71 | -7,06 | -4,79 | -5,22 | -5,44 |
| Ratio (FI/TI) | 2,89 | 1,88 | 2,32 | 2,53 | 2,94 | 2,97 | 3,62 | 3,08 | 2,51 | 4,52 | 2,44 | 2,48 | 2,85 |

Planche synthèse 1

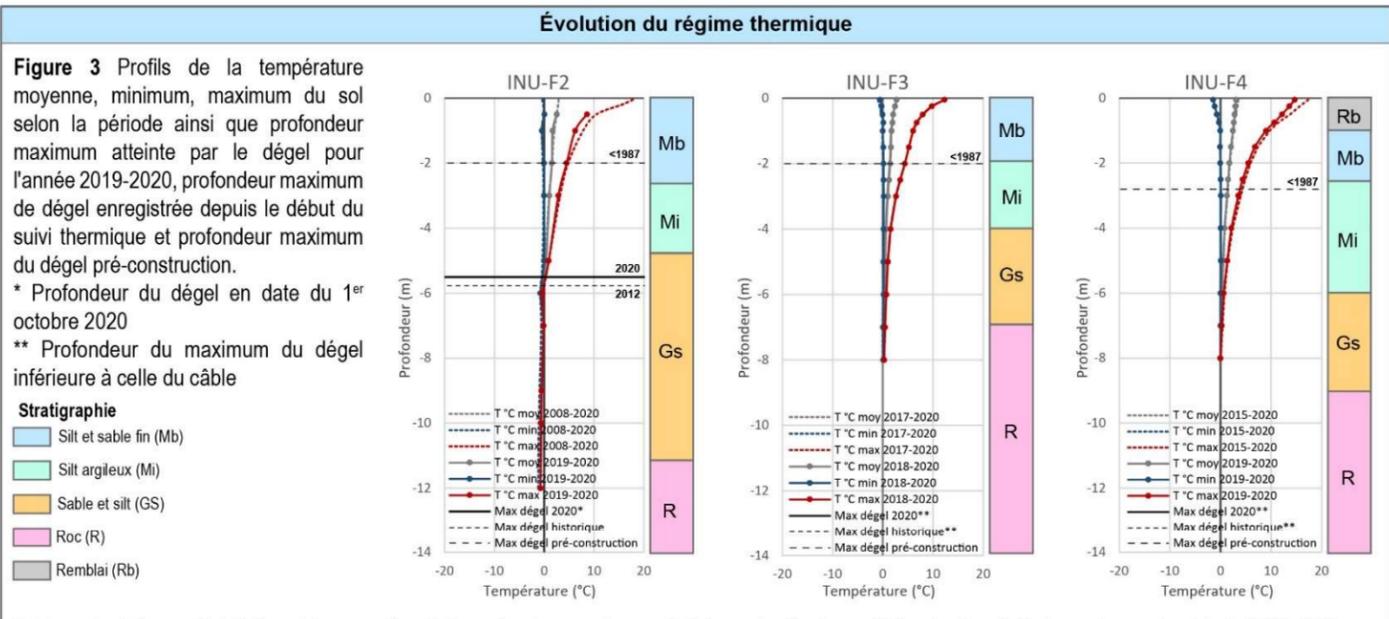


Tableau 3 et Figure 4 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020.

| Année | INU-F2 | | | INU-F3 | | | INU-F4 | | |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|--------|-------|------|--------------|-------|----------------|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | -5,68 | - | 2008-11-06 | | | | | | |
| 2009 | -5,66 | -0,02 | 2009-11-11 | | | | | | |
| 2010 | -5,75 | 0,09 | 2010-11-21 | | | | | | |
| 2011 | -5,76 | 0,01 | 2011-11-22 | | | | | | |
| 2012 | -5,77 | 0,01 | 2012-11-24 | | | | | | |
| 2013 | -5,68 | -0,08 | 2013-11-23 | | | | | | |
| 2014 | -5,72 | 0,04 | 2014-11-23 | | | | | | |
| 2015 | - | - | - | | | | -7,62 | - | 2016-02-07 |
| 2016 | - | - | - | | | | - | - | - |
| 2017 | -5,55 | - | 2017-11-26 | | | | - | - | - |
| 2018 | -5,35 | 0,20 | 2018-11-21 | | | | - | - | - |
| 2019 | -5,61 | -0,25 | 2019-11-06 | | | | - | - | - |
| 2020 | *-5,50 | - | - | | | | - | - | - |
| Moyenne (m) | -5,64 | 0,00 | 21-nov | | | | -7,62 | | 07-févr |

Variations récentes du maximum de dégel

| Influence du couvert nival | Fort | Fort | Fort |
|----------------------------|--------------------------------------|--|--|
| | Épaississement important depuis 2018 | La profondeur maximum du dégel se situe en dessous de la dernière thermistance | La profondeur maximum du dégel se situe en dessous de la dernière thermistance |

* Profondeur du dégel en date du 1^{er} octobre 2020

* Profondeur du dégel en date du 1^{er} octobre 2020

4.1.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol à l'aéroport d'Inukjuak

4.1.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 1, Figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air pour l'année 2019-2020 est de -5,22 °C, ce qui est au-dessus de la moyenne de -5,46 °C enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence à cause d'un été au-dessus de la moyenne. L'indice de gel (*Fi*) fut très légèrement supérieur (3098 comparativement à 3084) à la moyenne, indiquant un hiver froid, mais l'indice de dégel (*Ti*) est nettement supérieur (1249 comparativement à 1116) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.1.2.2 Régime thermique du pergélisol (Planche synthèse 1, figures 3 et 4 et tableau 3)

4.1.2.2.1 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage

Câble INU-F2 :

- Lors du téléchargement des données enregistrées en octobre pour l'année 2019-2020, la profondeur maximum de dégel n'était pas encore atteinte au câble INU-F2, localisé en pied de remblai.
- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur atteinte par la couche active en date du 1^{er} octobre 2020 est de 5,50 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 5,64 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble INU-F2.
- La profondeur de la couche active, en date du 1^{er} octobre 2019, se situe dans le dépôt de sable et de silt (Gs) qui repose directement sur le roc évalué à 11 mètres de profondeur à cet endroit.
- Pour l'année 2019-2020, le câble INU-F2 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -0,76 et -0,13 °C ce qui en fait un pergélisol chaud, près du point de fusion.

Câble INU-F3 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active au câble INU-F3, localisé en pied de remblai, est en dessous de 8 m, profondeur maximale du câble lui-même.
- La profondeur de la couche active de plus de 8 m d'épaisseur a atteint le roc, dont la profondeur est évaluée à 6,8 m à cet endroit.

- Pour l'année 2019-2020, le câble INU-F3 présente un profil dont la température moyenne varie entre 0,18 et 2,74 °C sur toute sa profondeur, ce qui indique qu'il n'y a plus de pergélisol dans les dépôts.

Câble INU-F4 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active au câble INU-F4, localisé en pied de remblai, est en dessous de 8 m, profondeur maximale du câble lui-même.
- La profondeur maximale de la couche active se situe encore probablement dans le dépôt de sable et de silt (Gs) qui repose directement sur le roc évalué à 9,25 mètres de profondeur à cet endroit.
- Pour l'année 2019-2020, le câble INU-F4 présente un profil dont la température moyenne varie entre -0,01 et 3,10 °C ce qui indique que le pergélisol est presque complètement dégelé dans les dépôts meubles.

4.1.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.1.3.1 Évolution récente : 2008-2020

Les câbles INU-F2, INU-F3 et INU-F4, localisés en pied de remblai de la piste d'atterrissage, présentent tous une couche active très épaisse. Le pergélisol en dessous est près du point de dégel. Depuis 2017, les thermistances près de la surface indiquent que le sol ne regèle pas en hiver au câble INU-F2. De même, les températures enregistrées aux câbles INU-F3 et INU-F4 indiquent que le sol ne regèle pas entre 1 et 7 m depuis leur mise en fonction en 2017 et 2016 respectivement. À ces endroits, d'importantes accumulations de neige (déposée mécaniquement et soufflée par le vent) en hiver et des mares d'eau stagnante dans les fossés en été y sont aussi observées (figure 4, 5 et 6). L'important couvert nival (accentué par la présence d'arbustes) combiné aux mauvaises conditions de drainage observées en pied de remblai contribue au réchauffement du pergélisol en empêchant l'extraction de la chaleur durant la saison de gel, et ce, malgré les hivers froids de 2014 à 2019. D'ailleurs, au site INU-F4, le maximum de dégel enregistré pour la saison de dégel 2015 n'est atteint que l'année suivante, en février 2016, ce qui témoigne de l'importante quantité de chaleur latente liée au changement de phase de l'eau.

4.1.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Avec une augmentation des températures projetées de 2,3 à 3,7 °C pour la période 2041-2070, le front de dégel gagnera progressivement en profondeur (Ouranos, 2015). Selon les simulations effectuées par l'Hérault et al. (2012) à l'aide des températures du câble INU-F2, les résultats indiquent que le profil thermique sera complètement au-dessus du point de congélation et qu'au centre-piste la couche active s'approfondira d'environ 3 m supplémentaires d'ici 2050. Cependant, la dégradation prévue pourrait s'accélérer, à court terme,

advenant une série d'années chaudes telle que connue en 2010. En pied de remblai, l'épaississement progressif du maximum de dégel sous le niveau actuel dans le dépôt de sable et silt fluvioglaciaire (Gs) (teneur en eau volumétrique de 0,1 à 0,22 m³/m³) diminuera la capacité portante de l'infrastructure et augmentera les risques de tassements. Ces tassements pourraient éventuellement engendrer de nouvelles fissures de tension en bordure du remblai telles que celles antérieurement observées par Allard et al. (2007). De plus, les conditions plus chaudes en périphérie de l'infrastructure vont, par transfert latéral de la chaleur, se propager vers le centre-piste et ultimement y provoquer des tassements (L'Hérault et al., 2012). Sous l'infrastructure, la profondeur du maximum de dégel est inconnue, mais se trouve probablement à l'interface du remblai, qui varie de 1 à 5 m, et des sédiments marins (Mb et Mi) (teneur en eau volumétrique de 0,14 à 0,33 m³/m³) qui atteignent jusqu'à 9 m de profondeur. Un approfondissement du maximum de dégel dans le terrain naturel sous la piste pourrait entraîner des tassements différentiels ainsi qu'une perte de la capacité portante.

4.1.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol à Inukjuak :

La problématique découle principalement de l'accumulation de neige en bordure de la piste à laquelle s'ajoutent le mauvais drainage du terrain naturel sur lequel elle a été construite et la difficulté d'établir des fossés efficaces à cause des pentes faibles autour de la piste. Les modifications au régime thermique du pergélisol sont causées conjointement par :

- L'augmentation de la température de l'air à cause du changement climatique ;
- L'accumulation de neige en périphérie des deux côtés de la piste durant la saison de gel ;
- La présence d'eau stagnante dans les fossés de drainage et le mauvais drainage du terrain adjacent durant la saison de dégel ;
- La présence de végétation arbustive en pied de remblai.

4.1.3.4 Seuil critique sous la piste d'atterrissage :

Le seuil critique pour la stabilité de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel, à laquelle il faut ajouter l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la profondeur de la couche active en terrain naturel variait entre 0,70 et 2,00 m, avant le début des travaux de construction (Pluritec consultants inc., 1981 ; Cogemat inc., 1984), et l'épaisseur ajoutée de remblai varie actuellement entre 1 et 5 m, selon les plans tel que construits. Pour l'instant, il n'y a pas de câble à thermistances sous la piste pour mesurer la profondeur maximum de dégel. Toutefois, l'absence de tassement à ce jour dans la partie centrale de la piste suggère que la profondeur de dégel n'a encore jamais atteint la base de la couche active pré-construction .

4.1.3.5 Seuil critique sur les talus et en pied de remblai

Le pergélisol sous les talus et pieds de remblai de la piste d'Inukjuak a déjà fondu sur plusieurs mètres de profondeur. Pour l'aéroport d'Inukjuak, la valeur critique d'épaisseur de neige qui ne devrait pas être dépassée en pied de remblai pour maintenir le pergélisol sous les conditions climatiques actuelles est estimée comme étant de l'ordre de 0,50 m. Cette valeur a été déterminée à Umiujaq par Ménard *et al.* (1998) où le climat s'approche de celui d'Inukjuak

4.1.4 Signes de dégradation

Les figures 4, 5 et 6 montrent le mauvais drainage en pied de piste dans lequel baignent les câbles à thermistances. Cependant, notre personnel n'a observé aucun tassement en bordure du remblai ou dans la piste elle-même au voisinage des câbles.



Figure 4. Présence d'eau en pied de remblai et dans le terrain adjacent au câble INU-F2

(Photo : Denis Sarrazin, 1^{er} octobre 2020)



Figure 5. Présence d'eau dans le fossé de drainage à proximité du câble INU-F3
(Photo : Denis Sarrazin, 1^{er} octobre 2020)



Figure 6. Présence d'eau et d'arbustes dans le fossé de drainage au câble INU-F4
(Photo : Denis Sarrazin, 1^{er} octobre 2020)

4.2 Puvirnitug

4.2.1 *Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation*

4.2.1.1 *Synthèse de la répartition spatiale, de l'épaisseur et des propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

L'aéroport de Puvirnitug et ses infrastructures ont été achevés en 1990. La piste d'atterrissage, qui fait 2044 m de longueur et 90 m de largeur, est orientée selon un axe nord-nord-ouest sud-sud-est (011-191° N), à une altitude moyenne de 25,6 m (Allard et al., 2007).

La piste repose sur trois unités géologiques de surface différentes soit des affleurements rocheux, des dépôts d'origine marine et du till remanié lors du retrait de la mer de Tyrrell, donc plutôt sableux et pauvres en particules fines. La répartition spatiale de ces trois unités géologiques de surface suit un patron bien spécifique qui est intimement lié à la topographie régionale caractérisée par un relief ondulé où alternent sommets et dépressions de faible amplitude (dénivellation inférieure à 30 m). Les parties surélevées correspondent essentiellement à des affleurements rocheux dont la surface lisse est marquée par des polis glaciaires, tandis que les dépressions sont, quant à elles, comblées de dépôts meubles d'origine marine et/ou glaciaire. Le roc qui délimite ces dépressions peut plonger abruptement ce qui forme des cuvettes profondes à l'intérieur desquelles l'épaisseur des dépôts argileux peut atteindre plus de 16 m. La piste est en grande partie construite sur des affleurements rocheux. Toutefois, elle traverse une vallée remplie de dépôts meubles argileux riches en glace entre les chaînages 6+125 et 6+390 m. C'est dans cette section de la piste traversée par la vallée qu'ont été observées par le passé la majorité des dégradations qui ont nécessité des travaux d'adaptation (L'Hérault et al., 2012).

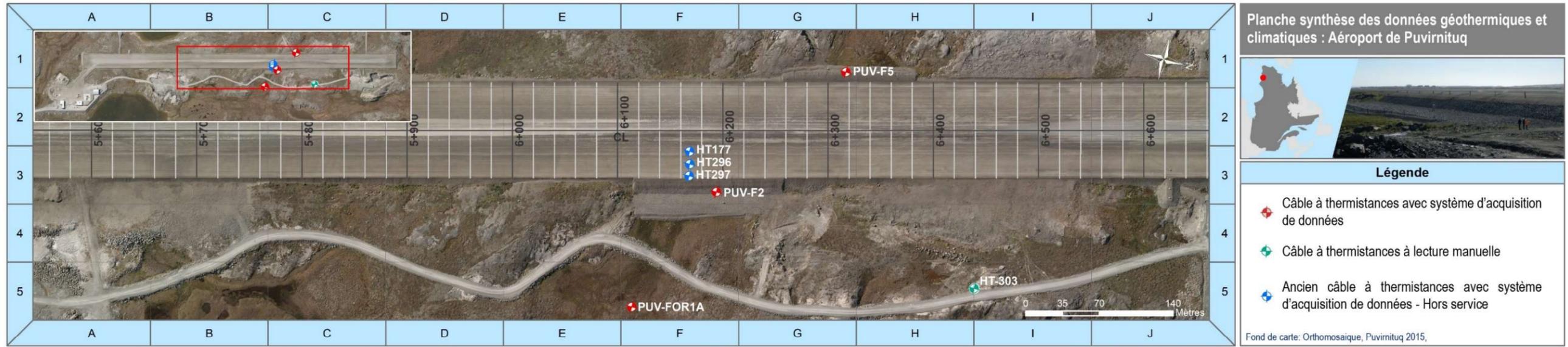
4.2.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Puvirnitug comprend six câbles à thermistances automatisés (dont seulement trois sont fonctionnels) et un câble à thermistances à lectures manuelles (Planche synthèse 2, tableau 1 et figure 3) :

- **PUV-F2** : Le câble PUV-F2 a été instrumenté en 2008 et automatisé en 2009. Il est localisé du côté est de la piste sous une berme à convection installée en 2009, au chaînage 6+197 m, à moins d'un mètre de l'ancien pied de remblai. Il comporte 15 thermistances situées entre 2 m de profondeur, correspondant à l'interface de la berme à convection et du sol naturel, et 17 m de profondeur dans le sol sous-jacent afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **PUV-F5** : Le câble PUV-F5 a été instrumenté en 2008 et automatisé en 2009. Il est localisé du côté ouest de la piste sous une berme à convection

installée en 2009, au chaînage 6+315 m, à moins d'un mètre de l'emplacement de l'ancien pied de remblai. Il comporte 12 thermistances situées entre 2 m de profondeur, correspondant à l'interface de la berme à convection et du sol naturel, et 8,5 m de profondeur dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.

- **PUV-FOR1a** : Le câble PUV-FOR1a a été installé en 2005. Il est localisé à environ 122 m du côté est de la piste et à environ 50 m de la route d'accès aux carrières, en terrain naturel (milieu argileux). Il comporte 11 thermistances situées entre 0,05 et 3,75 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT-177, HT-296 et HT-297** : Les câbles HT-177, HT-296 et HT-297 ont été installés en 1991 lors de la construction de la piste et automatisés en 2005. Les trois câbles installés dans le remblai de la piste forment une section transversale, partant de la partie centrale vers le bord de la piste, au chaînage 6+170 m approximativement. Le système d'acquisition, commun aux trois câbles, ne fonctionne plus depuis 2010 à cause d'un bris causé par des travaux d'excavation et l'enregistrement des données a cessé depuis.
- **HT-303** : Le câble HT-303 a été installé en 1991. Il est localisé à environ 100 m du côté est de la piste et à environ 3 m à l'ouest de la route d'accès, en terrain naturel (dans le roc). Il comporte 11 thermistances situées entre 1 et 20 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement à intervalle irrégulier. Les données lues à ce câble entre 2016 et 2020 apparaissent à l'annexe 4.



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport Puvirnituk.

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| HT303 | Terrain naturel | 20,00 | 11 | 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 15; 18; 20 | 1991-06-24 | manuelle | température du sol |
| HT177 | remblai | 9,10 | 5 | 1.1; 4.1; 7.1; 8; 9.1 | 1991-10-06 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT296 | remblai | 8,00 | 11 | 3.25; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6; 6.5; 7; 7.5; 8 | 1991-10-06 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT297 | remblai | 10,00 | 11 | 5.25; 5.5; 6; 6.5; 7; 7.5; 8; 8.5; 9; 9.5; 10 | 1991-10-07 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| PUV-FOR1a | Terrain naturel | 3,75 | 11 | 0.05; 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 3.75 | 2005-07-03 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| PUV-F2 | Berme | 17,00 | 15 | 2; 2.2; 2.5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 17 | 2009-09-25 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| PUV-F5 | Berme | 8,50 | 12 | 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6; 7; 8; 8.5 | 2009-09-25 | automatisée/CR1000 | température du sol |

Suivi climatique

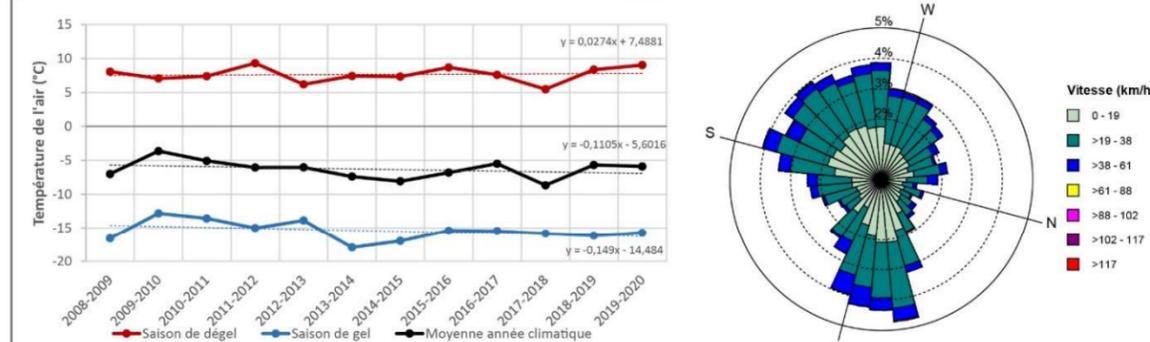


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020.

Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période 2014-2015.

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020.

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 29-oct | 19-oct | 04-nov | 23-oct | 05-oct | 24-oct | 17-oct | 10-oct | 11-oct | 16-oct | 08-oct | 29-oct | 18-oct |
| Fin | 02-juin | 11-mai | 01-juin | 29-mai | 26-mai | 20-mai | 31-mai | 01-juin | 08-mai | 09-juin | 16-mai | 26-mai | 25-mai |
| Durée | 216 | 204 | 209 | 219 | 233 | 208 | 226 | 235 | 209 | 236 | 220 | 210 | 219 |
| Moyenne T°C | -16,59 | -12,82 | -13,57 | -15,01 | -13,88 | -17,95 | -16,98 | -15,41 | -15,46 | -15,85 | -16,16 | -15,74 | -15,45 |
| Indice de gel (FI) | 3599 | 2629 | 2851 | 3303 | 3247 | 3752 | 3854 | 3637 | 3247 | 3757 | 3572 | 3322 | 3397 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 03-juin | 12-mai | 02-juin | 30-mai | 27-mai | 21-mai | 01-juin | 02-juin | 09-mai | 10-juin | 17-mai | 27-mai | 26-mai |
| Fin | 18-oct | 03-nov | 22-oct | 04-oct | 23-oct | 16-oct | 09-oct | 10-oct | 15-oct | 07-oct | 28-oct | 17-oct | 16-oct |
| Durée | 137 | 175 | 142 | 127 | 149 | 148 | 130 | 130 | 159 | 119 | 164 | 143 | 144 |
| Moyenne T°C | 8,06 | 7,07 | 7,40 | 9,32 | 6,20 | 7,43 | 7,32 | 8,69 | 7,60 | 5,49 | 8,37 | 9,04 | 7,67 |
| Indice de dégel (TI) | 1112 | 1243 | 1059 | 1193 | 929 | 1108 | 959 | 1139 | 1217 | 658 | 1380 | 1256 | 1105 |
| Moyenne année climatique | -7,00 | -3,64 | -5,08 | -6,06 | -6,04 | -7,39 | -8,09 | -6,81 | -5,49 | -8,68 | -5,68 | -5,90 | -6,32 |
| Ratio (FI/TI) | 3,24 | 2,11 | 2,69 | 2,77 | 3,49 | 3,39 | 4,02 | 3,19 | 2,67 | 5,71 | 2,59 | 2,64 | 3,21 |

Évolution du régime thermique

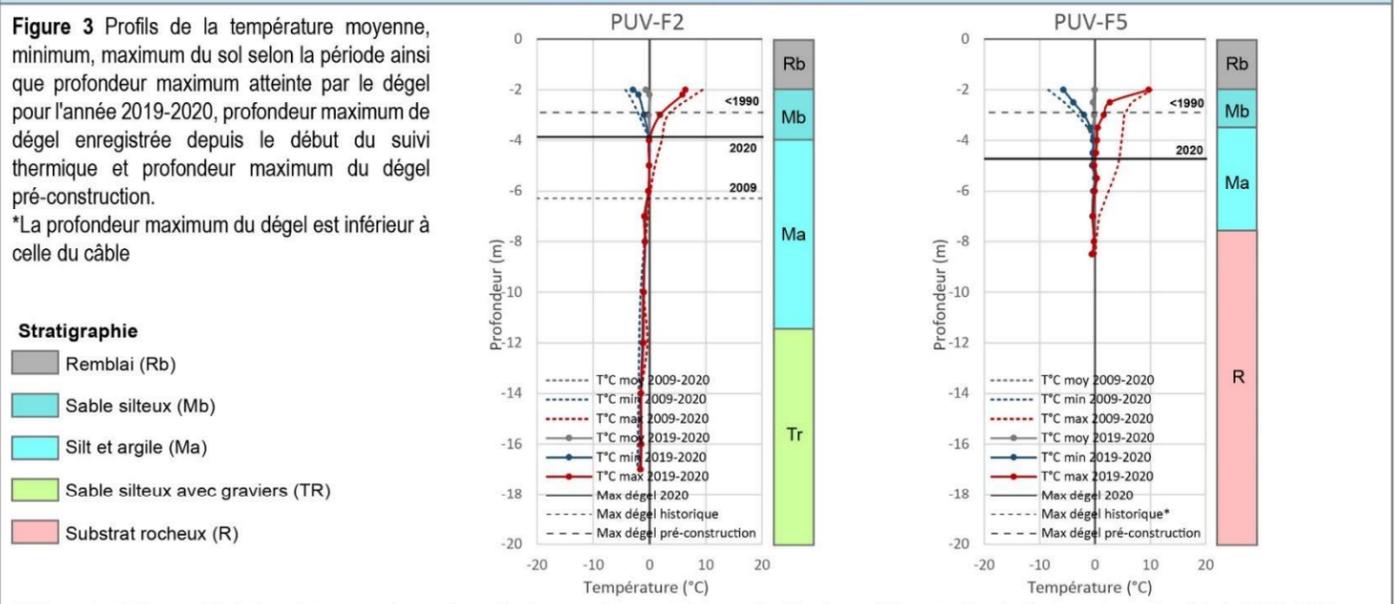
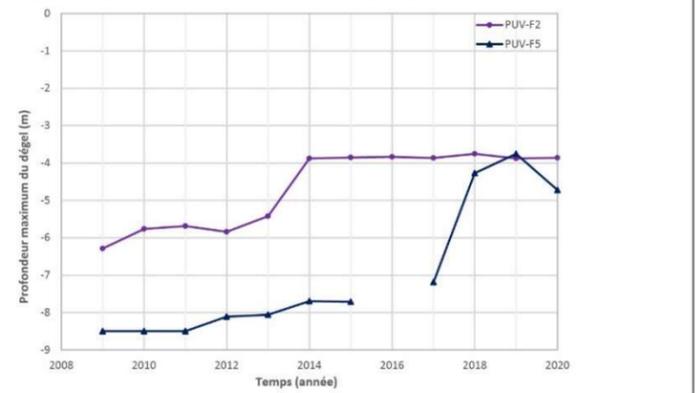


Tableau 3 et Figure 4 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020

| Année | Profondeur maximum du dégel (m) | | | | | |
|---|---------------------------------|--------------|----------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
| | PUV-F2 | | | PUV-F5 | | |
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | - | - | - | - | - | - |
| 2009 | -6,29 | - | 2009-10-14 | -8,50 | - | - |
| 2010 | -5,76 | -0,52 | 2010-11-08 | -8,50 | 0,00 | - |
| 2011 | -5,69 | -0,08 | 2011-11-06 | -8,50 | 0,00 | - |
| 2012 | -5,84 | 0,15 | 2012-10-11 | -8,11 | -0,39 | 2012-11-25 |
| 2013 | -5,42 | -0,42 | 2013-11-16 | -8,06 | -0,05 | 2013-11-16 |
| 2014 | -3,88 | -1,55 | 2014-06-06 | -7,70 | -0,37 | 2014-12-12 |
| 2015 | -3,85 | -0,02 | 2015-07-30 | -7,71 | 0,02 | 2015-12-27 |
| 2016 | -3,84 | -0,02 | 2016-09-17 | - | - | - |
| 2017 | -3,86 | 0,03 | 2017-10-06 | -7,19 | - | 2017-11-07 |
| 2018 | -3,75 | -0,11 | 2018-10-06 | -4,27 | -2,92 | 2018-09-24 |
| 2019 | -3,88 | 0,13 | 2019-09-23 | -3,75 | -0,52 | 2019-10-14 |
| 2020 | -3,86 | -0,01 | 2020-09-17 | -4,72 | 0,97 | 2020-09-24 |
| Moyenne (m) | -4,66 | -0,22 | 25-sept | -7,00 | -0,36 | 07-nov |
| Influence du couvert nival | Forte | | | Forte | | |
| Variations récentes du maximum de dégel | Stable depuis 2014 | | | Amincissement important depuis 2017 | | |



4.2.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Puvirnituk

4.2.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 2, figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air pour l'année 2019-2020 est de -5,90 °C, ce qui est au-dessus de la moyenne de -6,32 °C enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence, avec un indice de gel (Fi) légèrement inférieur (3322 comparativement à 3397) et un indice de dégel (Ti) nettement supérieur (1256 comparativement à 1105) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.2.2.2 Régime thermique du pergélisol

4.2.2.2.1 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage (Planche synthèse 2, figures 3 et 4 et tableau 3)

Câble PUV-F2 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 3,86 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 4,66 m enregistrée pour la période référence de 2009 à 2020 au câble PUV-F2 localisé 2 m sous une berme à convection du côté est de la piste.
- Depuis 2009, il y a eu une diminution significative de près de 2,5 m de la profondeur maximale de la couche active au câble PUV-F2.
- La profondeur maximale de la couche active se situe maintenant au contact stratigraphique entre le dépôt de sable silteux (Mb) et le dépôt de silt et argile (Ma).
- Pour l'année 2019-2020, le câble PUV-F2 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -1,63 et -0,07 °C, ce qui en fait un pergélisol chaud, près du point de fusion.

Câble PUV-F5 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 4,72 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 7,00 m enregistrée pour la période référence de 2009 à 2020 au câble PUV-F5 localisé 2 m sous une berme à convection du côté ouest de la piste.

- Depuis 2009, il y a eu une diminution significative de 3,75 m de la profondeur maximale de la couche active au câble PUV-F5. Cependant, de 2019 à 2020, elle s'est approfondie à nouveau de près d'un mètre (Planche synthèse 2, figure 4).
- La profondeur maximale de la couche active se situe présentement dans le dépôt de silt et argile (Ma).
- Pour l'année 2019-2020, le câble PUV-F5 présente un profil presque isotherme et la température du pergélisol se situe entre -0,51 et 0,13 °C (au niveau du talik à 5,5 m de profondeur), ce qui en fait un pergélisol chaud, près du point de fusion.

4.2.2.2 Câbles localisés en terrain naturel

Câble PUV-FOR1A :

- Le tube du câble PUV-FOR1A, localisé en terrain naturel et servant de référence, remonte à cause du soulèvement gélocal. La profondeur réelle des thermistances est donc inconnue. Le rehaussement du câble est estimé à 1,5 m selon une mesure effectuée en 2018, ce qui rend quasi impossible de corriger les données. Il est probable que le pergélisol du terrain naturel de ce câble qu'on souhaitait avoir comme référence soit perturbé, soit par du tassement ou un début de thermokarst tel que le suggère la présence de flaques d'eau (figure 10).

4.2.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.2.3.1 Évolution récente : 2009-2020

Les données de suivi de température jusqu'en 2020 montrent que le pergélisol s'est reformé sous les bermes à convection construites pour remédier aux dégradations observées en 2009. La profondeur maximum du dégel se trouve dans l'unité de sédiments marins (Mb/Ma) (teneurs en eau volumétrique mesurées de 0,08 à 0,58 m³/m³) aux câbles PUV-F2 et PUV-F5 en 2019. Bien que le système à convection des bermes ait certainement aidé, il est aussi évident que le refroidissement du climat de 2010 à 2019 et particulièrement les hivers froids de 2014, 2016 et 2019 ont favorisé la récupération du pergélisol. Les années plus chaudes de 2013, 2017 et 2019, indiquent un léger approfondissement de la couche active à PUV-F2, malgré la berme. Ainsi, les variations climatiques ont tout de même un impact sur le front de dégel. L'impact de ces années plus chaudes a été amorti par l'effet refroidissant de la berme à convection. Une source de chaleur dont la nature est à déterminer (climat ou

infiltration d'eau) a provoqué un approfondissement de la couche active sous la berme au câble PUV-F5.

4.2.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Étant donné qu'une augmentation des températures de l'air de 2,7 à 4,2 °C (est projetée pour la région de Puvirnituq pour la période 2041-2070 (Ouranos, 2015), cet apport supplémentaire de chaleur aura certainement un impact sur le pergélisol qui se trouve près du point de congélation sous les bermes ainsi que dans le terrain naturel adjacent. Par ailleurs, les températures plus chaudes enregistrées entre 5 et 6 m de profondeur à PUV-F5 (> 0 °C) depuis l'installation de la berme indiquent qu'un apport de chaleur latente, possiblement causé par un écoulement d'eau souterrain, est toujours actif. Comme il s'agit du site d'un ancien cours d'eau détourné qui a pu laisser en héritage une zone de suintement souterraine, il existe une possibilité que le réchauffement en profondeur se poursuive de façon lente jusqu'à provoquer ultimement un tassement au dégel.

4.2.3.3 Facteurs dominants du régime thermique : les bermes à convection

Les bermes à convection ont permis la reformation du pergélisol des deux côtés de la piste là où elle est fragile à cause de la présence d'un sol argileux originalement à forte teneur en glace. Les données de température de l'air et de suivi des câbles à thermistances depuis 2009 montrent que ce regel a de plus été favorisé par des années froides dans la dernière décennie. Mais 2020 a été un peu plus chaude et il reste à voir si c'est le début d'un retour du réchauffement général. Malgré le retour du pergélisol, un talik persiste du côté amont de l'écoulement qui se faisait sous la piste avant le détournement du drainage et la construction de la berme (voir le graphique-contour du câble PUV-F5 à l'annexe 2). Il est possible qu'un problème d'advection de chaleur par une infiltration d'eau s'additionne à l'effet futur du réchauffement climatique au câble PUV-F5 : une situation à surveiller.

4.2.3.4 Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste.

Le seuil critique pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle nous ajoutons l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la profondeur de la couche active était d'environ 0,90 m dans la vallée transversale, avant le début des travaux de construction (Allard et al., 1994; Allard et al., 2006), là où l'épaisseur de remblai varie actuellement entre 3 et 8 m d'épaisseur, selon les plans tel que construit. Pour l'instant, il n'y a pas de câble à thermistances fonctionnel sous la piste pour mesurer la

profondeur de la couche active, mais compte tenu de l'épaisseur maximum du remblai dans la zone de la « vallée », on peut estimer que le sol sous l'ouvrage ne doit pas actuellement dégeler par la seule conduction de chaleur.

4.2.4.5 Seuil critique sur les talus et pieds de remblais.

Comme la seule section de la piste sur pergélisol sensible au tassement est déjà dotée de bermes et de talus de remblai à convection qui favorisent la formation et le maintien du pergélisol, la profondeur de la couche active dépend principalement de l'efficacité de la convection sous les conditions climatiques actuelles, qu'on ne mesure pas dans ce projet. Il faut noter aussi que du côté du câble PUV-F5, il apparaît qu'une source de chaleur par advection liée au drainage déficient vient compliquer l'interprétation du régime thermique.

Sur le plan théorique, à Puvirnituk l'épaisseur critique de neige pour assurer une température moyenne annuelle du sol de 0 °C (définition du seuil critique que nous appliquons aux pieds de remblais en général) est de l'ordre de 0,80 m en appliquant la relation neige vs facteurs-n dans Riseborough et Smith (1998) et dans L'Hérault et Allard (2018) (voir aussi la section 6 du présent rapport). Ce serait la valeur à utiliser si c'était nécessaire, mais comme le reste de la piste est sur le roc, elle n'est de toute façon pas à risque de subir des tassements.

4.2.4 Signes de dégradation

Aucune dégradation n'a été observée à proximité des câbles HT-303 et PUV-F2 (figures 7 et 8). La présence d'eau a été observée en pied de remblai à proximité du câble PUV-F5 (figure 9). Le site du câble PUV-FOR1a est soumis à un soulèvement gélival du tubage évalué à 1,5 m et le terrain naturel est saturé en eau à proximité. La présence de mares suggère le début d'un thermokarst (figure 10).



Figure 7. Le câble HT-303 (dans le roc)
(Photo : Denis Sarrazin, 3 octobre 2020)



Figure 8. Aucune dégradation à proximité du câble PUV-F2
(Photo : Denis Sarrazin, 3 octobre 2020)



Figure 9. Présence d'eau en pied de remblai à proximité du câble PUV-F5
(Photo : Denis Sarrazin, 3 octobre 2020)



Figure 10. Site du câble PUV-FOR1a (au centre) soumis à un soulèvement géival du tubage évalué à 1,5 m.
(Photo : Denis Sarrazin, 3 octobre 2020)

4.3 Akulivik

4.3.1 Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation

4.3.1.1 Synthèse de la répartition spatiale, de l'épaisseur et des propriétés géotechniques des dépôts superficiels

L'aéroport d'Akulivik ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1991. La piste d'atterrissage a une longueur totale de 1190 m et une largeur de 44 m. Son axe est orienté sud-ouest nord-est (084-264°) et son altitude moyenne est de 18 m (Allard et al., 2007). La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Akulivik traverse deux unités géologiques. La partie sud-ouest de la piste repose sur une plaine de sable marin riche en coquillages et sillonnée par des fentes de gel tandis que le nord-est de la piste repose principalement sur une butte de till recouverte par endroit d'une mince couche de sable marin ponctuée d'ostioles à bourrelets silto-graveleux (Allard et al., 1993). Les principaux signes de dégradation recensés par le MTQ sont des dépressions et quelques petites mares thermokarstiques en pied de remblai dans la section sur till (L'Hérault et al., 2012).

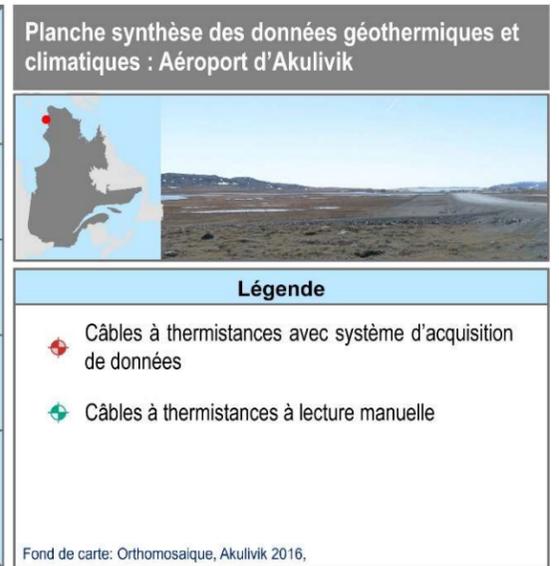
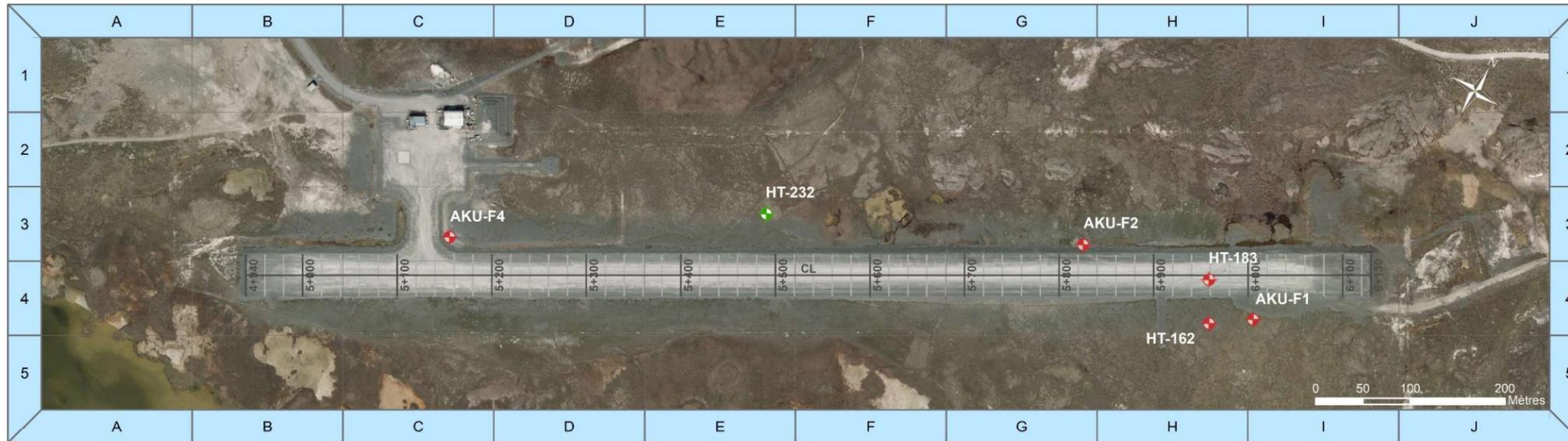
4.3.1.2 Localisation et description de l'instrumentation

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Akulivik comprend cinq câbles à thermistances automatisés répartis dans le terrain naturel à proximité de la piste, dans les accotements et dans le remblai de l'infrastructure et un câble à thermistances à lectures manuelles (voir Planche synthèse 3, tableau 1) :

- **AKU-F1** : Le câble AKU-F1 a été instrumenté et automatisé en 2008. Il est localisé du côté sud de la piste au chaînage 6+010 m à 25 m du pied du remblai vers le sud-est. Il comporte 12 thermistances situées entre 0,5 m et 9,50 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **AKU-F2** : Le câble AKU-F2 a été instrumenté et automatisé en 2015. Il est localisé du côté nord de la piste au chaînage 5+825 m à 1,8 m du pied du remblai. Il comporte 14 thermistances situées entre 0,05 et 15 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **AKU-F4** : Le câble AKU-F4 a été instrumenté et automatisé en 2008. Il est localisé du côté nord de la piste au chaînage 5+825 m à 10 m du pied du remblai de la voie d'accès vers l'est-nord-est. Il comporte 12 thermistances situées entre 0,50 et 9,50 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du

régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.

- **HT-162** : Le câble HT-162 a été installé en 1990 et automatisé en 2004. Il est localisé du côté sud de la piste au chaînage 5+960 m à 25 m du pied du remblai vers le sud-est. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,25 et 5 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT-183** : Le câble HT-183 a été installé en 1990 et automatisé en 2004. Il est localisé dans le remblai de la piste au chaînage 5+960 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,65 et 5,40 m, dont les 3 premières sont situées dans le remblai d'environ 1,5 m d'épaisseur et 8 dernières dans le sol naturel sous-jacent, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT-232** : Le câble HT-232 a été installé en 1990. Il est situé du côté nord de la piste, au chaînage 5+492 m, à environ 43 m de la piste dans les sédiments marins sableux. Il comporte 10 thermistances situées entre la surface et 17,5 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement à intervalle irrégulier. Les données recueillies à ce câble entre 2016 et 2020 sont présentées à l'annexe 4.



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Akulivik.

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| HT-162 | Terrain naturel | 5,00 | 14 | 0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 | 1990-06-21 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| HT-183 | Centre piste | 5,40 | 11 | 0,65; 0,9; 1,4; 1,9; 2,4; 2,9; 3,4; 3,9; 4,4; 4,9; 5,4 | 1990-08-08 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-232 | Terrain naturel | 17,50 | 11 | 0,4; 0,8; 0,5; 1,5; 3,5; 5,5; 7,5; 9,5; 12,5; 15,5; 17,5 | 1990-06-21 | manuelle | température du sol |
| AKU-F1 | Pied de remblai | 9,50 | 12 | 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 9,5 | 2008-10-12 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| AKU-F2 | Pied de remblai | 8,00 | 14 | 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 | 2015-10-20 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| AKU-F4 | Pied de remblai | 9,50 | 12 | 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 9,5 | 2008-10-11 | automatisée/CR1000 | température du sol |

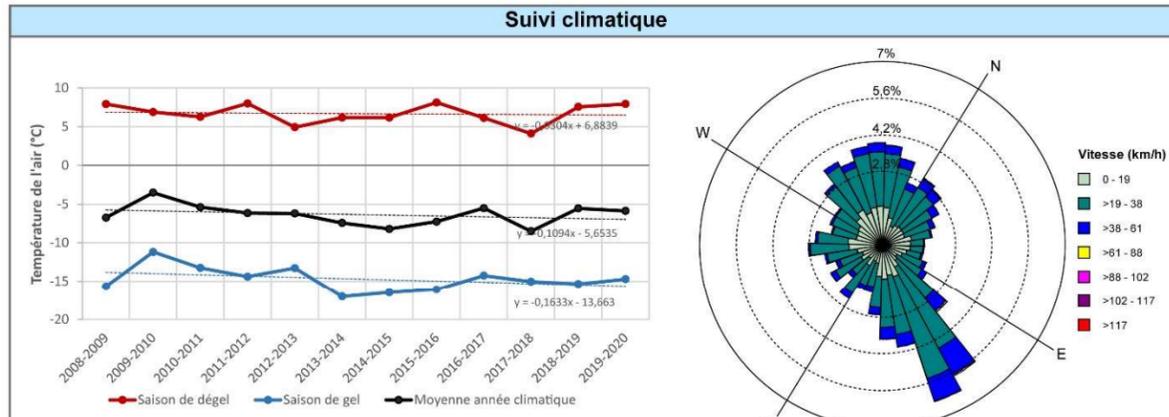


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020.

Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période 1993-2014.

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020.

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 29-oct | 13-oct | 04-nov | 23-oct | 05-oct | 24-oct | 17-oct | 10-oct | 06-oct | 17-oct | 07-oct | 30-oct | 18-oct |
| Fin | 02-juin | 23-mai | 02-juin | 29-mai | 27-mai | 21-mai | 31-mai | 01-juin | 08-mai | 07-juin | 16-mai | 01-juin | 26-mai |
| Durée | 216 | 222 | 210 | 219 | 234 | 209 | 226 | 235 | 214 | 233 | 221 | 215 | 221 |
| Moyenne T°C | -15,67 | -11,18 | -13,24 | -14,38 | -13,27 | -17,02 | -16,50 | -16,08 | -14,25 | -15,03 | -15,36 | -14,70 | -14,72 |
| Indice de gel (FI) | 3400 | 2494 | 2794 | 3164 | 3119 | 3574 | 3745 | 3538 | 3064 | 3518 | 3410 | 3175 | 3250 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 03-juin | 24-mai | 03-juin | 30-mai | 28-mai | 22-mai | 01-juin | 02-juin | 09-mai | 08-juin | 17-mai | 02-juin | 27-mai |
| Fin | 12-oct | 03-nov | 22-oct | 04-oct | 23-oct | 16-oct | 09-oct | 05-oct | 16-oct | 06-oct | 29-oct | 17-oct | 16-oct |
| Durée | 131 | 163 | 141 | 127 | 148 | 147 | 130 | 125 | 160 | 120 | 165 | 137 | 141 |
| Moyenne T°C | 7,92 | 6,90 | 6,26 | 8,00 | 4,93 | 6,18 | 6,18 | 8,13 | 6,14 | 4,11 | 7,56 | 7,93 | 6,69 |
| Indice de dégel (TI) | 1046 | 1131 | 890 | 1024 | 735 | 914 | 809 | 1024 | 988 | 497 | 1255 | 1095 | 951 |
| Moyenne année climatique | -6,75 | -3,52 | -5,40 | -6,15 | -6,21 | -7,43 | -8,20 | -7,27 | -5,52 | -8,51 | -5,55 | -5,88 | -6,36 |
| Ratio (FI/TI) | 3,25 | 2,20 | 3,14 | 3,09 | 4,25 | 3,91 | 4,63 | 3,45 | 3,10 | 7,07 | 2,72 | 2,90 | 3,64 |

Planche synthèse 3

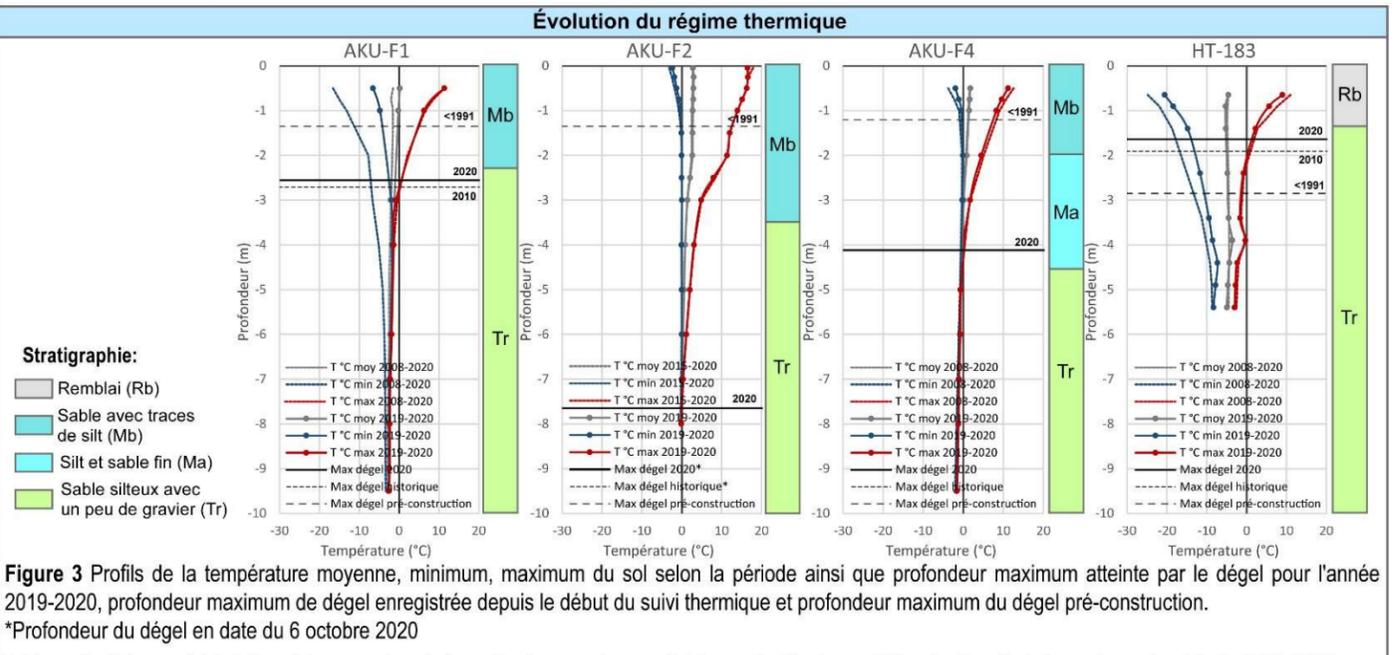


Figure 3 Profils de la température moyenne, minimum, maximum du sol selon la période ainsi que profondeur maximum atteinte par le dégel pour l'année 2019-2020, profondeur maximum de dégel enregistrée depuis le début du suivi thermique et profondeur maximum du dégel pré-construction.

*Profondeur du dégel en date du 6 octobre 2020

Tableau 3 et Figure 4 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020.

| Année | AKU-F1 | | | | AKU-F2 | | | | AKU-F4 | | | | HT-162 | | | | HT-183 | | | |
|----------------|--------------|-------------|----------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|----------------|--------------|-------------|---------------|--------------|--------------|----------------|------|--------|------|--|--|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | | |
| 2008 | -1,97 | - | - | - | - | - | -3,42 | - | - | -2,41 | - | - | -1,83 | - | - | - | - | - | | |
| 2009 | -2,05 | 0,07 | 2009-09-25 | - | - | - | -3,16 | -0,26 | 2009-10-04 | -2,34 | -0,07 | 2009-09-25 | -1,87 | 0,03 | 2009-08-26 | - | - | - | | |
| 2010 | -2,71 | 0,67 | 2010-10-01 | - | - | - | -3,47 | 0,31 | 2010-10-05 | -2,87 | 0,52 | 2010-10-03 | -1,91 | 0,05 | 2010-09-20 | - | - | - | | |
| 2011 | -2,06 | -0,65 | 2011-10-02 | - | - | - | -3,47 | 0,00 | 2011-09-23 | -2,55 | -0,32 | 2011-09-22 | -1,76 | -0,15 | 2011-09-06 | - | - | - | | |
| 2012 | -2,47 | 0,41 | 2012-10-06 | - | - | - | -3,91 | 0,44 | 2012-09-24 | -2,67 | 0,12 | 2012-10-05 | -1,78 | 0,02 | 2012-09-04 | - | - | - | | |
| 2013 | -2,22 | -0,24 | 2013-08-31 | - | - | - | -3,87 | -0,03 | 2013-09-13 | -2,37 | -0,29 | 2013-09-07 | -1,33 | -0,45 | 2013-08-23 | - | - | - | | |
| 2014 | -2,28 | 0,05 | 2014-09-04 | - | - | - | -3,82 | -0,05 | 2014-09-23 | -2,50 | 0,13 | 2014-09-13 | - | - | - | - | - | - | | |
| 2015 | -2,14 | -0,14 | 2015-08-28 | -6,66 | - | 2015-10-23 | -3,72 | -0,10 | 2015-09-29 | -2,31 | -0,19 | 2015-09-18 | -1,54 | - | 2015-08-29 | - | - | - | | |
| 2016 | -2,23 | 0,09 | 2016-10-07 | -6,75 | 0,09 | 2016-10-25 | -3,95 | 0,23 | 2016-09-27 | -2,47 | 0,16 | 2016-09-24 | -1,78 | 0,24 | 2016-09-06 | - | - | - | | |
| 2017 | -2,40 | 0,17 | 2017-09-28 | -6,91 | 0,16 | 2017-11-18 | - | - | - | -2,55 | 0,09 | 2017-09-27 | -1,63 | -0,15 | 2017-09-09 | - | - | - | | |
| 2018 | -2,00 | -0,40 | 2018-09-17 | -6,67 | -0,23 | 2018-11-15 | -3,52 | -0,41 | 2018-10-02 | -2,02 | -0,53 | 2018-09-18 | -1,37 | -0,26 | 2018-09-09 | - | - | - | | |
| 2019 | -2,53 | 0,53 | 2019-10-03 | -7,54 | 0,87 | 2019-11-30 | -4,09 | 0,57 | 2019-10-02 | -2,61 | 0,59 | 2019-10-04 | -1,45 | 0,08 | 2019-09-01 | - | - | - | | |
| 2020 | -2,55 | 0,02 | 2020-09-25 | -7,65* | 0,11 | - | -4,12 | 0,03 | 2020-09-24 | -2,61 | 0,00 | 2020-09-27 | -1,64 | 0,19 | 2020-08-25 | - | - | - | | |
| Moyenne | -2,28 | 0,05 | 22-sept | -7,03 | 0,20 | 09-nov | -3,72 | 0,06 | 26-sept | -2,48 | 0,02 | 21-oct | -1,66 | -0,04 | 02-sept | - | - | - | | |

4.3.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport d'Akulivik

4.3.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 3, figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air enregistrée à Akulivik pour l'année 2019-2020 est de -5,88 °C, ce qui est au-dessus de la moyenne de -6,36 °C pour la période référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence, en raison d'un indice de dégel (Ti) de l'été 2019 supérieur (1095 comparativement à 951) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020. L'indice de gel (Fi) de l'hiver 2019-2020 a, quant à lui, été légèrement inférieur à la moyenne (3175 comparativement à 3250).

4.3.2.2 Régime thermique du pergélisol (Planche synthèse 3, figures 3 et 4 et tableau 3)

4.3.2.2.1 Câbles localisés dans la piste d'atterrissage

Câble HT-183 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 1,64 m, ce qui est près de la moyenne de 1,66 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble HT-183, localisé dans le remblai de la piste d'atterrissage.
- Depuis 2008, il y a eu une remontée de 0,23 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-183.
- La profondeur maximale de la couche active se situe juste sous l'interface du remblai (Rb) et de l'unité de till (Tr) sous-jacente.
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-183 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -4,98 et -3,61 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.3.2.2.2 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage

Câble AKU-F1 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,55 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 2,28 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble AKU-F1, localisé en pied de remblai du côté sud de la piste.

- Depuis 2008, il y a eu une augmentation de 0,58 m de la profondeur maximale de la couche active au câble AKU-F1.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans l'unité de till remanié (Tr).
- Pour l'année 2019-2020, le câble AKU-F1 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -2,56 et -0,16 °C ce qui en fait un pergélisol relativement chaud.

Câble AKU-F2 :

- Lors du téléchargement des données enregistrées en octobre 2020, la profondeur maximum de dégel n'était pas encore atteinte au câble AKU-F2, localisé en pied de remblai.
- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur atteinte par la couche active en date du 6 octobre 2020 est de 7,65 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 7,03 m enregistrée pour la période référence de 2015 à 2020 au câble AKU-F2.
- La profondeur de la couche active se situe dans l'unité de till remanié (Tr).
- Pour l'année 2019-2020, le câble AKU-F2 présente un profil dont la température moyenne varie entre -0,12 et 2,97 °C sur toute sa profondeur. Il n'y a donc presque plus de pergélisol sur les 8 premiers mètres à l'emplacement du câble.

Câble AKU-F4 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 4,12 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 3,72 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble AKU-F4, localisé à 10 m du pied du remblai de la voie d'accès vers l'est-nord-est.
- Depuis 2008, il y a eu un épaissement de 0,70 m de la profondeur maximale de la couche active au câble AKU-F4.
- La profondeur de la couche active se situe dans l'unité de silt et sable fin (Ma).
- Pour l'année 2019-2020, le câble AKU-F4 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -1,61 et -0,65 °C, ce qui en fait un pergélisol chaud.

4.3.2.2.3 Câbles localisés en terrain naturel

Câble HT-162 :

- Le tube du câble HT-162, localisé en terrain naturel et servant de référence, remonte à cause du soulèvement gélocal. La profondeur réelle des thermistances est donc inconnue, mais l'erreur liée à ce rehaussement reste

minime. Cette dernière est estimée à 0,11 m selon une mesure effectuée en 2019.

- Durant la saison de dégel de 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,61 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 2,48 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble HT-162, localisé à 25 m du pied du remblai du côté sud de la piste.
- Depuis 2008, il y a eu un épaissement de 0,20 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-162.
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-162 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -1,84 et -1,52 °C, ce qui en fait un pergélisol chaud.

4.3.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.3.3.1 Évolution récente : 2004-2020

De manière générale, les années récentes plus froides ont eu pour effet de diminuer l'épaisseur de la couche active dans la piste, au câble HT-183, malgré un léger épaissement survenu en 2020. Comme le remblai a une épaisseur d'environ 1,50 m dans cette section de la piste, le front de dégel se situe à l'interface du remblai et du till (Tr) sous-jacent, dans l'ancienne couche active pré-construction. Cette dernière, estimée entre 1,25 et 1,50 m de profondeur, est consolidée et pauvre en glace (teneurs en eau volumétrique mesurées de 0,08 à 0,15 m³/m³) (Allard et al., 2007 ; l'Hérault et al., 2012). Quant au pergélisol présent en pied de remblai et dans les fossés du côté nord de la piste, il est fortement dégradé, voire dégelé par endroits sur plus de 8 m de profondeur. De 2008 à 2020, le régime thermique des câbles en pied de remblai s'est considérablement réchauffé. En 2020, ces derniers ont enregistré un approfondissement important du maximum de dégel (AKU-F1, AKU-F2 et AKU-F4). D'ailleurs, en octobre 2020, la profondeur de l'isotherme 0 °C au câble AKU-F4 est la plus grande enregistrée depuis 2008, alors que le maximum de dégel de cette saison n'était pas encore atteint. Cet approfondissement se poursuit malgré les récents hivers plus froids, indiquant que l'épais couvert nival en bordure de piste empêche l'extraction de chaleur durant la saison de gel. Aucune mesure de neige n'a été prise récemment par l'équipe du MTQ, mais l'analyse des profils thermiques des câbles AKU-F2 et AKU-F4 indique qu'un important couvert nival recouvre l'accotement et le fossé nord en hiver. Au câble AKU-F4, la topographie est peu favorable à l'accumulation naturelle de neige, mais le site est dans une zone d'empilement par les opérations de déneigement. De plus, le fossé à l'intersection de la voie d'accès et de la piste, où se situe le câble à thermistance, ne se draine plus adéquatement et contient toujours de l'eau en été. Le maximum de dégel enregistré à ces trois câbles se situe nettement au-delà de la profondeur de la couche active pré-construction. Aux câbles AKU-F1 et AKU-F2, le maximum de dégel se trouve maintenant dans le

till (Tr) faible en glace, alors qu'au câble AKU-F4, il se trouve maintenant dans les sédiments marins d'eau profonde composés de silt et de sable fin riche en glace (Mb) (teneurs en eau volumétriques mesurées de 0,15 à 0,30 m³/m³) (Planche synthèse 3, figure 3).

4.3.3.2 *Comportement anticipé : 2020-2050*

Les augmentations projetées de la température annuelle pour la période 2041-2070 dans la région d'Akulivik sont de 2,5 à 4,0 °C (Ouranos, 2015). Selon les simulations réalisées par l'Hérault *et al.* (2012), cette augmentation de la température de l'air aura un impact considérable sur la profondeur maximum du dégel en pied de remblai qui pourra atteindre entre 6,63 et 12,37 m de profondeur à proximité du câble AKU-F4 et entre 15,48 et 20,00 m de profondeur à proximité du câble AKU-F2. Pour ce qui est de la piste, les simulations indiquent que le dégel pourrait atteindre entre 2,21 et 3,81 m de profondeur au centre.

À moyen terme, les conditions plus chaudes observées en périphérie de l'infrastructure vont, par transfert latéral de la chaleur, se propager vers le centre-piste et ultimement en affecter la stabilité. Des tassements différentiels pourraient être anticipés dans la piste si le seuil critique venait qu'à être dépassé là où le remblai est le plus mince, à savoir dans le secteur du câble HT-183. Enfouis sous la partie ouest de la piste où le remblai est plus épais, les coins de glace ne sont pas présentement à risque de fondre par transfert de chaleur par conduction à travers la piste. À surveiller dans le futur.

4.3.3.3 *Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol à Akulivik :*

La problématique découle du mauvais drainage et de l'accumulation de neige en bordure de la piste. Plus spécifiquement, les modifications au régime thermique sont causées par :

- L'augmentation de la température de l'air (notable aussi dans le réchauffement au câble HT-232, voir figure 32, p.173);
- La présence d'eau stagnante dans les fossés de drainage du côté nord ;
- L'accumulation de neige en périphérie, surtout du côté nord en hiver ;
- Construction sur une section en déblai (à l'emplacement du câble HT-183).

4.3.3.4 *Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste :*

Le seuil critique pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle nous ajoutons l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la profondeur de la couche active était d'environ 1,10 à 1,35 m, avant le début des travaux de construction (Allard *et al.*, 1994), et l'épaisseur de remblai varie actuellement entre 1,5 et 5 m d'épaisseur, selon les plans tels que construits. Le seuil critique varie donc le long de la piste entre environ 1,6 et 6,35 m. Là où la piste est en déblai, au site du câble HT-183, le

seuil a été déterminé en utilisant simplement la profondeur maximum historique observée en 2010, soit 1,91 m. ce seuil n'a pas été ré-atteint depuis.

4.3.3.5 Seuil critique sur les talus et pieds de remblais :

Il est clair que sous les remblais et pieds de talus, la profondeur de la couche active pré-construction est dépassée depuis longtemps au site des câbles AKU-F2 et AKU-F4. Les données du câble AKU-F1 où le pergélisol est devenu « chaud » et où la couche active s'approfondit actuellement indiquent que cette profondeur a été dépassée récemment et que la dégradation progressive (encore relativement lente) du pergélisol y a commencé. Un seuil critique a été déterminé en utilisant une épaisseur de neige maximum au-delà de laquelle, la formation et le maintien du pergélisol est peu probable. Pour l'aéroport d'Akulivik, la valeur critique d'épaisseur de neige est estimée comme étant de l'ordre de 0,80 m, en appliquant les relations numériques établies par Riseborough et Smith (1998) (voir aussi la section 6 du présent rapport). Il serait important de prendre des mesures de l'accumulation et de la densité de neige à ces sites pour obtenir des données empiriques en vue ensuite de préciser les seuils critiques d'accumulation de neige.

4.3.4 Signes de dégradation

Aucune dégradation de la piste ou des bordures de remblais n'a été observée à proximité des câbles HT-162, HT-183, HT-232, AKU-F1 et AKU-F4 lors de la visite de 2020 (figures 11, 12, 13 et 15). La présence d'eau a été observée en pied de remblai à proximité du câble AKU-F2 et le câble se trouve lui-même dans l'eau (figure 14). Un rehaussement du câble HT-162 est estimé à environ 0,10 m depuis 2008.



Figure 11 Aucune dégradation à proximité du câble AKU-F1
(Photo : Denis Sarrazin, 6 octobre 2020)



Figure 12 Aucune dégradation à proximité du câble HT-162.
(Photo : Denis Sarrazin, 6 octobre 2020)



Figure 13 Aucune dégradation à proximité du câble HT-183
(Photo : Denis Sarrazin, 6 octobre 2020)



Figure 14 Présence d'eau en pied de remblai à proximité du câble AKU-F2.
(câble dans l'eau)
(Photo : Denis Sarrazin, 6 octobre 2020)



Figure 15 **Aucune dégradation à proximité du câble AKU-F4**
(Photo : Denis Sarrazin, 6 octobre 2020)

4.4 Salluit

4.4.1 Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation

4.4.1.1 Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des dépôts superficiels

L'aéroport de Salluit ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1988. La piste d'atterrissage a une longueur de 1190 mètres et une largeur de 44 m. Elle est orientée selon un axe sud-sud-ouest-nord-nord-est (034-214° N), à une altitude moyenne de 223,1 m (Allard *et al.*, 2007).

L'aéroport de Salluit, situé sur de hauts plateaux, repose sur 3 types d'unités géologiques de surface, à savoir : des dépôts de till épais (> 2 m), des couvertures de till mince et discontinu sur le roc et des affleurements rocheux. La topographie du secteur se caractérise par un relief ondulé où alternent sommets et creux. Sur les sommets, le roc affleure tandis que dans les creux topographiques, le till peut atteindre des épaisseurs de plus de 7 m. C'est également à l'intérieur de ces creux topographiques, souvent mal drainés, que s'accumulent tourbe et colluvions dans lesquelles se développent fréquemment des réseaux de coins de glace. Sur les pentes, des lobes de gélifluxion se forment en surface du till, processus lents et limités à la couche active (L'Hérault *et al.*, 2012). Les principaux signes de dégradation recensés à l'aéroport lors des travaux de caractérisation en 2008 correspondaient à des tassements et des dépressions le long de l'accotement ainsi qu'à l'accumulation de l'eau dans les fossés combinés à un réseau de drainage déficient (Allard *et al.*, 2007).

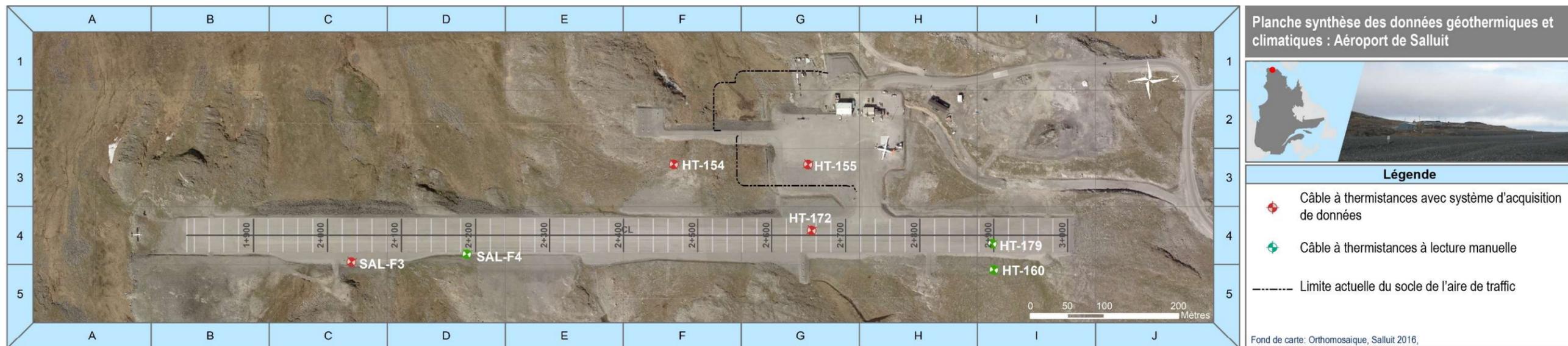
4.4.1.2 Localisation et description de l'instrumentation

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol à Salluit comprend quatre câbles à thermistances automatisés et trois câbles à thermistances à lectures manuelles (Planche synthèse 4, tableau 1 et figure 3) :

- **SAL-F3** : Le câble SAL-F3 a été instrumenté et automatisé en 2012. Il est localisé dans le talus du remblai du côté est de la piste au chaînage 2+030 m, sous une pente douce tronquée qui a été construite pour combler partiellement une dépression topographique dans un secteur où des tassements se produisaient. Il comporte 15 thermistances situées entre 1 et 15 m, dont les 9 premières sont situées dans le remblai d'environ 7 m d'épaisseur et les 6 dernières dans le sol naturel sous-jacent, afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il se trouve du côté est de la piste au chaînage 2+030 m et l'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **SAL-F4** : Le câble SAL-F4 a été instrumenté en 2008. Il est localisé du côté est de la piste, au chaînage 2+185 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai. Il comporte 10 thermistances situées entre 0,5 et 4,95 m

dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement lors de visites sur le site. Les lectures faites à ce câble pour la période 2016-2020 apparaissent à l'annexe 4 du présent rapport.

- **HT-154** : Le câble HT-154 a été instrumenté en 1987 et automatisé en 2002. Il est localisé à environ 75 m du côté ouest de la piste, au niveau du chaînage 2+460 m, en terrain naturel (dans le roc). Il comporte 11 thermistances situées entre 1 et 20 m afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10.
- **HT-155** : Le câble HT-155 a été instrumenté en 1987 et automatisé en 2014. Il est localisé sous le remblai du tarmac, à environ 75 m du côté ouest de la piste, au niveau du chaînage 2+450. En 2010, près de 8 m (épaisseur réelle inconnue) de matériel ont été ajoutés par-dessus le terrain naturel. Lors de l'installation du câble, il comportait 11 thermistances situées entre 0,75 et 19,75 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partage avec le câble HT-172.
- **HT-172** : Le câble HT-172 a été instrumenté en 1987 et automatisé en 2014. Il est localisé à 20 m du bord dans le remblai de la piste au chaînage 2+650 m. Il comporte 15 thermistances situées entre 0,25 et 19,50 m, dont les 7 premières sont situées dans le remblai d'environ 5,3 m d'épaisseur et 8 dernières dans le sol naturel sous-jacent, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partage avec le câble HT-155.
- **HT-160** : Le câble HT-160 a été instrumenté en 1987. Il est localisé à 25 m de la piste en terrain naturel (till mince sur du roc) au chaînage 2+900 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,25 et 5 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement à intervalle irrégulier (voir Annexe 4).
- **HT-179** : Le câble HT-179 a été instrumenté en 1987. Il est localisé à 10 m du bord dans le remblai de la piste au chaînage 2+900 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 2,32 et 7,07 m dans le sol naturel, sous le remblai estimé à environ 2,3 m d'épaisseur, afin d'assurer le suivi du régime thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement à intervalle irrégulier (voir Annexe 4).



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Salluit.

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------|----------------------|--------------------|
| HT-154 | Terrain naturel | 20,00 | 11 | 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 15; 18; 20 | 1987-07-17 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-155 | Tablier | 19,75 | 11 | 0,75; 1,75; 2,75; 3,75; 5,75; 7,75; 9,75; 11,75; 14,75; 17,75; 19,75 | 1987-07-17 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-160 | Terrain naturel | 5,00 | 11 | 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 | 1987-07-17 | manuelle | température du sol |
| HT-172 | Centre piste | 19,50 | 11 | 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 11; 14; 17; 19,5 | 1987-07-16 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-179 | Centre piste | 7,07 | 11 | 2,32; 2,57; 3,07; 3,57; 4,07; 4,57; 5,07; 5,57; 6,07; 6,57; 7,07 | 1987-07-17 | manuelle | température du sol |
| SAL-F3 | Talus | 15,00 | 15 | 1; 2; 3; 4; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 11; 15 | 2012-10-08 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| SAL-F4 | Pied de remblai | 4,95 | 10 | 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 4,95 | 2008-10-26 | manuelle | température du sol |

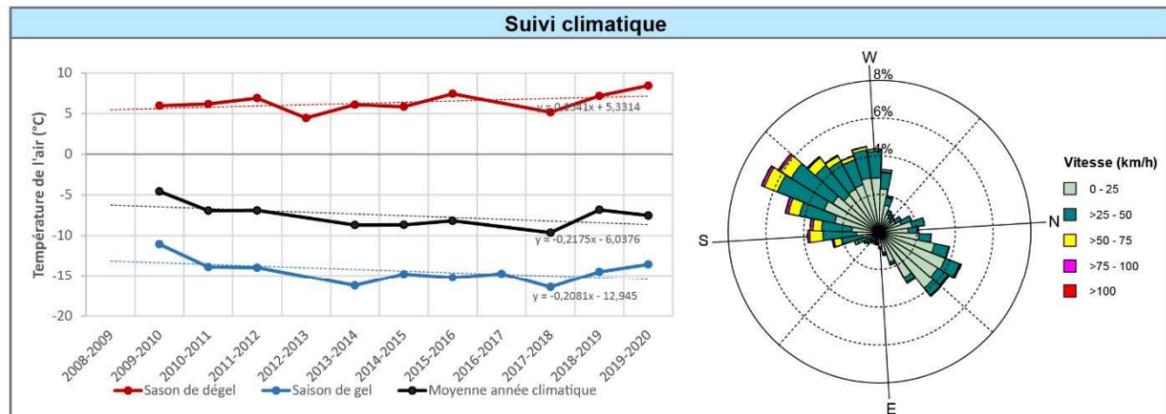


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020.

Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période 2002-2009.

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020.

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 10-oct | 22-sept | 23-oct | 29-sept | 03-oct | 04-oct | 16-sept | 04-oct | 05-oct | 16-oct | 19-sept | 12-oct | 05-oct |
| Fin | 04-juin | 24-mai | 02-juin | 30-mai | 06-juin | 21-mai | 12-juin | 08-juin | 24-mai | 09-juin | 27-mai | 18-juin | 03-juin |
| Durée | 237 | 244 | 222 | 244 | 246 | 229 | 269 | 248 | 231 | 236 | 250 | 250 | 242 |
| Moyenne T°C | n.d. | -11,07 | -13,88 | -13,97 | n.d. | -16,25 | -14,78 | -15,23 | -14,75 | -16,44 | -14,49 | -13,57 | -14,44 |
| Indice de gel (FI) | n.d. | 2712 | 3096 | 3422 | n.d. | 3738 | 3991 | 3792 | 3067 | 3633 | 3637 | 3380 | 3447 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 05-juin | 25-mai | 03-juin | 31-mai | 07-juin | 22-mai | 13-juin | 09-juin | 25-mai | 10-juin | 28-mai | 19-juin | 04-juin |
| Fin | 21-sept | 22-oct | 28-sept | 02-oct | 03-oct | 15-sept | 03-oct | 04-oct | 15-oct | 18-sept | 11-oct | 23-sept | 01-oct |
| Durée | 108 | 150 | 117 | 124 | 118 | 116 | 112 | 117 | 143 | 100 | 136 | 96 | 120 |
| Moyenne T°C | n.d. | 5,98 | 6,19 | 6,92 | 4,46 | 6,11 | 5,86 | 7,45 | n.d. | 5,18 | 7,19 | 8,45 | 6,38 |
| Indice de dégel (TI) | n.d. | 903 | 731 | 864 | 531 | 715 | 663 | 834 | n.d. | 523 | 985 | 794 | 754 |
| Moyenne année climatique | n.d. | -4,57 | -6,94 | -6,91 | n.d. | -8,71 | -8,69 | -8,19 | n.d. | -9,66 | -6,84 | -7,54 | -7,56 |
| Ratio (FI/TI) | n.d. | -3,00 | -4,24 | -3,96 | n.d. | -5,23 | -6,02 | -4,55 | n.d. | -6,95 | -3,69 | -4,25 | -4,65 |

Planche synthèse 4

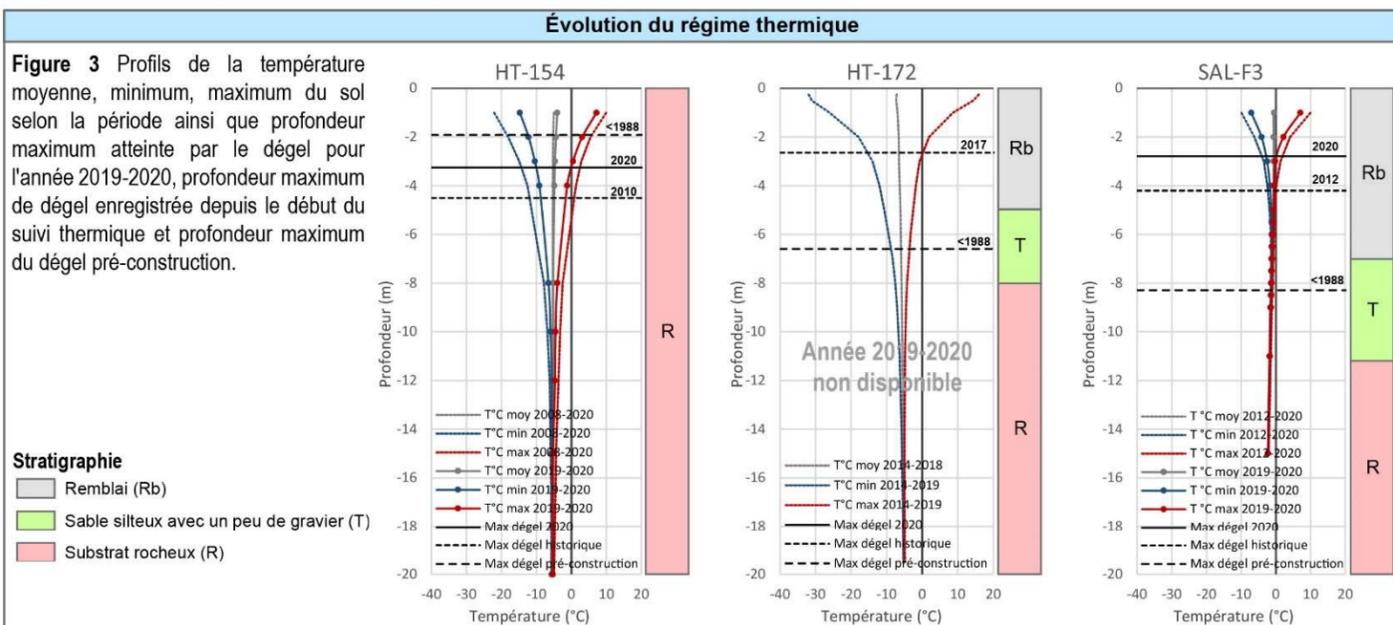


Tableau 3 et Figure 4 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020.

| Année | HT-154 | | | HT-172 | | | SAL-F3 | | |
|--|--------------------------------------|--------------|----------------|---|--------------|----------------|----------------------------------|--------------|----------------|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | -3,78 | - | 2008-09-21 | | | | | | |
| 2009 | -3,71 | -0,07 | 2009-09-23 | | | | | | |
| 2010 | -4,51 | 0,81 | 2010-10-05 | | | | | | |
| 2011 | -3,80 | -0,72 | 2011-09-18 | | | | | | |
| 2012 | -3,84 | 0,04 | 2012-09-27 | | | | -4,20 | - | 2012-10-09 |
| 2013 | -3,29 | -0,55 | 2013-09-11 | | | | -2,89 | -1,31 | 2013-08-29 |
| 2014 | -3,50 | 0,21 | 2014-09-19 | -2,57 | - | 2014-08-20 | -2,86 | -0,02 | 2014-08-18 |
| 2015 | -3,16 | -0,35 | 2015-09-19 | -2,07 | -0,50 | 2015-10-15 | -3,22 | 0,36 | 2015-08-20 |
| 2016 | -3,55 | 0,40 | 2016-09-21 | -2,50 | 0,43 | 2016-09-27 | -2,87 | -0,36 | 2016-08-27 |
| 2017 | -3,19 | -0,36 | 2017-09-15 | -2,60 | 0,10 | 2017-09-16 | -2,79 | -0,07 | 2017-09-16 |
| 2018 | -2,35 | -0,84 | 2018-08-17 | -2,45 | -0,16 | 2018-08-26 | -2,65 | -0,14 | 2018-09-16 |
| 2019 | -3,12 | 0,77 | 2019-10-01 | - | - | - | -2,82 | 0,17 | 2019-10-01 |
| 2020 | -3,26 | 0,13 | 2020-09-22 | - | - | - | -2,79 | -0,03 | 2020-09-18 |
| Moyenne (m) | -3,47 | -0,04 | 19-sept | -2,44 | -0,03 | 19-sept | -3,01 | -0,18 | 10-sept |
| Influence du couvert nival | Faible | | | Faible | | | Forte | | |
| Variations récentes du maximum de dégel | Épaississement important depuis 2018 | | | Satton d'enregistrement non-fonctionnelle | | | Amincissement faible depuis 2019 | | |

4.4.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Salluit

4.4.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 4, figure 1 et tableau 2).

- La température moyenne de l'air pour l'année 2019-2020 est de $-7,54$ °C, ce qui est très près de la moyenne de $-7,56$ °C enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été en moyenne comparable à celle de la période de référence avec un indice de gel (Fi) légèrement inférieur (3380 degrés-jours comparativement à 3447) et un indice de dégel (Ti) légèrement supérieur (794 comparativement à 754) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.4.2.2 Régime thermique du pergélisol (Planche synthèse 4, figures 3 et 4 et tableau 3)

4.4.2.2.1 Câbles localisés dans la piste d'atterrissage

Câble HT-172 :

- Il n'y a pas de données disponibles pour l'année 2019-2020 au câble HT-172, localisé dans le remblai de la piste, car la station d'enregistrement a été endommagée par de la machinerie lourde.

4.4.2.2.2 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage

Câble SAL-F3 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,79 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 3,01 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 à ce câble localisé dans le talus du remblai du côté est de la piste, sous une pente douce tronquée.
- Depuis 2012, il y a eu une diminution de 1,41 m de la profondeur maximale de la couche active au câble SAL-F3.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le remblai (Rb) de la pente douce tronquée qui fait environ 7 m d'épaisseur à cet endroit.
- Pour l'année 2019-2020, le câble SAL-F3 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre $-2,28$ et $-0,53$ °C ce qui en fait un pergélisol relativement chaud.

4.4.2.2.3 Câbles localisés en terrain naturel

Câble HT-154 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 3,26 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 3,47 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble HT-154, localisé dans le roc en terrain naturel.
- Depuis 2008, il y a eu une diminution de 0,52 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-154.
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-154 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -5,43 et -4,87 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.4.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.4.3.1 Évolution récente : 2012-2020

La profondeur maximale atteinte par le front de dégel a beaucoup varié depuis le début du suivi thermique. L'analyse des valeurs de température enregistrées par les câbles (HT-154, HT-155, HT-172 et SAL-F3) aux différents sites sur l'aéroport permet de constater que cette profondeur a généralement diminué suivant la tendance récente des températures de l'air. Ce refroidissement du profil thermique a permis un regel du pergélisol et un rétablissement d'une couche active généralement plus mince. L'agrandissement du tablier, où est installé le câble HT-155, a permis la remontée du front de dégel et le refroidissement des températures dans le tablier agrandi de l'aéroport. Toutefois, l'épaisseur du matériau granulaire ajouté lors de l'agrandissement du tablier devra être connue plus précisément afin de pouvoir continuer l'analyse thermique à cet endroit. À l'extrémité sud-est de la piste, les données thermiques mesurées par le câble automatisé SAL-F3, localisé dans le talus à pente douce tronquée du remblai, ont permis d'estimer une épaisseur de couche active de 2,79 m en 2020, toujours dans le matériel de remblai. L'installation de la pente douce tronquée en 2012 a donc eu l'effet souhaité puisque le pergélisol qui avait dégelé en pied de remblai à cet endroit a maintenant réintégré le terrain et que la couche active se maintient dans la pente tronquée, malgré une efficacité réduite par l'enneigement. Toutefois, le profil thermique du pergélisol en dessous demeure près du point de fusion jusqu'à 6 m dans le sol à cet endroit. La température du pergélisol semble tarder à se refroidir ; la situation est à surveiller. À l'inverse, les câbles HT-154 et HT-172, localisés respectivement dans le roc non enneigé et sous la surface déneigée de la piste, indiquent une corrélation importante entre les températures de l'air et le régime thermique du sol. Cela découle d'une quasi-absence de neige sur l'affleurement rocheux et de l'absence de neige sur la piste. Cependant, l'ajout par inadvertance de matériau de déblai durant des travaux près du site (creusement

d'un fossé) au pourtour du câble HT-154, créant ainsi une cuvette favorisant l'accumulation de neige à cet endroit, pourrait avoir un impact local sur les températures du roc à moyen terme.

4.4.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Les augmentations projetées de la température annuelle pour la période 2041-2070 dans la région de Salluit sont de l'ordre de 2,7 à 4,1 °C (Ouranos, 2015). Étant donné l'épaisseur importante du remblai, et la proximité du roc sur une grande partie de la piste, les projections effectuées par L'Hérault et al. (2012) indiquent que, malgré un approfondissement de la couche active, cette dernière devrait demeurer dans la partie remblayée et ne devrait pas générer de tassements importants. Les endroits où la piste a été construite en déblai restent à surveiller, car malgré l'épaisseur considérable du remblai, le till sous-jacent est riche en glace et pourrait causer des tassements si le dégel venait qu'à l'atteindre.

4.4.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol à Salluit :

La problématique découlant originalement de l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai semble avoir perdu en intensité grâce aux travaux d'adaptation effectués au cours des dernières années. Plus spécifiquement, les modifications au régime thermique sont maintenant causées par :

- L'augmentation de la température de l'air ;
- L'accumulation d'eau et de neige en pied de remblai ;
- La construction d'importants remblais pour l'extension du tablier.

4.4.3.4 Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste :

Le seuil critique pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle nous ajoutons l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la profondeur de la couche active était d'environ 1,30 m (L'Hérault et al., 2012), avant le début des travaux de construction et l'épaisseur de remblai varie actuellement entre 2 et 8 m d'épaisseur pour une moyenne de 5,3 m, avec une section en déblai allant jusqu'à 2 m, selon les plans tel que construit. Sous les secteurs en remblai le seuil critique moyen se situe donc à environ 6,60 m

4.4.3.5 Seuil critique sur les talus et pieds de remblais :

Le seuil critique sur talus et en pied de remblai correspond à l'épaisseur de neige accumulée qui ferait en sorte que la température à l'interface neige-sol en hiver soit de 0 °C au maximum. Cette situation est peu susceptible de survenir compte tenu des travaux d'adaptation déjà effectués, lesquels (comme au site F-3 et au site F-4) ont consisté en la construction de pentes douces tronquées qui réduisent l'accumulation de neige. Un seuil critique a tout de même été déterminé en utilisant une épaisseur de neige maximum au-delà de laquelle, la

formation et le maintien du pergélisol est peu probable. À Salluit, cette valeur a été mesurée comme étant environ 1 m par Allard et al, (2004).

4.4.4 Signes de dégradation

Aucune évidence de dégradation n'a été observée à proximité des câbles HT-154, HT-155, HT-160, HT-172, HT-179, SAL-F3 et SAL-F4, lors de la visite de 2020 (figure 16).



Figure 16. Aucune dégradation de la piste et du rebord du remblai à proximité du câble SAL-F3

(Photo : Denis Sarrazin, 8 octobre 2020)

4.5 Quaqtaq

4.5.1 *Caractéristiques des dépôts de surface et détail de l'instrumentation*

4.5.1.1 *Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

Situé dans la zone de pergélisol continu à une altitude d'environ 30 m, l'aéroport de Quaqtaq a été achevé en 1989. La piste d'atterrissage est orientée dans un axe nord-ouest-sud-est (155-335°) avec une longueur totale de 1190 m et une largeur de 44 m (L'Hérault et al., 2012). La piste d'atterrissage repose sur trois unités géologiques de surface qui se résument à : 1) des affleurements rocheux de gneiss granitique, 2) des dépôts de sable et graviers littoraux et pré-littoraux et 3) des dépôts minces de sable fin silteux mal drainés d'origine alluviale qui recouvrent un till (L'Hérault et al., 2012). Récemment, les fossés autour de la piste ont été refaçonnés. Ils ont été reconfigurés en les éloignant du pied immédiat du remblai en construisant une pente douce tronquée et en leur donnant un profil transversal évasé. Ainsi moins de neige s'accumule dans les fossés et le drainage y est favorisé. La pente douce du remblai, dont une section est aussi munie d'une membrane étanche, doit en principe favoriser le regel du pergélisol et étancher la piste par le gel, favorisant ainsi le maintien du pergélisol sous l'ouvrage. Les fossés à l'extrémité sud de la piste ont aussi été reprofilés tandis que, du côté est, ils ont été aménagés de façon à évacuer rapidement l'eau de fonte au printemps. L'intention générale est d'éviter l'ennoiement de la structure de la piste au printemps, car il s'agit d'une source de chaleur qui avait commencé à provoquer le dégel du pergélisol sous l'ouvrage au début des années 2010. Cette mesure d'adaptation a été appliquée afin de provoquer la reformation du pergélisol dans le remblai et en périphérie, assurant ainsi l'intégrité à long terme de l'ouvrage.

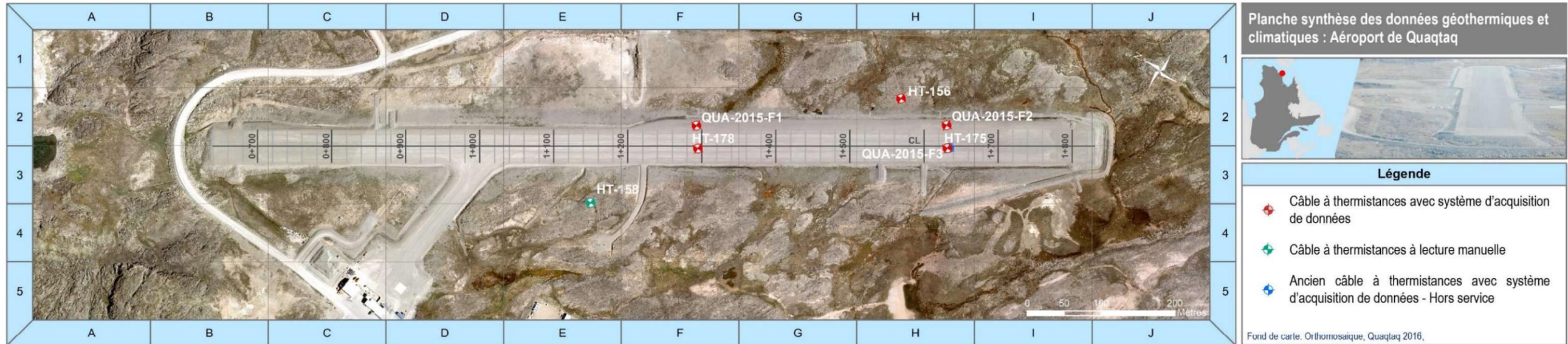
4.5.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Quaqtaq comprend cinq câbles à thermistances automatisés et un câble à thermistances à lectures manuelles (Planche synthèse 5; tableau 1 et figure 3):

- **HT-156** : Le câble HT-156 a été installé en 1988 et automatisé en 2004. Il est localisé du côté est de la piste à la hauteur du chaînage 1+570 m à 43 m de la piste en terrain naturel (sables et graviers). Il comporte 11 thermistances localisées entre 0,56 et 19,56 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique ainsi qu'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT-158** : Le câble HT-158 a été instrumenté en 1988. Il est localisé du côté ouest de la piste à la hauteur du chaînage 1+150 m à 54 m du pied du

remblai en terrain naturel. Il comporte 11 thermistances entre 1,37 et 20,37 m dans le roc afin d'assurer le suivi du régime thermique. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait manuellement à intervalle irrégulier. Les données lues entre 2016 et 2019 à ce câble apparaissent à l'annexe 4.

- **HT-178** : Le câble HT-178 a été installé en 1988 et automatisé en 2004. Il est localisé dans le remblai du centre piste au chaînage 1+295 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,45 et 5 m dont les 3 premières sont situées dans le remblai d'environ 1,4 m d'épaisseur et 8 dernières dans le sol naturel sous-jacent afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **QUA2015-F1** : Le câble QUA2015-F1 a été instrumenté en 2015. Il est localisé du côté ouest de la piste au chaînage 1+290 m dans le talus à pente douce du remblai. Il comporte 12 thermistances situées entre 0,15 et 10 m, dont les 4 premières sont placées dans le talus à pente douce du remblai d'environ 1,5 m d'épaisseur et les 8 dernières dans le sol naturel, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **QUA2015-F2** : Le câble QUA2015-F2 a été instrumenté en 2015. Il est localisé du côté ouest de la piste au chaînage 1+650 m dans le talus à pente douce du remblai. Il comporte 12 thermistances situées entre 0,15 et 10 m, dont les 4 premières sont placées dans le remblai de la pente douce d'environ 1,5 m d'épaisseur et les 8 dernières dans le sol naturel, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **QUA2015-F3** : Le câble QUA2015-F3 a été instrumenté en 2015. Il est localisé dans le remblai du centre piste au chaînage 1+650 m. Il comporte 12 thermistances entre 0,25 et 20,25 m, dont les 2 premières sont placées dans le remblai d'environ 1,5 m d'épaisseur et les 8 dernières dans le sol naturel en dessous, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000. Il a été installé en remplacement de l'ancien câble **HT-175** autrefois installé à 1+635 et qui a été arraché accidentellement lors des travaux de réfection en 2012.



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Quaqtq

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|---|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| HT-156 | Terrain naturel | 19,56 | 11 | 0,56; 1,56; 2,56; 3,56; 5,56; 7,56; 9,56; 11,56; 14,56; 17,56; 19,56 | 1988-06-26 | automatisée/CR1000 | température du sol et de l'air |
| HT-158 | Terrain naturel | 20,37 | 11 | 1,37; 2,37; 3,37; 4,37; 6,37; 8,37; 10,37; 12,37; 15,37; 18,37; 20,37 | 1988-06-26 | manuelle | température du sol |
| HT-175 | centre-ligne | 20,55 | 12 | 0,25; 1,55; 2,55; 3,55; 4,55; 6,55; 8,55; 10,55; 12,55; 15,55; 18,55; 20,55 | 1988-06-26 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-178 | centre-ligne | 5,00 | 11 | 0,45; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 | 1988-06-26 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| QUA2015-F1 | accotement | 10,00 | 12 | 0,15; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 8; 10 | 2015-10-11 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| QUA2015-F2 | accotement | 10,00 | 12 | 0,15; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 8; 10 | 2017-06-13 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| QUA2015-F3 | centre-ligne | 20,25 | 13 | 0,25; 0,25; 1,25; 2,25; 3,25; 4,25; 6,25; 8,25; 10,25; 12,25; 15,25; 18,25; 20,25 | 2016-09-30 | automatisée/CR1000 | température du sol |

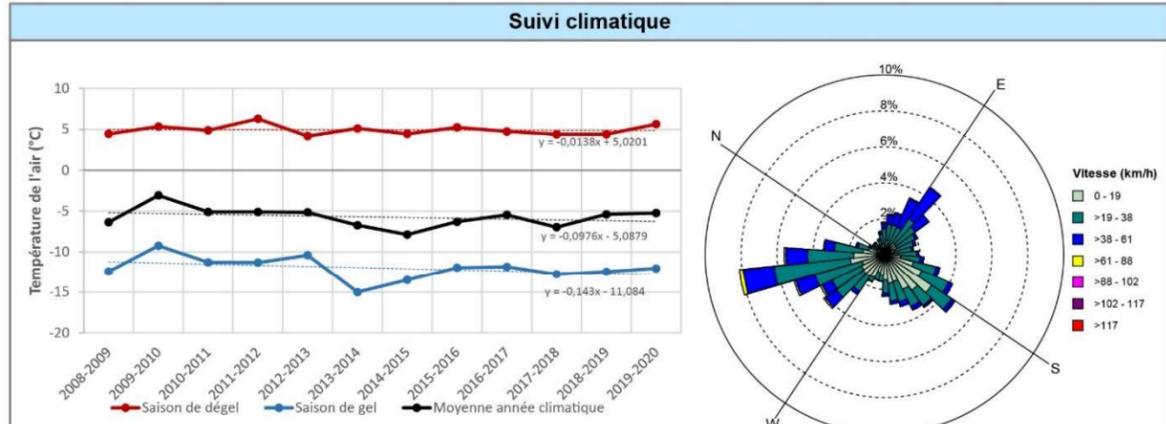


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020

Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période 2014-2015

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 11-oct | 13-oct | 05-nov | 11-oct | 05-oct | 23-oct | 10-oct | 05-oct | 07-oct | 17-oct | 07-oct | 31-oct | 15-oct |
| Fin | 02-juin | 24-mai | 02-juin | 30-mai | 06-juin | 17-mai | 13-juin | 07-juin | 25-mai | 08-juin | 20-mai | 03-juin | 30-mai |
| Durée | 234 | 223 | 209 | 232 | 244 | 206 | 246 | 246 | 230 | 234 | 225 | 216 | 229 |
| Moyenne T°C | -12,42 | -9,24 | -11,27 | -11,31 | -10,40 | -15,01 | -13,49 | -11,94 | -11,83 | -12,76 | -12,45 | -12,04 | -12,01 |
| Indice de gel (FI) | 2918 | 2069 | 2367 | 2635 | 2548 | 3107 | 3333 | 2949 | 2732 | 3000 | 2814 | 2612 | 2757 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 03-juin | 25-mai | 03-juin | 31-mai | 07-juin | 18-mai | 14-juin | 08-juin | 26-mai | 09-juin | 21-mai | 04-juin | 31-mai |
| Fin | 12-oct | 04-nov | 10-oct | 04-oct | 22-oct | 09-oct | 04-oct | 06-oct | 16-oct | 06-oct | 30-oct | 17-oct | 14-oct |
| Durée | 131 | 163 | 129 | 126 | 137 | 144 | 112 | 120 | 143 | 119 | 162 | 135 | 135 |
| Moyenne T°C | 4,45 | 5,34 | 4,88 | 6,31 | 4,18 | 5,12 | 4,45 | 5,25 | 4,75 | 4,40 | 4,41 | 5,64 | 4,93 |
| Indice de dégel (TI) | 588 | 877 | 634 | 801 | 577 | 742 | 502 | 635 | 684 | 527 | 719 | 767 | 671 |
| Moyenne année climatique | -6,35 | -3,07 | -5,10 | -5,09 | -5,15 | -6,72 | -7,86 | -6,29 | -5,46 | -6,96 | -5,39 | -5,23 | -5,72 |
| Ratio (FI/TI) | 4,97 | 2,36 | 3,73 | 3,29 | 4,42 | 4,19 | 6,64 | 4,64 | 4,00 | 5,69 | 3,91 | 3,40 | 4,27 |

Planche synthèse 5

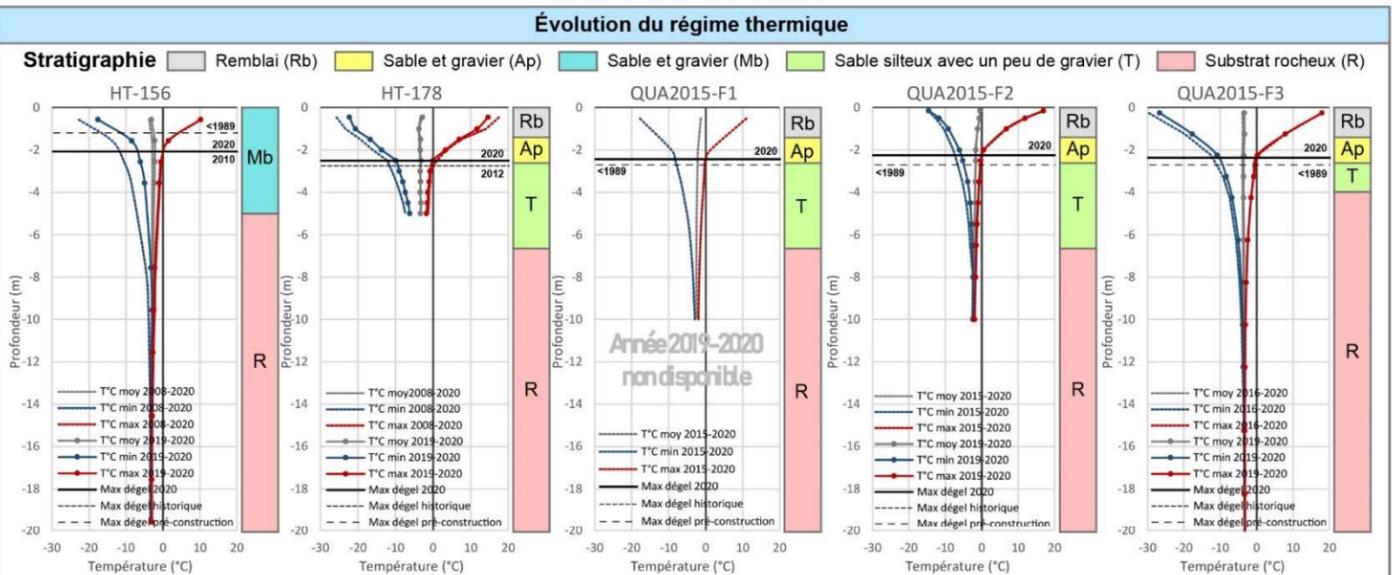


Figure 3 Profils de la température moyenne, minimum, maximum du sol selon la période ainsi que profondeur maximum atteinte par le dégel pour l'année 2019-2020, profondeur maximum de dégel enregistrée depuis le début du suivi thermique et profondeur maximum du dégel pré-construction.

Tableau 3 et Figure 4 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020

| Année | HT-156 | | | HT-178 | | | QUA2015-F1 | | | QUA2015-F2 | | | QUA2015-F3 | | |
|--------------------|--------|-------|------------|--------|-------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|------------|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | -1,71 | - | 2008-09-07 | -2,40 | - | 2008-09-07 | | | | | | | | | |
| 2009 | -1,60 | -0,10 | 2009-09-14 | -2,39 | -0,01 | 2009-09-06 | | | | | | | | | |
| 2010 | -2,09 | 0,48 | 2010-08-31 | -2,52 | 0,13 | 2010-09-22 | | | | | | | | | |
| 2011 | -1,69 | -0,39 | 2011-10-01 | -2,43 | -0,09 | 2011-09-09 | | | | | | | | | |
| 2012 | -1,92 | 0,23 | 2012-10-06 | -2,75 | 0,32 | 2012-09-11 | | | | | | | | | |
| 2013 | -1,78 | -0,14 | 2013-09-07 | -2,43 | -0,32 | 2013-09-08 | | | | | | | | | |
| 2014 | -1,97 | -0,19 | 2014-09-05 | -2,51 | 0,08 | 2014-09-07 | | | | | | | | | |
| 2015 | -1,69 | -0,28 | 2015-09-19 | -2,32 | -0,19 | 2015-08-25 | -2,11 | - | 2015-10-12 | | | | | | |
| 2016 | -1,83 | 0,14 | 2016-09-17 | -2,33 | 0,01 | 2016-09-01 | -2,26 | 0,14 | 2016-10-09 | | | | | | |
| 2017 | -2,01 | 0,18 | 2017-09-06 | -2,39 | 0,06 | 2017-09-08 | -2,40 | 0,14 | 2017-09-28 | -2,18 | - | 2017-09-24 | -2,26 | 0,05 | 2017-09-26 |
| 2018 | -1,84 | -0,17 | 2018-09-09 | -2,36 | -0,03 | 2018-08-26 | -2,22 | -0,17 | 2018-09-13 | -2,00 | -0,18 | 2018-09-11 | -2,20 | -0,06 | 2018-09-09 |
| 2019 | -1,96 | 0,12 | 2019-09-24 | -2,41 | 0,05 | 2019-09-25 | -2,37 | 0,15 | 2019-10-04 | -2,09 | 0,09 | 2019-10-04 | -2,26 | 0,07 | 2019-09-25 |
| 2020 | -2,08 | 0,12 | 2020-09-10 | -2,50 | 0,09 | 2020-09-12 | -2,44 | 0,06 | 2020-09-27 | -2,25 | 0,15 | 2020-09-16 | -2,37 | 0,10 | 2020-09-16 |
| Moyenne (m) | -1,86 | 0,03 | 14-sept | -2,44 | 0,01 | 08-sept | -2,30 | 0,07 | 30-sept | -2,13 | 0,02 | 21-sept | -2,26 | 0,02 | 21-sept |

Figure 4: Graphique montrant l'évolution de la profondeur maximum du dégel (m) de 2008 à 2020 pour les différents sites.

4.5.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Quaqtq

4.5.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 5, figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air enregistrée à Quaqtq pour l'année 2019-2020 est de -5,23 °C, ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne de -5,72 °C pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence avec un indice de gel (Fi) légèrement inférieur (2612 comparativement à 2757) et un indice de dégel (Ti) nettement supérieur (767 comparativement à 671) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.5.2.2 Régime thermique du pergélisol (Planche synthèse 5, figures 3 et 4 et tableau 3)

4.5.2.2.1 Câbles localisés dans la piste d'atterrissage

Câble HT-178 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,50 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 2,44 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble HT-178, localisé dans le remblai de la piste d'atterrissage.
- Depuis 2008, il y a eu une quasi-stabilité avec une augmentation d'à peine 0,10 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-178.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt alluvial de sable et gravier (Ap).
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-178 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -3,42 et -3,23 °C, ce qui en fait un pergélisol froid.

Câble QUA2015-F3 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,37 m, ce qui est légèrement plus profond que la moyenne de 2,26 m enregistrée pour la période référence de 2016 à 2020 au câble QUA2015-F3, localisé dans le remblai de la piste d'atterrissage.
- Depuis 2016, il y a eu une augmentation de 0,16 m de la profondeur maximale de la couche active au câble QUA2015-F3.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt alluvial de sable et gravier (Ap).

- Pour l'année 2019-2020, le câble QUA2015-F3 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -3,60 et -3,29 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.5.2.2.2 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage (Planche synthèse 5, figures 3 et 4 et tableau 4)

Câble QUA2015-F1 :

- Durant l'année 2020, une défaillance de l'équipement a causé une perte de données du 24 février au 12 mai. Ainsi, certains indices n'ont pu être calculés.
- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,44 m, ce qui est légèrement plus profond que la moyenne de 2,30 m enregistrée pour la période référence de 2015 à 2020.
- Depuis 2015, il y a eu une augmentation de 0,33 m de la profondeur maximale de la couche active au câble QUA2015-F1.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt alluvial de sable et gravier (Ap).

Câble QUA2015-F2 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,25 m au câble QUA2015-F2, localisé dans le talus à pente douce du remblai.
- Depuis 2017, le maximum de dégel est relativement stable avec une augmentation de 0,07 m à ce câble.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt alluvial de sable et gravier (Ap).
- Pour l'année 2019-2020, le câble QUA2015-F2 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -2,22 et -1,67°C ce qui en fait un pergélisol relativement chaud.

4.5.2.2.3 Câbles localisés en terrain naturel

Câble HT-156 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,08 m, ce qui est supérieur à la moyenne de 1,86 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 à ce câble localisé du côté est de la piste en terrain naturel.
- Depuis 2008, il y a eu une augmentation de 0,37 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-156.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt de sable et gravier (Mb).

- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-156 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -3,09 et -2,23 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.5.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.5.3.1 Évolution récente : 2004-2020

L'épaisseur de la couche active sous la piste est devenue légèrement plus importante que dans la pente douce du remblai qui fut aménagée pour assurer la reprise du pergélisol le long du fossé de drainage de la piste d'atterrissage. Cela indique l'efficacité du réseau du fossé de drainage amélioré et du reprofilage du remblai réalisé à l'été 2012. Malgré une accumulation d'eau dans le fossé de drainage, au pied du talus à pente douce près du câble QUA2015-F2, il ne semble pas y avoir d'influence d'eau dans le sol sur le temps de regel de la couche active ou sur les températures du sol à cet endroit. À l'inverse, au câble QUA2015-F1 localisé aussi dans un talus à pente douce du côté nord-est, la longue période zéro observée à environ 2 m de profondeur suggère la persistance d'un écoulement d'eau estival décrit par l'Hérault *et al.*, en 2012 (Voir annexe 4). De manière générale, le profil thermique du pergélisol dans le talus et en pied de remblai y est encore légèrement plus chaud que dans la piste et en terrain naturel, mais les valeurs de profondeur atteinte par la couche active enregistrées se situent entre celles de la piste et du terrain naturel. Aussi, la couche active se trouve dans l'unité de sable et gravier alluviaux, pauvre en glace (teneur en eau estimée à environ 15 %). Le système de pente douce tronquée et de reprofilage du fossé fonctionne donc actuellement tel qu'espéré lorsque cette mesure d'adaptation a été conçue et décidée.

4.5.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

L'augmentation des températures projetées de 2,5 à 3,8 °C pour la période 2041-2070 dans la région de Quaqtac pourrait certainement avoir un impact sur la stabilité thermique de l'infrastructure, notamment à l'endroit où est situé le câble HT-178 (Ouranos, 2015). En effet, le front de dégel à cette section construite en déblai, à l'endroit où se trouvait une petite butte cryogène composée d'un till à matrice de sable fin silto-argileux (teneurs pondérales en eau de 12 à 18 %), a déjà atteint la profondeur maximum de la couche active pré-construction et le seuil critique sous la piste correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active en 2012. Ainsi, tout approfondissement futur du maximum de dégel sous ce niveau pourrait entraîner des tassements dans la piste (Allard *et al.*, 1994 ; Allard *et al.*, 2006)

4.5.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol Quaqtac :

La problématique découlant originalement du drainage et de l'accumulation de neige semble avoir été significativement atténuée, malgré la persistance d'eau

dans les fossés de drainage (N.B. ces fossés sont plus éloignés qu'autrefois de la piste). Plus spécifiquement, les modifications au régime thermique sont causées par :

- L'augmentation de la température de l'air ;
- L'accumulation d'eau et l'obstruction des fossés de drainage du côté nord-est (les fossés sont en principe déneigés à la fin de l'hiver pour les débloquer avant la fonte printanière);
- L'écoulement d'eau possible dans la fondation de la piste dans la zone en déblai ;

4.5.3.4 Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste.

Le seuil critique pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle nous ajoutons l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la profondeur de la couche active était d'environ 1,22 m dans les sables et graviers (Allard et al., 1988), avant le début des travaux de construction et l'épaisseur de remblai est de l'ordre de 2 m avec une section en déblai allant jusqu'à 2,5 m, selon les plans tel que construit. Ainsi le seuil critique est évalué à 2,72 m.

En zone de déblai, la profondeur maximum observée de 2,75 m en 2012 au câble HT-178 est le seuil critique estimé.

4.5.3.5 Seuil critique sur les talus et pieds de remblais.

La seule zone de l'aéroport qui pourrait être affectée en cas de dépassement d'un seuil critique d'épaisseur de neige est celle qui a été réaménagée avec une pente tronquée et un fossé évasé éloigné de la piste. Le suivi y est déjà effectué à l'aide des câbles QUA2015-F1 et QUA2015-F2. Les données thermiques y révèlent un pergélisol bien rétabli, mais néanmoins plus chaud qu'aux autres câbles. Cela découle d'une épaisseur de neige significative accumulée sur la pente douce tronquée, mais encore inférieure au seuil qui amènerait la température hivernale à 0 °C en surface du sol. Un seuil critique a tout de même été déterminé en utilisant une épaisseur de neige maximum au-delà de laquelle, la formation et le maintien du pergélisol est peu probable. Pour l'aéroport de Quaqaq, la valeur critique d'épaisseur de neige est estimée comme étant de l'ordre de 0,80 m, selon les courbes de référence dans Riseborough et Smith (1998).

4.5.4 Signes de dégradation

Aucune dégradation n'a été observée à proximité des câbles HT-156, HT-178, QUA2015-F1, QUA2015-F2 et QUA2015-F3 lors de la visite de 2020 (figures 17 et 18).



Figure 17. Aucune dégradation à proximité du câble HT-156
(Photo : Denis Sarrazin, 17 octobre 2020)



Figure 18. Aucune dégradation à proximité du câble QUA2015-F3
(Photo : Denis Sarrazin, 17 octobre 2020)

4.6 Kangirsuk

4.6.1 *Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation*

4.6.1.1 *Synthèse de la répartition spatiale, de l'épaisseur et des propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

Achevé en 1987, l'aéroport de Kangirsuk est situé dans la zone de pergélisol continu sur la rive nord de la rivière Arnaud (Allard et *al.*, 2007). La piste d'atterrissage, qui est d'une longueur totale de 1190 m et d'une largeur de 44 m, est orientée selon un axe nord-est-sud-sud-ouest (038-218° N) (Allard et *al.*, 2009). Juchée à une altitude de plus de 95 m, elle repose en majeure partie sur une mince couverture de sables et graviers grossiers sur le roc (L'Hérault et *al.*, 2012). Toutefois une zone en déblai, entre les chaînages 0+760 m et 1+040 m, est construite sur un till riche en glace qui a provoqué des tassements lors de son dégel dans les années passées.

Le tassement dans la zone en déblai constitue le principal, sinon l'unique, problème géotechnique à être survenu à cet aéroport. Cette section a fait l'objet d'une étude par Tremblay et Doré (1988). Des tassements de 0,23 m ont été enregistrés l'année suivant la construction de l'aéroport. En 2004, le tassement cumulé dans cette section depuis la construction de la piste avait été évalué à 0,46 m (Beulac, 2005). Le suivi a été poursuivi par le MTQ entre 2007 et 2010 qui a mesuré des tassements cumulatifs compris entre 0,02 et 0,05 m à partir des plaques de tassements installées dans l'accotement et au centre-piste (L'Hérault et *al.*, 2012). Lors de la réalisation des travaux de forage au mois de juin 2009, ces signes de dégradation de l'infrastructure étaient toujours présents et une dépression non recensée était clairement visible entre le chaînage 1+075 m et 1+115 m.

4.6.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation (Planche synthèse 6, tableau 1 et figure 2)*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Kangirsuk comprenait jusqu'à l'été 2016 deux câbles à thermistances automatisés. Ils ont été détruits par inadvertance lors des travaux de rechargement de la piste et de rénovation du système d'éclairage. Depuis les deux câbles ont été remplacés.

- **KANGIR-HT-1** : Le câble HT-1 a été instrumenté en 2005 et remplacé en 2016 par le câble HT-1B. Il était localisé dans le remblai au centre piste, au chaînage 0+850 m. Il comportait 9 thermistances situées entre 0,56 et 19,56 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se faisait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partageait avec le câble KANGIR-F2. Ce câble n'est plus en service.

- **KANGIR-HT-1B** : Le câble HT-1B a été instrumenté en 2016 pour remplacer le câble HT-1. Il est localisé dans le remblai de la piste, au chaînage 0+850 m, à quelques mètres de l'ancien câble HT-1. Il comporte 16 thermistances situées entre 0,25 et 8 m, dont les 5 premières sont placées dans le remblai, qui fait environ 1,40 m à cet endroit, et les 11 dernières sont placées dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **KANGIR-F2** : Le câble KANGIR-F2 a été instrumenté en 2010 et remplacé en 2016 par le câble KANGIR-F2B. Il était localisé du côté est de la piste à la hauteur du chaînage 0+916 m à 2 m du pied de remblai. Il comportait 10 thermistances situées entre 0,05 et 6,5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,25 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se faisait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partageait avec le câble HT-1. Ce câble n'est plus en service.
- **KANGIR-F2B** : Le câble KANGIR-F2B, instrumenté en 2016 pour remplacer le câble KANGIR-F2. Il est localisé du côté est de la piste à la hauteur du chaînage 0+916 m au pied du remblai dans le fossé de drainage à quelques mètres de l'ancien câble KANGIR-F2. Il comporte 9 thermistances, situées entre 0,25 et 2,25 m, placées sous le remblai qui fait environ 0,5 m à cet endroit, et dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. Une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,25 m au-dessus du sol a été installée pour le faire le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10.



Planche synthèse des données géothermiques et climatiques : Aéroport de Kangirsuk

Légende

- ★ Câble à thermistances avec système d'acquisition de données
- ★ Ancien câble à thermistances avec système d'acquisition de données - Hors service

Fond de carte: Orthomosaïque, Kangirsuk 2016.

Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Kangirsuk

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|-------------|-----------------|--------------|-------------------|---|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| KANGIR-HT1* | remblai | 2,91 | 9 | 0,66; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,5; 2,91 | 2005-06-21 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| KANGIR-F2* | Pied de remblai | 6,50 | 9 | 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5 | 2010-10-15 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| KANGIR-HT1B | remblai | 8,00 | 16 | 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 | 2016-08-17 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| KANGIR-F2B | Pied de remblai | 8,00 | 16 | 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25 | 2016-08-19 | automatisée/CR1000 | température du sol |

* Câbles à thermistances endommagés lors des travaux de réfection de 2016. Ces câbles ont été remplacés par KANGIR-HT1B et KANGIR-F2B respectivement.

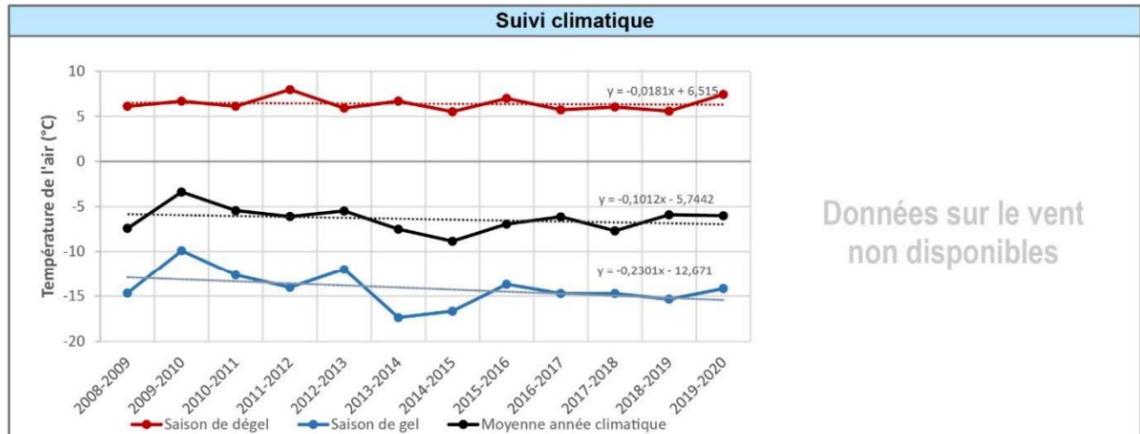


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 11-oct | 01-oct | 25-oct | 19-oct | 05-oct | 22-oct | 10-oct | 05-oct | 06-oct | 17-oct | 06-oct | 29-oct | 14-oct |
| Fin | 29-mai | 24-mai | 02-juin | 30-mai | 04-juin | 17-mai | 30-mai | 07-juin | 11-mai | 07-juin | 06-mai | 03-juin | 27-mai |
| Durée | 230 | 235 | 220 | 224 | 242 | 207 | 232 | 246 | 217 | 233 | 212 | 218 | 226 |
| Moyenne T°C | -14,68 | -9,90 | -12,65 | -14,04 | -12,01 | -17,38 | -16,67 | -13,70 | -14,72 | -14,73 | -15,35 | -14,17 | -14,17 |
| Indice de gel (F) | 3390 | 2336 | 2796 | 3158 | 2918 | 3615 | 3883 | 3385 | 3210 | 3446 | 3269 | 3104 | 3209 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 30-mai | 25-mai | 03-juin | 31-mai | 05-juin | 18-mai | 31-mai | 08-juin | 12-mai | 08-juin | 07-mai | 04-juin | 28-mai |
| Fin | 30-sept | 24-oct | 18-oct | 04-oct | 21-oct | 09-oct | 04-oct | 05-oct | 16-oct | 05-oct | 28-oct | 14-oct | 13-oct |
| Durée | 123 | 152 | 137 | 126 | 138 | 144 | 126 | 119 | 157 | 119 | 174 | 132 | 137 |
| Moyenne T°C | 6,12 | 6,68 | 6,12 | 7,97 | 5,92 | 6,68 | 5,52 | 6,98 | 5,73 | 6,03 | 5,59 | 7,43 | 6,40 |
| Indice de dégel (TI) | 758 | 1022 | 844 | 1012 | 823 | 968 | 701 | 838 | 905 | 724 | 978 | 988 | 880 |
| Moyenne année climatique | -7,41 | -3,38 | -5,44 | -6,10 | -5,49 | -7,50 | -8,84 | -6,94 | -6,13 | -7,69 | -5,90 | -6,01 | -6,40 |
| Ratio (F/TI) | 4,47 | 2,29 | 3,31 | 3,12 | 3,55 | 3,74 | 5,54 | 4,04 | 3,55 | 4,76 | 3,34 | 3,14 | 3,74 |

Planche synthèse 6

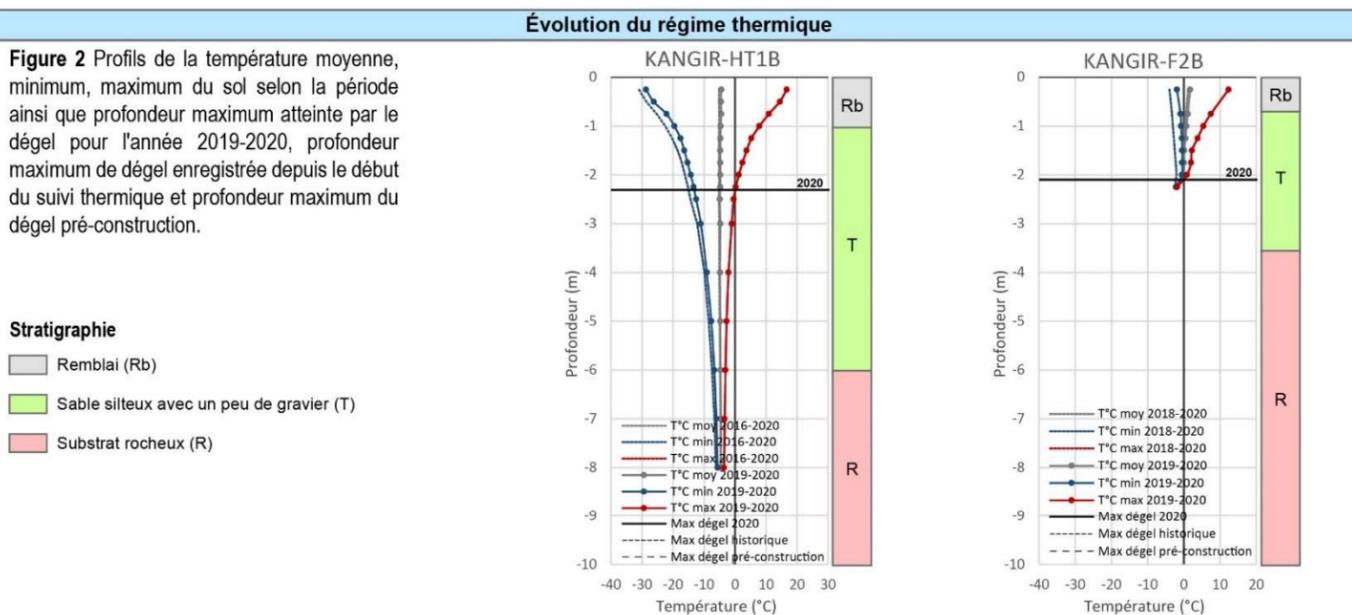
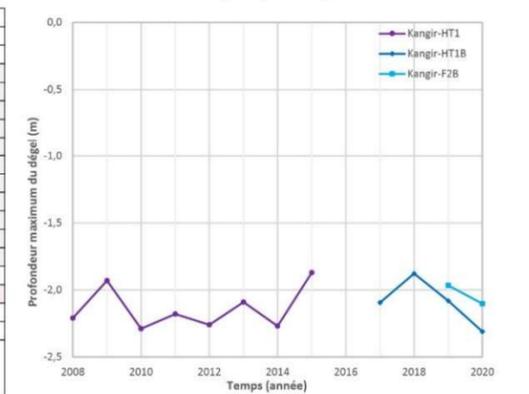


Tableau 3 et Figure 3 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020.

Tableau 3 Profondeur maximum du dégel (m)

| Année | Kangir-HT1 | | | Kangir-HT1B | | | Kangir-F2B | | |
|--|--------------------------------|--------------|----------------|--------------------------------------|-------------|----------------|----------------------------|-------------|----------------|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2009 | -1,93 | -0,28 | 2009-09-14 | - | - | - | - | - | - |
| 2010 | -2,29 | 0,36 | 2010-09-21 | - | - | - | - | - | - |
| 2011 | -2,18 | -0,11 | 2011-09-12 | - | - | - | - | - | - |
| 2012 | -2,26 | 0,08 | 2012-09-14 | - | - | - | - | - | - |
| 2013 | -2,09 | -0,17 | 2013-08-28 | - | - | - | - | - | - |
| 2014 | -2,27 | 0,18 | 2014-09-07 | - | - | - | - | - | - |
| 2015 | -1,87 | -0,40 | 2015-09-02 | - | - | - | - | - | - |
| 2016 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2017 | - | - | - | -2,09 | - | 2017-09-19 | - | - | - |
| 2018 | - | - | - | -1,88 | -0,22 | 2018-09-09 | - | - | - |
| 2019 | - | - | - | -2,08 | 0,20 | 2019-09-25 | -1,97 | - | 2019-09-14 |
| 2020 | - | - | - | -2,31 | 0,23 | 2020-09-15 | -2,10 | 0,14 | 2020-08-24 |
| Moyenne (m) | -2,14 | -0,05 | 09-sept | -2,09 | 0,11 | 17-sept | -2,03 | 0,14 | 03-sept |
| Influence du couvert nivale | Faible | | | Faible | | | - | | |
| Variations récentes du maximum de dégel | Câble remplacé par Kangir-HT1B | | | Épaississement important depuis 2018 | | | Épaississement depuis 2019 | | |



4.6.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Kangirsuk

4.6.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 6, figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air enregistrée à Kangirsuk pour l'année 2019-2020 est de $-6,01$ °C, ce qui est un peu au-dessus de la moyenne de $-6,40$ °C pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence avec un indice de gel (Fi) légèrement inférieur (3104 comparativement à 3209) et un indice de dégel (Ti) largement supérieur (988 comparativement à 880) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.6.2.2 Régime thermique du pergélisol

4.6.2.2.1 Câbles localisés dans la piste d'atterrissage

Câble KANGIR-HT-1B :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,31 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 2,09 m pour la période référence de 2017 à 2020 au câble KANGIR-HT-1B localisé dans le remblai de la piste d'atterrissage. Cette valeur de 2,31 m dépasse de deux centimètres le maximum de 2,29 m observé au câble KANGIR-HT-1 en 2010 et qui en principe constituait le seuil critique estimé.
- Depuis 2009, il y a eu une augmentation de 0,38 m de la profondeur maximale de la couche active aux câbles HT-1 et HT-1B ce qui correspond au maximum historique enregistré à cet endroit ainsi que le nouveau seuil critique de dégel.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le till (T) sous le remblai de la piste.
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-1B présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre $-4,92$ et $-4,61$ °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.6.2.2.2 Câbles localisés dans le talus ou en pied de remblai de la piste d'atterrissage

Câble KANGIR-F2B

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 2,10 m au câble KANGIR-F2B localisé du côté est de

la piste ou pied du versant qui surplombe la piste (versant découpé dans une butte lors du déblai pendant la construction).

- Depuis 2019, il y a eu une augmentation de 0,13 m de la profondeur maximale de la couche active au câble KANGIR-F2B, ce qui correspond au maximum historique enregistré à cet endroit et devient le nouveau seuil critique de dégel.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le till (T) sous le rebord du remblai de la piste.
- Pour l'année 2019-2020, le câble KANGIR-F2B présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -1,95 et 1,70 °C ce qui en fait un pergélisol relativement chaud.

4.6.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.6.3.1 Évolution récente : 2009-2020

Depuis 2009, le régime thermique du pergélisol au centre-piste fluctue de manière synchrone avec les variations des températures de l'air. On observe durant les années les plus froides de 2009, 2015 et 2018 une diminution de la profondeur maximum de dégel et, à l'inverse, durant les années plus chaudes de 2010 à 2014, 2017 et 2019 une augmentation de cette dernière. La première année complète de température du sol acquise au câble KANGIR-F2B indique que le maximum atteint par la couche active est légèrement moins profond que dans la piste à proximité. De même, le maximum de dégel survient légèrement plus tôt sur le bord que dans le centre de la piste. Dans la zone du centre-piste en déblai, la profondeur maximale de dégel a aussi été égale ou très légèrement supérieure (de l'ordre de 0,02 m) au maximum observé antérieurement (Câble KANGIR-HT-1B).

4.6.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Étant donné qu'une augmentation des températures de l'air de 2,7 à 3,9 °C est projetée pour la région de Kangirsuk pour la période 2041-2070, il est certain que cet apport de chaleur supplémentaire aura un impact sur la profondeur maximum de dégel (Ouranos, 2015). Les câbles KANGIR-HT1B (anciennement KANGIR-HT1) et KANGIR-F2B sont localisés dans une section de la piste construite en déblai où le matériel de remblai de la piste est relativement mince (chaînage approximatif de 0+770 et 1+320). Depuis la construction, l'épaisseur du remblai au câble KANGIR-HT1B qui était à l'origine d'un mètre y fait maintenant 1,4 m suite aux rechargements. Cela implique que le maximum de dégel actuel se trouve dans le pergélisol pré construction, soit un le till à matrice fine, dont la teneur en glace augmente considérablement en dessous de 2,3 m de profondeur (teneurs en eau volumétrique de 50 à 80 %) (Tremblay et Doré, 1988 ; Allard et Pilon, 1994). Comme la profondeur maximale de la couche active pré-construction a été atteinte à cet endroit dès la construction et que le

seuil critique sous la piste correspond maintenant à la profondeur maximale du dégel de 2020, tout approfondissement en deçà de ce niveau pourrait provoquer des tassements et une perte de capacité portante (Allard et al., 2006). Les taux de tassements pourraient atteindre de valeurs de 10 à 15 % (ex. de 1 à 1,5 cm de tassement pour un dégel de 10 cm) dans cette section de la piste, tel que le suggèrent les projections effectuées par l'Hérault et al. (2012). Le reste de la piste d'atterrissage repose sur des dépôts minces de sable et graviers (Mb) non gélifs directement sur le roc.

4.6.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol Kangirsuk :

Les modifications au régime thermique et les risques d'instabilité associés rencontrés à l'aéroport de Kangirsuk sont causés par :

- La construction originale sur une section en déblai ;
- L'augmentation de la température de l'air, surtout en été, qui affecte directement la profondeur maximum de dégel dans la zone en déblai.
- L'infiltration possible d'eau sous le remblai au pied du versant de la colline en marge de la piste dans le secteur en déblai difficile à drainer

4.6.3.4 Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste :

Comme la section à risque de la piste de Kangirsuk est une zone en déblai sur till et qu'il y a eu des tassements pendant plusieurs années après la construction, le seuil critique est maintenant déterminé par la profondeur maximale historique atteinte par le front de dégel au cours des années de suivi, soit 2,31 m atteint le 15 septembre 2020 (tableau 5). Au-delà de cette profondeur critique, le dégel du pergélisol riche en glace entraînera probablement des tassements. Toutefois, aucun tassement notable n'a attiré le regard de notre professionnel dans la piste construite en déblai lors de sa visite en octobre 2020. Selon les relevés géophysiques, il y a environ 4-5 m de till gelé sous la piste avant d'atteindre le plancher rocheux (L'Hérault et al., 2012).

4.6.3.5 Seuil critique en bordure de remblai :

À Kangirsuk, la majorité de la piste est sur le roc ou sur des dépôts minces sur le roc. De plus, elle n'est guère surélevée de sorte qu'elle est peu affectée par des accumulations de neige en pied de remblai. Néanmoins l'accumulation de neige dans le fossé au pied du versant en déblai de la colline du côté est par les opérations de déneigement et le vent a pour effet de réchauffer le pergélisol même si la couche active reste stable, comme l'indiquent les données du câble KANGIR-F2B (figure 19). Le pergélisol y est encore froid. Un seuil critique été déterminé en utilisant une épaisseur de neige maximum au-delà de laquelle, la formation et le maintien du pergélisol est peu probable. Pour l'aéroport de Kangirsuk, la valeur critique d'épaisseur de neige est estimée comme étant de l'ordre de 0,80 m, en appliquant les calculs de Riseborough et Smith (1998).

4.6.4 Signes de dégradation

Aucun signe de dégradation de la piste et de son rebord n'était perceptible lors de la visite du site en octobre 2020.

La présence de neige accumulée dans le fossé de drainage a été observée à proximité du câble KANGIR-F2B figure 19). La localisation de cette congère en début d'hiver illustre la propension du fossé en bordure de piste à accumuler de la neige. Cette neige peu dense accumulée en début de saison de gel réduit l'extraction de chaleur du sol en hiver, d'où le profil thermique plus chaud qu'au centre-piste (Planche synthèse 6, figure 2).



Figure 19 Présence de neige accumulée dans le fossé de drainage à proximité du câble KANGIR-F2B.

(Photo : Denis Sarrazin, 14 octobre 2020)

4.7 Aupaluk

4.7.1 *Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation*

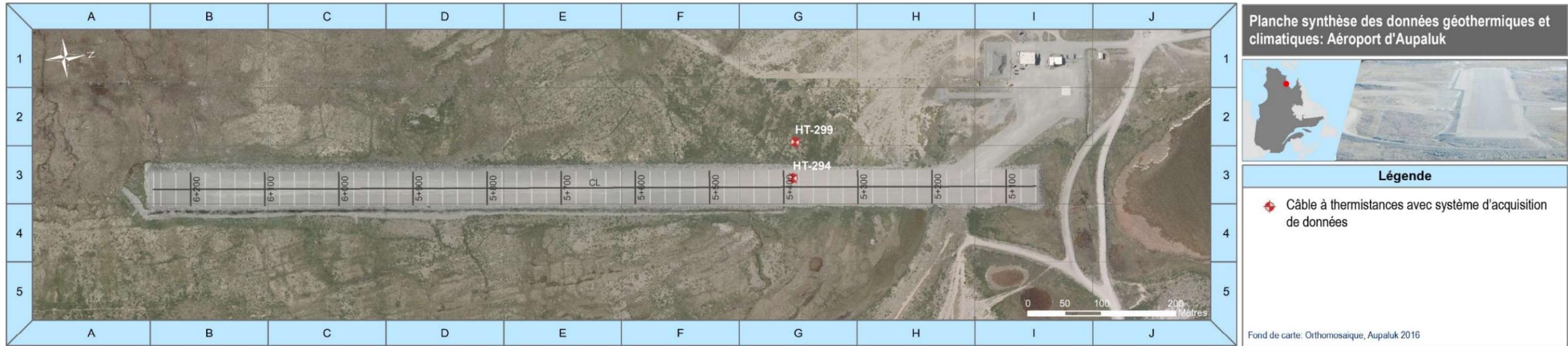
4.7.1.1 *Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

L'aéroport d'Aupaluk ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1990. La piste d'atterrissage (04-22), d'une longueur de 1190 m et d'une largeur de 44 m est orientée selon un axe nord-est-sud-ouest (043-223° N) à une altitude moyenne de 29 m. L'aéroport et le village sont établis sur une série d'anciennes plages marines soulevées lors du relèvement isostatique consécutif à la déglaciation. Les sols sableux et graveleux du secteur de l'aéroport sont marqués par de nombreux sillons et fentes de gel associés à un réseau de coins de glace (Allard et *al.*, 2007).

4.7.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation (Planche synthèse 7, tableau 1 et figure 2)*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Aupaluk comprend deux câbles à thermistances automatisés :

- **HT-294** : Le câble HT-294 a été instrumenté en 2004. Il est localisé sous la piste, au chaînage 5+370 m, à 20 m du bord. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,50 et 5,50 m, dont les 7 premières sont situées dans le remblai de 3,6 m d'épaisseur et les 4 dernières dans le sol naturel sous-jacent afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT-299** : Le câble HT-299 a été instrumenté en 1990 et automatisé en 1997. Il est localisé du côté ouest de la piste à la hauteur du chaînage 5+384 m à 45 m de la piste en terrain naturel (sables et graviers). Il comporte 11 thermistances situées entre 0,10 et 19,10 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. Une thermistance logée dans un abri de radiation à 1,25 m au-dessus du sol est utilisée pour le suivi de la température de l'air en continu depuis 2004. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.



Caractéristiques de l'instrumentation

Tableau 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Aupaluk

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| HT-294 | centre-ligne | 5,50 | 11 | 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50; 5,00; 5,50 | 2004-06-15 | automatisée/CR10X | température du sol |
| HT-299 | Terrain naturel | 19,10 | 11 | 0,10; 1,10; 2,10; 3,10; 5,10; 7,10; 9,10; 11,10; 14,10; 17,10; 19,10 | 1997-10-21 | automatisée/CR10X | température du sol et de l'air |

Suivi climatique

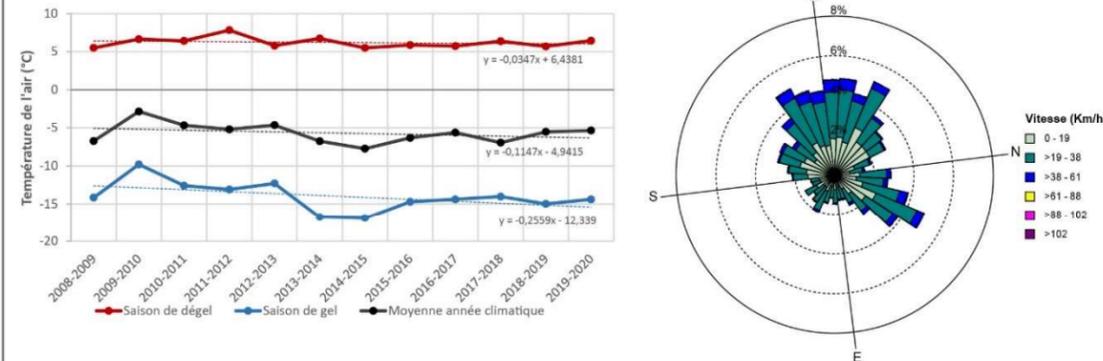


Figure 1 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020
Figure 2 Vitesses et directions des vents pour la période 1993-2015

Tableau 2 Caractéristiques climatiques pour la période de 2008-2020.

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 15-oct | 13-oct | 05-nov | 19-oct | 13-oct | 24-oct | 18-oct | 09-oct | 08-oct | 17-oct | 09-oct | 29-oct | 18-oct |
| Fin | 28-mai | 24-mai | 26-mai | 29-mai | 17-mai | 17-mai | 15-mai | 11-mai | 06-mai | 06-juin | 05-mai | 17-mai | 20-mai |
| Durée | 225 | 223 | 202 | 223 | 216 | 205 | 209 | 215 | 210 | 232 | 208 | 201 | 214 |
| Moyenne T°C | -14,14 | -9,79 | -12,58 | -13,09 | -12,28 | -16,76 | -16,91 | -14,70 | -14,38 | -14,02 | -14,98 | -14,38 | -14,00 |
| Indice de gel (FI) | 3196 | 2194 | 2555 | 2932 | 2666 | 3452 | 3552 | 3176 | 3035 | 3266 | 3130 | 2905 | 3005 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 29-mai | 25-mai | 27-mai | 30-mai | 18-mai | 18-mai | 16-mai | 12-mai | 07-mai | 07-juin | 06-mai | 18-mai | 21-mai |
| Fin | 12-oct | 04-nov | 18-oct | 12-oct | 23-oct | 17-oct | 08-oct | 07-oct | 16-oct | 08-oct | 28-oct | 19-oct | 18-oct |
| Durée | 136 | 163 | 144 | 135 | 158 | 152 | 145 | 148 | 162 | 123 | 175 | 154 | 150 |
| Moyenne T°C | 5,51 | 6,64 | 6,42 | 7,82 | 5,80 | 6,73 | 5,50 | 5,88 | 5,74 | 6,38 | 5,69 | 6,44 | 6,21 |
| Indice de dégel (TI) | 754 | 1089 | 930 | 1064 | 922 | 1030 | 803 | 876 | 935 | 791 | 1002 | 998 | 933 |
| Moyenne année climatique | -6,73 | -2,85 | -4,67 | -5,19 | -4,64 | -6,75 | -7,72 | -6,30 | -5,61 | -6,93 | -5,53 | -5,34 | -5,69 |
| Ratio (FI/TI) | 4,24 | 2,01 | 2,75 | 2,76 | 2,89 | 3,35 | 4,42 | 3,62 | 3,24 | 4,13 | 3,12 | 2,91 | 3,29 |

Évolution du régime thermique

Figure 2 Profils de la température moyenne, minimum, maximum du sol selon la période ainsi que profondeur maximum atteinte par le dégel pour l'année 2019-2020, profondeur maximum de dégel enregistrée depuis le début du suivi thermique et profondeur maximum du dégel pré-construction.

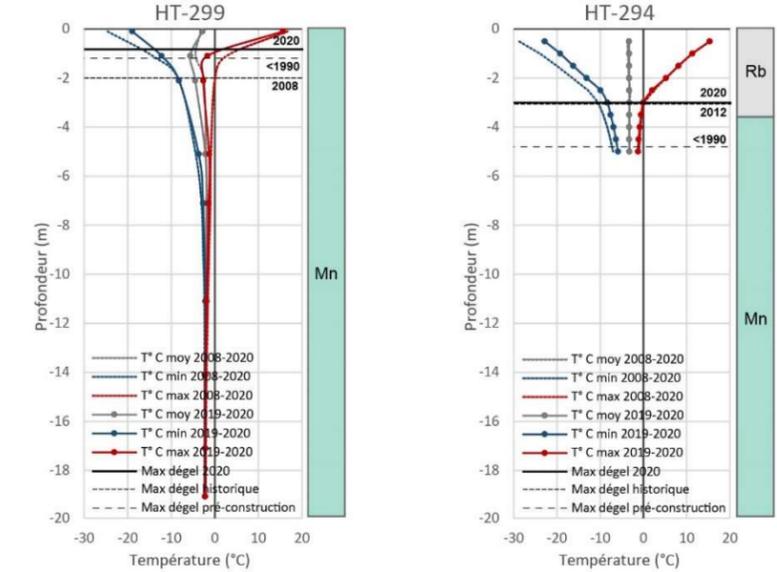
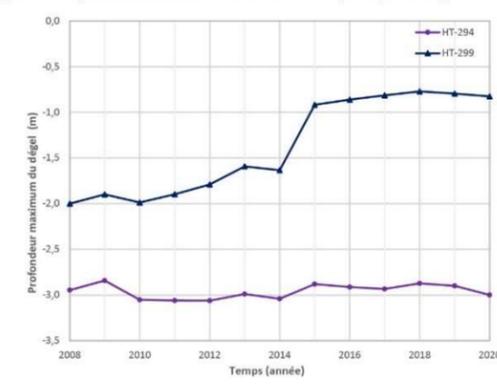


Tableau 3 et Figure 3 Variations interannuelles de la profondeur maximum atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020

| Année | HT-294 | | HT-299 | |
|--|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|--------------|
| | z(m) | Δ (m) | z(m) | Δ (m) |
| 2008 | -2,95 | - | -2,00 | - |
| 2009 | -2,84 | -0,10 | -1,90 | 0,10 |
| 2010 | -3,05 | 0,21 | -1,99 | -0,09 |
| 2011 | -3,06 | 0,01 | -1,90 | -0,09 |
| 2012 | -3,06 | 0,00 | -1,79 | -0,11 |
| 2013 | -2,99 | -0,07 | -1,59 | -0,20 |
| 2014 | -3,04 | 0,05 | -1,63 | 0,04 |
| 2015 | -2,88 | -0,16 | -0,92 | -0,72 |
| 2016 | -2,91 | 0,03 | -0,86 | -0,06 |
| 2017 | -2,93 | 0,02 | -0,82 | -0,05 |
| 2018 | -2,87 | -0,06 | -0,77 | -0,04 |
| 2019 | -2,90 | 0,03 | -0,80 | 0,02 |
| 2020 | -3,00 | 0,10 | -0,83 | 0,03 |
| Moyenne (m) | -2,96 | 0,00 | -1,37 | -0,10 |
| Influence du couvert nival | Faible | | Faible | |
| Variations récentes du maximum de dégel | Épaississement modéré depuis 2018 | | Épaississement faible depuis 2018 | |



4.7.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport d'Aupaluk

4.7.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 7, figure 1 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air pour l'année 2019-2020 est de -5,34 °C, ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne de -5,69 °C enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été plus chaude par rapport à la période de référence avec un indice de gel (*Fi*) légèrement inférieur (2905 comparativement à 3005) et un indice de dégel (*Ti*) supérieur (998 comparativement à 933) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.7.2.2 Régime thermique du pergélisol (Planche synthèse 7, figures 2 et 3 et tableau 3)

4.7.2.2.1 Câble localisé dans la piste d'atterrissage

Câble HT-294 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 3,00 m, ce qui est près de la moyenne de 2,96 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020.
- Depuis 2008, la profondeur maximale de la couche active est relativement stable avec un épaissement de seulement 0,05 m.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le matériel de remblai de la piste (Rb) qui fait environ 3,6 m à cet endroit.
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-294 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -3,32 et -3,27 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.7.2.2.2 Câble localisé en terrain naturel

Câble HT-299 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 0,83 m, ce qui est moins profond que la moyenne de 1,37 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020.
- Depuis 2009, il y a eu une diminution de 1,17 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-299.
- Pour l'année 2019-2020, ce câble présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -5,67 et -1,95 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.7.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.7.3.1 Évolution récente : 2004-2020

Depuis le début du suivi thermique, l'épaisseur de la couche active dans le remblai de la piste (HT-294) oscille légèrement autour de 3 m en phase avec les variations de la température de l'air. Le front de dégel s'est donc maintenu dans le remblai (3,6 m d'épaisseur à cet endroit) et ce dernier repose sur un sol non gélif bien qu'un consultant avant construction ait obtenu de hautes valeurs de teneur en eau que nous croyons issues ponctuellement soit d'un coin de glace, soit d'une butte saisonnière à cœur de glace (teneurs en eau mesurées avant construction de 8 à 242 %; Lupien, Rosenberg, Journeaux et associés inc., 1984) (Allard et al., 2007). L'état actuel du pergélisol sous la piste est considéré comme stable. En milieu naturel (câble HT-299), le plafond du pergélisol est remonté graduellement à partir de deux mètres de 2008 à 2014, puis a connu une hausse abrupte en 2015 pour se stabiliser aux alentours de 0,8 m. L'interprétation probable de cette hausse rapide est que la nappe d'eau perchée dans la couche active jusqu'en 2014 a gelé lors de l'hiver particulièrement froid de 2014-2015 et n'a pas refondu depuis.

4.7.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Malgré une augmentation projetée de la température de l'air pour la période 2041-2070 de l'ordre de 2,60 à 3,90 °C, la couche active sous la piste restera dans le remblai et la couche active pré-construction pendant encore de nombreuses années (Ouranos, 2015). Toutefois, aucune projection n'a été effectuée concernant le régime thermique et le comportement anticipé de l'aéroport d'Aupaluk.

Le réseau de coins de glace en périphérie et sous l'infrastructure pourrait être sujet à l'érosion thermique advenant un écoulement d'eau sous la piste, créant ainsi des dépressions linéaires et des tassements en surface. Les accumulations d'eau observées en périphérie de l'infrastructure devraient être évitées afin de limiter les infiltrations dans la fondation. Le fossé qui intercepte le drainage du terrain le long du flanc ouest de la piste doit être surveillé et entretenu.

4.7.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol Aupaluk :

La piste est présentement stable. Le risque le plus apparent, quoique non évalué, est la possible thermo-érosion de coins de glace sous la piste. Une augmentation importante des températures de l'air pourra, à terme, interagir avec la problématique du drainage. Plus spécifiquement, les modifications au régime thermique seraient causées par :

- L'augmentation de la température de l'air ;
- L'accumulation d'eau dans le fossé de drainage du côté est.

4.7.3.4 *Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste*

La profondeur maximale de dégel se maintient autour de trois mètres depuis 12 ans. Le seuil critique pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspond à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle nous ajoutons l'épaisseur du remblai. Selon les archives consultées, la couche active était d'environ 1,00 à 1,20 m d'épaisseur (Lupien, Rosenberg, Journeaux et Associés inc., 1984; Allard *et al.*, 1994) avant le début des travaux de construction. L'épaisseur de remblai varie actuellement entre 2,5 et 5 m selon les plans tel que construit (tableau 6). Étant donné une épaisseur moyenne de remblai de l'ordre de 3,6 m (comme au câble HT-294), la profondeur du seuil critique est donc de 4,8 m. Même si cette profondeur de dégel est atteinte un jour, il faut aussi noter que le sol sablo-graveleux sous la piste est peu gélif et donc peu susceptible aux tassements en cas de dégel (à l'exception de coins de glace locaux).

4.7.3.5 *Seuil critique sur les talus et pieds de remblai.*

Il n'existe aucune observation sur les accumulations de neige sur les flancs de la piste et aucun tassement qui serait provoqué par un dégel du pergélisol n'a été observé ou rapporté à date. Cet état de fait résulte probablement du caractère non gélif des dépôts sableux locaux qui ne tassent pas lorsqu'ils dégèlent.

Un seuil critique d'épaisseur de neige a tout de même été déterminé en utilisant une épaisseur de neige maximum au-delà de laquelle le maintien du pergélisol est peu probable. Pour l'aéroport d'Aupaluk, la valeur critique d'épaisseur de neige est estimée comme étant de l'ordre de 0,80 m, en utilisant les calculs de Riseborough et Smith (1998).

4.7.4 Signes de dégradation

Aucune dégradation de la bordure de piste n'a été observée à proximité des câbles HT-294 et HT-299 lors de la visite de 2020 (figures 20 et 21).



Figure 20. Aucune dégradation de la piste à proximité du câble HT-294
(Photo : Denis Sarrazin, 24 octobre 2020)



Figure 21. Aucune dégradation du terrain naturel à proximité du câble HT-299
(Photo : Denis Sarrazin, 24 octobre 2020)

4.8 Tasiujaq

4.8.1 *Caractéristiques des dépôts de surface et détail de l'instrumentation*

4.8.1.1 *Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des dépôts superficiels*

L'aéroport est situé sur une terrasse fluviale sur la rive nord de la rivière Bérard. L'aéroport a été achevé en 1990. La piste d'atterrissage, d'une longueur effective de 1190 m et d'une largeur de 44 m, est orientée selon un axe est-nord-est-ouest-sud-ouest (057-237°) à une altitude moyenne de 34 m (Allard et al., 2007). Une des particularités de la piste de Tasiujaq est qu'elle traverse, entre les chaînages 5+820 m et 5+865 m, un ancien méandre abandonné qui forme un petit lac peu profond et intermittent. Le drainage naturel de ce lac s'effectue principalement par un ruisseau qui coule parallèlement à la piste, du côté ouest, en direction nord (L'Hérault et al., 2012).

Les tassements différentiels qui affectent surtout le bord de piste et le talus du remblai constituent les principaux problèmes relevés. Il a été démontré que l'accumulation de neige par le vent et par les opérations de déneigement ainsi que l'accumulation d'eau en bordure de remblai est la principale source de chaleur qui fait dégeler le pergélisol en pied de remblai. En 2010 est aussi apparue une dépression transversale associée probablement à un écoulement traversant latéralement le remblai de la piste. De telles infiltrations porteuses de chaleur sont susceptibles de se reproduire ailleurs à mesure que les mares d'eau déjà existantes s'agrandissent et submergent la base du remblai. Cette piste a été le lieu d'installation de planches d'essais qui ont servi à tester des solutions d'ingénierie pour stabiliser les bords de remblais, comme des pentes douces, les drains de chaleur et les remblais à convection. Le principal danger qui menace la piste (L'Hérault et al., 2012), à savoir l'enneigement des bordures, est en voie d'être mitigé par les travaux que le MTQ a réalisés en 2018, lesquels consistent principalement à construire des pentes douces autour de l'ouvrage et à améliorer le drainage du terrain.

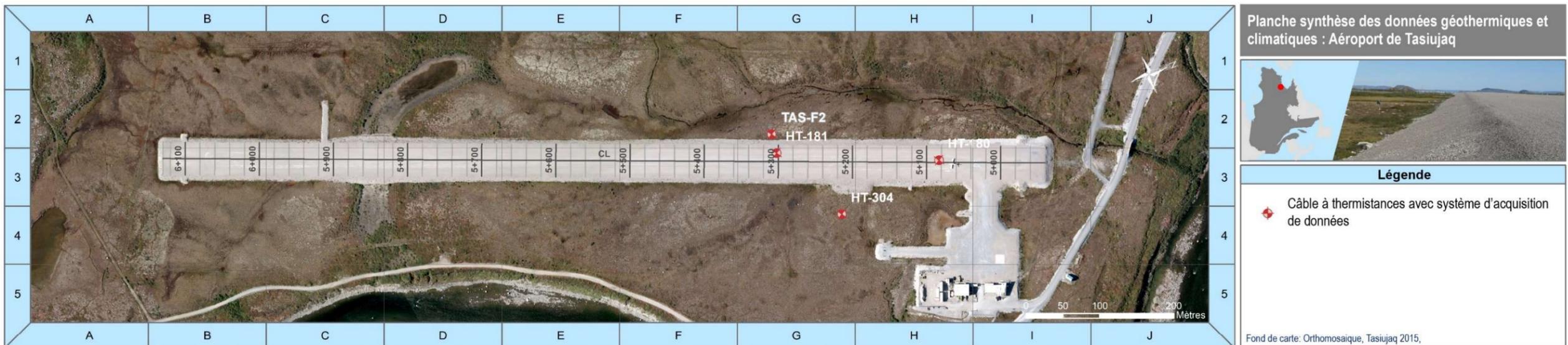
4.8.1.2 *Localisation et description de l'instrumentation (Planche synthèse 8, figures 1 et 3)*

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Tasiujaq comprend quatre câbles à thermistances automatisés :

- **HT-180** : Le câble HT-180 a été installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1993. Il est localisé au centre piste sous le remblai d'une épaisseur de 1,80 m et traverse une couche d'isolant rigide de 50 mm, au contact entre le remblai et le sol naturel, au chaînage 5+090 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,60 et 5 m, dont les 4 premières sont placées dans le remblai et les 5 dernières sont placées dans le sol naturel,

afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.

- **HT-181** : Le câble HT-181 a été installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1995. Il est localisé dans le remblai de la piste qui fait 1,75 m à cet endroit, au chaînage 5+300 m. Il comporte 11 thermistances situées entre 0,65 et 5,40 m, dont les 3 premières sont placées dans le remblai et les 8 dernières sont placées dans le sol naturel, afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X qu'il partage avec le câble TAS-F2.
- **HT-304** : Le câble HT-304 a été installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1993. Il est localisé à 48 m à l'est de la piste, en terrain naturel (dans une barre alluviale de sables et graviers) vis-à-vis chaînage 5+215 m. Il comporte 13 thermistances situées entre 0,05 et 11 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à environ 1,25 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **TAS-F2** : Le câble TAS-F2 a été instrumenté en 2010. Il est localisé du côté ouest de la piste, au chaînage 5+310, à 10 m du pied de remblai. Il comporte 16 thermistances situées entre 0,10 et 13,50 m dans le sol naturel afin d'assurer le suivi du régime thermique. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X qu'il partage avec le câble HT-181.



Caractéristiques de l'instrumentation

Figure 1 Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Tasiujaq

| No. forage | Localisation | Longueur (m) | Nb. thermistances | Répartition (m) | Mise en service | Type lecture/système | Paramètres mesurés |
|------------|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| HT-180 | remblai | 5,35 | 11 | 0,6; 0,61; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 | 1989-06-17 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-181 | remblai | 5,40 | 11 | 0,65; 0,9; 1,4; 1,9; 2,4; 2,9; 3,4; 3,9; 4,4; 4,9; 5,4 | 1991-10-06 | automatisée/CR1000 | température du sol |
| HT-304 | Terrain naturel | 11,00 | 14 | 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 7; 9; 11 | 1993-08-27 | automatisée/CR1000 | température de l'air et du sol |
| TAS-F2 | Terrain naturel | 13,50 | 16 | 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 9; 11; 13,5 | 2010-10-11 | automatisée/CR1000 | température du sol |

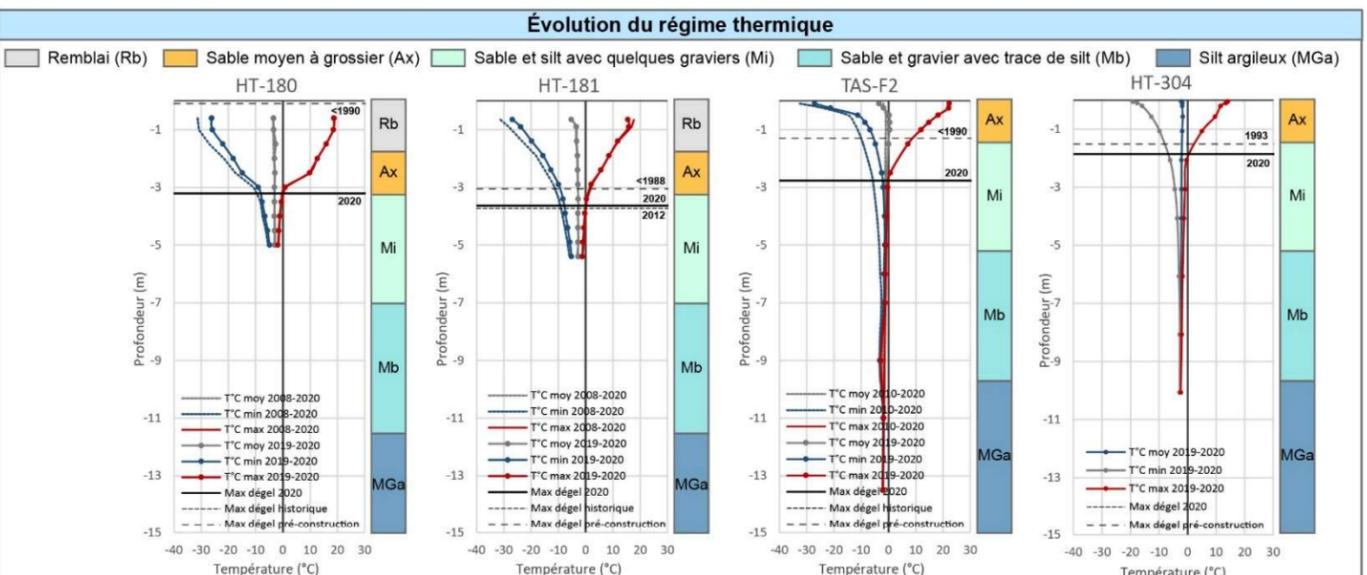


Figure 3 Profils de la température moyenne, minimum, maximum du sol selon la période ainsi que profondeur maximum atteinte par le dégel pour l'année 2019-2020, profondeur maximum de dégel enregistrée depuis le début du suivi thermique et profondeur maximum de dégel pré-construction.

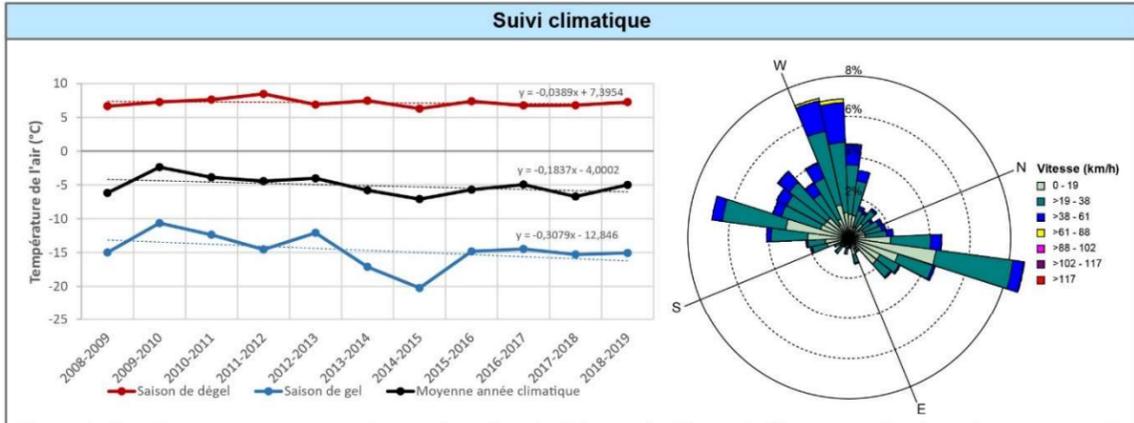


Figure 2 Température moyenne annuelle et saisonnière de l'air pour la période 2008-2020

Figure 3 Vitesses et directions des vents pour la période 1994-2015

Tableau 2

Caractéristiques climatiques pour la période 2008-2020

| Année climatique | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 | 2017-2018 | 2018-2019 | 2019-2020 | Moyenne |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Saison de gel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 29-oct | 20-oct | 05-nov | 24-oct | 13-oct | 25-oct | 31-oct | 09-oct | 08-oct | 26-oct | 09-oct | 30-oct | 21-oct |
| Fin | 27-mai | 12-mai | 26-mai | 09-mai | 17-mai | 12-mai | 21-avr | 10-mai | 06-mai | 26-mai | 05-mai | 16-mai | 13-mai |
| Durée | 210 | 204 | 202 | 198 | 216 | 199 | 172 | 214 | 210 | 212 | 208 | 199 | 204 |
| Moyenne T°C | -14,99 | -10,64 | -12,37 | -14,55 | -12,09 | -17,12 | -20,24 | -14,82 | -14,47 | -15,28 | -15,05 | -14,59 | -14,69 |
| Indice de gel (F) | 3163 | 2182 | 2511 | 2896 | 2623 | 3424 | 3501 | 3186 | 3054 | 3255 | 3146 | 2918 | 2988 |
| Saison de dégel | | | | | | | | | | | | | |
| Début | 28-mai | 13-mai | 27-mai | 10-mai | 18-mai | 13-mai | 22-avr | 11-mai | 07-mai | 27-mai | 06-mai | 17-mai | 14-mai |
| Fin | 19-oct | 04-nov | 23-oct | 12-oct | 24-oct | 30-oct | 08-oct | 07-oct | 25-oct | 08-oct | 29-oct | 19-oct | 19-oct |
| Durée | 144 | 175 | 149 | 155 | 159 | 170 | 169 | 149 | 171 | 134 | 176 | 155 | 159 |
| Moyenne T°C | 6,65 | 7,27 | 7,61 | 8,46 | 6,89 | 7,47 | 6,28 | 7,37 | 6,75 | 6,79 | 7,25 | 7,72 | 7,21 |
| Indice de dégel (TI) | 964 | 1279 | 1142 | 1319 | 1102 | 1278 | 1068 | 1105 | 1160 | 917 | 1247 | 1205 | 1149 |
| Moyenne annuelle climatique | -6,18 | -2,37 | -3,88 | -4,44 | -4,03 | -5,79 | -7,09 | -5,70 | -4,94 | -6,72 | -4,98 | -4,81 | -5,08 |
| Ratio (F/TI) | 3,28 | 1,71 | 2,20 | 2,19 | 2,38 | 2,68 | 3,28 | 2,88 | 2,63 | 3,55 | 2,52 | 2,42 | 2,64 |

Tableau 3 et Figure 4

Variations interannuelles de la profondeur maximale atteinte par le dégel aux différents sites de l'aéroport pour la période 2008-2020

| Année | HT-180 | | | HT-181 | | | TAS-F2 | | | HT-304 | | |
|--------------------|--------------|-------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date | z(m) | Δ (m) | Date |
| 2008 | -3,01 | - | 2008-09-14 | -3,52 | - | 2008-09-22 | - | - | - | - | - | - |
| 2009 | -2,98 | -0,03 | 2009-09-14 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2010 | -3,08 | 0,10 | 2010-09-20 | -3,71 | - | 2010-10-14 | -2,40 | - | 2010-10-12 | - | - | - |
| 2011 | -3,07 | -0,01 | 2011-09-07 | -3,67 | -0,04 | 2011-10-07 | -1,99 | -0,41 | 2011-10-07 | - | - | - |
| 2012 | -3,10 | 0,03 | 2012-09-09 | -3,73 | 0,06 | 2012-10-10 | -2,18 | 0,18 | 2012-10-09 | - | - | - |
| 2013 | -3,05 | -0,05 | 2013-09-06 | -3,60 | -0,13 | 2013-10-14 | -2,05 | -0,12 | 2013-10-11 | - | - | - |
| 2014 | -3,13 | 0,08 | 2014-09-03 | -3,63 | 0,03 | 2014-10-14 | -2,27 | 0,22 | 2014-09-20 | - | - | - |
| 2015 | -3,02 | -0,11 | 2015-09-03 | -3,50 | -0,13 | 2015-10-31 | -2,36 | 0,09 | 2015-10-11 | - | - | - |
| 2016 | -3,04 | 0,03 | 2016-09-13 | -3,44 | -0,07 | 2016-10-27 | -2,47 | 0,10 | 2016-10-03 | - | - | - |
| 2017 | -3,07 | 0,03 | 2017-09-16 | -3,56 | 0,13 | 2017-10-13 | -2,45 | -0,02 | 2017-10-06 | - | - | - |
| 2018 | -3,01 | -0,06 | 2018-09-12 | -3,29 | -0,28 | 2018-09-26 | -2,22 | -0,22 | 2018-09-12 | - | - | - |
| 2019 | -3,07 | 0,06 | 2019-09-23 | -3,53 | 0,24 | 2019-11-12 | -2,52 | 0,30 | 2019-10-21 | -1,76 | - | 2019-10-14 |
| 2020 | -3,21 | 0,14 | 2020-09-09 | -3,64 | 0,11 | 2020-10-02 | -2,77 | 0,24 | 2020-09-28 | -1,86 | 0,10 | 2020-09-26 |
| Moyenne (m) | -3,06 | 0,02 | 11-sept | -3,57 | -0,01 | 13-oct | -2,33 | 0,04 | 04-oct | -1,81 | 0,10 | 05-oct |

Influence du couvert nival: Faible

Variations récentes du maximum de dégel: Épaississement important depuis 2019

4.8.2 Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique du pergélisol pour l'année en cours à l'aéroport de Tasiujaq

4.8.2.1 Température de l'air (Planche synthèse 8, figure 2 et tableau 2)

- La température moyenne de l'air pour l'année 2019-2020 est de $-4,81$ °C, ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne de $-5,08$ °C enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.
- L'année 2019-2020 a été légèrement plus chaude par rapport à la période de référence avec un indice de gel (Fi) inférieur (2918 comparativement à 2988) et un indice de dégel (Ti) supérieur (1205 comparativement à 1149) à la moyenne enregistrée pour la période de référence de 2008 à 2020.

4.8.2.2 Régime thermique du pergélisol

4.8.2.2.1 Câbles localisés dans la piste d'atterrissage (Planche synthèse 8, tableau 3 et figures 3 et 4)

Câble HT-180 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 3,21 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 3,06 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020 au câble HT-180, localisé dans une section isolée du remblai de la piste d'atterrissage.
- Depuis 2008, il y a eu une augmentation de 0,20 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-180.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt sableux fluvial (Ax).
- Pour l'année 2019-2020, ce câble présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre $-3,14$ et $-3,04$ °C ce qui en fait un pergélisol froid.

Câble HT-181 :

- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active à ce câble est de 3,64 m, ce qui est un peu plus profond que la moyenne de 3,57 m enregistrée pour la période référence de 2008 à 2020.
- Depuis 2008, il y a eu une augmentation de 0,12 m de la profondeur maximale de la couche active au câble HT-181.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt de sable silteux d'origine marine (Mi).

- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-181 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -2,80 et -2,72 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.8.2.2.2 Câbles localisés en terrain naturel

Câble TAS-F2 :

- Lors du téléchargement des données enregistrées pour l'année 2019-2020, la profondeur maximum de dégel n'était pas encore atteinte au câble TAS-F2, localisé à 10 m du pied de remblai du côté ouest de la piste.
- La profondeur atteinte par le front de dégel en date du 10 octobre 2019 était de 2,40 m, ce qui est plus profond que la moyenne de 2,28 m d'épaisseur de la couche active enregistrée pour la période référence de 2010 à 2020 au câble TAS-F2.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt de sable silteux d'origine marine (Mi).
- Pour l'année 2019-2020, le câble TAS-F2 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -2,51 et -1,85 °C ce qui en fait un pergélisol relativement froid.

Câble HT-304 :

- Le tube du câble HT-304, localisé en terrain naturel et servant de référence, remonte à cause du soulèvement gélival. En 2019 le tube a été sectionné et la profondeur des thermistances remesurée.
- Durant la saison de dégel 2020, la profondeur maximale atteinte par la couche active est de 1,86 m, à ce câble en terrain naturel.
- Depuis 1993 (lors de l'installation du câble et avant le début du soulèvement gélival du tubage), il y a eu une augmentation estimée à 0,35 m de la profondeur maximale de la couche active au site du câble.
- La profondeur maximale de la couche active se situe dans le dépôt de sable silteux d'origine marine (Mi).
- Pour l'année 2019-2020, le câble HT-304 présente un profil dont la température moyenne du pergélisol varie entre -2,60 et -2,11 °C ce qui en fait un pergélisol froid.

4.8.3 Évolution récente du régime thermique, vulnérabilité aux changements climatiques et comportement de l'infrastructure anticipé

4.8.3.1 Évolution récente : 1993-2020

Le suivi thermique effectué à l'aide des câbles HT-180 et HT-181 démontre que la profondeur de dégel est demeurée relativement stable jusqu'à récemment

(2018) sous le centre de l'infrastructure au cours des dernières années, mais qu'il s'est légèrement approfondi en 2019 et 2020 (Planche synthèse 8, figure 4). À cet endroit de la piste (HT-180), le maximum du dégel, qui atteint plus de 3 m, est plus profond que l'épaisseur du remblai et se situe dans le dépôt fluviatile sableux (Ax) pauvre en glace (teneur en eau estimée à environ 12 %). Le câble HT-181 quant à lui, indique que le maximum de dégel, malgré qu'il ne soit pas encore atteint lors du téléchargement des données, se trouve dans l'unité de sable silteux (Mi) sensible au dégel (teneur en eau pouvant atteindre jusqu'à 27 %) et légèrement salin (4,6 à 18,2 g NaCl/L) (Allard *et al.*, 2007). Il en est de même pour le câble TAS-F2, localisé en pied de remblai.

4.8.3.2 Comportement anticipé : 2020-2050

Pour la région de Tasiujaq, une augmentation projetée de la température de l'air de l'ordre de 2,6 à 3,9 °C est prévue pour la période 2041-2070 (Ouranos, 2015). Comme la profondeur maximale de la couche active pré-construction a été dépassée et que le seuil critique sous la piste correspond maintenant à la profondeur maximale du dégel atteinte en 2012 au câble HT-181 et en 2020 au câble HT-180, tout approfondissement continu en deçà de ce niveau pourrait provoquer des tassements. Ainsi, si la tendance se maintient, des tassements de l'ordre de 10 à 15 % (par tranche de dégel) sont à prévoir sous la piste (L'Hérault *et al.*, 2012). En plus des tassements au dégel, il faudra surveiller si les nouvelles pentes douces construites autour de la piste en 2018 auront l'effet positif souhaité.

4.8.3.3 Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol à Tasiujaq :

La problématique découle de l'accumulation de neige et de l'accumulation d'eau conséquente à des tassements du sol en bordure de la piste. Plus spécifiquement, les modifications au régime thermique sont causées par :

- L'accumulation de neige sur les pentes et en pied de remblai;
- L'écoulement d'eau à travers le remblai ;
- L'accumulation d'eau en pied de remblai ;
- La construction sur une section en déblai (actuellement protégée par une couche d'isolant).
- L'augmentation de la température de l'air ;

4.8.3.4 Seuil critique de l'épaisseur de la couche active sous la piste:

Le seuil critique original pour la stabilité thermique de la piste en son centre correspondait à la profondeur maximum atteinte par la couche active pré-construction, dans le terrain naturel à laquelle s'ajoutait l'épaisseur du remblai déposé initialement (N. B. il y a eu des rechargements entretemps). Selon les archives consultées, cette dernière variait entre 1,2 et 1,4 m et était de 1,30 m

près du câble HT-180 avant le début des travaux de construction (Allard et al., 1988), alors que l'épaisseur de remblai varie actuellement entre 2 et 4 m, avec une section en déblai allant jusqu'à 1,3 m, selon les plans tel que construit. Ainsi, le seuil critique de départ était de 1,9 m au droit du câble HT-180 et de 3,05 m au câble HT-181 (tableau 2). Ces profondeurs critiques originales ont été largement dépassées, en 2012 au câble HT-181 (3,73 m) et en 2020 au câble HT-180 (3,21 m). Des tassements ont d'ailleurs affecté la piste dans ce secteur dans la décennie 2010.

Un léger épaissement de la couche active est observable aux deux câbles en 2019 et en 2020 (Planche synthèse 8, tableau 3 et figure 4). Cela révèle que le nouveau « seuil critique » est encore dépassé au câble HT-180 et que le dégel progresse actuellement de quelques centimètres par an dans le pergélisol de la couche Mi. Comme on observe la même tendance pour ces deux années en terrain naturel à HT-304 et à TAS-F2, l'augmentation des températures de l'air, notamment pendant l'été chaud de 2020, apparaît être la cause principale de cet épaissement.

Tableau 2 : Épaisseur de la couche active (CA), épaisseur de remblai et de déblai, maximum historique atteint par la couche active et seuil critique pour la piste de Tasiujaq, avec et sans isolant sous le remblai.

| Câble | Épaisseur max. dégel pré-construction (année) | Remblai | Déblai | Seuil critique original | Maximum historique atteint par la CA (année) | Seuil critique actuel (instable..) |
|--------|---|----------------|--------|-------------------------|--|------------------------------------|
| HT-180 | 1,30 m (1988) | 1,80 + isolant | 1,20 m | 1,90 m | 3,21 m (2020) | 3,21 m |
| HT-181 | 1,30 m (1988) | 1,75 m | | 3,05 m | 3,73 m (2012) | 3,64 m |

4.8.3.5 Seuil critique sur les talus et pieds de remblai :

Les mesures antérieures de températures en surface du sol en marge de la piste de Tasiujaq ont montré qu'avec une épaisseur de neige d'environ 0,80 m, la température moyenne annuelle en surface du sol est ≥ 0 °C (Allard et al., 2007), sous les conditions climatiques actuelles. Par conséquent, le pergélisol se dégrade lorsque ce seuil critique d'enneigement est atteint. Les tassements dans la couche de silt (Mi) se produisent alors et les dépressions ainsi provoquées le long de la piste retiennent de l'eau qui s'ajoute comme véhicule de chaleur. Les travaux d'adaptation récemment réalisés à Tasiujaq et qui ont consisté à adoucir les pentes et améliorer le drainage avaient effectivement pour but de prévenir que ce seuil critique d'enneigement soit dépassé dorénavant. Les suivis futurs permettront d'évaluer la performance de cette mesure d'adaptation à l'échelle de la piste.

4.8.4 Signes de dégradation

Aucune dégradation n'a été observée dans la piste et les bordures à proximité immédiate des câbles HT-180, HT-181, HT-304 et TAS-F2 lors de la visite de 2020 (figures 22, 24 et 25). Un tassement différentiel transversal à la piste et des rigoles causées par la convergence des eaux de ruissellement ont toutefois été observés aux environs du chaînage 5+250 à environ une cinquantaine de mètres du câble HT-181 (figure 23). Une accumulation d'eau a été observée en périphérie de l'aire de stationnement (figure 26).



Figure 22. Aucune dégradation à proximité du câble HT-180
(Photo : Denis Sarrazin, 15 octobre 2020)



Figure 23. Tassement différentiel transversal à la piste et rigoles aux environs du chaînage 5+250 à environ une cinquantaine de mètres du câble HT-181
(Photo : Denis Sarrazin, 15 octobre 2020)



Figure 24. Aucune dégradation à proximité des câbles TAS-F2 (à droite) et HT-181 (à gauche)
(Photo : Denis Sarrazin, 15 octobre 2020)



Figure 25. Aucune dégradation à proximité du câble HT-304. Noter la nouvelle pente douce du remblai de la piste à l'arrière-plan.
(Photo : Denis Sarrazin, 15 octobre 2020)



Figure 26: Accumulation d'eau en périphérie de l'aire de stationnement. Noter qu'il y avait déjà un lac intermittent avant la construction.
(Photo : Denis Sarrazin, 15 octobre 2020)

5. ÉTAT DE L'INSTRUMENTATION ET RÉPARATIONS EFFECTUÉES DE 2017 À 2020

Les paragraphes qui suivent décrivent l'état de l'instrumentation au moment de la visite en octobre 2020 et la liste des travaux d'entretien effectués au cours des quatre années du projet. S'ajoute un énoncé de travaux d'entretien ou d'amélioration proposé pour chaque site de mesure.

5.1 Aéroport d'Inukjuak :

INU-F2 :

- En 2017, la structure, le boîtier, l'abri radiatif, le panneau solaire ont été rehaussés pour minimiser les dommages liés à l'enneigement du site.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance située à 8 m de profondeur enregistre une baisse de la température alors que les autres thermistances de ce câble enregistrent un réchauffement de la température du sol. L'intégrité de cette dernière serait à vérifier afin de s'assurer que ce signal ne soit pas lié à un défaut de thermistance.
- Les thermistances installées à 0,05, 0,1 et 0,2 m de profondeur ne sont plus fonctionnelles depuis la remise service de la station au début de juin 2017, car leur câble est trop court pour se rendre à la station qui a été rehaussée afin d'éviter les infiltrations d'eau. Ces dernières devront être ajustées et rebranchées.

INU-F3 :

- En 2017, une réfection complète de la station a été effectuée à la suite d'une infiltration d'eau. Les composantes abîmées ont été remplacées, notamment le système d'acquisition de données, le régulateur de charge, la batterie, le panneau solaire et le plexiglas.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

INU-F4 :

- En 2017, une réfection complète de la station a été effectuée à la suite d'une infiltration d'eau. Les composantes abîmées ont été remplacées, notamment le système d'acquisition de données, le régulateur de charge, le panneau solaire et le plexiglas.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

5.2 Aéroport de Puvirnituk

PUV-F2 :

- En 2017, la maintenance régulière a été effectuée.
- En 2018, un des câbles d'alimentation qui avait été sectionné durant l'année a été réparé et la batterie a été remplacée par une batterie prise sur place.
- En 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée. La batterie est à remplacer par une nouvelle, car cette dernière descend sous le seuil de charge nécessaire ce qui pourrait éventuellement causer une perte de données.
- La thermistance à 9 m de profondeur a cessé de fonctionner en avril 2012.

PUV-F5 :

- En 2017, le multiplexeur qui avait été abîmé par une infiltration d'eau a été remplacé. L'abri radiatif a été redressé, car ce dernier a été plié sous le poids de la neige.
- En 2018, la thermistance servant à enregistrer la température de l'air a été rehaussée, car l'abri radiatif contenant cette dernière était de nouveau plié par le poids de la neige.
- En 2019, l'abri radiatif a été redressé, car ce dernier a été de nouveau plié sous le poids de la neige.
- En 2020, une maintenance régulière a été effectuée.
- Le remplacement de l'abri radiatif et du panneau solaire sera à prévoir, car ils ont été encore brisés.

PUV-FOR1a :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- Il est à noter que le câble à thermistances subit un rehaussement évalué à 1,40 m, ce qui affecte gravement la prise de mesure (tableau 3). Ce phénomène est dû au tassement du sol et au soulèvement gélival du tubage. La profondeur originale des thermistances est donc faussée. Le câble devra être réajusté et la profondeur des thermistances mesurée annuellement afin de poursuivre correctement les analyses thermiques à cet endroit. Une autre solution serait de forer un nouveau trou et d'en installer un neuf.

HT-177, HT-296 et HT-297 :

- Le système d'acquisition, commun aux trois câbles, ne fonctionne plus depuis 2010 et l'enregistrement des données a cessé depuis. Le coût, le temps et la complexité du travail nécessaire afin de reconnecter ces câbles sont très élevés. Afin de poursuivre le suivi thermique à cet

endroit, de nouveaux câbles dans de nouveaux puits de forages forés dans la piste devront être installés.

- Advenant qu'il soit décidé de forer et installer de nouveaux câbles à travers le remblai épais de ce secteur, il vaudrait la peine de cibler des stratégiquement des sites pour détecter autant les transferts par advection (infiltration d'eau résiduelle?) que les transferts par seule conduction.

HT-303 :

- Ce câble de référence dans le roc n'est pas équipé d'un système automatisé.

5.3 Aéroport d'Akulivik

AKU-F1 :

- En 2017, le multiplexeur qui avait été abîmé par une infiltration d'eau a été remplacé.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- Les thermistances à 0,75, 2,00 et 5,00 m de profondeur sont à vérifier, car un renard a mordillé de câble.
- La thermistance à 2 m de profondeur a cessé de fonctionner depuis janvier 2013.

AKU-F2:

- En 2017, la batterie a dû être chargée, car elle indiquait un voltage faible.
- En 2018, la batterie a dû être chargée de nouveau, car elle indiquait encore un voltage faible.
- En 2019, la batterie a été remplacée par une qui a été achetée sur place, car celle envoyée à cet effet a été égarée lors du transport cargo.
- En 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- Les thermistances à -1,5 et -2 m de profondeur ne fonctionnent plus depuis le rebranchement du câble en 2018.

AKU-F4:

- En 2017, la station a été redressée et enrochée, afin d'éviter que cette dernière bascule de nouveau.
- En 2018, un câble d'alimentation électrique qui avait été sectionné a été remplacé et une batterie temporaire a été installée.
- En 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

- Les thermistances à 4 et 9 m de profondeur ont cessé de fonctionner en 2011.

HT-162 :

- En 2017, un fil qui avait été sectionné par un renard a été réparé.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- Il est à noter que le câble à thermistances semble subir un rehaussement évalué à 0,10 m ce qui affecte la prise de mesure (tableau 3). Ce phénomène est dû au tassement du sol et au soulèvement gélival du tubage. La profondeur originale des thermistances est donc faussée. Le câble devra être réajusté et la profondeur des thermistances mesurée annuellement afin de poursuivre correctement les analyses thermiques à cet endroit.

HT-183 :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- L'intégrité du système d'acquisition de données est à vérifier, car il y a beaucoup de bruit dans les données depuis 2009.

HT-232 :

- Ce câble de référence en milieu naturel n'est pas équipé d'un système automatisé.

5.4 Aéroport de Salluit

SAL-F3 :

- En 2017, la batterie a été remplacée par une déjà sur le site.
- En 2018, le panneau solaire a été remplacé.
- En 2019, le panneau solaire a été remplacé de nouveau, ainsi que la batterie.
- En 2020, la maintenance régulière a été effectuée. Afin de limiter les dégâts causés par les débris projetés lors des opérations de déneigement, un panneau de particules de bois a aussi été installé pour protéger l'équipement.

SAL-F4 :

- Ce câble n'est pas équipé d'un système automatisé.

HT-154 :

- En 2017, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

HT-155 :

- En 2017, la maintenance régulière a été effectuée.
- En 2018, le panneau solaire et le plexiglas ont été remplacés.
- En 2019, la batterie a été remplacée.
- En 2020, le câble d'alimentation a été sectionné par de la machinerie, la station d'acquisition de données est donc inopérante depuis. Le câble devra être réparé, ainsi que la batterie interne et le panneau solaire remplacés.
- La thermistance à 2,75 m de profondeur ne fonctionne pas.
- Il est à noter que depuis l'ajout du remblai à cet endroit, la profondeur réelle des thermistances est inconnue. L'épaisseur du matériel au-dessus du câble devra être déterminée afin de poursuivre les analyses thermiques à cet endroit.

HT-172 :

- En 2017, la maintenance régulière a été effectuée.
- En 2018, le panneau solaire et le plexiglas ont été remplacés.
- En 2019, la batterie a été remplacée.
- En 2020, le câble d'alimentation a été sectionné par de la machinerie, la station d'acquisition de données est donc inopérante depuis. Le câble devra être réparé, ainsi que la batterie interne et le panneau solaire remplacés.

HT-160 :

- Ce câble n'est pas équipé d'un système automatisé.

HT-179 :

- Ce câble n'est pas équipé d'un système automatisé.

5.5 Aéroport de Quaqtqaq

HT-156 :

- En 2017, le mat de la station a été abaissé afin de répondre aux normes d'aviation actuelles.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 5,56 m de profondeur indique des valeurs de température anormales qui peuvent être liées à une défectuosité du système. L'intégrité de cette dernière serait à vérifier.

HT-158 :

- Ce câble n'est pas équipé d'un système automatisé.

HT-178 :

- En 2017, le mat de la station a été abaissé afin de répondre aux normes d'aviation actuelles.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 0,50 m de profondeur indique des valeurs de température anormales qui peuvent être liées à une défektivité du système. L'intégrité de cette dernière serait à vérifier.

QUA2015-F1 :

- En 2017, la structure a été rehaussée et le système d'acquisition de données, la batterie, le panneau solaire le chargeur ainsi que le plexiglas ont été remplacés.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La batterie est à remplacer, car sa perte de puissance a généré une perte de données de la fin février à la mi-mai 2020.

QUA2015-F2 :

- En 2017, la structure a été rehaussée et le système d'acquisition de données, la batterie, le panneau solaire le chargeur ainsi que le plexiglas ont été remplacés.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

QUA2015-F3 :

- En 2017, le mat de la station a été abaissé afin de répondre aux normes d'aviation actuelles.
- En 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

5.6 Aéroport de Kangirsuk

KANGIR-HT-1 :

- Ce câble a été remplacé par le KANGIR-HT1B et n'est plus en service

KANGIR-HT-1B :

- En 2017 et 2018, la maintenance régulière a été effectuée.
- En 2019, une calibration du système d'acquisition de données a été effectuée.
- En 2020, une vérification des branchements du chargeur a été effectuée.

KANGIR-F2:

- Ce câble a été remplacé par le KANGIR-F2B et n'est plus en service

KANGIR-F2B :

- En 2018, le câble a été raccordé à la station d'enregistrement de données.
- En 2019, une calibration du système d'acquisition de données a été effectuée.
- En 2020, une vérification des branchements du chargeur a été effectuée.

5.7 Aéroport d'Aupaluk

HT-294 :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 5,50 m de profondeur ne fonctionne pas depuis la mise en marche de la station.

HT-299 :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 3,10 m de profondeur ne fonctionne pas depuis la mise en marche de la station.

5.8 Aéroport de Tasiujaq

HT-180 :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 3,50 m de profondeur ne fonctionne pas depuis la mise en marche de la station.

HT-181 :

- En 2017, 2018 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- En 2019, un des câbles du multiplexeur qui avait été sectionné a été réparé.
- La thermistance à 5,40 m de profondeur a cessé de fonctionner en juin 2015.

HT-304 :

- En 2017 et 2018, la maintenance régulière a été effectuée.

- En 2019, la batterie a été retirée afin de la recharger dans le garage.
- Il est à noter que le câble à thermistances a subi un rehaussement évalué à 0,93 m ce qui affecte la prise de mesure (tableau 3). Ce phénomène est dû au tassement du sol et au soulèvement gélival du tubage. La profondeur originale des thermistances est donc faussée. Ainsi, le câble a été réajusté et la profondeur des thermistances mesurée afin de poursuivre correctement les analyses thermiques à cet endroit. Cette mesure de rehaussement devra être prise annuellement.
- En 2020, la maintenance régulière a été effectuée.

TAS-F2 :

- En 2017, 2018, 2019 et 2020, la maintenance régulière a été effectuée.
- La thermistance à 2 m de profondeur a cessé de fonctionner en mars 2016.

Tableau 3 : Mesures (cm) de rehaussement des tubes des câbles à thermistances. Les mesures correspondent à la distance entre la surface du sol et un point de référence sur le tube. Lorsque les valeurs ne changent pas au fil du temps, cela indique qu'il n'y a pas de soulèvement gélival.

| | Akulivik | | | | Tasiujaq | Puvirnitug | Quaqtaq | Aupaluk |
|------|----------|--------|--------|--------|----------|------------|---------|---------|
| | HT-162 | AKU_F2 | AKU-F1 | HT-232 | HT-304 | POV_F1 | HT-156 | HT-299 |
| 2005 | | | | | | 13 | | |
| 2006 | | | | | 74 | | | |
| 2007 | | | | | 74 | | | |
| 2008 | 114 | | | 55 | 76 | 50 | | |
| 2009 | | | | | | 53 | | |
| 2010 | n.d. | | | | | | | |
| 2011 | 126 | | 7 | 57 | | 80 | | |
| 2012 | 126 | | | 56 | | 91 | | |
| 2013 | n.d. | | | | | | | |
| 2014 | 124 | | 13 | 57 | 110 | 105 | | |
| 2015 | n.d. | | | | | | | |
| 2016 | 127 | | | 59 | | 125 | | |
| 2017 | | 10 | | 56 | 134 | | 124 | |
| 2018 | 126 | | 16 | 59 | 145 | 151 | 125 | 116 |
| 2019 | 125 | 10 | | | | | 125 | 116 |
| 2020 | | | | 58 | *21 | | | 116 |

*Le tube dans lequel se trouve le câble a été coupé

6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

L'état thermique du pergélisol sous les infrastructures aéroportuaires du Nunavik varie sur une base annuelle et d'un village à l'autre. Malgré des différences marquées dans la profondeur du front de dégel d'un site à l'autre, l'impact des variations interannuelles du climat est le même à travers tout le Nunavik. En effet, le climat varie plutôt uniformément à l'échelle de la région. Cela se manifeste dans les années d'augmentation et de diminution de l'épaisseur de la couche active (tableau 4).

Tableau 4 Variation de la profondeur de dégel maximum aux aéroports du MTQ au Nunavik pour la période de 2008 à 2020. En bleu : amincissement de la couche active; en orangé épaisissement de la couche active.

| | Câble | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| INU | INU-F2 | -5,68 | -5,66 | -5,75 | -5,76 | -5,77 | -5,68 | -5,72 | - | - | -5,55 | -5,49 | -5,61 | -5,50* |
| | INU-F3 | | | | | | | | | | <-8,00 | <-8,00 | <-8,00 | <-8,00 |
| | INU-F4 | | | | | | | | -7,62 | <-8,00 | <-8,00 | <-8,00 | <-8,00 | -8,00 |
| PUV | PUV-F2 | | -6,29 | -5,76 | -5,69 | -5,84 | -5,42 | -3,88 | -3,85 | -3,84 | -3,86 | -3,75 | -3,88 | -3,86 |
| | PUV-F5 | | -8,50 | -8,50 | -8,50 | -8,11 | -8,06 | -7,70 | -7,71 | - | -7,19 | -4,27 | -3,75 | -4,72 |
| AKU | AKU-F1 | -1,97 | -2,05 | -2,71 | -2,06 | -2,47 | -2,22 | -2,28 | -2,14 | -2,23 | -2,40 | -2,00 | -2,53 | -2,55 |
| | AKU-F2 | | | | | | | | -6,66 | -6,75 | -6,91 | -6,67 | -7,54 | -7,65* |
| | AKU-F4 | -3,42 | -3,16 | -3,47 | -3,47 | -3,91 | -3,87 | -3,82 | -3,72 | -3,95 | - | -3,52 | -4,09 | -4,12 |
| | HT-183 | -1,83 | -1,87 | -1,91 | -1,76 | -1,78 | -1,33 | - | -1,54 | -1,78 | -1,63 | -1,37 | -1,45 | -1,64 |
| SAL | HT-154 | -3,78 | -3,71 | -4,51 | -3,80 | -3,84 | -3,29 | -3,50 | -3,16 | -3,55 | -3,19 | -2,35 | -3,12 | -3,26 |
| | HT-172 | | | | | | | -2,57 | -2,07 | -2,50 | -2,60 | -2,45 | - | - |
| | SAL-F3 | | | | | -4,20 | -2,89 | -2,86 | -3,22 | -2,87 | -2,79 | -2,65 | -2,82 | -2,79 |
| QUA | HT-156 | -1,71 | -1,60 | -2,09 | -1,69 | -1,92 | -1,78 | -1,97 | -1,69 | -1,83 | -2,01 | -1,84 | -1,96 | -2,08 |
| | HT-178 | -2,40 | -2,39 | -2,52 | -2,43 | -2,75 | -2,43 | -2,51 | -2,32 | -2,33 | -2,39 | -2,36 | -2,41 | -2,50 |
| | QUA2015-F1 | | | | | | | | -2,11 | -2,26 | -2,40 | -2,22 | -2,37 | -2,44 |
| | QUA2015-F2 | | | | | | | | | | -2,18 | -2,00 | -2,09 | -2,25 |
| | QUA2015-F3 | | | | | | | | | -2,21 | -2,26 | -2,20 | -2,26 | -2,37 |
| KANGIR | KANGIR-HT1 | - | -1,93 | -2,29 | -2,18 | -2,26 | -2,09 | -2,27 | -1,87 | - | | | | |
| | KANGIR-HT1B | | | | | | | | | | -2,09 | -1,88 | -2,08 | -2,31 |
| | KANGIR-F2B | | | | | | | | | | | | -1,97 | -2,10 |
| AUP | HT-294 | -2,95 | -2,84 | -3,05 | -3,06 | -3,06 | -2,99 | -3,04 | -2,88 | -2,91 | -2,93 | -2,87 | -2,90 | -3,00 |
| | HT-299 | -2,00 | -1,90 | -1,99 | -1,90 | -1,79 | -1,59 | -1,63 | -0,92 | -0,86 | -0,82 | -0,77 | -0,80 | -0,83 |
| TAS | HT-180 | -3,01 | -2,98 | -3,08 | -3,07 | -3,10 | -3,05 | -3,13 | -3,02 | -3,04 | -3,07 | -3,01 | -3,07 | -3,21 |
| | HT-181 | -3,52 | - | -3,71 | -3,67 | -3,73 | -3,60 | -3,63 | -3,50 | -3,44 | -3,56 | -3,29 | -3,53 | -3,64 |
| | TAS-F2 | | | -2,40 | -1,99 | -2,18 | -2,05 | -2,27 | -2,36 | -2,47 | -2,45 | -2,22 | -2,52 | -2,77 |

*Le maximum de dégel n'est pas encore atteint lors du téléchargement des données.

Pour la période de 2008 à 2020, les résultats du suivi indiquent que les années 2009, 2011, 2013, 2015 et 2018 ont été caractérisées par un amincissement généralisé de la couche active tandis qu'à l'inverse les

années 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2017, 2019 et 2020 l'ont été par un épaissement de la couche active.

6.1 Synthèse de l'évolution du régime thermique du pergélisol des aéroports du MTQ au Nunavik

SYNTHÈSE POUR LE NUNAVIK

Jusqu'à 2018, la survenue d'années froides ou proches de la moyenne observée des températures de l'air a été favorable à un certain regel et au maintien du pergélisol sous les pistes, ce qui ne peut qu'avoir contribué à leur stabilité. Plus récemment, l'année 2019-2020 a été un peu plus chaude que la moyenne (surtout l'été 2020), ce qui a provoqué un début de l'approfondissement quasi généralisé des couches actives de l'ordre de quelques centimètres. Dans le cas de deux secteurs de piste en déblai (Tasiujaq, HT-180 et Kangirsuk KANGIR-HT1B) le « seuil critique » des années antérieures a été dépassé. Cet approfondissement fut de 8 cm à Tasiujaq et de 2 cm à Kangirsuk, probablement des valeurs insuffisantes pour créer des tassements perceptibles à l'œil, sans compter le fait que des travaux d'entretien estivaux ont pu les corriger. Plusieurs sites de mesure sont à 1-2 cm près du « seuil critique ». Une succession de quelques années chaudes amplifiera le processus éventuellement : à surveiller!

Sauf à Kangirsuk, les signes de dégradation du pergélisol observés touchent principalement les zones d'épaulement et de périphérie des pistes, coïncidant avec les secteurs d'accumulation de neige déblayée et accumulée par le vent, ainsi que d'eau en été. D'ailleurs, à ces sites en forte dégradation (tels que INU-F2, INU-F4 et AKU-F2) on observe un retardement de la date du regel complet de la couche active, très épaisse et qui évolue au-delà du mois d'octobre, voire jusque dans l'année suivante.

INUKJUAK

À Inukjuak, le pergélisol aux sites des câbles INU-F2, INU-F3 et INU-F4, situés en pied de remblai aux deux extrémités et dans la partie centrale de la piste, est caractérisé par un dégel annuel très profond, variant de 5,50 à plus de 8 m de profondeur en 2020 et un pergélisol chaud, près du point de fusion jusqu'à 12 m de profondeur. Le pergélisol est dégelé jusqu'au roc au câble INU-F3, vers 7 m de profondeur et est près de l'être à INU-F4 (Planche synthèse 1). Ces câbles à thermistances sont tous implantés dans la zone enneigée, où stagne de l'eau et sous un couvert arbustif en été, en pied de remblai. Aucun câble ne mesure actuellement le régime thermique du pergélisol sous la piste et dans le terrain naturel non perturbé.

PUVIRNITUQ

À Puvirnituk, les données des câbles PUV-F2 (côté est de la piste) et PUV-F5 (côté ouest de la piste) installés sous des bermes à convection de 2 m d'épaisseur, au contact avec l'ancienne surface du sol le long de la partie centrale de la piste, indiquent que le pergélisol s'est reformé sous les bermes

depuis 2009. Cette diminution du maximum de dégel est attribuable en partie au bon fonctionnement thermique de la convection d'air dans la berme, mais aussi au refroidissement récent du climat, principalement en hiver. L'épaississement de la couche active, suite aux années plus chaudes de 2019 et 2020, indique que le sol sous les bermes reste sensible aux variations climatiques. Le profil thermique du pergélisol entre 4 et 8 m de profondeur demeure près du point de fusion et tarde à se refroidir. Au câble PUV-F5, un talik à 5,5 m de profondeur (3,5 m sous l'interface de la berme) subsiste depuis l'installation de cette dernière. La présence de ce talik suggère qu'un certain écoulement d'eau, à travers la fondation, pourrait toujours être actif à cet endroit.

AKULIVIK

À Akulivik, tous les câbles montrent un épaississement de la couche active en 2020, et ce, même si le maximum de dégel n'était pas encore atteint en début d'octobre au câble AKU-F2. Ce dernier, installé au pied du remblai, montre que le pergélisol est fortement dégradé à cet endroit avec un maximum atteint par la couche active de près de 8 m de profondeur en 2018 et 2019. Les câbles AKU-F1 et AKU-F4, installés respectivement en pied de remblai et dans la pente d'un fossé, indiquent que la couche active s'est considérablement approfondie, notamment au câble AKU-F4 où elle a atteint, encore cette année, son maximum depuis le début du suivi. Le câble installé dans la piste d'atterrissage (HT-183) indique quant à lui un épaississement faible de la couche active en 2020.

Il est impossible de commenter la situation au câble HT-162 en raison du soulèvement de son tubage.

SALLUIT

À Salluit, les données disponibles indiquent qu'il y a eu un épaississement de la couche active dans le roc en terrain naturel (HT-154); à l'inverse, dans le talus de la piste (SAL-F3) il y a eu un léger amincissement de la couche active en 2020. Malgré un amincissement considérable de l'épaisseur de la couche active depuis 2012 au câble SAL-F3, ce dernier montre un profil thermique beaucoup plus chaud qu'en terrain naturel (HT-154) et dans la piste (HT-172), probablement en raison de la neige accumulée sur la pente douce tronquée.

QUAQTAQ

À Quaqtaq, tous les câbles montrent un épaissement de la couche active en 2019 et 2020. Le câble HT-178 situé sous la piste confirme que, malgré un léger épaissement depuis 2008, les variations interannuelles de la couche active sont faibles sous cette dernière. Le câble HT-156, en terrain naturel, indique un épaissement plus marqué de la couche active qui se trouve près du maximum historique observé en 2010. Les nouveaux câbles installés en 2015, soit QUA2015-F1, vis-à-vis le câble HT-178 et QUA2015-F2 vis-à-vis le câble QUA2015-F3, et localisés en bordure de piste dans la pente douce profilée en 2012, révèlent que la couche active à cet endroit est plus mince que sous la piste. Il apparaît donc que la pente douce tronquée et le fossé reprofilé ont eu un impact favorable sur le régime thermique de la piste.

KANGIRSUK

À Kangirsuk, les deux câbles à thermistances montrent un épaissement de la couche active en 2020. Le câble KANGIR-HT-1, remplacé par le câble KANGIR-HT-1B montre que cette dernière a légèrement dépassé le maximum de dégel historique enregistré dans la piste depuis le début du suivi ainsi que le seuil critique de dégel (2,29 en 2010) qui est maintenant de 2,31 m. Ce secteur de la piste étant construit en déblai, le till sous le remblai est sensible au dégel. Ce secteur reste à surveiller si le climat se réchauffe encore dans les années prochaines. Le câble KANGIR-F2B installé en pied de remblai, près du chaînage de KANGIR-HT1B, indique que la couche active à cet endroit est légèrement plus mince que sous la piste. Malgré un profil thermique plus chaud que dans la piste, le regel de la couche active en bordure de la piste se termine plus tôt.

AUPALUK

À Aupaluk, le câble HT-294, confirme que les variations récentes de la couche active sont faibles sous la piste et que le niveau actuel est encore proche de celui de 2008. La base de la couche active est située dans l'épais remblai, à une profondeur d'environ 3 m. Le câble HT-299, localisé dans le terrain naturel, indique un amincissement important de la couche active de plus d'un mètre depuis 2008. Il est probable que cette remontée importante du plafond du pergélisol résulte d'un enrichissement en glace du sol après que la nappe d'eau perchée formée lors du profond dégel de 2010 eut regelé.

TASIUJAQ

À Tasiujaq, tous les câbles indiquent un épaissement de la couche active en 2020. Le câble HT-180, situé sous la piste, montre que le seuil critique qui avait été atteint en 2010 vient d'être dépassé d'environ 0,11 m. De même, le maximum de dégel est aussi très près du seuil critique au câble HT-181. À cet endroit de la piste, on observe une période de dégel plus longue qu'au câble HT-180 et un maximum plus profond d'en moyenne 0,50 m. Cette situation résulte de la présence d'une couche d'isolant de 50 mm d'épaisseur placée au site du câble HT-180 lors de la construction. Au câble TAS-F2, le maximum de dégel a

atteint 2,77 m de profondeur en 2020 dans la couche de pergélisol sensible en terrain naturel, soit le maximum observé depuis son installation en 2010.

6.1.1 Comparaison du régime thermique : en milieu naturel, en périphérie et sous les pistes d'atterrissage.

L'analyse de la température moyenne du sol en fonction de la profondeur a révélé qu'à Quaqtuq, dont l'aéroport est équipé de câbles fonctionnels dans les trois types de terrain, il existe un gradient de température entre la piste déneigée, dans le talus et en pied de remblai, et dans le terrain naturel (figure 27). Malgré le fait que tous les villages ne soient pas équipés de câbles dans les trois types de milieux, on note de façon générale que les épaulements sont l'endroit où se trouve le pergélisol le plus chaud ou en dégradation alors que sous les pistes, on retrouve un pergélisol plus froid et stable d'une année à l'autre.

La conductivité thermique élevée des matériaux de remblai, leur géométrie et, en principe, l'absence d'eau limitant les effets de chaleur latente dans le sol sont les principaux facteurs qui expliquent la stabilité plus grande du pergélisol sous les pistes que sous les accotements et les terrains naturels. La majorité des pistes ont un pergélisol plus froid que sous les accotements et les terrains naturels.

En général, le déneigement des pistes d'atterrissage en hiver a permis aux hivers froids enregistrés entre 2014 à 2018 d'extraire la chaleur des remblais et a favorisé la remontée du front de dégel. Cependant, les années 2019 et 2020 légèrement plus chaudes montrent que cette stabilisation n'est pas immuable.

SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

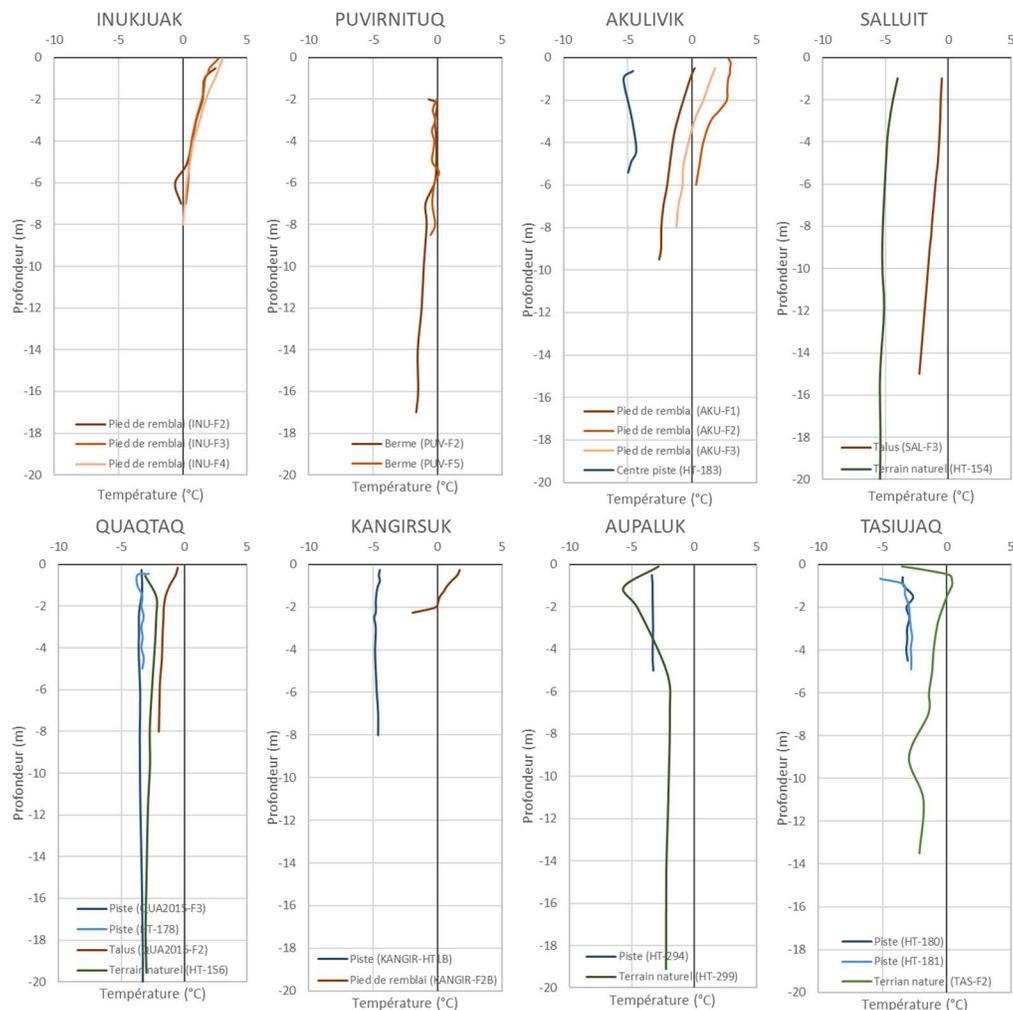


Figure 27 Température moyenne annuelle du sol selon la profondeur et en fonction de leur emplacement, aux câbles à thermistances installés aux aéroports du MTQ pour l'année 2019-2020.

6.1.2 Impact de la neige sur le talus et pied de remblai

La présence de neige soufflée par le vent ou déblayée mécaniquement sur les épaulements et en périphérie de l'infrastructure isole le sol et limite l'extraction de chaleur en hiver. L'absence de données précises quant aux conditions d'enneigement (épaisseur, densité, etc.) sur les talus et les pieds de remblai empêche de faire une analyse du régime thermique complète à ces emplacements sensibles afin de déterminer un seuil critique d'épaisseur de neige pour ces derniers. Cependant, les données disponibles suggèrent que l'analyse des valeurs critiques d'épaisseur de neige et de densité ainsi que leur impact sur le régime thermique du pergélisol pourrait être une perspective

ntéressante à envisager afin de déterminer des seuils critiques théoriques pour les talus et les pieds de remblai à chaque aéroport.

Tableau 5 : Mesures d'épaisseur de neige en fonction des sites localisés en pied de remblai et en périphérie des pistes d'atterrissage prises par l'équipe du MTQ de 2008 à 2016 aux aéroports d'Inukjuak, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq. Les valeurs en rouges indiquent que l'épaisseur dépasse le seuil critique de 0,50 m pour Inukjuak, de 1 m à Salluit et de 0,80 m pour les autres villages.

| INUKJUAK (0,50 m) | | | | | | | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Date | N1 | N1a | N3 | N9 | N13 | N14 | N15 |
| 04-02-2008 | 1,50 | 0,90 | 0,95 | 1,10 | 0,95 | 0,85 | 0,95 |
| 16-02-2009 | 0,80 | 1,65 | 1,25 | 1,20 | 1,25 | 1,25 | 0,90 |
| 08-02-2010 | 1,00 | 1,30 | 0,95 | 1,25 | 0,95 | 0,75 | 0,65 |
| 01-03-2012 | 1,15 | 2,20 | 1,05 | 1,15 | 1,15 | 1,00 | 0,75 |
| 31-03-2014 | 1,20 | 1,80 | 1,20 | 1,30 | 1,70 | 1,65 | 1,20 |
| 16-06-2016 | 1,10 | 1,65 | 1,10 | 1,10 | 0,80 | 1,00 | 0,60 |
| Moyenne | 1,13 | 1,58 | 1,08 | 1,18 | 1,13 | 1,08 | 0,84 |

| SALLUIT (1,00 m) | | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Date | N1 | N2 | N3 | N3a | N8 | N12 | N12a |
| 05-02-2008 | 0,30 | n.d. | 0,30 | 0,20 | 0,80 | 0,80 | n.d. |
| 18-02-2009 | 0,50 | 1,00 | 0,65 | 0,50 | 1,35 | 1,30 | 1,15 |
| 09-02-2010 | 0,65 | 1,80 | 0,80 | 0,75 | 1,30 | 1,05 | 1,15 |
| 29-02-2012 | 1,00 | 1,20 | 0,50 | 0,55 | 0,25 | 0,95 | 0,55 |
| 02-04-2014 | 0,40 | 1,35 | 0,25 | 0,85 | 1,05 | 1,35 | 1,30 |
| 16-02-2016 | 1,00 | 0,50 | 0,55 | 0,50 | 0,55 | 1,10 | 1,10 |
| Moyenne | 0,64 | 1,17 | 0,51 | 0,56 | 0,88 | 1,09 | 1,05 |

| QUAQTAQ (0,80 m) | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|
| Date | N1 | N2 | N3 |
| 06-02-2008 | 1,20 | 1,30 | 1,50 |
| 10-02-2009 | 0,90 | 0,80 | 1,20 |
| 10-02-2010 | 1,45 | 1,00 | 1,65 |
| 28-02-2012 | 1,05 | 0,85 | 1,30 |
| 02-04-2014 | 1,00 | 1,10 | 1,45 |
| 17-02-2016 | 1,25 | 1,05 | 0,55 |
| Moyenne | 1,14 | 1,02 | 1,28 |

| KANGIRSUK (0,80 m) | | |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Date | N1 | N2 |
| 06-02-2008 | 0,50 | 0,65 |
| 18-02-2009 | 0,70 | 0,70 |
| 10-02-2010 | 0,85 | 0,70 |
| 28-02-2012 | 0,50 | 0,65 |
| 02-04-2014 | 0,65 | 1,00 |
| 17-02-2016 | 0,75 | 0,95 |
| Moyenne | 0,66 | 0,78 |

| TASIUJAQ (0,80 m) | | |
|--------------------------|-------------|-------------|
| Date | N7 | N12 |
| 07-02-2008 | 1,10 | 1,35 |
| 19-02-2009 | 1,80 | 1,55 |
| 11-02-2010 | 0,80 | 1,70 |
| 27-02-2012 | 0,95 | 1,15 |
| 03-04-2014 | 0,15 | 1,30 |
| 17-02-2016 | 1,50 | 1,20 |
| Moyenne | 1,05 | 1,38 |

Cela dit, l'acquisition de données d'épaisseur et de densité de neige *in situ* permettrait de déterminer des valeurs critiques fondées sur des mesures empiriques. En effet, les facteurs-n obtenus en mettant en relation les indices de gel l'air à chaque localité et de la surface du sol permettent d'évaluer quantitativement l'effet isolant de la neige sur le régime thermique du pergélisol. Cette relation générale a été mise en évidence par Riseborough et Smith (1998) (figure 28). Ainsi, il est possible d'observer une diminution du facteur-n en fonction de l'épaisseur de neige. Au-dessus d'une certaine épaisseur, l'effet isolant de la neige atténue toutes les fluctuations majeures de la température de l'air. Ménard *et al.* (1998) ont estimé que la hauteur de neige annuelle minimum qui empêchait la formation du pergélisol était d'environ 0,50 m dans le pergélisol discontinu du Québec subarctique. Roche et Allard (1996) quant à eux ont évalué cette hauteur entre 0,70 et 0,90 m dans une combe à neige en terrain naturel près de Kuujuarapik. Dans le pergélisol continu de l'aéroport de Tasiujaq, Allard *et al.* (2007) situent cette valeur à 0,77 m (figure 29). De même, pour la vallée de Salluit, cette valeur a été estimée à approximativement 1,00 m (Allard *et al.*, 2004) (figure 30). Pour les pistes d'atterrissage et les routes d'accès du Nunavik (L'Héroult et Allard, 2018), il a été déterminé que la valeur critique d'enneigement, empêchant le développement du pergélisol, est de l'ordre de 0,80 à 1,00 m et que l'effet isolant de la neige atteint son maximum aux épaisseurs supérieures à 1,50 m. On peut envisager qu'à des épaisseurs inférieures à 0,8-1 m sur les pentes des remblais et dépendamment de la

densité de la neige, on pourrait déterminer une épaisseur critique maximum à chaque site en bas de laquelle le pergélisol sous les accotements resterait sous 0 °C. Il est à noter que cette relation ne tient pas compte des autres conditions de terrain telles que la présence d'eau.

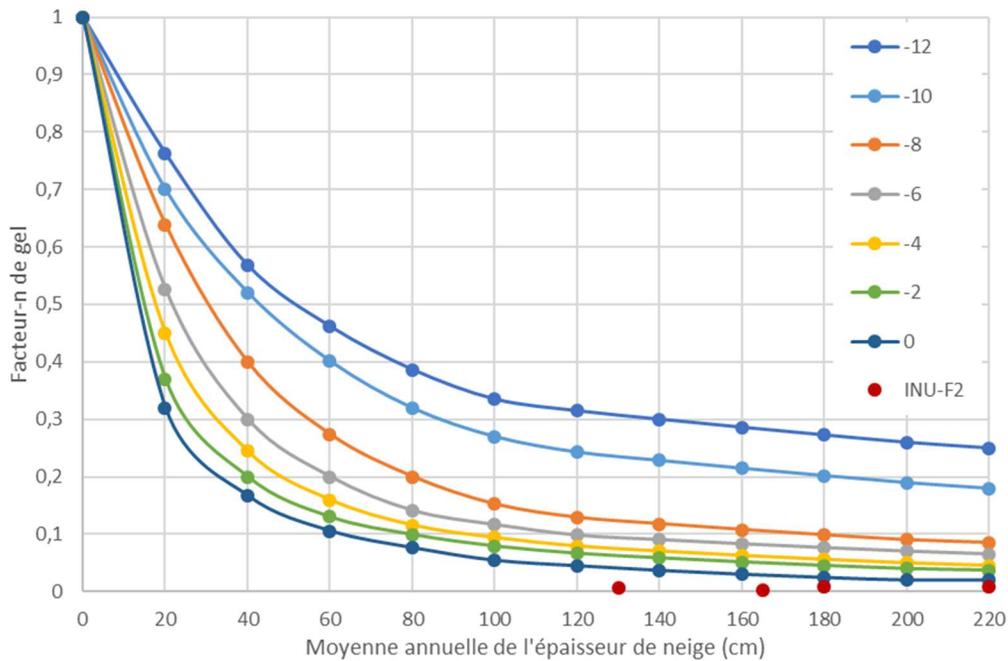


Figure 28 Facteur-n de gel en fonction de l'épaisseur de neige (à une densité de 250 kg/m³) et de la température moyenne annuelle de l'air. (Adaptée de Riseborough et Smith, 1998)

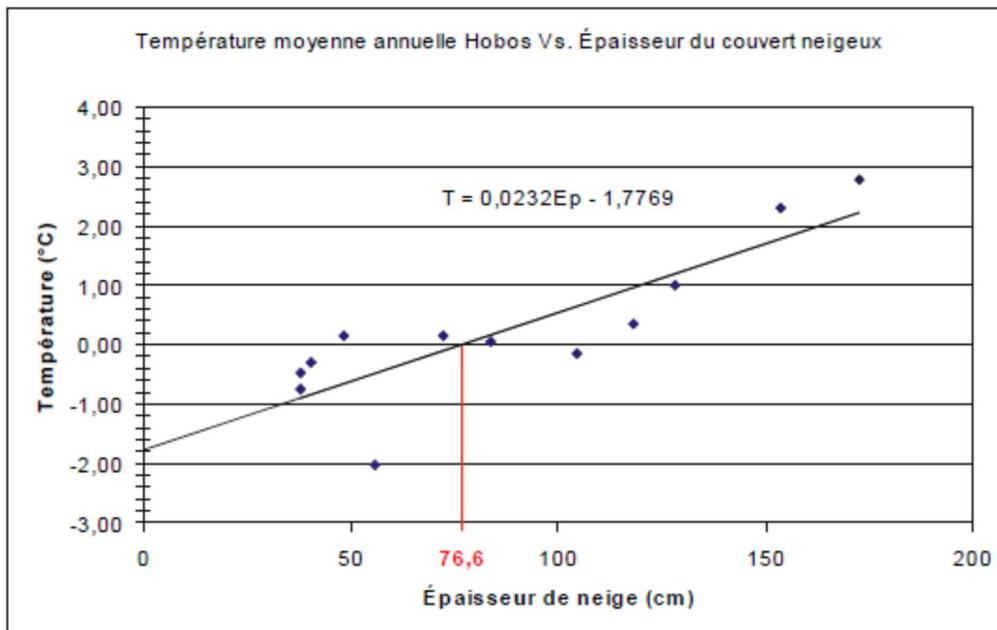


Figure 29 : Température moyenne annuelle à la surface du sol en fonction de l'épaisseur du couvert neigeux à l'aéroport de Tasiujaq en 2005 (Allard *et al.*, 2007)

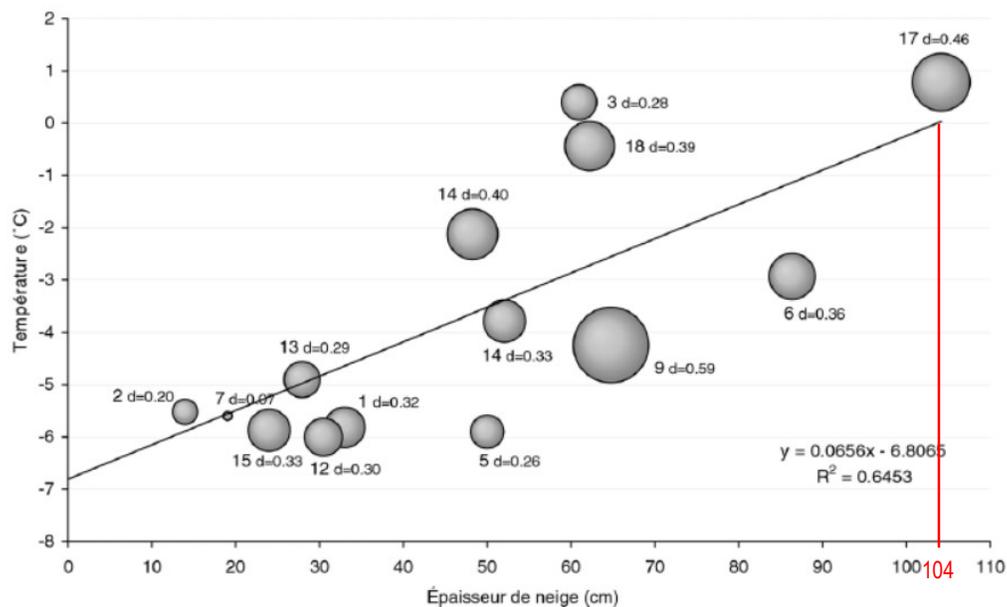


Figure 30 : Température moyenne annuelle à la surface du sol en fonction de l'épaisseur et la densité du couvert neigeux dans la vallée de Salluit pour l'année 2002-2003 (Allard *et al.*, 2004)

À titre d'exemple, au câble INU-F2 (seul câble possédant des valeurs d'épaisseur de neige et de température de surface) localisé du côté nord-ouest de la piste à 2 m du pied de remblai, pour une épaisseur de neige variant de 0,90 à 2,20 m, les valeurs de facteurs-n de gel demeurent sensiblement les mêmes, soit entre 0 et 0,01, d'une année à l'autre (tableau 6 et figure 28). Ces facteurs-n de gel, près de 0, indiquent que le transfert thermique est fortement atténué par des facteurs de surface, voire nul. Cette relation entre la température de l'air et du sol est aussi présentée à la figure 31.

Tableau 6 Indices calculés de gel et de dégel de l'air (FI et TI Tair), du sol (FI et TI Tsol à 5 cm de profondeur), ainsi que le facteur-n de gel et de dégel (Fn Gel et Fn dégel), et épaisseur de neige (données fournies par le MTQ)

| Année | Indices annuels (cal.) | | | | | | Borne N1a |
|----------------|------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| | FI Tair | TI Tair | FI Tsol | TI Tsol | Fn Gel | Fn dégel | |
| 2008 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 0,90 (2008-02-04) |
| 2009 | -3082 | 1161 | -10 | 1145 | 0,00 | 0,99 | 1,65 (2009-02-16) |
| 2010 | -2132 | 1283 | -13 | 1244 | 0,01 | 0,97 | 1,30 (2010-02-08) |
| 2011 | -2974 | 1154 | -20 | 1067 | 0,01 | 0,92 | ND |
| 2012 | -3043 | 1208 | -26 | 943 | 0,01 | 0,78 | 2,20 (2012-03-01) |
| 2013 | -3231 | 987 | -26 | 896 | 0,01 | 0,91 | ND |
| 2014 | -3256 | 1205 | -29 | 1215 | 0,01 | 1,01 | 1,80 (2014-03-31) |
| 2015 | -3646 | 999 | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2016 | -3370 | 1102 | ND | ND | ND | ND | 1,65 (2016-02-16) |
| 2017 | -2945 | 1189 | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2018 | -3297 | 702 | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2019 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2020 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Moyenne | -3098 | 1099 | -21 | 1085 | 0,01 | 0,93 | 1,58 |

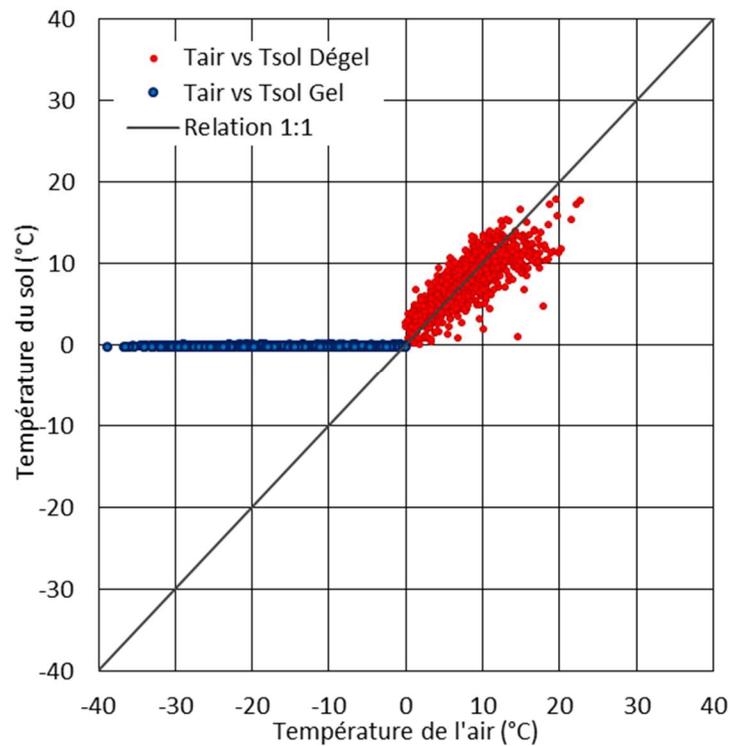


Figure 31 Corrélation entre la température de l'air et à la surface du sol (5 cm de profondeur) enregistrée au câble INU-F2, localisé du côté nord-ouest de la piste à 2 m du pied de remblai.

Dans quelques cas, l'accumulation de neige peut être accentuée par la présence d'arbustes, comme c'est le cas à Inukjuak, du côté sud-est de la piste. L'été, s'il y a présence d'eau stagnante en pied de certains talus ou dans les fossés, le phénomène peut être amplifié par l'apport de chaleur latente. Cette problématique pourrait potentiellement causer des tassements localisés et une perte de capacité portante dans les secteurs riches en glace et à moyen terme la dégradation pourrait s'étendre sous la piste par transfert de chaleur latéral.

Les zones d'épaulement et la périphérie directe des infrastructures aéroportuaires constituent un secteur sensible au dégel du pergélisol et deviennent un élément clé dans le suivi des températures du sol en vue d'évaluer la stabilité à long terme. Il est donc primordial de conserver et de préserver l'instrumentation de suivi en place notamment lors des travaux de réfection et de mise à niveau des infrastructures, ainsi que lors des opérations de déneigement. En effet, les câbles et stations d'enregistrement localisés sur les bordures sont plus susceptibles de bris étant donné qu'ils sont situés dans la zone où est tassée la neige et où sont projetés des cailloux et des blocs de neige glacée.

6.2 Seuils critiques de dégel des pistes d'atterrissage ainsi que des talus et pieds de remblai

Pour chaque aéroport, le seuil critique de la piste d'atterrissage correspond à la profondeur de la base de la couche active pré-construction, dans le terrain naturel. Dans les cas où cette valeur a déjà été atteinte ou dépassée, le nouveau seuil correspond à la profondeur historique maximale observée de la couche active au cours des années de suivi (tableau 7).

Tableau 7 Seuils de risque critiques des pistes d'atterrissage ainsi que des talus et pieds de remblai du MTQ au Nunavik. En gras, les seuils ayant déjà été atteints.

| Aéroport | Seuil critique de profondeur dégel des pistes (m) | seuil critique d'enneigement sur les talus et pieds de remblai (m) |
|-----------------|--|---|
| Inukjuak | ND | 0,50 |
| Puvirnituq | ND | 0,80 |
| Akulivik | 2,85 (HT-183) | 0,80 |
| Salluit | 6,60 (HT-172) | 1,00 |
| Quaqtaq | 2,72 (QUA2015-F3) et 2,75 (HT-178) | 0,80 |
| Kangirsuk | 2,31 (KANGIR-HT1B) | 0,80 |
| Aupaluk | 4,80 (HT-294) | 0,80 |
| Tasiujaq | 3,21 (HT-180) et 3,73 (HT-181) | 0,80 |

Tel que mentionné précédemment, le seuil critique des talus et des pieds de remblai des pistes ne peut être déterminé de la même manière, car ces derniers sont soumis à une dynamique plus complexe. De plus, l'épaisseur de la couche active sous la majorité des talus et des pieds de remblai a déjà largement dépassé la profondeur maximale atteinte par la couche active pré-construction et ceux-ci sont déjà en déséquilibre thermique.

L'utilisation des facteurs-n pourrait être possible aussi, mais l'absence de mesures de températures de surface et de mesures d'épaisseur de neige empêche actuellement de les calculer comme nous l'avons fait dans le cas de INU-F2. En ayant de mesures d'épaisseur de neige et de températures de surface, le seuil critique d'enneigement pourrait être déterminé précisément à l'aide de calculs simples en fonction des conditions climatiques enregistrées, mais aussi en fonction des projections climatiques prévues pour la région.

Il faut aussi noter que ces seuils d'épaisseurs de neige ainsi que les courbes de la figure 28 s'appliquent en fonction de la température moyenne annuelle de l'air locale, donc pour le climat actuel. Ces épaisseurs critiques sont donc appelées à diminuer sur le territoire dans les prochaines décennies avec le réchauffement climatique. De plus, les courbes sont calculées pour une densité moyenne de 250 kg/m^3 . En augmentant la densité de la neige par compaction avec de la machinerie pour atténuer son effet isolant (c.-à-d. en augmentant sa conductivité thermique), il serait envisageable d'aider à maintenir le sol gelé. Il vaudra la peine de se tenir informés des résultats d'une expérience de compaction en cours le long des routes au Yukon où la même problématique est vécue.

6.3 Synthèse des facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol, des impacts anticipés sur l'infrastructure et des recommandations

Le tableau 8 présente une synthèse des facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol, des impacts anticipés sur les infrastructures et des recommandations pour chacun des aéroports du MTQ.

Tableau 8 : Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol, des impacts anticipés sur les infrastructures et des recommandations pour chacun des aéroports du MTQ

| Aéroports | Particularités du terrain | Facteurs qui contribuent à modifier le régime thermique du pergélisol | Risques pour l'infrastructure | Piste | | Recommandations |
|------------|---|--|---|--|-----------------|---|
| | | | | Max de dégel 2020 | Seuil critique | |
| INUKJUAQ | <ul style="list-style-type: none"> Pergélisol continu, chaud Dépôts meubles sensibles au dégel Roc entre 4 et 11 m de profondeur Contenu en glace moyen | <ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température de l'air Présence d'eau stagnante dans les fossés de drainage durant la saison de dégel Accumulation de neige en périphérie des deux côtés de la piste durant la saison de gel Présence de végétation arbustive en pied de remblai | <ul style="list-style-type: none"> Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Rotation des épaulements et fissuration | n.d. | n.d. | <ul style="list-style-type: none"> Ajout de câbles à thermistances dans la piste et en terrain naturel Ajout de capteurs de température de surface et effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements Améliorer le drainage sur les côtés Adoucir les pentes des remblais Élaguer les arbustes en bordure de piste |
| PUVIRNITUQ | <ul style="list-style-type: none"> Pergélisol continu, froid en général Piste en majorité sur le roc Une section de la piste en remblai épais sur argile marine. Cette section est dotée de bermes à convection pour restaurer le pergélisol dégelé durant les années 2000 Pergélisol effectivement regelé sous les bermes, mais à température tiède et possibilité d'un apport advectif de chaleur | <ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température de l'air Perte d'efficacité (?) de la circulation d'air dans les bermes Accumulation de neige sur les bermes Apport d'eau latéral (?) en profondeur (présence d'un talik côté nord) | <ul style="list-style-type: none"> Baisse possible d'efficacité des bermes à convection avec l'augmentation de la température de l'air Expansion du talik avec dégel sous la piste provoquant un tassement | n.d. | n.d. | <ul style="list-style-type: none"> Placer de nouveaux câbles stratégiquement dans la piste pour suivre l'évolution du régime thermique du pergélisol en-dessous de la zone en remblai |
| AKULIVIK | <ul style="list-style-type: none"> Pergélisol continu, relativement froid Piste repose sur des dépôts meubles Présence de coins de glace Till sensible au dégel | <ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température de l'air Présence d'eau stagnante dans les fossés de drainage du côté nord Accumulation de neige en périphérie du côté nord en hiver | <ul style="list-style-type: none"> Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Risque de thermo-érosion de coins de glace (dépressions linéaires) | 1,64 m (HT-183) | 2,85 m (HT-183) | <ul style="list-style-type: none"> Réajuster la profondeur des thermistances du câble HT-162 Ajout de capteurs de température de surface Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements Améliorer le drainage dans les fossés (les reprofiler) pour éviter les accumulations d'eau Éviter les accumulations importantes de neige Remplir les sillons de coin de glace de sable et/ou tourbe près de la piste |
| SALLUIT | <ul style="list-style-type: none"> Pergélisol continu, froid Piste repose sur le roc et du till Till très sensible au dégel | <ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température de l'air Contrôle de l'accumulation d'eau et de neige en pied de remblai Contrôle de l'Infiltration d'eau dans la fondation Construction sur des sections en déblai | <ul style="list-style-type: none"> Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels | 2,60 (HT-172) (maximum en 2017) (n.d. en 2020) | 6,60 m (HT-172) | <ul style="list-style-type: none"> Réparer le câble HT-172 dans la piste Ajout d'un câble à thermistances en terrain naturel, dans les dépôts meubles Ajout de capteurs de température de surface Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements Entretien du réseau de drainage (fossés, niveau du lac) |

| | | | | | | |
|-----------|--|---|--|---|---|---|
| QUAQTAQ | <ul style="list-style-type: none"> • Pergélisol continu, froid • Piste repose sur le roc et des dépôts meubles • Dépôts meubles sensibles au dégel • Zone inondable au printemps | <ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la température de l'air • Contrôle de l'écoulement dans les fossés • Écoulement d'eau dans la fondation de la piste • Construction d'une section en déblai | <p>Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Rotation des épaulements et fissuration Effondrements</p> | <p>2,50 m (HT-178) 2,37 m (QUA2015-F3)</p> | <p>2,75 m (HT-178) 2,72 m (QUA2015-F3)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de capteurs de température de surface • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements • Continuer le dégagement printanier des fossés de drainage • Éviter les accumulations importantes de neige |
| KANGIRSUK | <ul style="list-style-type: none"> • Pergélisol continu, froid • Piste repose sur des dépôts meubles stables au dégel et pauvres en glace • La section construite sur un till en déblai est sensible au dégel | <ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la température de l'air • Construction sur des sections en déblai | <p>Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Rotation des épaulements et fissuration Effondrements</p> | <p>2,31 m (KANGIR-HT1B)</p> | <p>2,31 m (KANGIR-HT1B)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout d'un câble à thermistances en terrain naturel (till) • Ajout de capteurs de température de surface • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige au pied du versant en déblai-fossé • Surveiller la qualité du drainage (fossé et ponceau) |
| AUPALUK | <ul style="list-style-type: none"> • Pergélisol continu, froid • Piste repose sur des dépôts meubles stables au dégel • Présence de coins de glace | <ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la température de l'air • Maintien de l'écoulement dans le fossé de drainage du côté est | <p>Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Effondrements Risque de thermo-érosion de coins de glace Dépressions linéaires</p> | <p>3,00 (HT-294)</p> | <p>4,80 m (HT-294)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ajout de capteurs de température de surface • Effectuer un relevé de l'épaisseur de neige sur les accotements • Remplir les sillons de coin de glace/tourbe de sable près de la piste • Entretenir le profil du fossé de drainage pour prévenir une infiltration sous la piste (en particulier le long d'un coin de glace) |
| TASIUJAJQ | <ul style="list-style-type: none"> • Pergélisol continu, relativement froid • Piste repose sur des dépôts meubles sensibles au dégel • Contenu en glace élevé | <ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la température de l'air • Écoulement d'eau à travers le remblai • Accumulation d'eau en pied de remblai • Construction sur une section en déblai | <p>Approfondissement du maximum de dégel Modification du régime thermique Tassements différentiels Rotation des épaulements et fissuration Effondrements</p> | <p>3,21 (HT-180) 3,64 (HT-181)</p> | <p>3,21 (HT-180) 3,73 (HT-181)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre le suivi de toutes les mesures d'adaptation récemment mises en place (hauteur de neige, températures de surface, pentes douces, fossés) |

7. CONCLUSION GÉNÉRALE

Présentés visuellement sous forme de planches synthèses, les résultats à jour sont commentés pour chaque site de mesure dans le contexte de chaque aéroport. La réalisation du projet a demandé des visites annuelles non seulement pour télécharger les données, mais aussi pour procéder à des entretiens réguliers et des réparations d'équipements. Le réseau instrumental demande en effet des efforts d'entretien constants. Une cause importante des bris réside dans les opérations d'entretien des pistes et de déneigement alors que les systèmes d'acquisition de données et leurs panneaux solaires sont exposés aux projections de neige et de pierres. L'apparition sur le marché de nouveaux systèmes d'acquisition de données de petite dimension, à grande capacité de mémoire, à batteries internes de longue durée sans panneaux solaires et, prochainement dotés de capacité de transmission de données devrait être mise à profit lorsque viendra le temps de renouveler les équipements.

La méthodologie inclut aussi une importante étape de vérification de la qualité des données avant leur acceptation dans la base de données et la compilation des graphiques présentés dans les planches synthèses.

Les données thermiques recueillies année après année permettent d'analyser le comportement de chaque piste ainsi que la performance des mesures d'adaptation qui y ont été appliquées au fil du temps.

La globalité des résultats révèle que les aéroports du Nunavik se sont bien maintenus dans la dernière décennie sous le climat relativement plus froid qu'anticipé qui a prévalu, contrairement aux prévisions de 2012, et grâce aux mesures d'adaptation comme les bermes à convection, les pentes douces tronquées et le calibrage de fossés de drainage. Il demeure toutefois impossible de quantifier quelle a été la part relative du climat et des mesures d'adaptation dans cette bonne performance des infrastructures.

L'ensemble des données recueillies donne une excellente image du climat et du régime thermique du pergélisol au Nunavik, tant sous les infrastructures aéroportuaires que dans les milieux naturels. Pour l'ensemble des villages, 2010 fut l'année la plus chaude depuis la construction des aéroports à la fin des années 1980, avec une moyenne annuelle de près de 3 °C au-dessus de la température moyenne de la période 2008-2020. Il est aussi possible de confirmer que la série d'années froides de 2013 à 2018 a eu un impact favorable sur les infrastructures de transport en prévenant le dégel du pergélisol et en additionnant son impact à celui des mesures d'adaptation mises en place. Mais plus récemment, en 2019 et 2020, malgré des années à peine plus chaudes que la moyenne de la période de référence, on observe tout de même une augmentation des profondeurs historiques de dégel, notamment à Kangirsuk et à Tasiujaq.

Quand elle surviendra, l'augmentation projetée des températures, des précipitations et des événements de fonte aura un impact direct sur les

infrastructures aéroportuaires, renforçant la nécessité des suivis de l'état du pergélisol et des infrastructures. Dans ce contexte, il s'avère essentiel de maintenir et d'améliorer le suivi thermique du pergélisol sous et en périphérie des infrastructures aéroportuaires afin de suivre les variations thermiques à venir et planifier les travaux préventifs et d'entretien futurs.

8. RÉFÉRENCES

- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O. et Michaud, Y. (2004). Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Salluit: Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Québec, Canada, 93 p.
- Allard, M. et Sarrazin, D. (2007), Monitoring des thermistances - collecte et interprétation des données : Aéroports de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqtuaq, Akulivik, Salluit et Puvirnituq au Nunavik. Rapport annuel au Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 41 p.
- Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Verreault, J., Sarrazin, D. (2009). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 2, Centre d'études nordiques, Université Laval, 83 p.
- Allard, M., Doyon, J., Sarrazin, D. et L'Hérault, E. (2011) Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25 de l'aéroport de Kuujuaq en prévision de l'impact du réchauffement climatique. Rapport final transmis à Transports Canada, 39 p.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. (2007) L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Rapport final au FACC, 199 p.
- Allard, M., L'Hérault, E., Doyon, J. et Sarrazin, D. (2010) L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport final préparé pour le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 38 p.
- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. et Sarrazin, D. (2013) Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports in Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. Edited by Allard, M. and Lemay, M. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Allard, M., Lévesque, R., Séguin, M. K. et Pilon, J. A. (1993). Les caractéristiques du pergélisol et les études préliminaires aux travaux de génie au Québec nordique, Centre d'études nordiques, Université Laval, 94 p.
- Allard, M., Sarrazin, D. et L'Hérault, E. (2009) Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25 de l'aéroport de Kuujuaq. Rapport final transmis à Transports Canada, 126 p.

- Allard, M., Sarrazin, D. et Roger, J. (2013) Monitoring des thermistances-collecte et interprétation des données : aéroports de Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik. Réalisé pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 147 p.
- Allard, M., Valérie Mathon-Dufour, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Sarah Aubé-Michaud (2017) Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik dans le contexte de CC. Rapport final au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 169 p.
- Allard, M., Valérie Mathon-Dufour, Emmanuel L'Hérault et Denis Sarrazin (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 au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 107 p.
- Barette C, Brown R, Way R, Mailhot A, Diaconescu EP, Grenier P, Chaumont D, Dumont D, Sévigny C, Howell S and Senneville S. Nunavik and Nunatsiavut regional climate information update. In Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization, second iteration (Ropars P, Allard M and Lemay M, eds.). ArcticNet Inc., Quebec City, Canada. Accepted.
- Barette, C., Bourdages, L., Brown, R., Chaumont, D., Dibike, Y., Frigon, A., Logan, T. et Paquin, D. (2013) Projections des changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut pour 2050 in *Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. Edited by Allard, M. and Lemay, M. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Beaulac, I. (2006) Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transport routier et aérien au Nunavik. Département de génie civil. Québec, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 250 p.
- Beaulac, I. et Doré, G. (2005) Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik, Université Laval, Département de génie civil, rapport GCT-2005-09, 123 p.
- Caya, D. et Laprise, R. (1999) A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model : The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127 :341–362.
- Caya, D., Laprise, R., Giguère, M., Bergeron, G., Blanchet, J.-P., Stocks, B.J., Boer, G.J. and McFarlane, N.A. (1995) Description of the Canadian Regional Climate Model. *Water, Air and Soil Pollution*, 82 :477–482.

- Duhaime, G., Lévesque, S. et Caron, A. (2015) Le Nunavik en chiffres 2015 - version intégrale. [En ligne] <http://www.chaireconditionautochtone.fss.ulaval.ca/documents/pdf/Le-Nunavik-en-chiffres-2015-18-08-15-.pdf>
- Forbes, D. L., Mate, D., Bourgeois, J., Bell, T., Budkewitsch, P., Chen, W., Gearheard, S., Illauq, N. and Smith, I. R. (2007) Integrated mapping and change detection for adaptation planning in an Arctic coastal community, Clyde River, Nunavut. Proceedings, Arctic Coastal Zones at Risk, Tromsø, Norway. LOICZ : 42–47.
- Ford, J. D., Bell, T. et St. Hilaire-Gravel, D. (2010) Vulnerability of community infrastructure to climate change in Nunavut : A case study from Arctic Bay In CAVIAR — Community Adaptation and Vulnerability in Arctic Regions. Edited by Hovelsrud, G. K., and Smit B., Springer, p. 107–130.
- Gouvernement du Canada (2018) Climat. [En ligne] <http://climat.meteo.gc.ca>.
- Gravel Gaumond, F. et Doré, G. (2013) Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituk. Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec (MTQ), Groupe de recherche en ingénierie des chaussées, Département de génie civil, Université Laval, 243 p.
- Irvine, M. L., Bell, T., Smith, I. R., and Forbes, D. L. (2009) Building on unstable ground : Identifying physical landscape constraints on infrastructure sustainability and planning in Nunavut communities. Annual Science Meeting, ArcticNet NCE, Victoria, 08–11 December.
- 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., Fortier, D., Carbonneau, A.-S., Lemieux, C. et Doyon-Robitaille, J. (2012) Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final préparé pour Ouranos, Centre d'études nordiques, Université Laval, 86 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, C. Barrette, G. Doré, et D. Sarrazin (2012). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 224 p.

- Lemieux, C., Allard, M., Fortier, D., Grandmont, K., Larrivée, K., L'Hérault, E. et Carbonneau, A.-S. (2013) Une évaluation de l'état du parc immobilier du Ministère de la Santé et des services sociaux du Québec en fonction de la sensibilité du pergélisol au Nunavik. Rapport final préparé pour le Ministère de la Santé et des Services sociaux. Québec, Centre d'études nordiques, 72 p.
- Lévesque, R., M. Allard, M. K. Séguin et P.-A. Pilon (1990). Données préliminaires sur le régime thermique du pergélisol dans quelques localités du Nunavik, Québec. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. C. d. é. Nordiques. Université Laval, Québec. 54 : 207-213.
- Mathon-Dufour, V. (2014). Caractérisation du pergélisol en vue de la réfection et de l'adaptation aux changements climatiques de l'aéroport d'Iqaluit, Nunavut. Université Laval, MSc Thesis. 259 p.
- Mathon-Dufour, V. et Allard, M. (2015) Understanding permafrost processes under the Iqaluit Airport: Final report. Centre d'études nordiques. Report produced for the Government of Nunavut and Transports Canada, Government of Canada. 160 p.
- Mathon-Dufour, V. et Allard, M. (2018) Scientific support to the performance monitoring and maintenance of the Iqaluit Airport. Centre d'études nordiques. Report produced for the Government of Nunavut and Transports Canada, Government of Canada. 34 p.
- Michel Allard, Valérie Mathon-Dufour, Emmanuel L'Hérault et Denis Sarrazin (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 au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 107 p.
- Mathon-Dufour, V., Denis Sarrazin, Michel Allard, et Emmanuel L'Hérault (2019) Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik dans le contexte des changements climatiques. Rapport d'étape 3 au Ministère des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 125 p.
- Mathon-Dufour, V., Sarrazin, D. et Allard, M. (2020) Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik dans le contexte des changements climatiques. Rapport d'étape 4 au Ministère des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 148 p.
- Mathon-Dufour, V., Sarrazin, D. et Allard, M. (2016) Évaluation des conditions de drainage sous la piste 07-25 de l'aéroport de Kuujuaq en réponse à la dégradation du pergélisol. Centre d'études nordiques, Université Laval. Rapport final transmis à Transports Canada, 159 p.

- Mathon-Dufour, V., Sarrazin, D. et Allard, M. (2018) Adaptation d'infrastructures aéroportuaires aux changements climatiques en milieux nordiques : Aéroport de Kuujuaq. Synthèse et analyse des données 2016-2018. Centre d'études nordiques, Université Laval. Rapport final transmis à Transports Canada, 53 p.
- Ménard, É., Allard, M., & Michaud, Y. (1998). Monitoring of ground surface temperatures in various biophysical micro-environments near Umiujaq, eastern Hudson Bay, Canada. In Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost. Yellowknife, Canada (pp. 723-729).
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Cote, H., Giguere, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. and De Elia, R. (2006) Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 22 :2302–2315.
- Riseborough, D.W. and Smith. M.W. (1998). Exploring the limits of permafrost. Proceedings, Seventh International Conference on Permafrost, 23-27 June 1998, Yellowknife, NWT. Quebec City: Centre d'études nordiques, Nordicana 57: 935-941.
- Roger, J., Allard, M., L'Hérault, E., Sarrazin, D., Aubé-Michaud, S. et Mathon-Dufour, V. (2016). Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik dans le contexte de CC. Rapport final au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 130 p.
- Sarrazin, D., Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Roger, J., Bilodeau, J.P. (2012) Évaluation des conditions de pergélisol sous la piste 05-27 de l'aéroport de Kuujuaq en prévision de l'impact du réchauffement climatique. Rapport préparé pour Transports Canada, Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Savard, C. (2006). Imagerie électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Québec, Université Laval. 244 p.
- Tremblay, C. and Doré, G. (1988) Airport network and housing construction programs in northern Québec, Canada. In Permafrost, Fifth International Conference. Proceedings, Trondheim, Norway, p. 1500–1506.
- Verreault, J. (2015). Caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du Nunavik (Doctoral dissertation, Université Laval).

ANNEXE 1

***TABLEAUX DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MENSUELLE DE
L'AIR POUR CHAQUE COMMUNAUTÉ***

| INUKJUAK | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -23,27 | -24,46 | -19,97 | -17,28 | -24,48 | -23,94 | -21,38 | -27,43 | -20,69 | -18,11 | -27,31 | -24,87 | -21,08 | -22,63 |
| Février | -26,37 | -24,13 | -18,46 | -22,56 | -24,42 | -24,18 | -23,33 | -31,57 | -26,42 | -24,63 | -27,17 | -23,29 | -25,56 | -24,79 |
| Mars | -21,42 | -20,97 | -15,13 | -22,04 | -18,58 | -12,88 | -25,50 | -24,82 | -21,79 | -17,73 | -14,47 | -18,74 | -20,68 | -19,60 |
| Avril | -9,22 | -9,94 | -5,32 | -13,68 | -10,87 | -12,06 | -14,85 | -9,76 | -15,60 | -10,84 | -10,24 | -7,64 | -11,36 | -10,88 |
| Mai | 0,97 | -4,61 | -0,66 | -3,68 | -1,20 | -2,33 | 1,25 | -2,26 | -1,63 | -0,50 | -1,90 | -0,57 | -2,21 | -1,49 |
| Juin | 9,90 | 5,69 | 5,23 | 6,42 | 8,06 | 5,69 | 6,75 | 4,10 | 6,53 | 8,27 | 1,80 | 8,40 | 7,17 | 6,46 |
| Juillet | 13,84 | 14,71 | 12,54 | 10,67 | 10,27 | 8,55 | 10,93 | 10,36 | 11,68 | 9,38 | 9,43 | 11,44 | 13,79 | 11,35 |
| Août | 13,56 | 10,00 | 11,59 | 11,42 | 11,87 | 10,38 | 11,47 | 10,31 | 10,45 | 9,87 | 7,24 | 11,77 | 12,02 | 10,92 |
| Septembre | 5,55 | 5,58 | 7,50 | 6,04 | 7,67 | 4,49 | 4,49 | 5,85 | 6,82 | 7,02 | 3,82 | 6,42 | 6,42 | 5,97 |
| Octobre | 2,42 | 0,24 | 2,71 | 2,26 | -0,45 | 1,13 | 2,89 | -1,02 | -1,33 | 0,73 | -3,69 | 3,23 | - | 0,79 |
| Novembre | -7,07 | -4,41 | -2,00 | -4,97 | -5,82 | -9,15 | -8,28 | -7,38 | -5,79 | -6,92 | -9,57 | -6,78 | - | -6,51 |
| Décembre | -18,72 | -12,09 | -7,03 | -13,70 | -12,85 | -20,78 | -13,23 | -15,07 | -16,99 | -16,23 | -14,76 | -14,33 | - | -14,65 |

| PUVIRNITUQ | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -26,74 | -25,30 | -21,99 | -18,03 | -26,76 | -25,43 | -22,13 | -30,01 | -22,36 | -20,53 | -28,69 | -27,05 | -23,52 | -24,50 |
| Février | -28,05 | -24,89 | -19,06 | -24,67 | -24,84 | -25,56 | -24,68 | -33,99 | -27,44 | -26,38 | -29,24 | -24,10 | -27,10 | -26,15 |
| Mars | -22,34 | -22,10 | -16,75 | -23,06 | -20,72 | -17,10 | -26,24 | -25,83 | -23,47 | -18,87 | -16,51 | -20,69 | -21,48 | -21,17 |
| Avril | -10,02 | -10,66 | -6,18 | -14,03 | -11,87 | -12,04 | -15,01 | -10,38 | -15,48 | -11,54 | -14,57 | -11,72 | -11,82 | -11,95 |
| Mai | 1,60 | -5,35 | -1,36 | -4,41 | -1,01 | -3,35 | 0,68 | -2,15 | -1,81 | -0,45 | -6,26 | -0,25 | -2,14 | -2,02 |
| Juin | 9,65 | 4,84 | 5,26 | 5,85 | 8,30 | 4,78 | 6,26 | 3,75 | 5,83 | 8,72 | 1,74 | 9,25 | 7,18 | 6,26 |
| Juillet | 14,27 | 14,85 | 12,75 | 10,50 | 11,28 | 8,73 | 11,26 | 10,72 | 12,32 | 10,45 | 8,78 | 12,93 | 14,76 | 11,81 |
| Août | 12,79 | 10,71 | 12,64 | 11,26 | 11,99 | 10,41 | 11,55 | 10,54 | 12,00 | 10,84 | 7,14 | 12,56 | 12,44 | 11,30 |
| Septembre | 4,66 | 5,10 | 7,42 | 5,57 | 6,86 | 3,93 | 3,57 | 5,21 | 6,50 | 6,91 | 3,27 | 6,87 | 6,03 | 5,53 |
| Octobre | 1,08 | -1,76 | 1,96 | 0,42 | -1,81 | 0,50 | 0,95 | -1,69 | -1,74 | -0,32 | -4,94 | 2,21 | - | -0,43 |
| Novembre | -8,57 | -6,57 | -2,54 | -6,54 | -7,45 | -10,80 | -10,11 | -8,82 | -7,14 | -9,30 | -11,99 | -7,84 | - | -8,14 |
| Décembre | -21,76 | -12,49 | -7,95 | -15,94 | -14,39 | -22,47 | -15,31 | -17,77 | -18,77 | -18,73 | -16,38 | -15,49 | - | -16,46 |

| AKULIVIK | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -24,73 | -23,53 | -20,33 | -17,31 | -25,79 | -24,38 | -21,53 | -28,73 | -21,63 | -19,41 | -26,85 | -26,59 | -22,53 | -23,33 |
| Février | -26,99 | -23,62 | -18,90 | -24,74 | -23,22 | -24,77 | -23,43 | -32,63 | -26,34 | -24,75 | -29,28 | -23,49 | -26,20 | -25,26 |
| Mars | -21,74 | -21,59 | -16,53 | -22,36 | -20,48 | -16,57 | -24,98 | -24,79 | -23,04 | -18,41 | -15,72 | -20,08 | -20,66 | -20,53 |
| Avril | -10,18 | -10,03 | -5,51 | -14,28 | -11,87 | -11,49 | -14,53 | -10,98 | -15,28 | -11,61 | -13,47 | -11,95 | -10,93 | -11,70 |
| Mai | 1,31 | -5,53 | -1,79 | -4,74 | -1,38 | -3,91 | -0,01 | -2,87 | -3,17 | -0,74 | -6,24 | -0,78 | -2,84 | -2,51 |
| Juin | 7,38 | 3,73 | 3,70 | 4,03 | 6,11 | 2,32 | 4,38 | 2,56 | 4,20 | 5,45 | 1,34 | 7,49 | 5,06 | 4,44 |
| Juillet | 11,72 | 14,57 | 11,27 | 8,34 | 9,86 | 7,14 | 9,99 | 9,53 | 10,98 | 7,89 | 6,33 | 11,97 | 12,98 | 10,20 |
| Août | 11,26 | 10,33 | 11,87 | 10,53 | 10,89 | 9,52 | 9,52 | 9,43 | 11,68 | 10,00 | 5,14 | 12,23 | 11,27 | 10,28 |
| Septembre | 4,54 | 4,58 | 7,37 | 4,80 | 6,11 | 2,94 | 3,20 | 4,06 | 6,06 | 6,41 | 2,87 | 6,61 | 5,70 | 5,02 |
| Octobre | 1,05 | -1,30 | 2,20 | 0,45 | -1,56 | 0,32 | 0,43 | -1,84 | -2,15 | -0,17 | -3,36 | 1,93 | - | -0,33 |
| Novembre | -7,62 | -6,03 | -2,08 | -5,24 | -6,55 | -9,56 | -8,99 | -8,29 | -5,46 | -7,65 | -10,18 | -6,41 | - | -7,01 |
| Décembre | -20,14 | -11,34 | -7,31 | -15,29 | -13,75 | -21,49 | -14,82 | -17,88 | -17,13 | -16,42 | -15,79 | -15,00 | - | -15,53 |

| SALLUIT | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | - | - | -20,14 | -18,11 | -24,90 | -24,42 | -20,74 | -28,83 | -22,06 | -20,43 | -26,96 | -26,38 | -22,85 | -23,25 |
| Février | - | - | -16,67 | -26,21 | -23,01 | -24,04 | -24,21 | -31,18 | -25,64 | -24,86 | -29,77 | -24,27 | -26,25 | -25,10 |
| Mars | - | - | -16,97 | -22,62 | -20,75 | -16,48 | -24,98 | -24,11 | -22,98 | -19,52 | -16,98 | -20,77 | -20,94 | -20,65 |
| Avril | - | - | -7,01 | -15,72 | -12,63 | -11,60 | -15,14 | -12,62 | -15,24 | -12,82 | -13,81 | -12,71 | -12,14 | -12,86 |
| Mai | 0,79 | -7,36 | -2,84 | -6,56 | -2,82 | -6,10 | -1,18 | -5,01 | -3,74 | -2,28 | -8,28 | -2,66 | -4,52 | -4,04 |
| Juin | - | - | 2,59 | 2,95 | 6,65 | 1,16 | 4,12 | 1,24 | 2,69 | - | 0,25 | 5,19 | 2,38 | 2,92 |
| Juillet | - | - | 9,58 | 9,27 | 8,95 | 7,05 | 7,78 | 9,30 | 9,60 | - | 8,11 | 10,74 | 11,24 | 9,16 |
| Août | - | - | 10,99 | 9,37 | 8,59 | 6,92 | 8,30 | 7,56 | 10,66 | - | 5,69 | 10,08 | 8,83 | 8,70 |
| Septembre | 1,58 | 1,79 | 5,28 | 1,93 | 3,65 | 1,41 | 0,12 | 1,58 | 4,39 | - | 0,91 | 5,03 | 3,20 | 2,57 |
| Octobre | -0,10 | -4,35 | -0,01 | -2,30 | -3,42 | -2,39 | -2,20 | -4,86 | -4,00 | - | -5,85 | -0,29 | -3,24 | -2,75 |
| Novembre | - | -8,03 | -4,13 | -7,93 | -8,90 | -12,41 | -11,50 | -10,66 | -7,72 | -9,69 | -10,32 | -8,57 | -10,14 | -9,17 |
| Décembre | - | -12,57 | -8,47 | -17,37 | -15,00 | -22,30 | -17,14 | -19,74 | -17,85 | -18,30 | -16,56 | -15,42 | - | -16,43 |

| QUAQTAQ | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -23,08 | -19,97 | -16,57 | -13,72 | -19,76 | -19,94 | -17,69 | -26,56 | -18,38 | -17,43 | -23,32 | -21,59 | -19,78 | -19,83 |
| Février | -23,95 | -19,42 | -12,89 | -22,78 | -19,01 | -20,41 | -23,28 | -28,09 | -22,00 | -21,87 | -26,31 | -19,85 | -23,01 | -21,76 |
| Mars | -19,83 | -17,28 | -14,62 | -19,47 | -18,17 | -12,81 | -21,53 | -21,17 | -18,81 | -17,32 | -12,80 | -18,06 | -16,49 | -17,57 |
| Avril | -7,95 | -10,04 | -6,12 | -12,89 | -9,17 | -9,05 | -12,87 | -10,53 | -10,81 | -11,34 | -11,30 | -8,46 | -9,05 | -9,97 |
| Mai | -0,25 | -4,95 | -1,26 | -4,11 | -1,31 | -3,86 | -1,33 | -2,29 | -1,56 | -1,79 | -5,85 | -0,59 | -2,27 | -2,42 |
| Juin | 3,28 | 2,29 | 3,20 | 2,62 | 5,25 | 1,75 | 4,66 | 2,19 | 2,67 | 2,82 | 0,95 | 3,10 | 2,18 | 2,84 |
| Juillet | 8,06 | 8,00 | 7,86 | 8,11 | 7,48 | 6,14 | 6,90 | 5,23 | 5,82 | 7,57 | 6,60 | 7,00 | 9,21 | 7,23 |
| Août | 7,70 | 5,53 | 9,36 | 6,04 | 8,39 | 6,75 | 9,16 | 5,81 | 7,55 | 6,81 | 6,98 | 6,06 | 9,06 | 7,32 |
| Septembre | 3,22 | 3,25 | 5,48 | 3,66 | 4,52 | 3,00 | 2,55 | 2,55 | 4,12 | 4,16 | 2,11 | 5,40 | 3,96 | 3,69 |
| Octobre | -0,05 | -1,76 | 2,12 | -0,41 | -0,61 | -0,29 | -0,53 | -2,18 | -1,73 | -0,03 | -3,54 | 1,56 | -1,22 | -0,67 |
| Novembre | -6,33 | -5,11 | -1,32 | -5,18 | -5,59 | -7,14 | -7,39 | -7,08 | -5,27 | -6,70 | -7,41 | -4,69 | - | -5,77 |
| Décembre | -18,06 | -9,52 | -4,59 | -13,47 | -11,67 | -17,45 | -13,95 | -15,57 | -13,36 | -12,57 | -13,31 | -10,81 | - | -12,86 |

| KANGIRSIK | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -26,49 | -23,42 | -19,79 | -17,07 | -24,14 | -23,28 | -20,30 | -29,72 | -20,34 | -20,16 | -26,80 | -25,28 | -23,70 | -23,12 |
| Février | -26,55 | -21,71 | -13,67 | -25,80 | -22,18 | -22,55 | -25,52 | -33,19 | -24,57 | -24,96 | -28,64 | -22,18 | -25,60 | -24,39 |
| Mars | -20,72 | -19,74 | -15,63 | -21,66 | -19,96 | -13,26 | -23,93 | -24,90 | -21,10 | -19,39 | -13,30 | -19,81 | -18,80 | -19,40 |
| Avril | -8,24 | -10,40 | -5,96 | -14,10 | -9,95 | -9,98 | -13,65 | -11,03 | -12,43 | -11,21 | -12,82 | -9,05 | -9,52 | -10,64 |
| Mai | 1,00 | -4,76 | -0,80 | -4,13 | -1,07 | -3,42 | -0,44 | -1,85 | -1,41 | -0,75 | -6,08 | 0,74 | -2,09 | -1,93 |
| Juin | 6,07 | 3,75 | 4,49 | 3,76 | 7,26 | 4,04 | 6,75 | 3,42 | 4,14 | 4,67 | 2,22 | 5,62 | 4,15 | 4,64 |
| Juillet | 10,97 | 9,70 | 9,58 | 10,48 | 9,46 | 8,52 | 8,55 | 7,20 | 8,30 | 10,09 | 9,17 | 9,68 | 12,20 | 9,53 |
| Août | 9,72 | 7,30 | 11,30 | 8,49 | 10,34 | 9,11 | 11,52 | 8,56 | 9,84 | 8,55 | 9,01 | 8,05 | 11,30 | 9,47 |
| Septembre | 3,78 | 3,86 | 5,75 | 4,44 | 5,37 | 3,73 | 3,05 | 3,12 | 4,56 | 4,75 | 2,68 | 5,80 | 4,34 | 4,25 |
| Octobre | -0,85 | -2,57 | 1,51 | -0,77 | -1,46 | -0,43 | -0,22 | -3,16 | -2,69 | -0,44 | -4,40 | 1,22 | - | -1,19 |
| Novembre | -8,77 | -6,80 | -2,85 | -8,07 | -8,09 | -10,04 | -10,34 | -9,45 | -7,99 | -10,11 | -10,19 | -7,96 | - | -8,39 |
| Décembre | -22,00 | -11,42 | -7,46 | -17,39 | -14,21 | -23,15 | -17,34 | -18,31 | -18,15 | -15,69 | -16,66 | -14,39 | - | -16,35 |

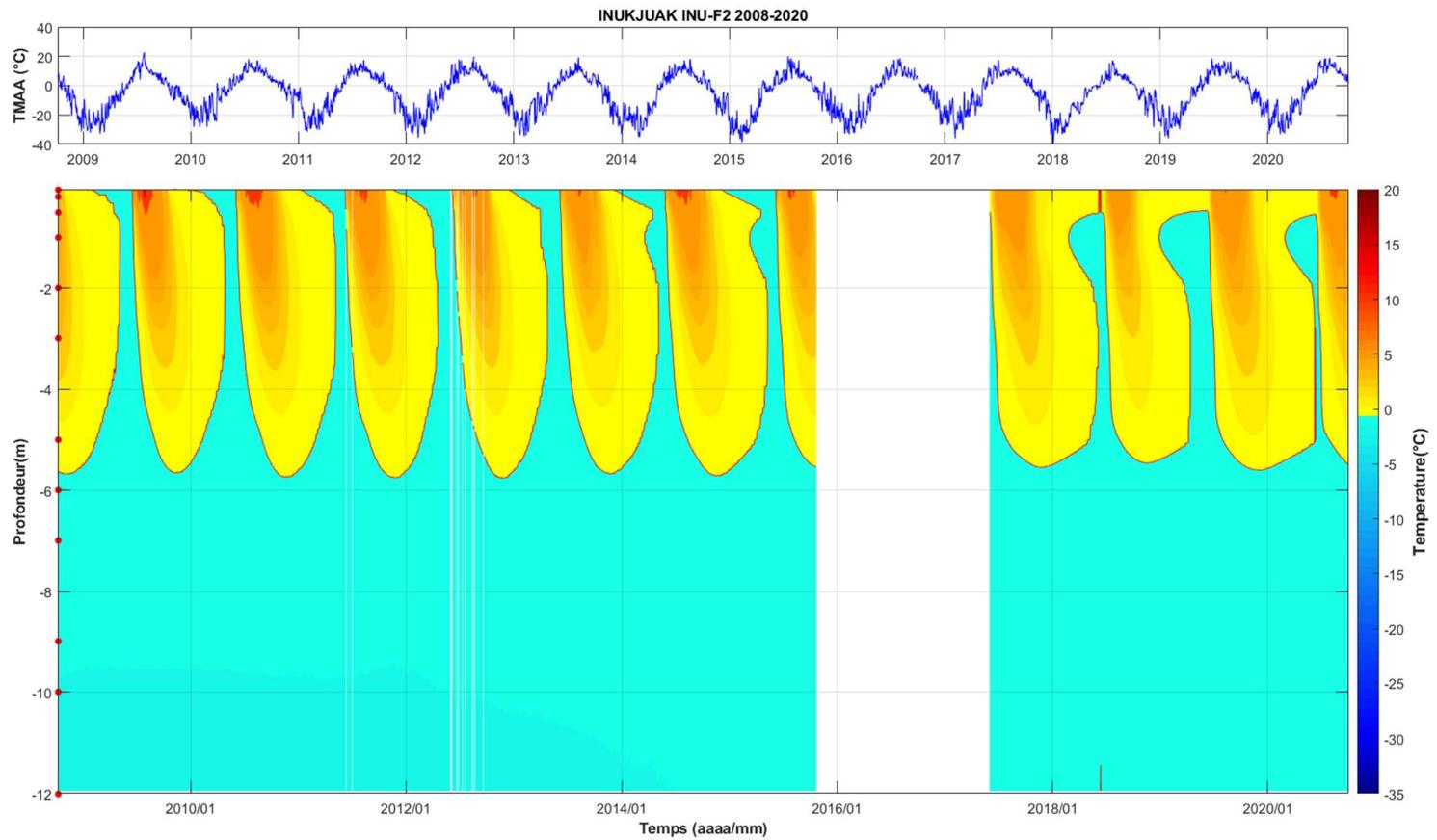
| AUPALUK | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|---------------------------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -25,14 | -22,56 | -19,76 | -16,58 | -23,25 | -22,17 | -20,38 | -28,38 | -19,20 | -19,49 | -25,91 | -24,22 | -22,15 | -22,24 |
| Février | -25,40 | -20,63 | -13,13 | -24,16 | -21,29 | -21,67 | -24,13 | -31,39 | -23,59 | -24,10 | -27,14 | -21,54 | -23,84 | -23,23 |
| Mars | -19,91 | -19,02 | -14,50 | -20,06 | -18,63 | -12,23 | -23,43 | -23,29 | -20,05 | -18,26 | -12,08 | -18,64 | -17,54 | -18,28 |
| Avril | -7,36 | -9,68 | -5,01 | -13,01 | -9,45 | -9,11 | -12,60 | -9,60 | -12,56 | -10,76 | -12,81 | -8,32 | -8,76 | -9,93 |
| Mai | 1,50 | -3,93 | -0,58 | -2,88 | -0,06 | -2,03 | -0,28 | -0,18 | -0,60 | -0,30 | -5,95 | 1,46 | -1,59 | -1,19 |
| Juin | 5,32 | 4,14 | 4,76 | 3,91 | 6,95 | 4,61 | 7,86 | 4,38 | 4,31 | 4,16 | 2,42 | 4,61 | 4,00 | 4,72 |
| Juillet | 9,77 | 7,62 | 9,50 | 10,86 | 9,94 | 9,20 | 8,36 | 8,16 | 7,89 | 10,17 | 9,30 | 9,11 | 11,46 | 9,33 |
| Août | 9,59 | 7,41 | 11,90 | 9,10 | 10,51 | 9,07 | 10,76 | 8,55 | 10,14 | 8,49 | 9,86 | 8,34 | 10,68 | 9,57 |
| Septembre | 4,98 | 4,76 | 6,25 | 5,56 | 6,26 | 4,93 | 4,00 | 3,95 | 5,30 | 5,49 | 3,52 | 6,35 | 5,30 | 5,13 |
| Octobre | 0,17 | -1,52 | 2,41 | 0,21 | 0,04 | 0,74 | 1,18 | -1,67 | -1,91 | 0,57 | -3,41 | 2,18 | 0,96 | 0,00 |
| Novembre | -8,08 | -5,60 | -2,15 | -6,73 | -6,78 | -8,62 | -8,71 | -8,48 | -6,51 | -8,64 | -9,96 | -7,23 | - | -7,29 |
| Décembre | -21,12 | -11,14 | -6,30 | -16,24 | -13,57 | -22,24 | -16,31 | -17,18 | -17,65 | -15,60 | -16,75 | -14,35 | - | -15,70 |

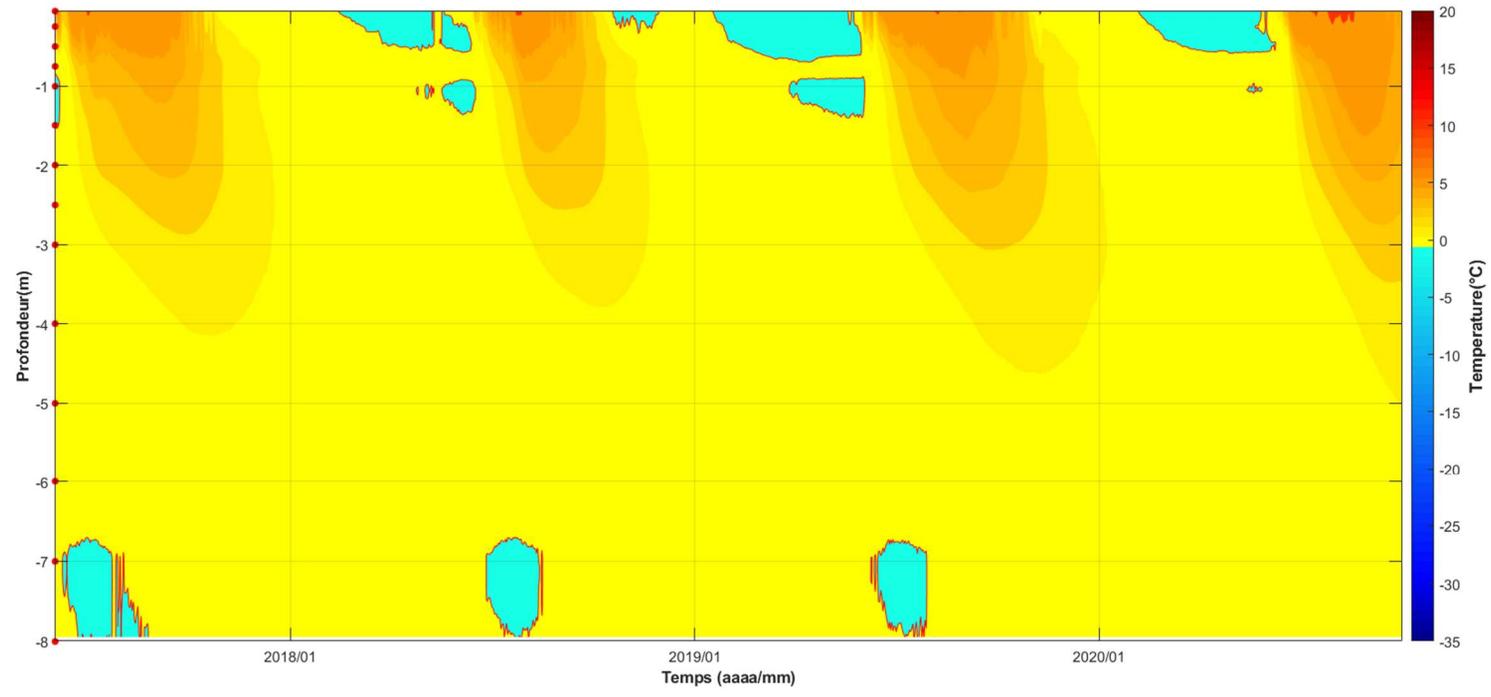
| TASIUAQ | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| Mois | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | \bar{x} mensuelle |
| Janvier | -24,60 | -22,81 | -20,45 | -17,51 | -23,71 | -22,40 | -21,00 | -28,39 | -19,51 | -19,68 | -26,32 | -24,26 | -22,04 | -22,51 |
| Février | -25,45 | -21,00 | -12,83 | -23,90 | -21,88 | -21,91 | -23,71 | -31,52 | -24,07 | -24,63 | -26,62 | -21,69 | -24,22 | -23,34 |
| Mars | -19,91 | -18,91 | -13,92 | -19,16 | -17,87 | -11,57 | -23,31 | -22,95 | -19,91 | -18,00 | -11,90 | -18,42 | -18,27 | -18,01 |
| Avril | -6,71 | -8,80 | -4,28 | -12,44 | -9,16 | -8,61 | -12,25 | -8,56 | -12,93 | -10,15 | -12,79 | -7,96 | -8,32 | -9,46 |
| Mai | 2,90 | -3,27 | -0,04 | -2,17 | 0,91 | -0,78 | 0,82 | 0,76 | 0,53 | 0,90 | -5,50 | 2,70 | -1,08 | -0,26 |
| Juin | 8,30 | 5,76 | 5,98 | 5,62 | 9,47 | 5,77 | 10,17 | 5,81 | 5,79 | 6,09 | 3,58 | 7,46 | 5,48 | 6,56 |
| Juillet | 12,39 | 9,82 | 11,74 | 12,22 | 11,88 | 10,74 | 10,13 | 11,22 | 10,38 | 11,93 | 10,78 | 11,01 | 13,04 | 11,33 |
| Août | 11,58 | 9,35 | 13,61 | 11,43 | 12,31 | 10,36 | 12,55 | 10,45 | 11,83 | 9,92 | 10,86 | 10,51 | 12,67 | 11,34 |
| Septembre | 5,76 | 5,68 | 6,81 | 6,47 | 7,40 | 5,63 | 4,53 | 5,06 | 6,22 | 6,43 | 3,97 | 6,71 | 6,46 | 5,93 |
| Octobre | 0,66 | -1,09 | 2,47 | 0,73 | 0,24 | 1,34 | 2,09 | -1,14 | -1,51 | 0,83 | -3,42 | 2,81 | -0,46 | 0,27 |
| Novembre | -8,40 | -5,28 | -2,01 | -6,51 | -6,50 | -8,52 | -8,53 | -8,41 | -6,78 | -8,61 | -10,67 | -7,04 | - | -7,27 |
| Décembre | -21,00 | -12,43 | -6,30 | -15,59 | -13,77 | -22,04 | -16,16 | -17,23 | -18,59 | -16,10 | -16,79 | -14,50 | - | -15,87 |

ANNEXE 2

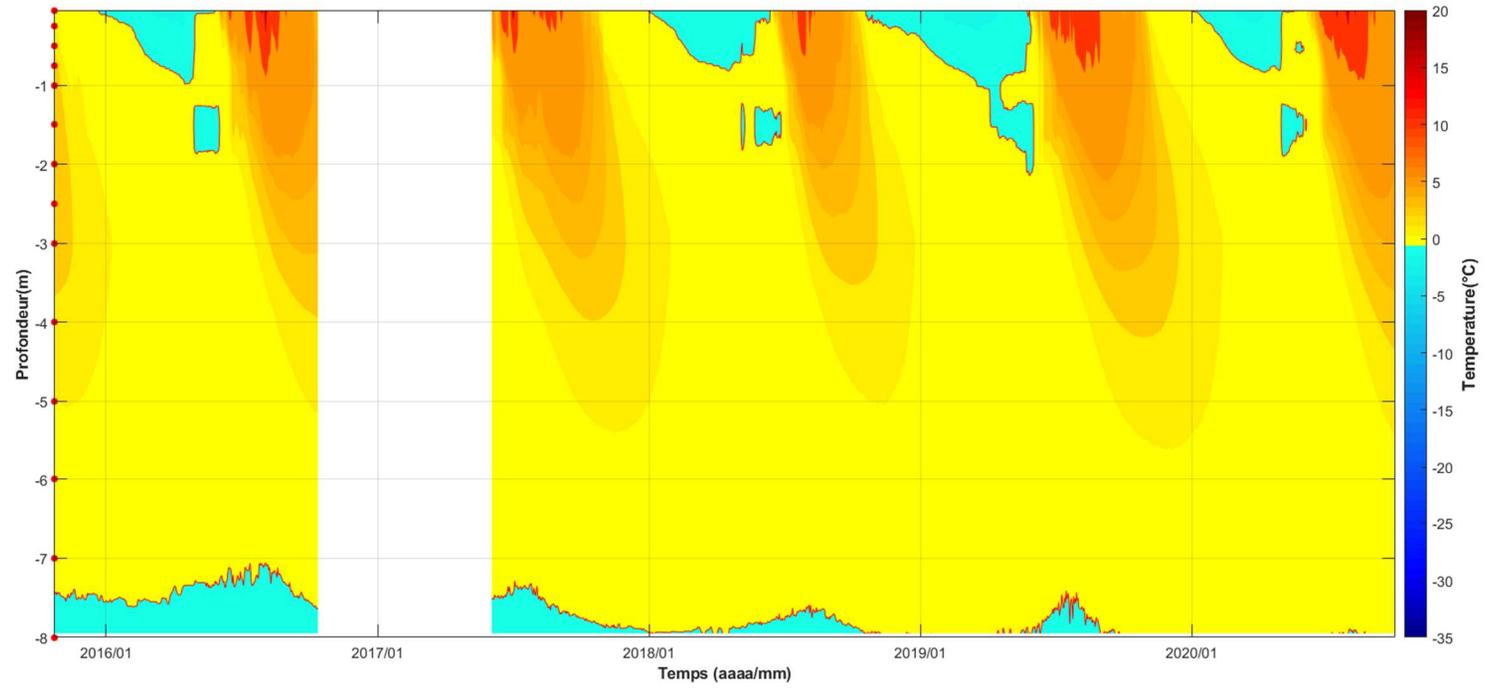
**GRAPHIQUES CONTOUR DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION
DU TEMPS ET DE LA PROFONDEUR POUR CHAQUE CÂBLE À
THERMISTANCES**

Inukjuak

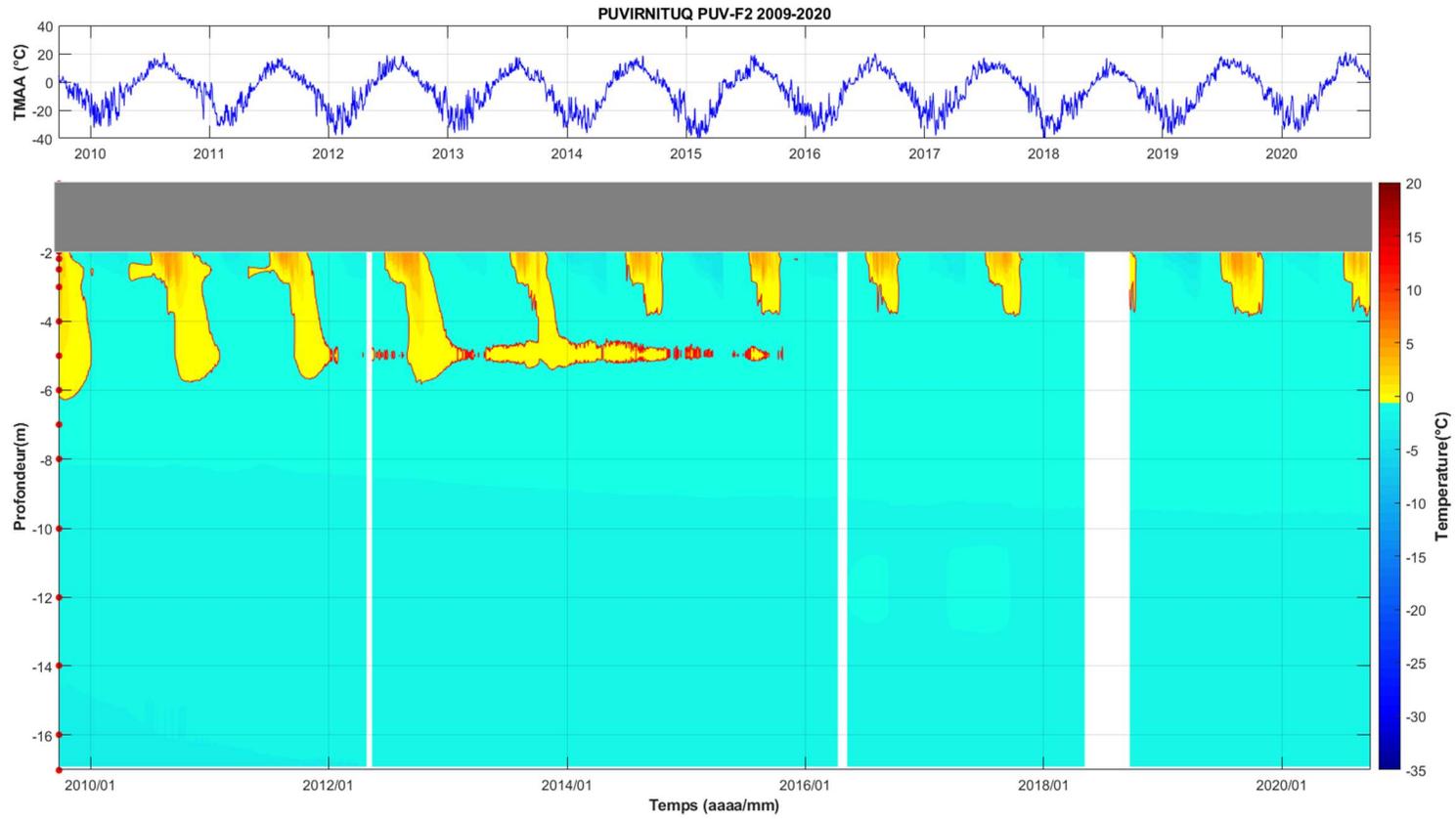


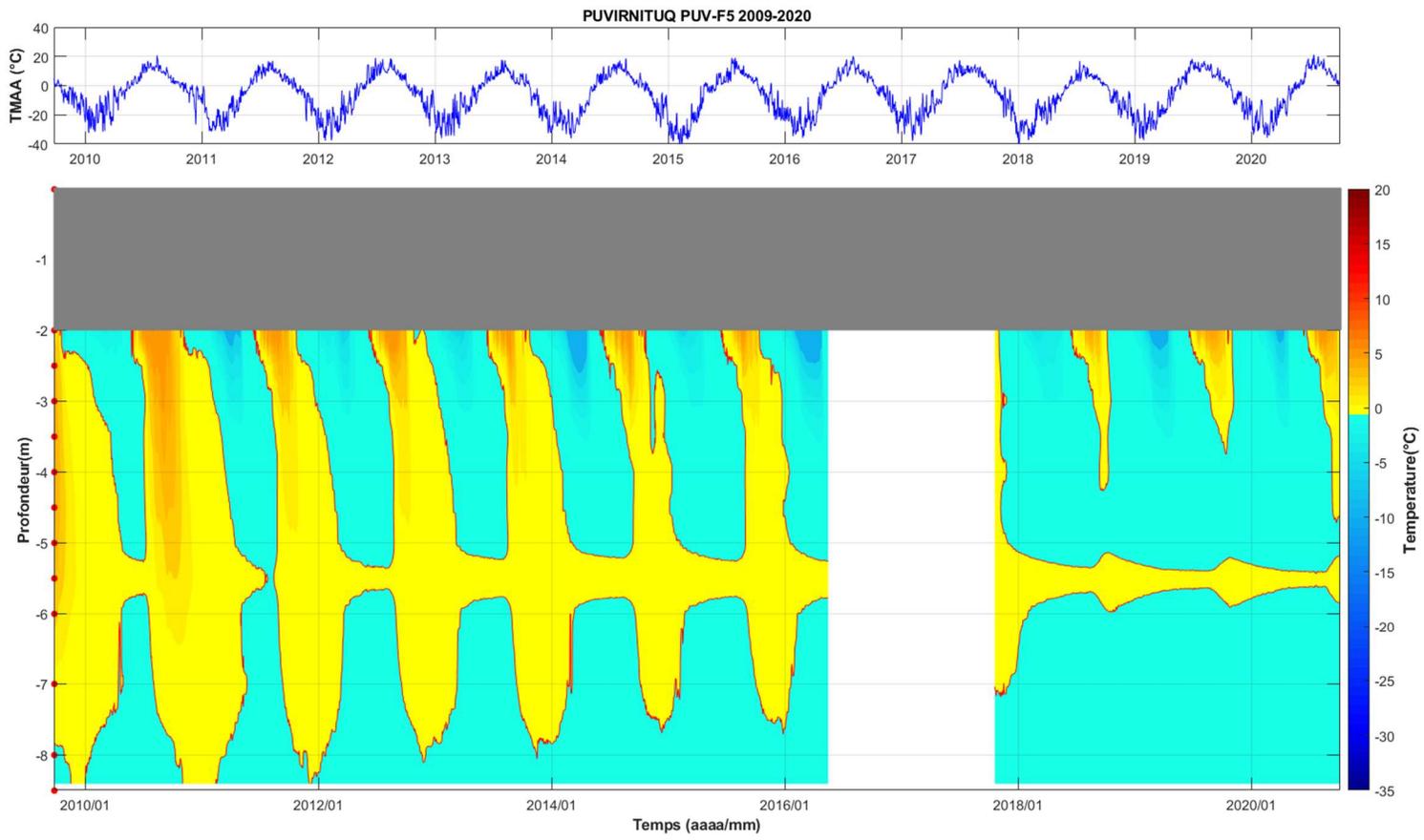


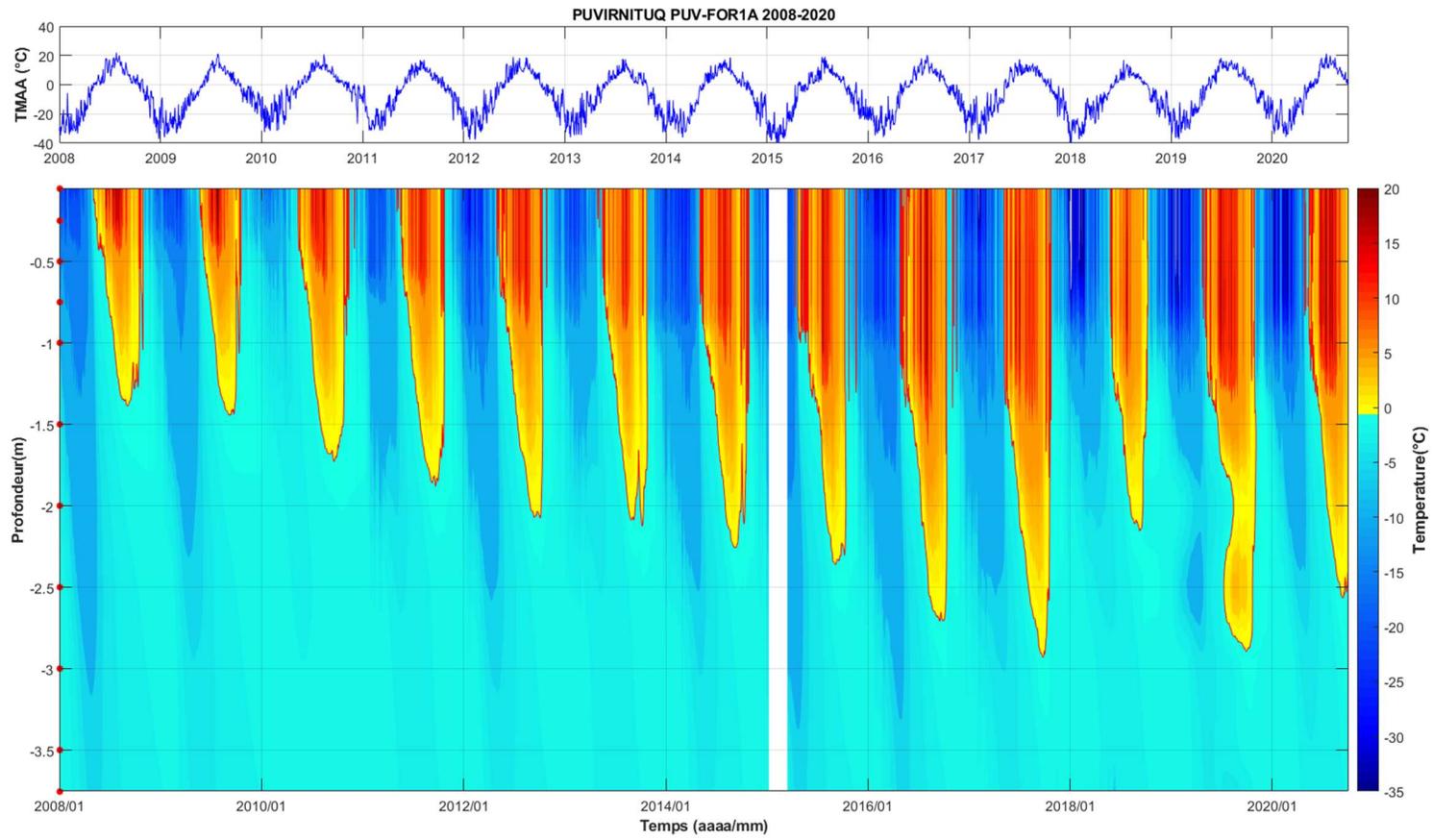
INUKJUAJ INU-F4 2015-2020



Puvirnitug

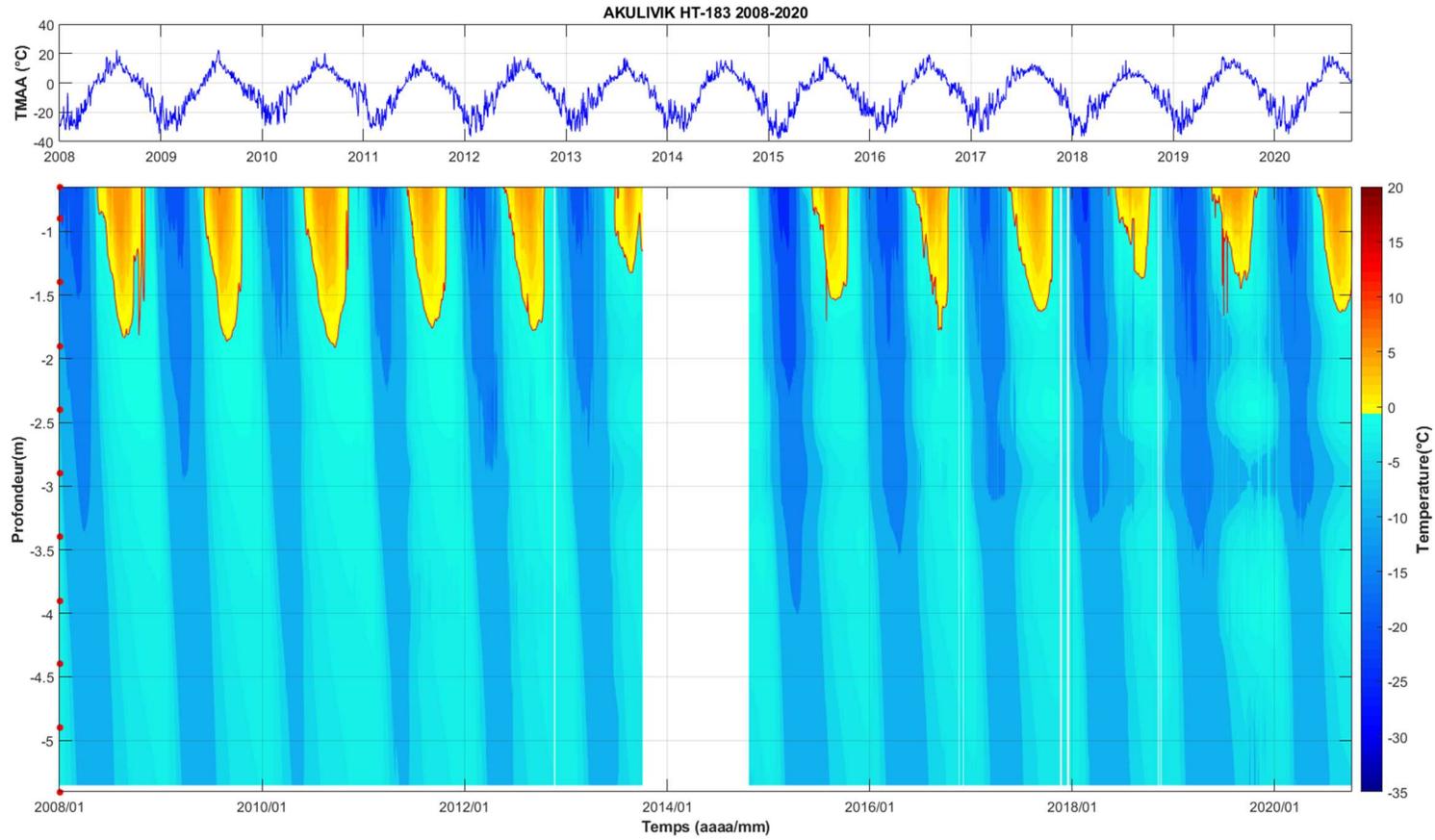




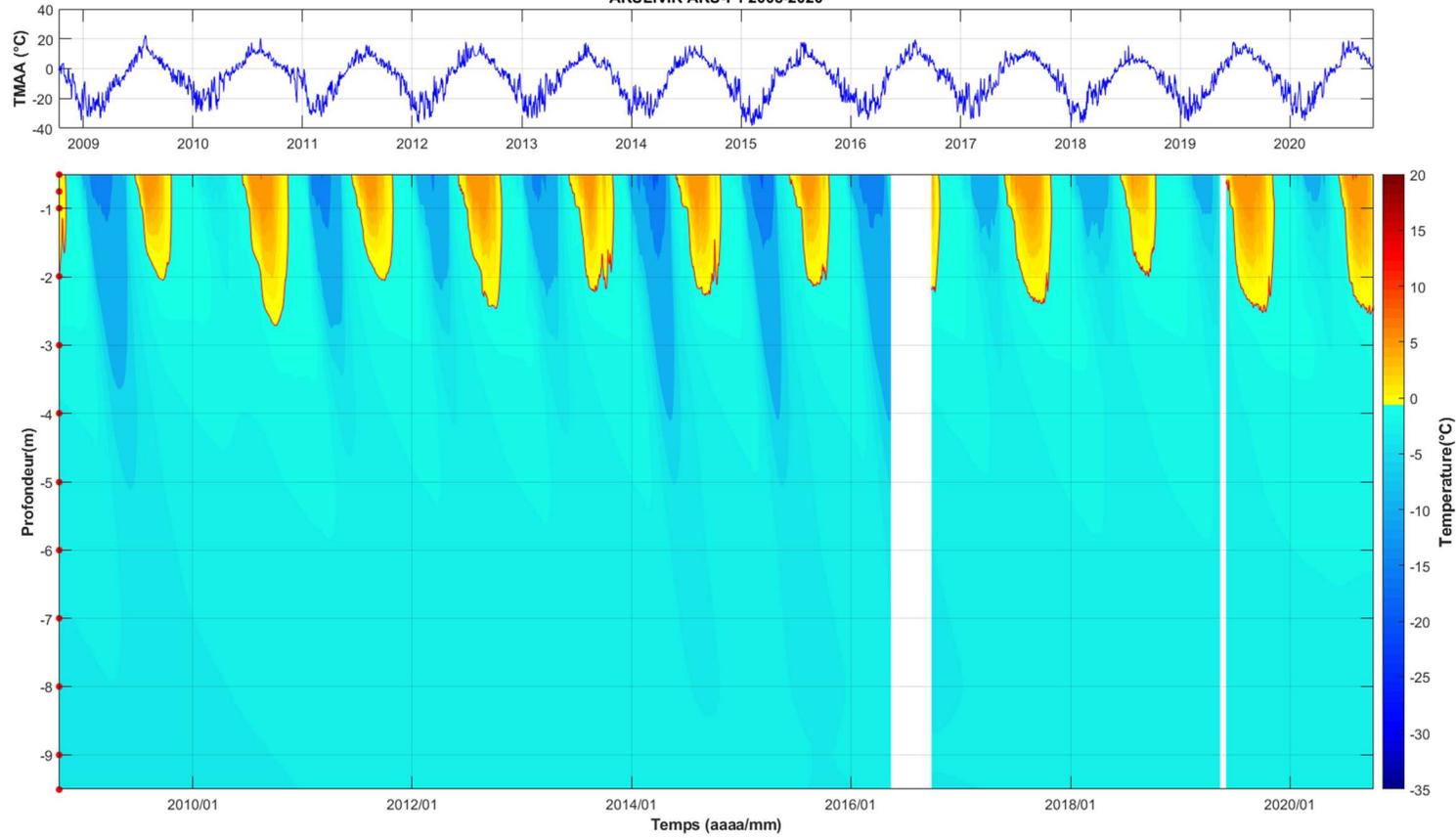


Note : comme le câble se soulève et sort graduellement du sol, ce graphique n'est pas fiable.

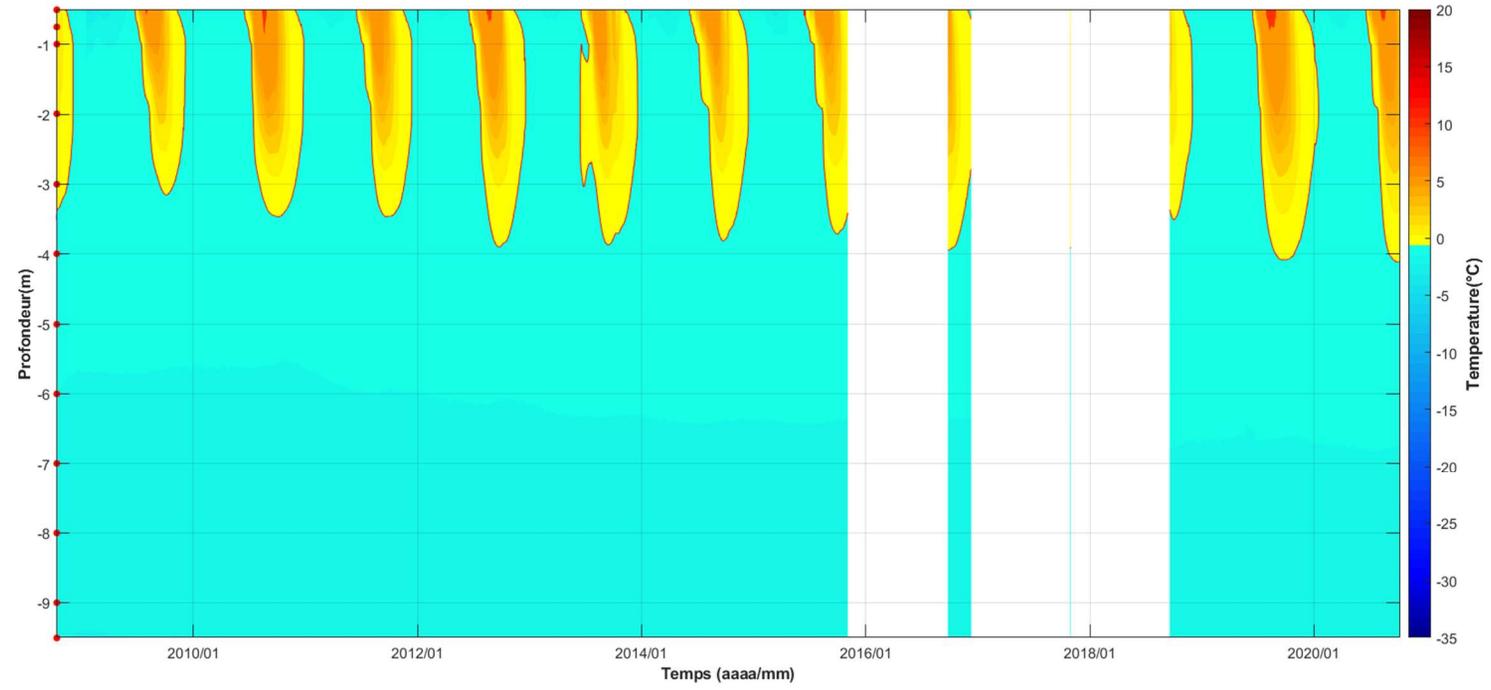
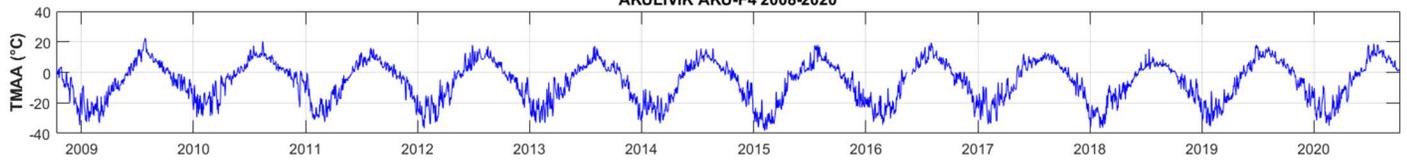
Akulivik



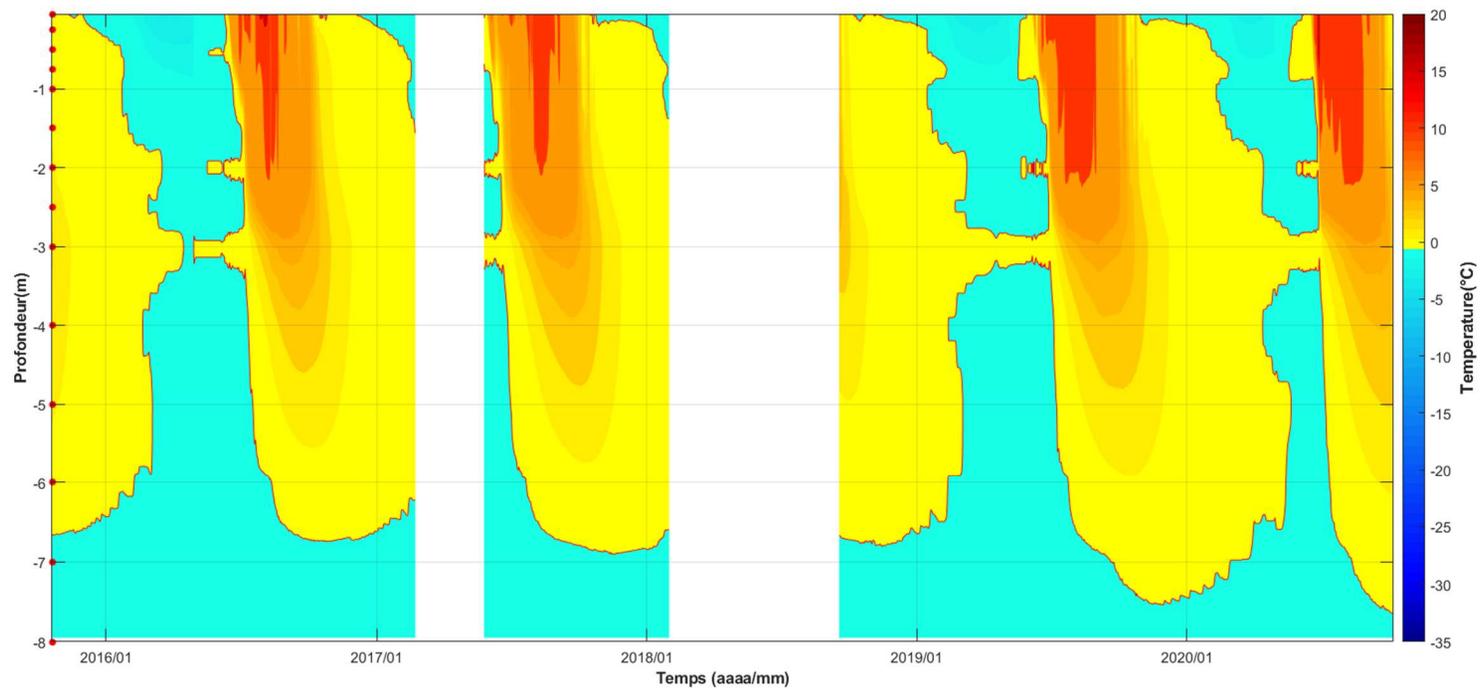
AKULIVIK AKU-F1 2008-2020



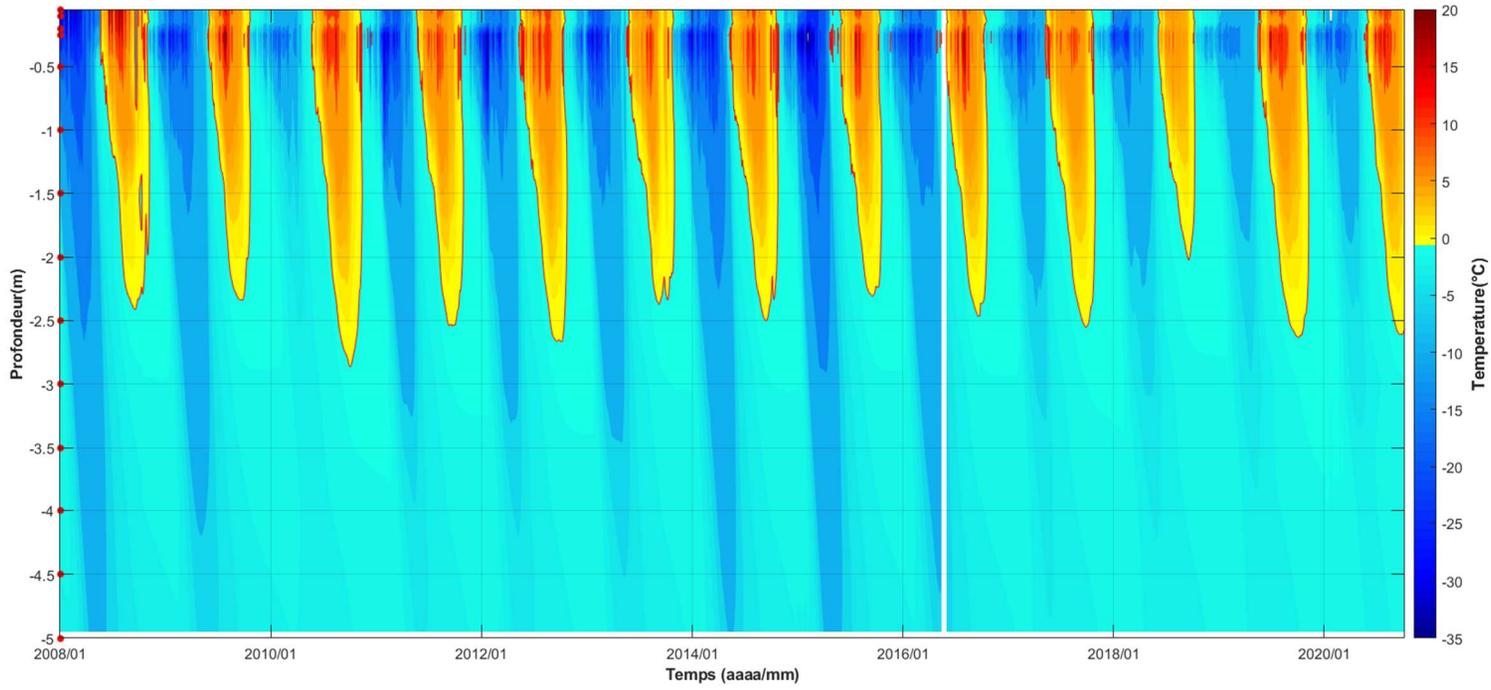
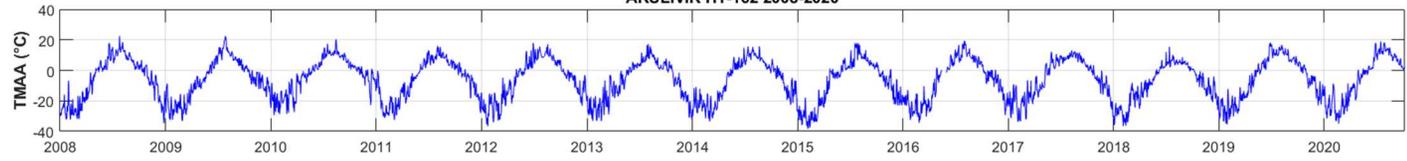
AKULIVIK AKU-F4 2008-2020



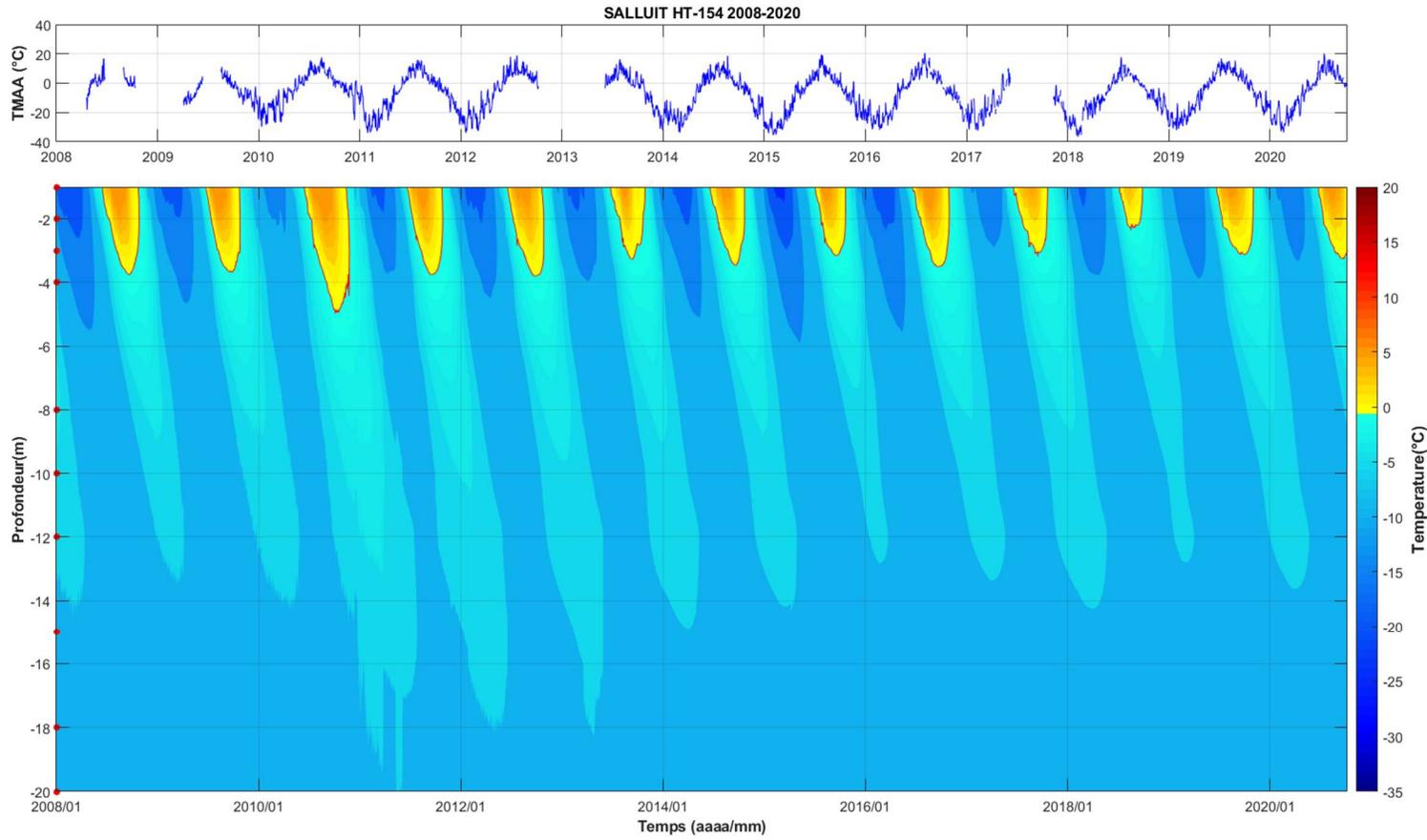
AKULIVIK AKU-F2 2015-2020



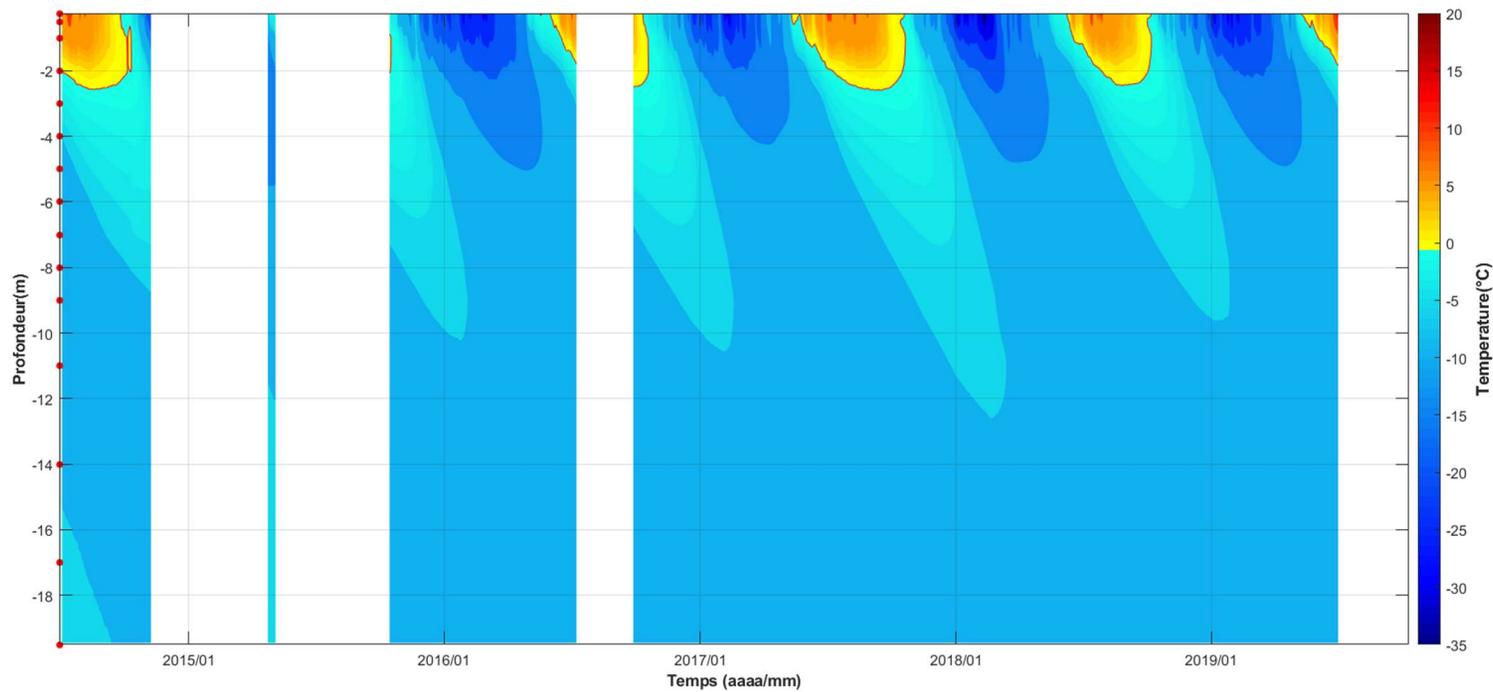
AKULIVIK HT-162 2008-2020



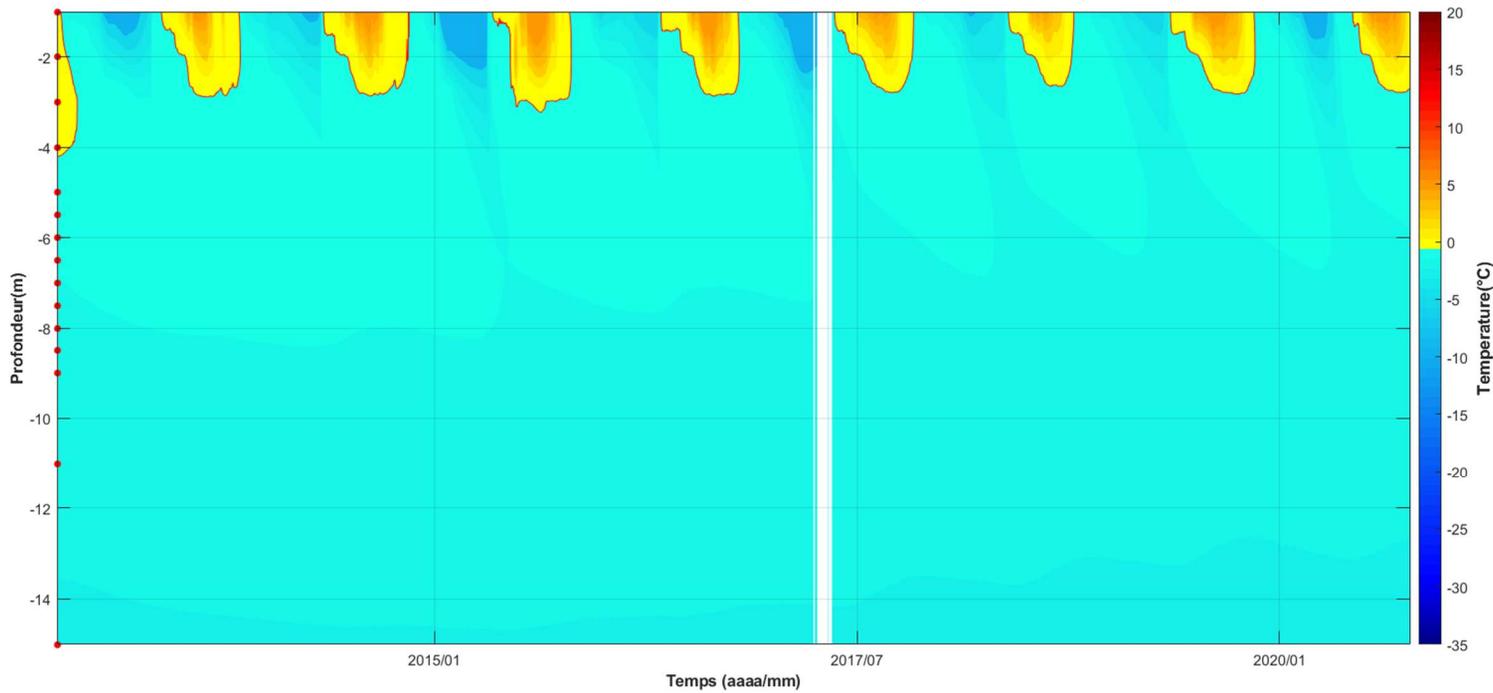
Salluit



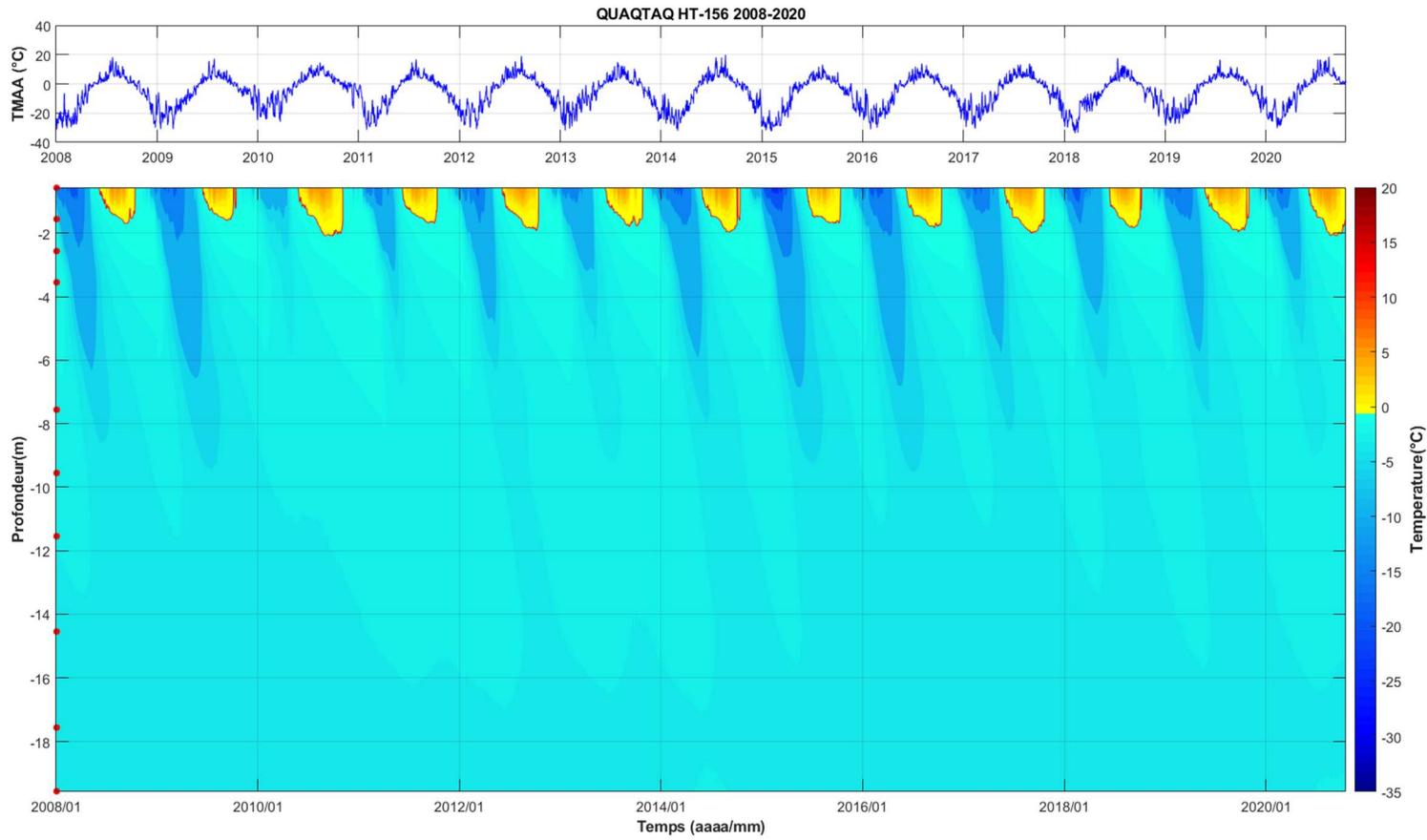
SALLUIT HT-172 2014-2019



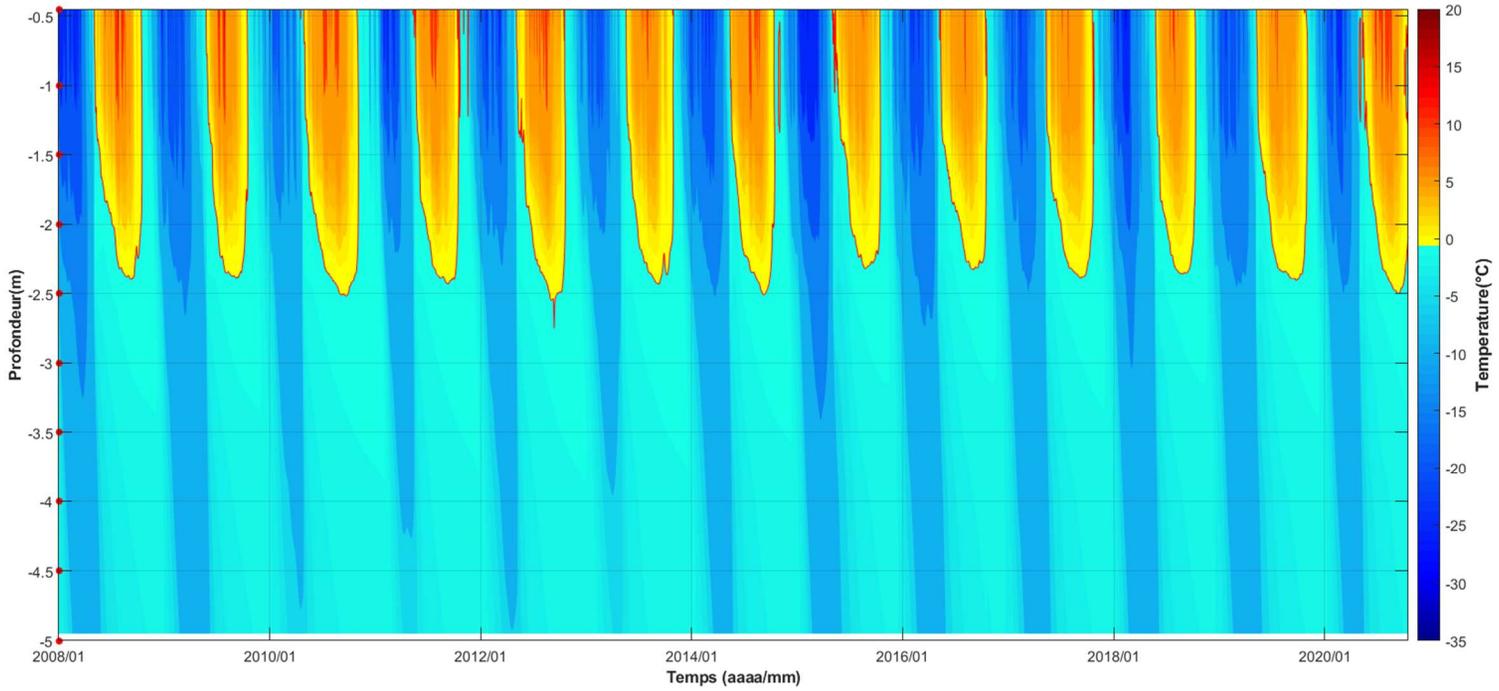
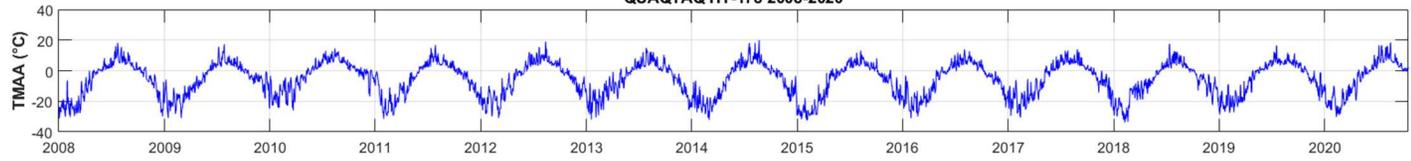
SALLUIT SAL-F3 2012-2020



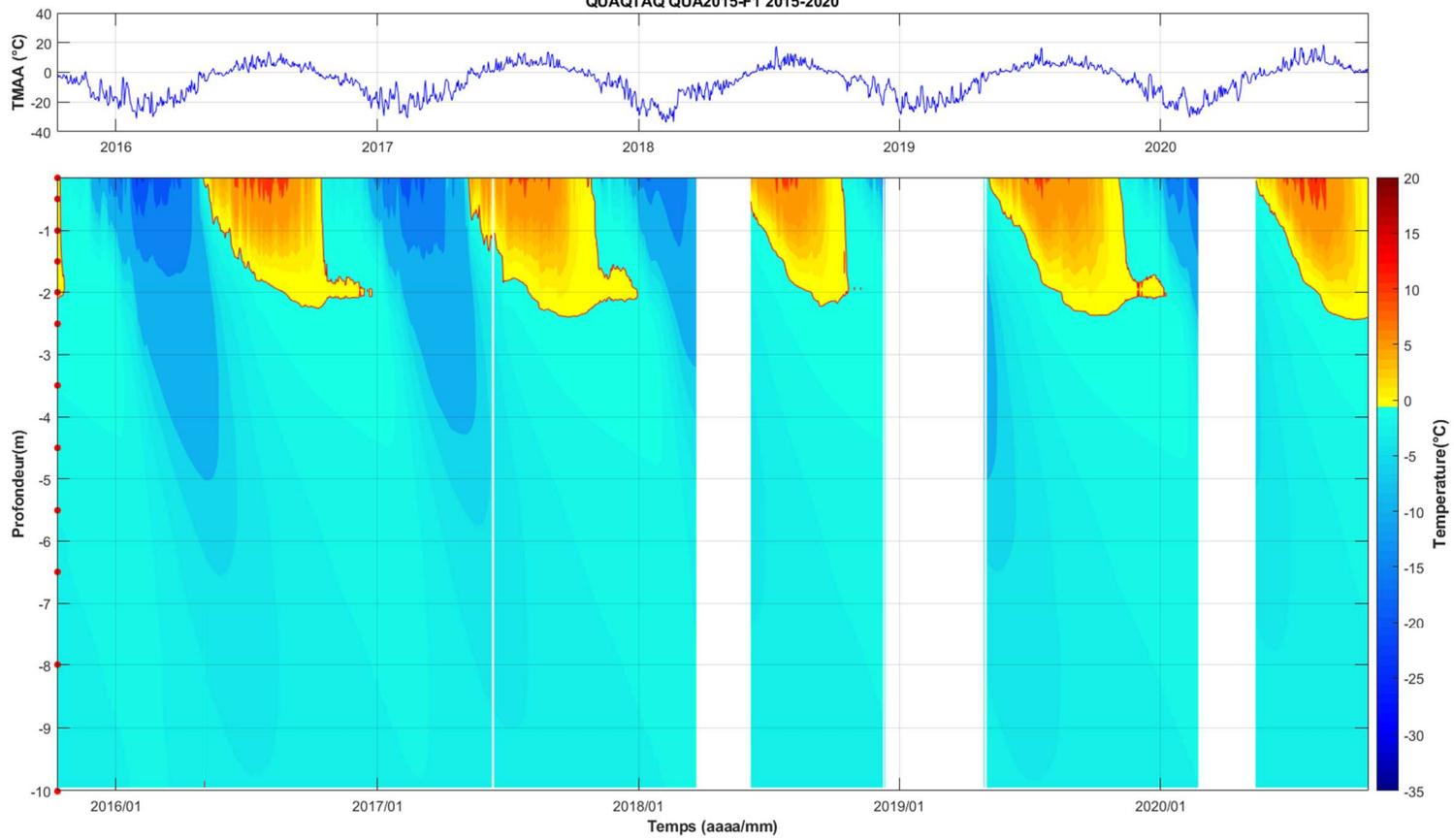
Quaqtaq



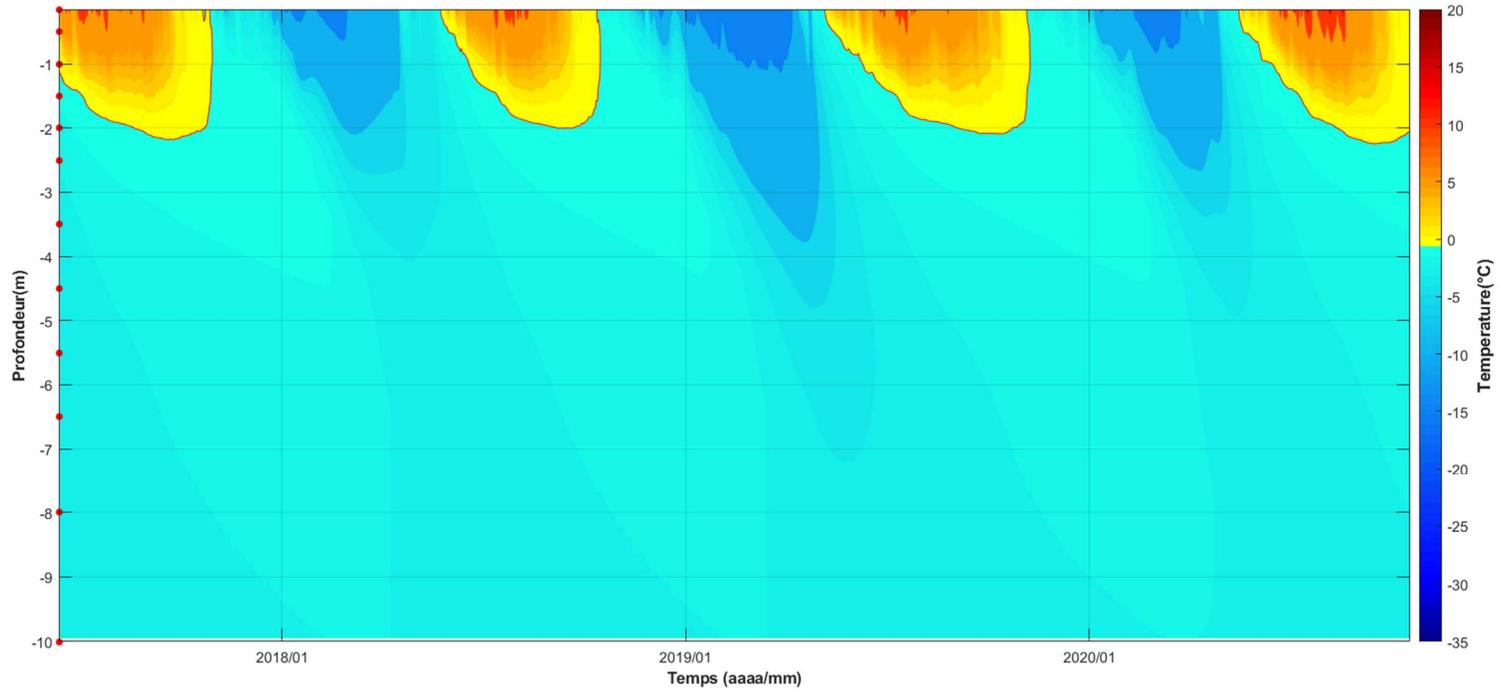
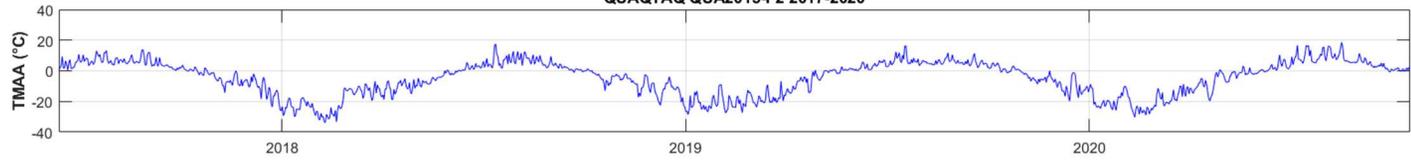
QUAQTAQ HT-178 2008-2020

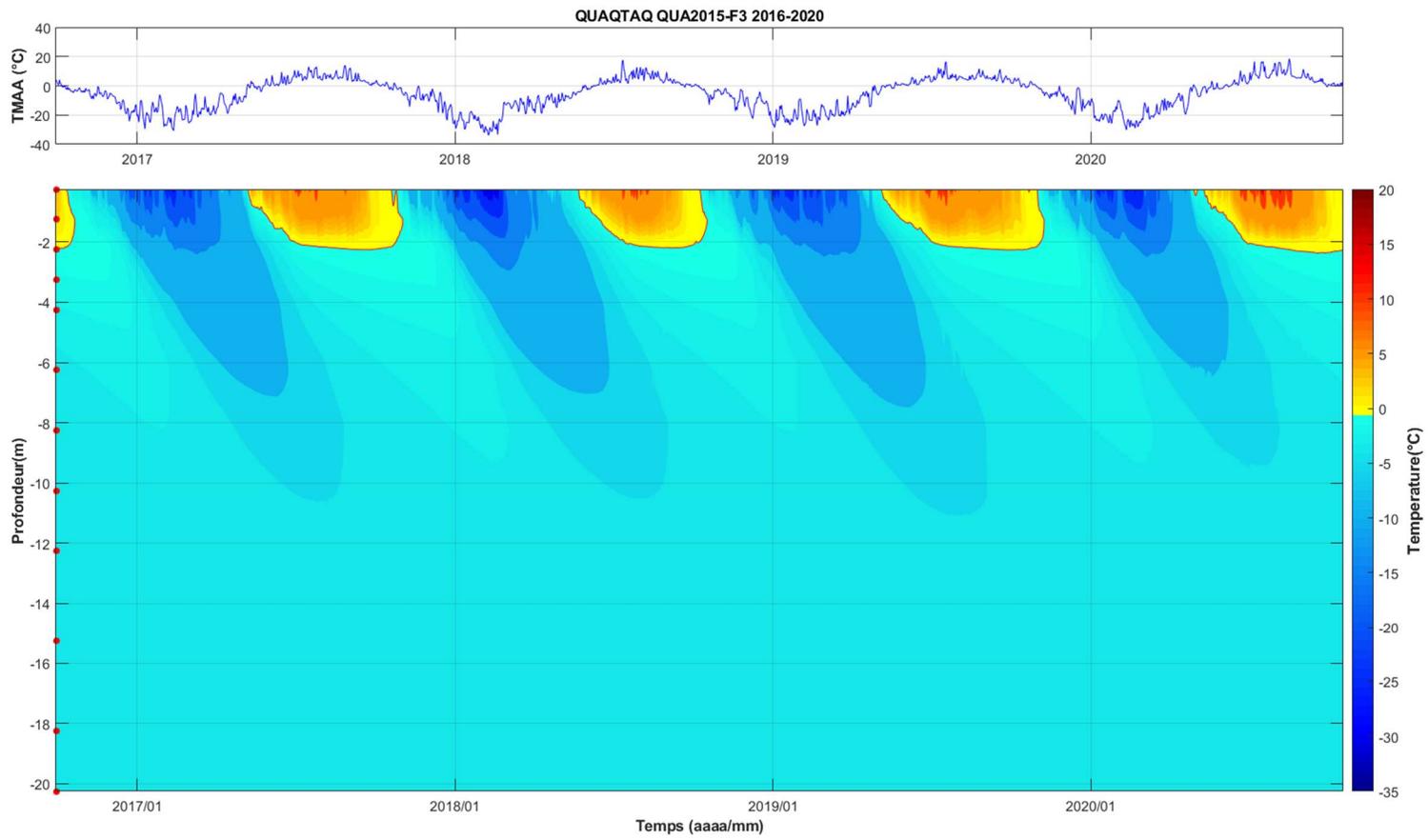


QUAQTAQ QUA2015-F1 2015-2020

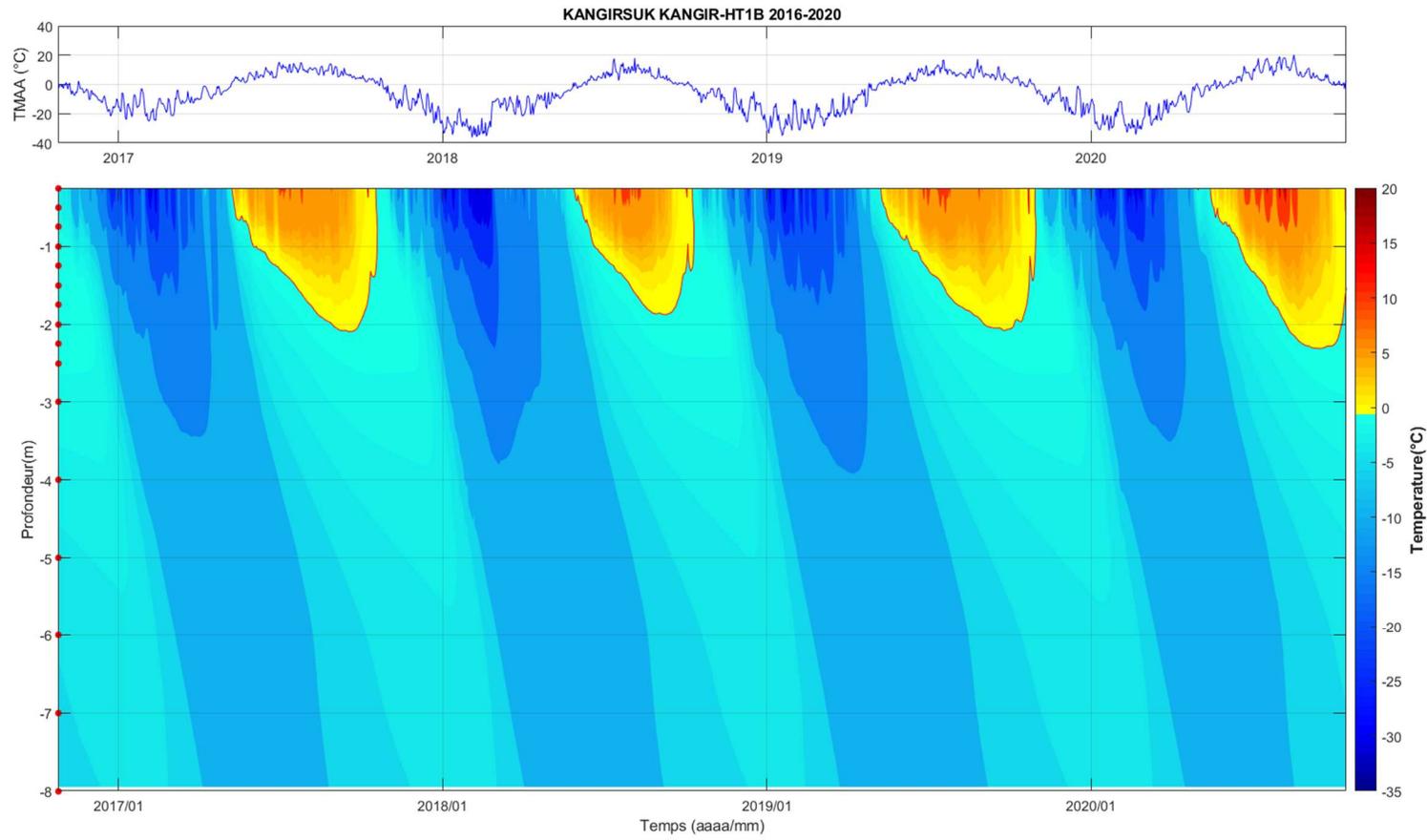


QUAQTAQ QUA2015-F2 2017-2020

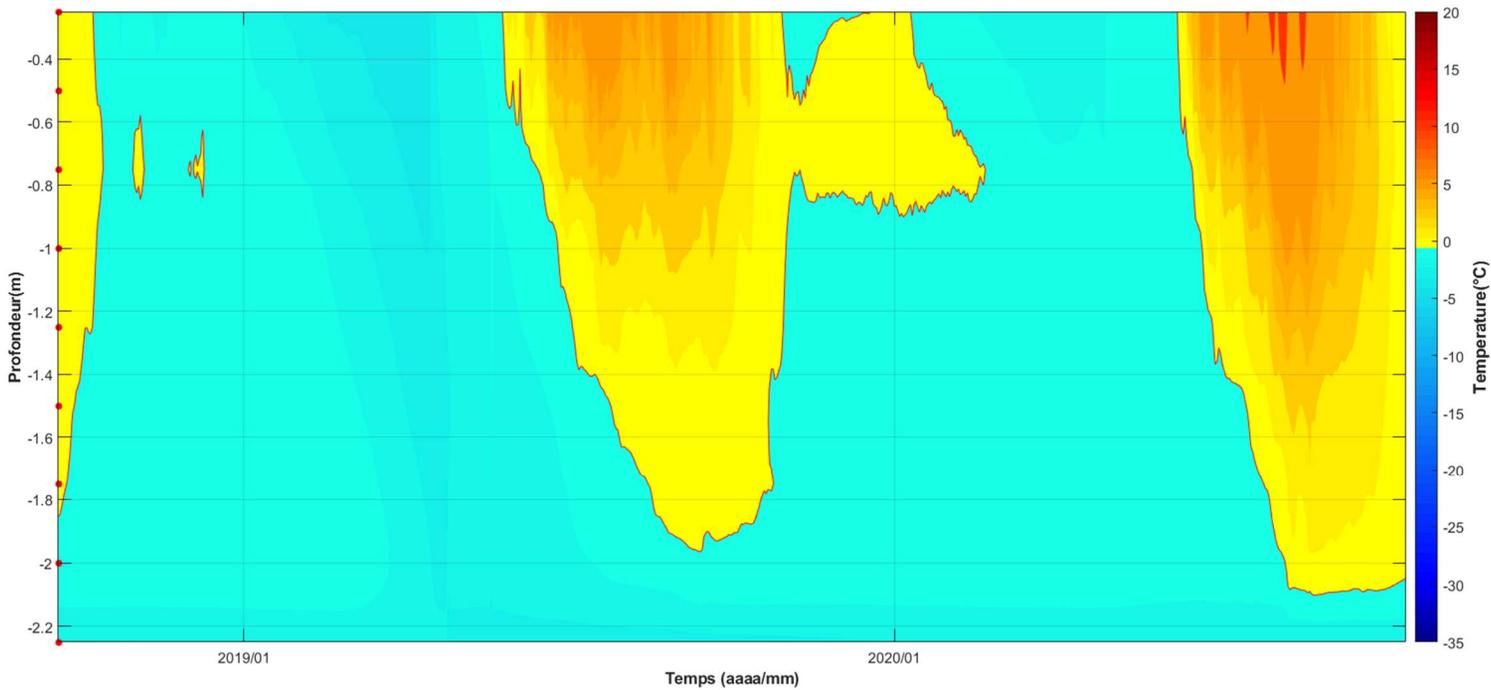




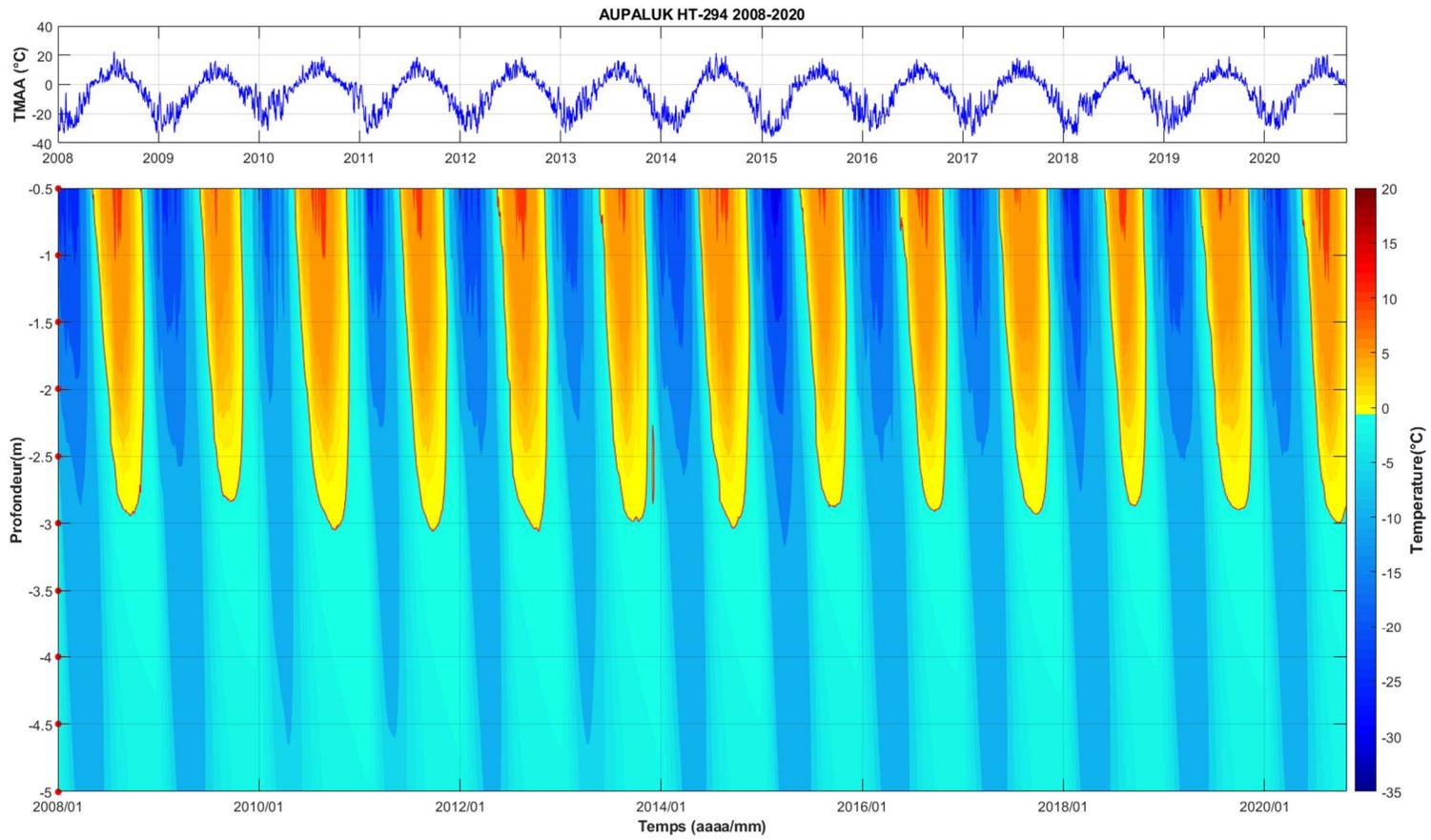
Kangirsuk



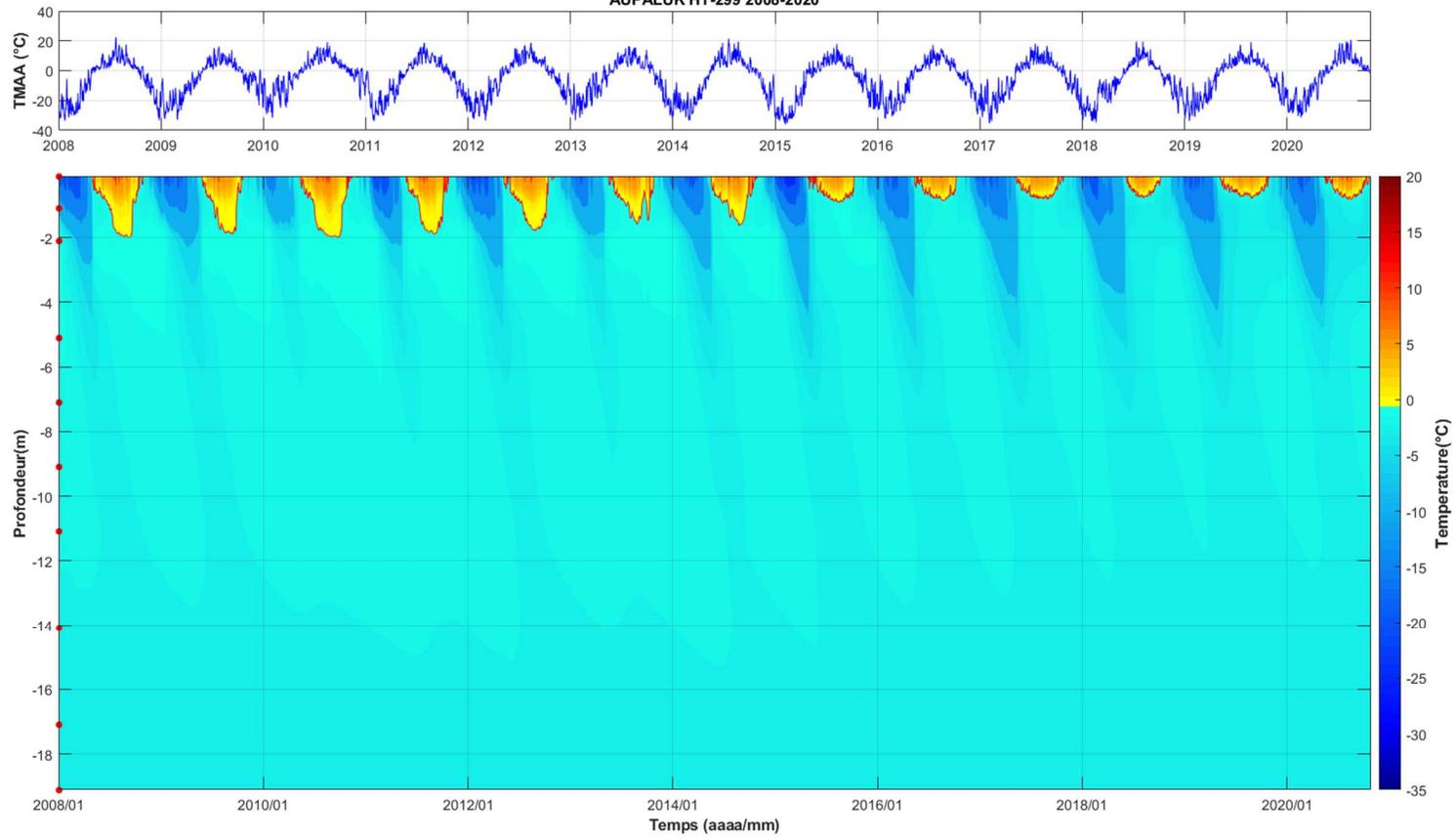
KANGIRSUK KANGIR-F2B 2018-2020



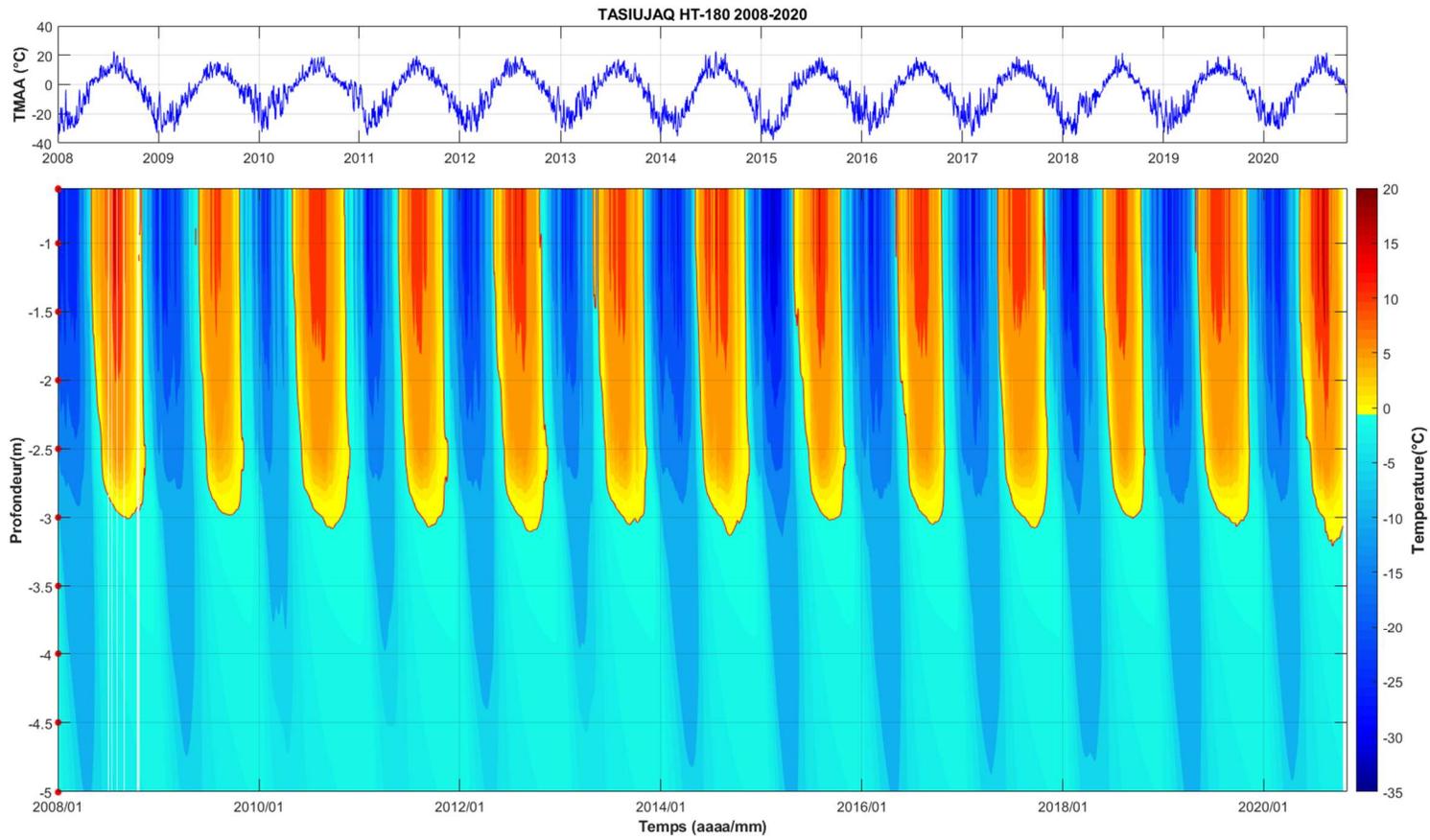
Aupaluk

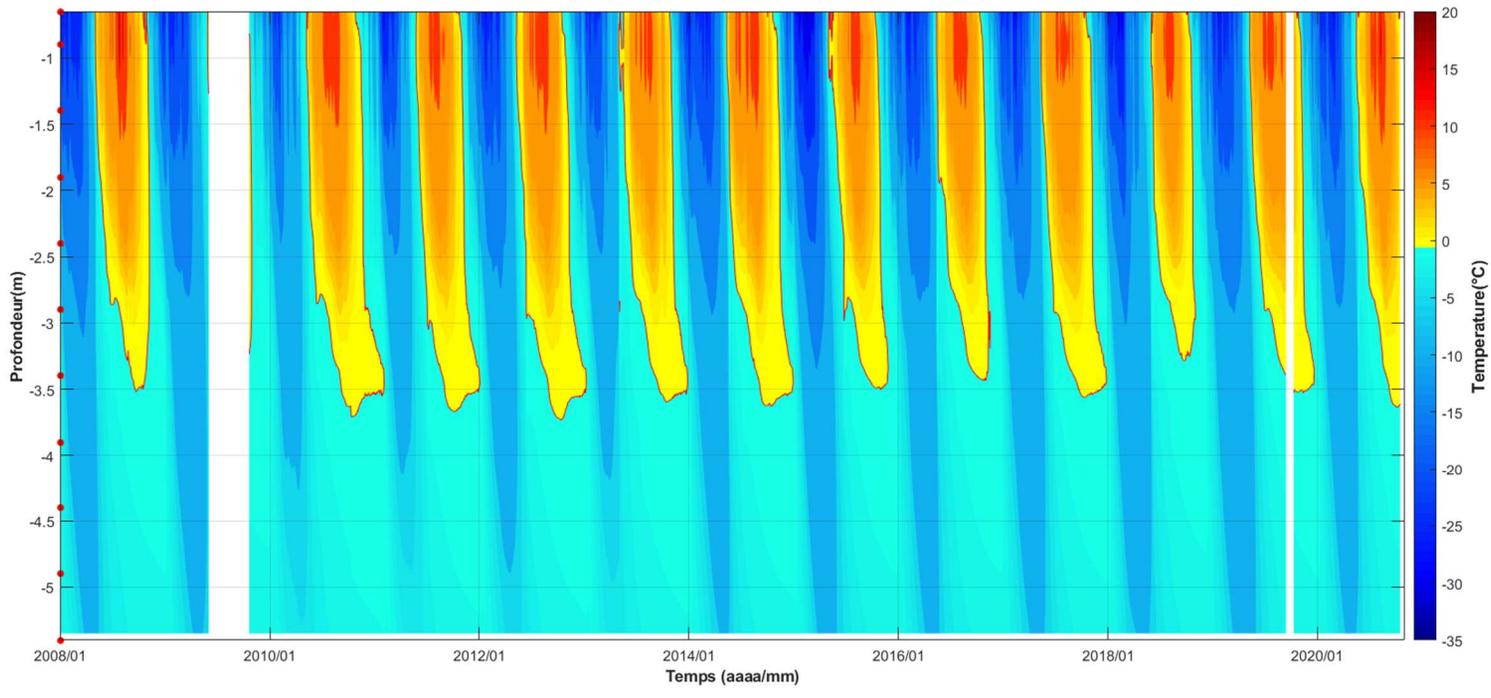
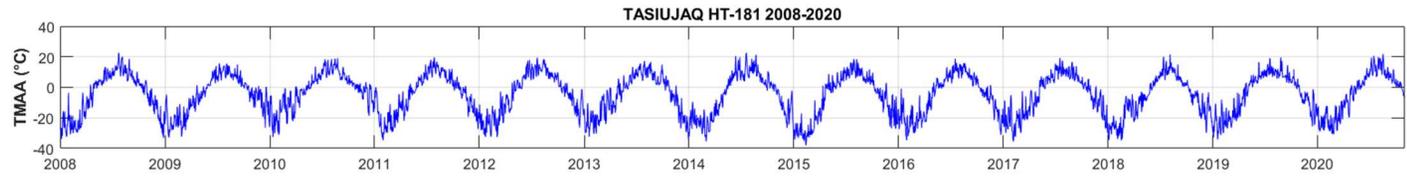


AUPALUK HT-299 2008-2020

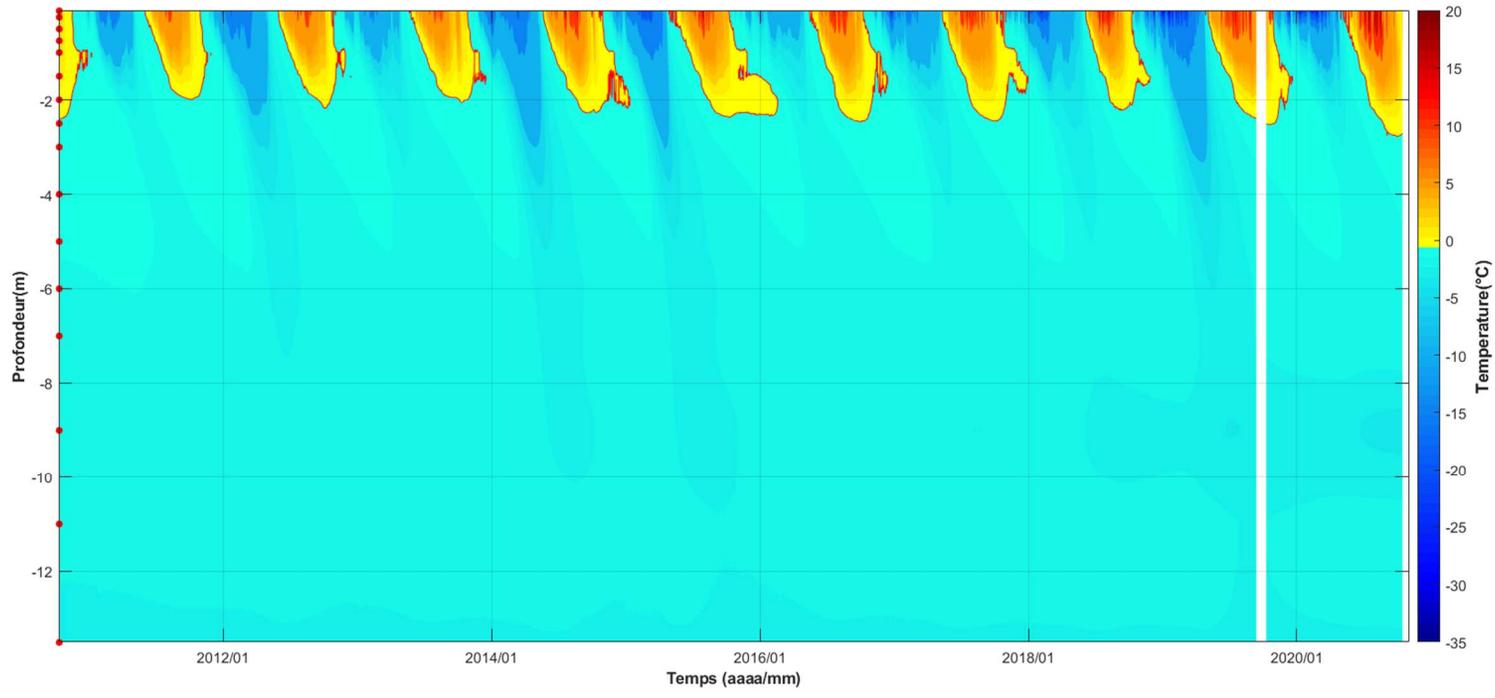


Tasiujaq

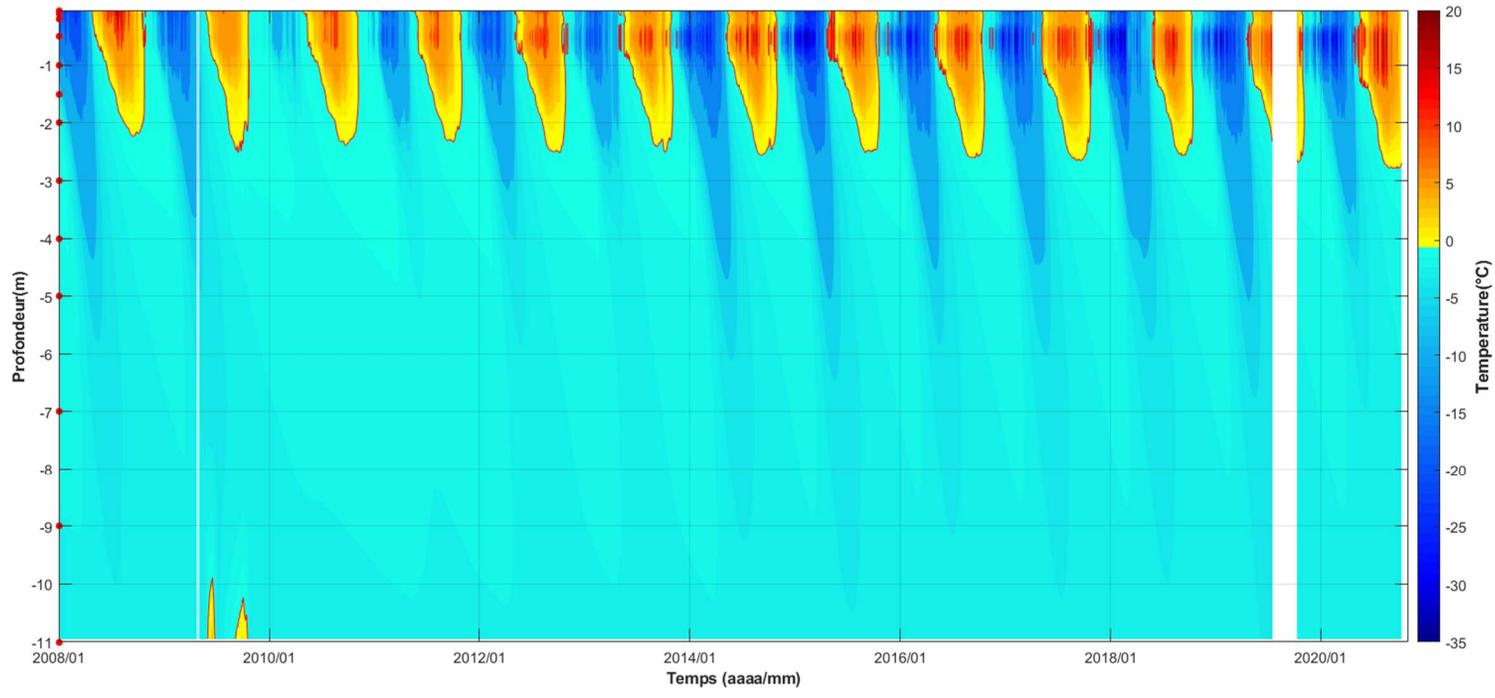
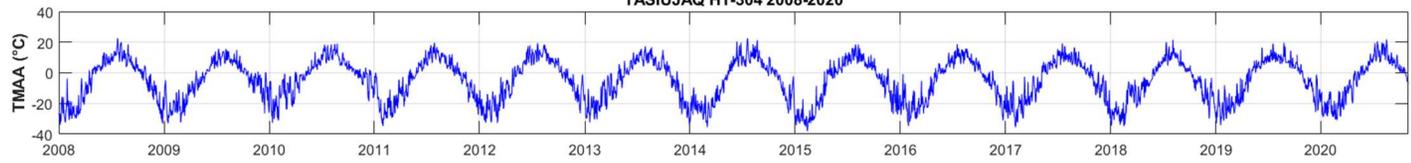




TASIQUAQ TAS-F2 2010-2020



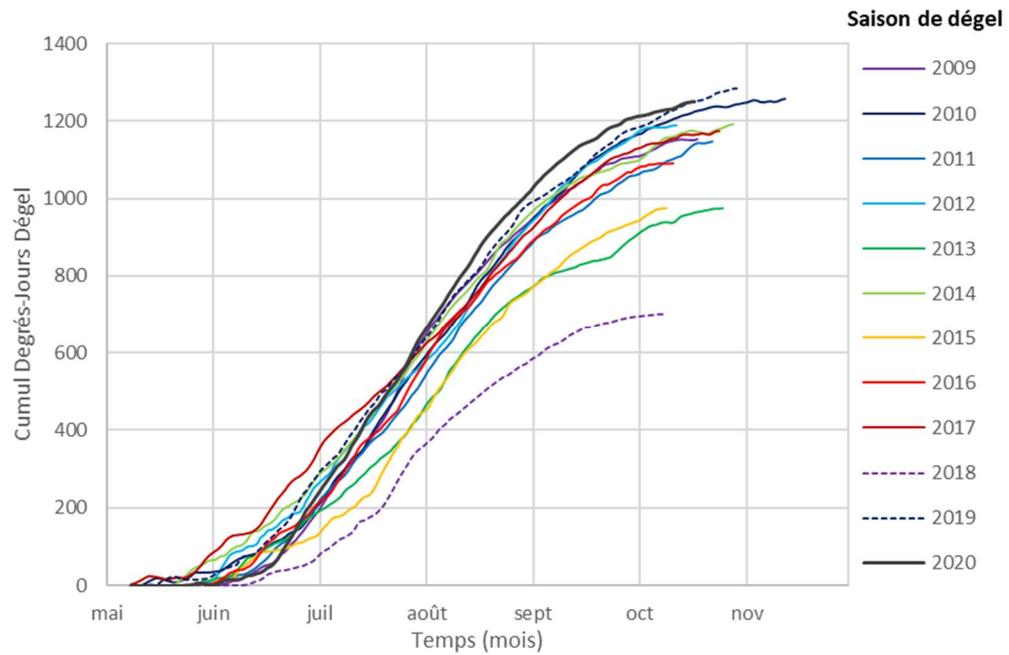
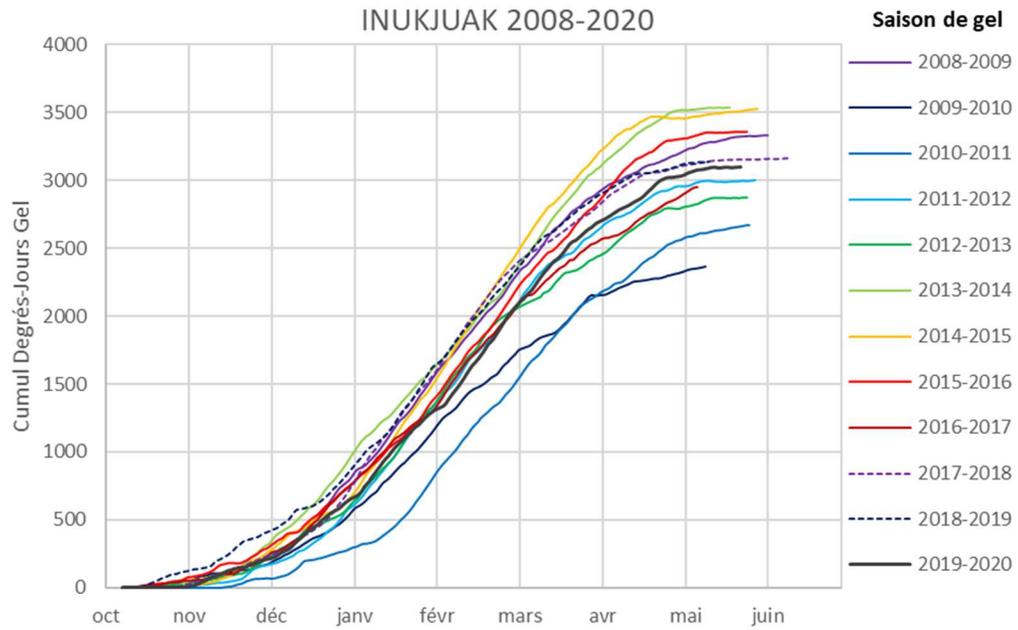
TASIUJAQ HT-304 2008-2020



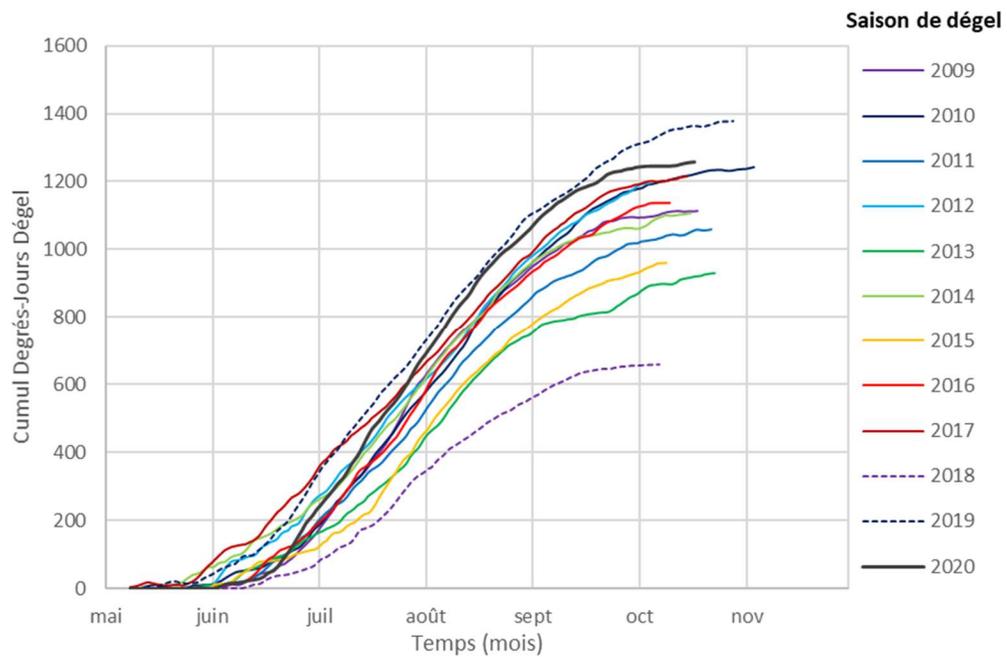
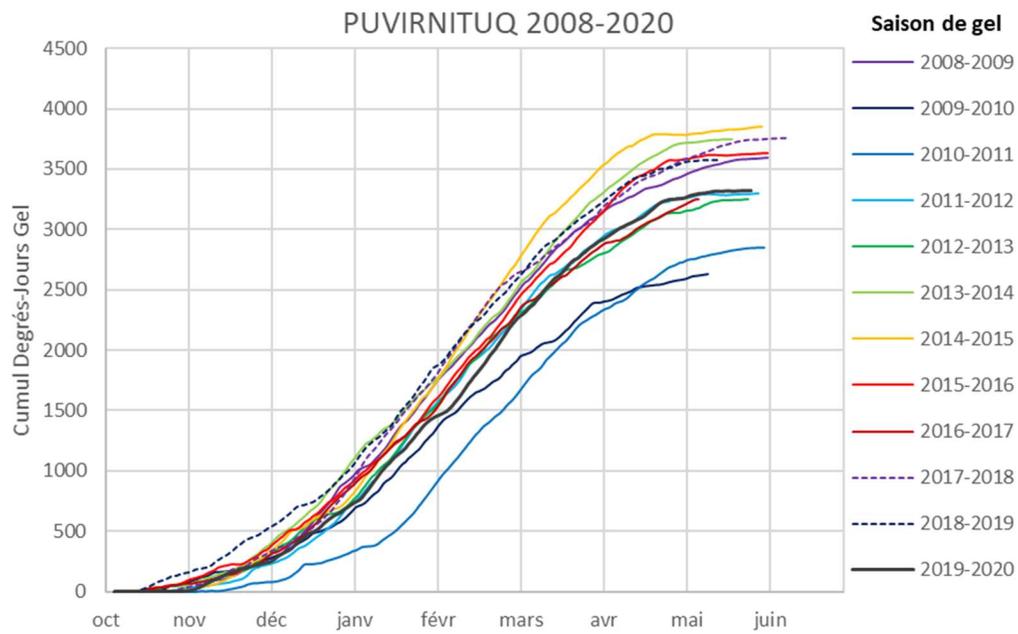
ANNEXE 3

***GRAPHIQUES DU CUMUL DES DEGRÉS-JOURS DE GEL ET DE
DÉGEL ANNUEL PAR VILLAGE POUR LA PÉRIODE DE 2008 À
2020***

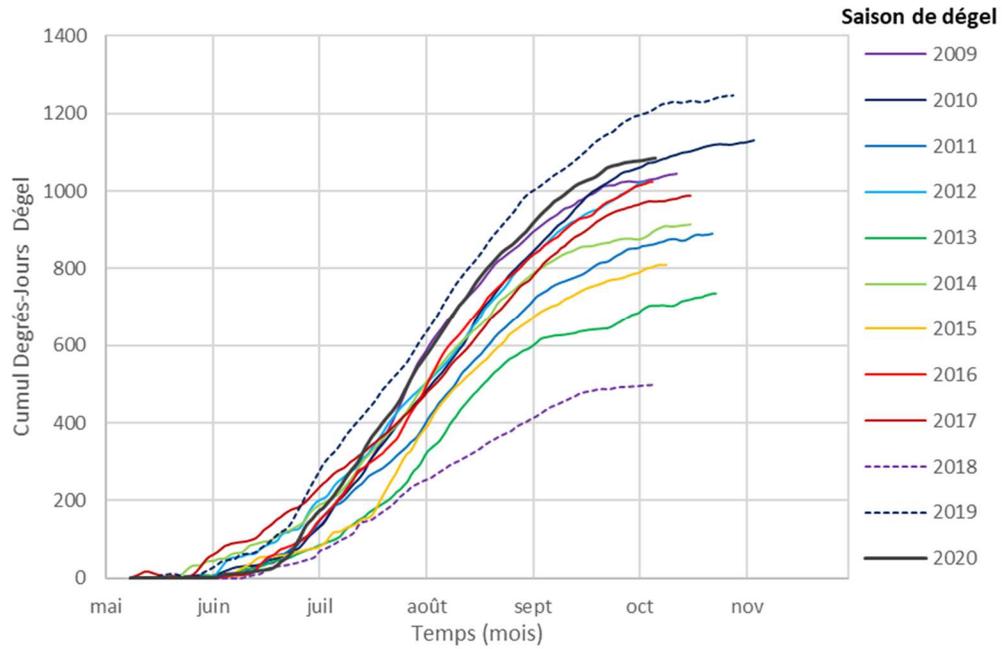
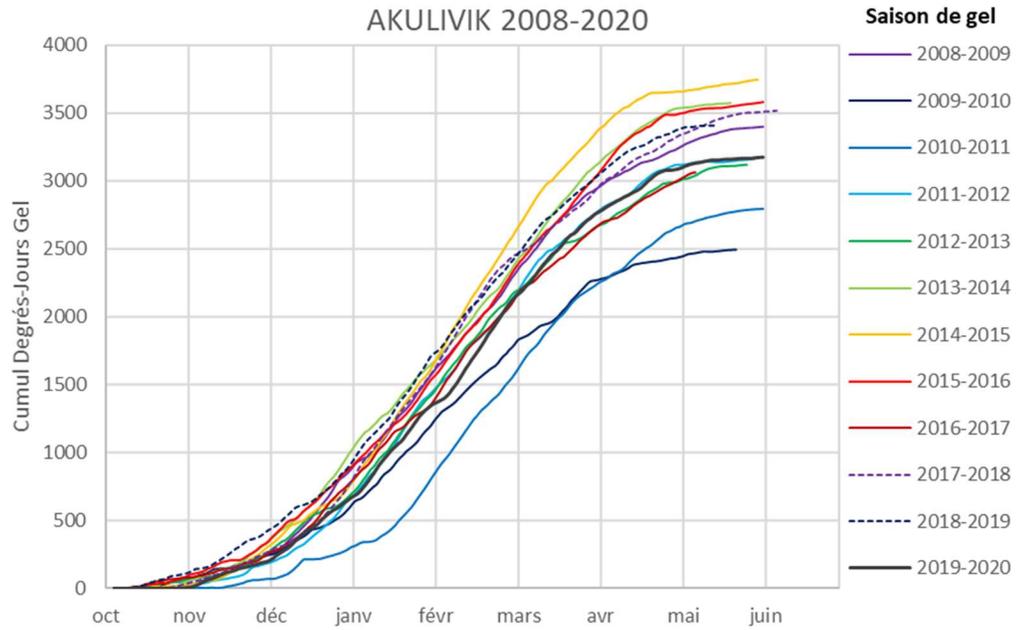
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



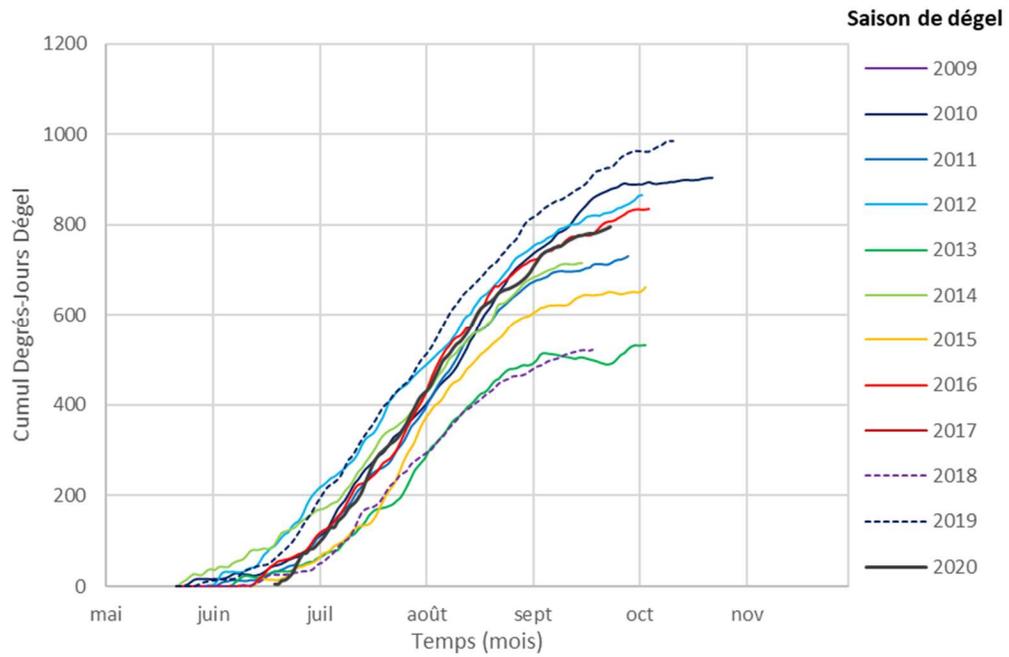
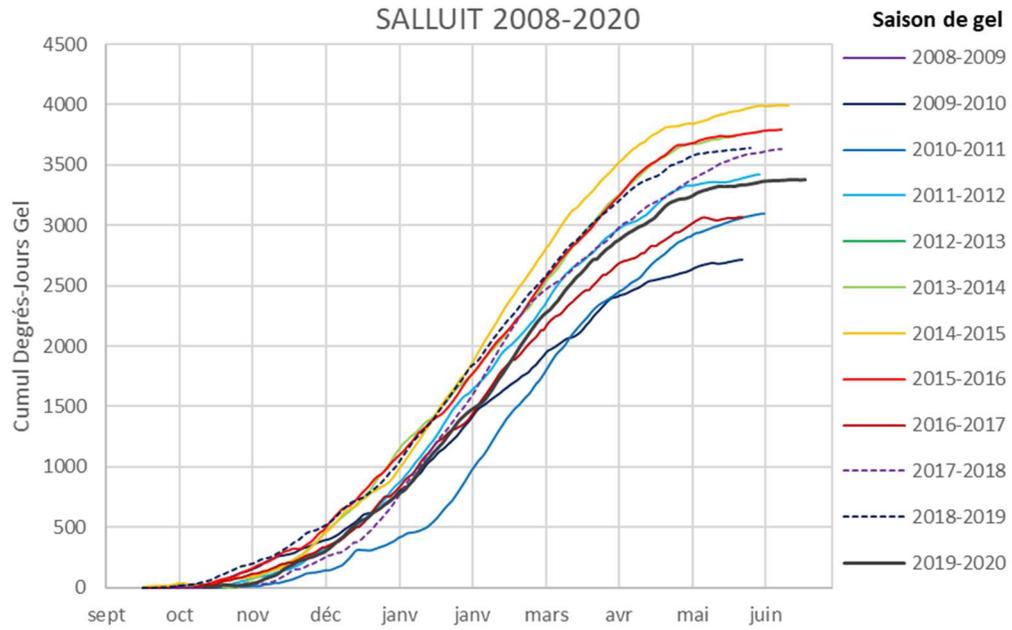
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



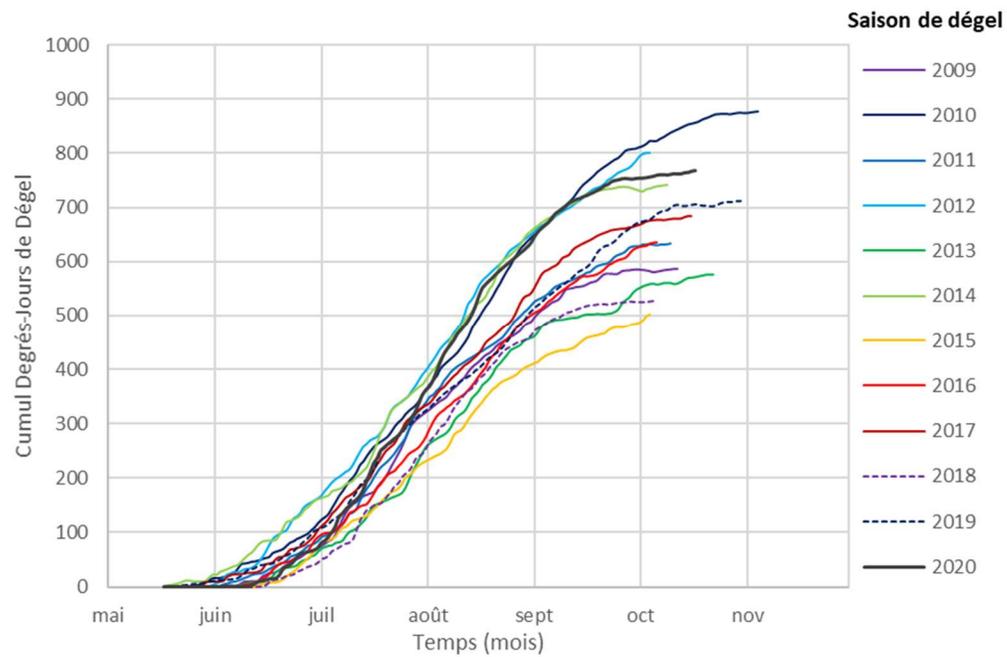
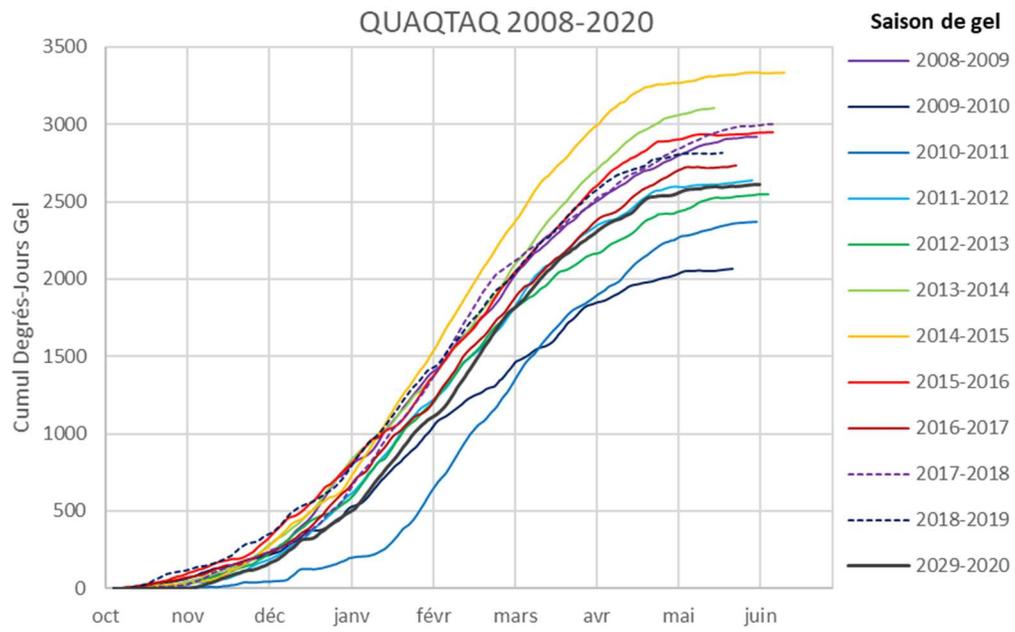
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



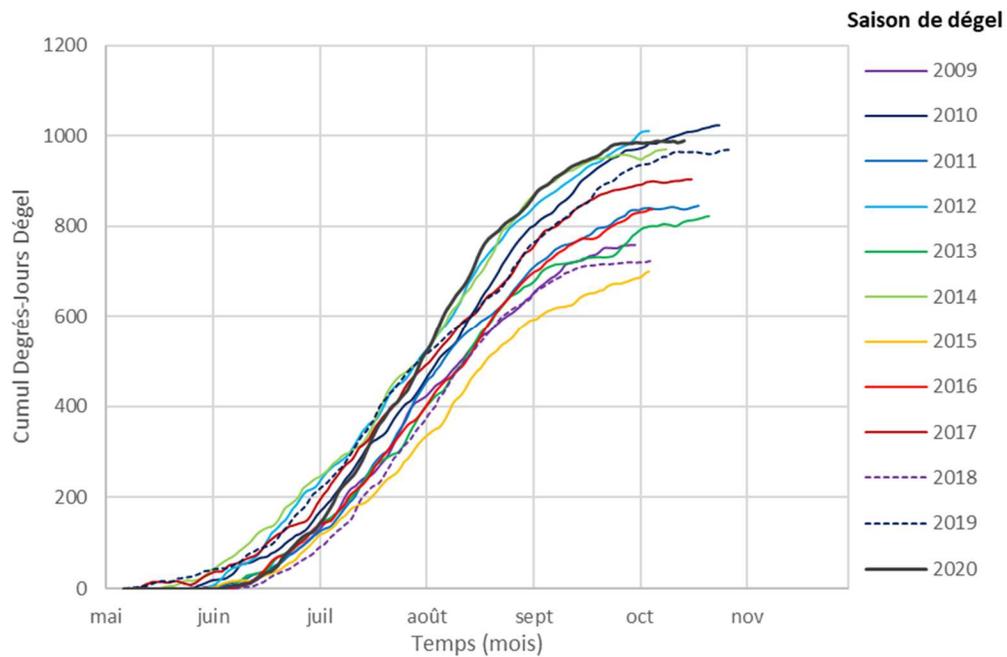
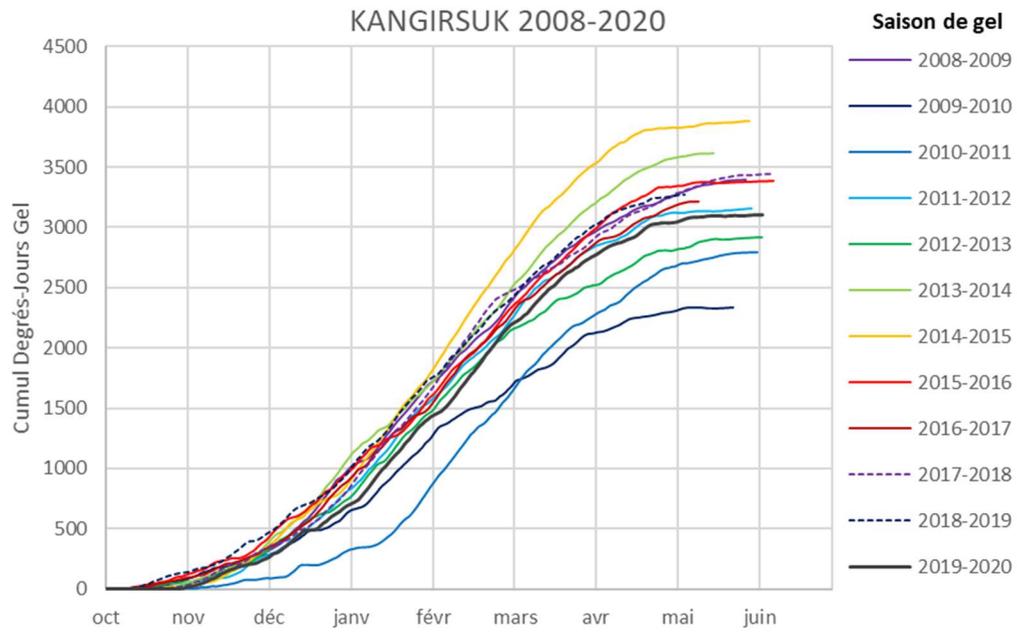
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



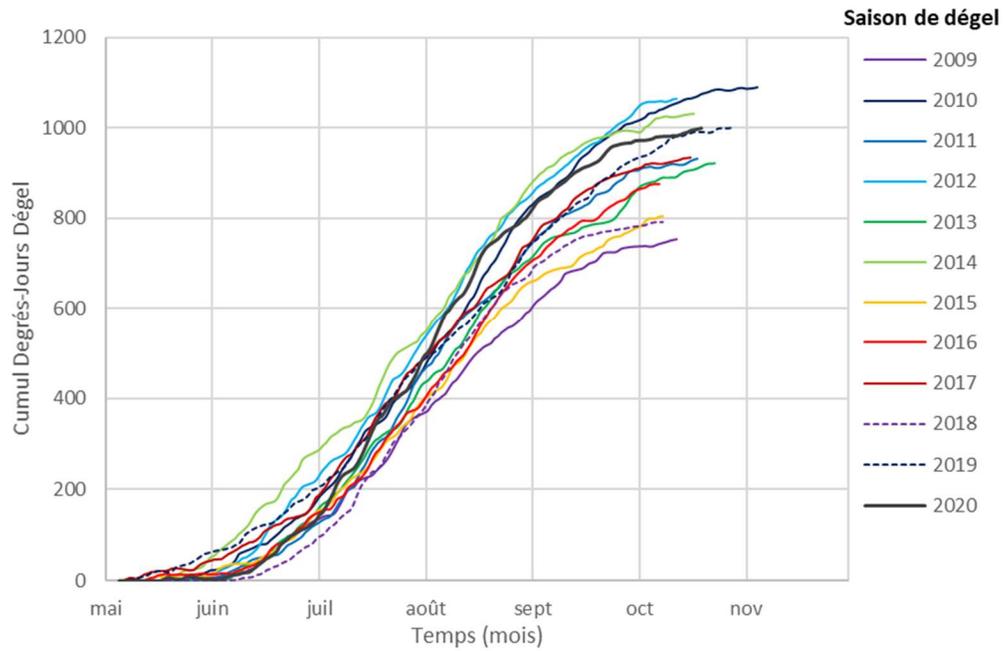
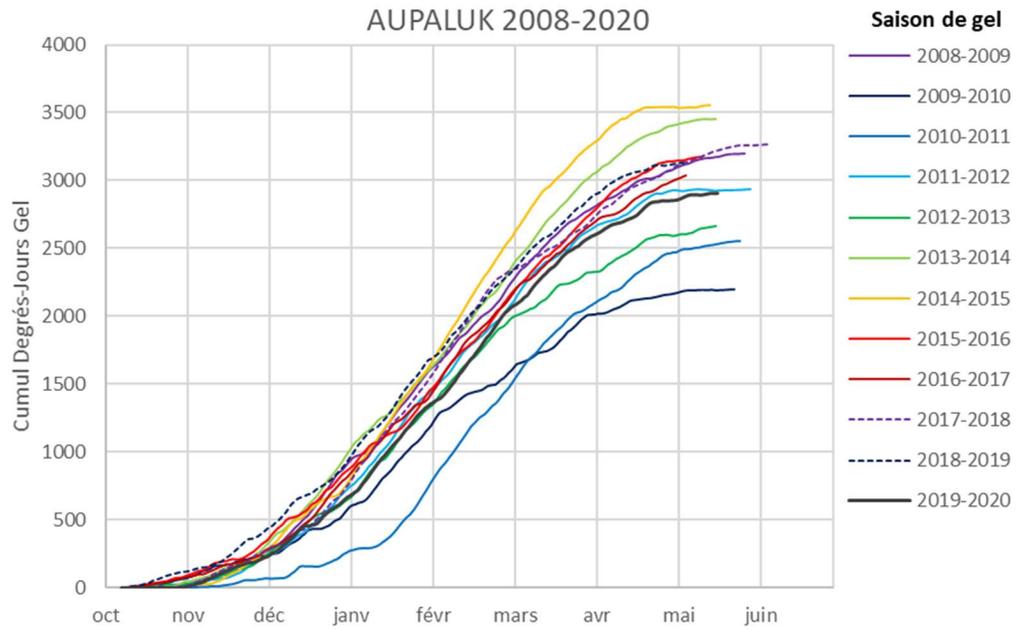
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



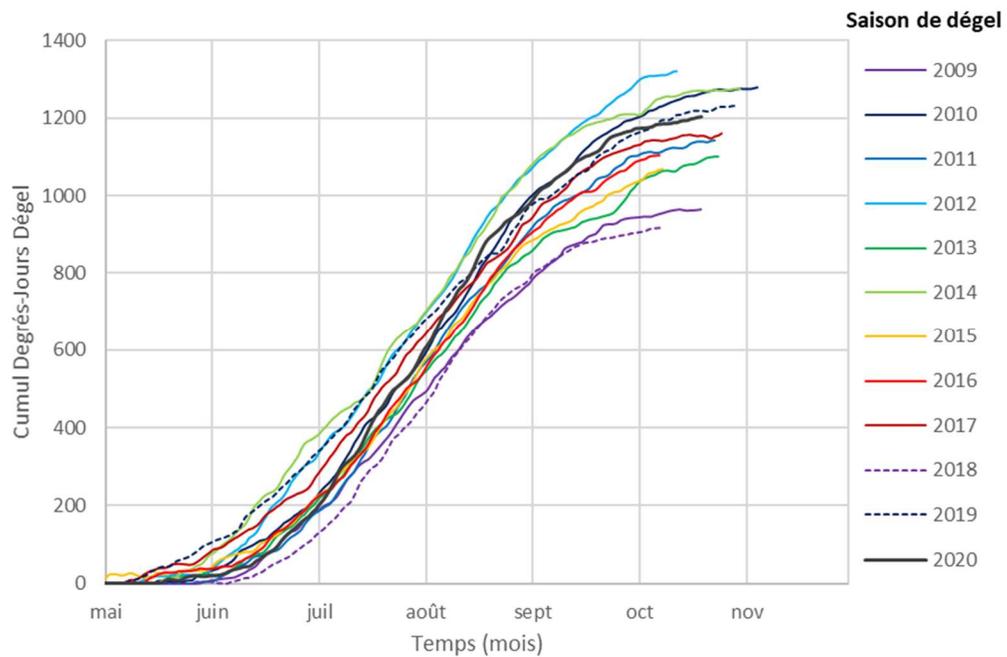
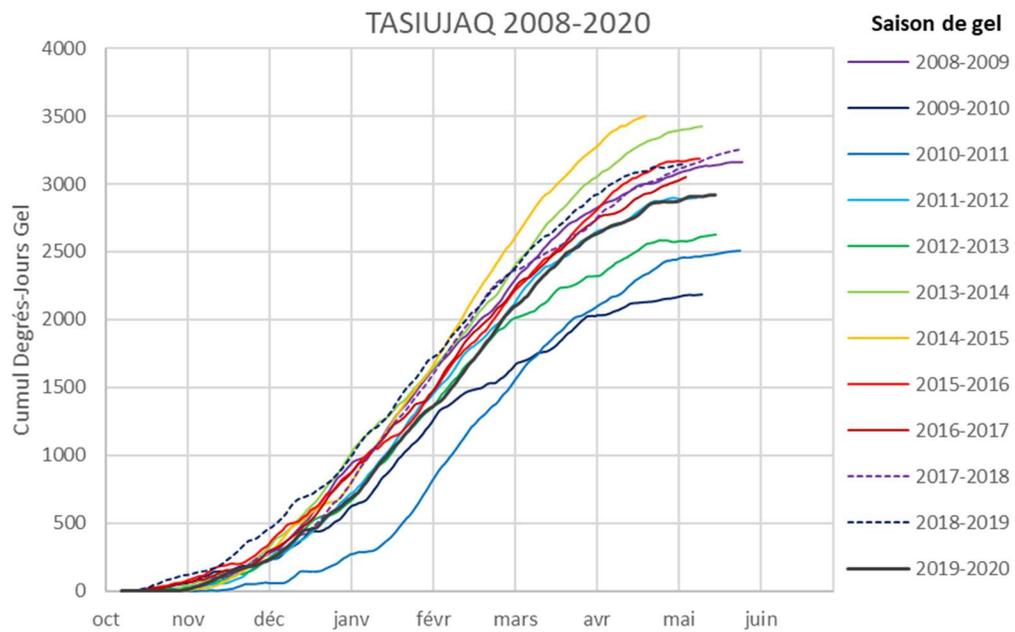
SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



ANNEXE 4

***PROFILS THERMIQUES DES CÂBLES À LECTURE MANUELLE
POUR LA PÉRIODE 2017 À 2020***

SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL ET DES RISQUES POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ AU NUNAVIK DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

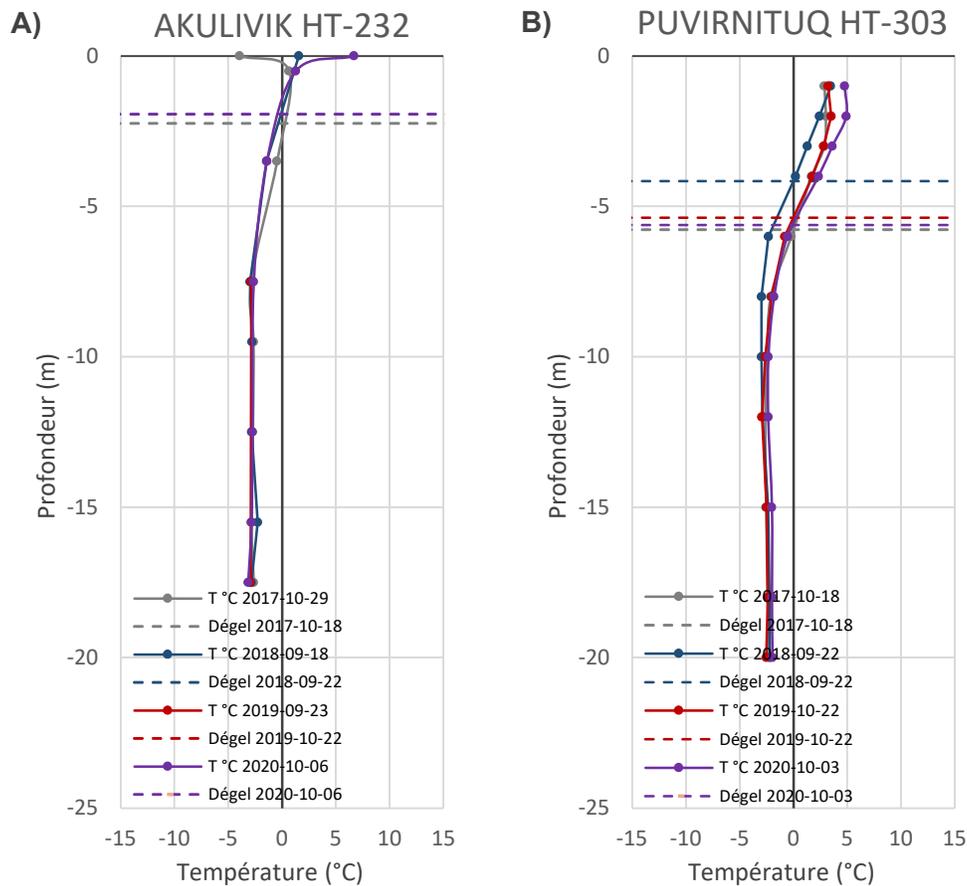


Figure 32 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle A) à l'aéroport de Puvirnituk (HT-303) à environ 100 m du côté est de la piste et à environ 3 m à l'ouest de la route d'accès, en terrain naturel (dans le roc) et B) à l'aéroport d'Akulivik (HT-232) du côté nord de la piste, au chaînage 5+492 m, à environ 43 m de la piste dans les sédiments marins sableux, pour la période de 2017 à 2020.

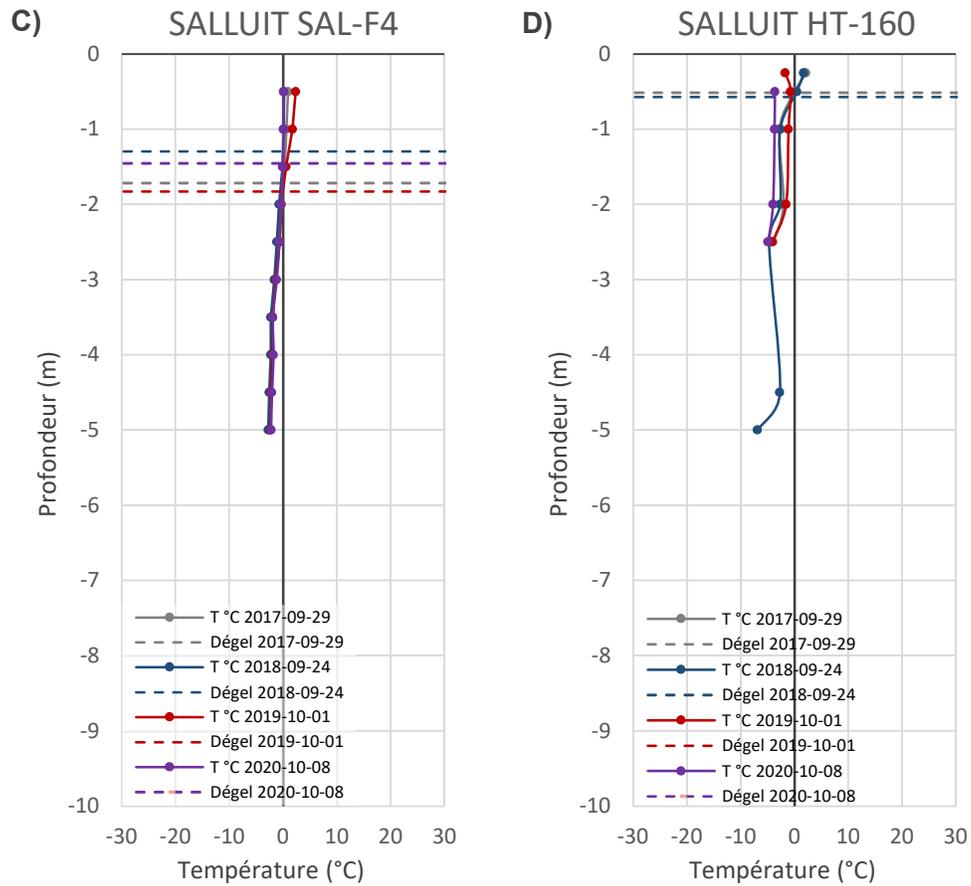


Figure 33 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle à l'aéroport de Salluit C) (SAL-F4) du côté est de la piste, au chaînage 2+185 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai et D) (HT-160) à 25 m de la piste en terrain naturel (till mince sur du roc) au chaînage 2+900 m, pour la période de 2017 à 2020.

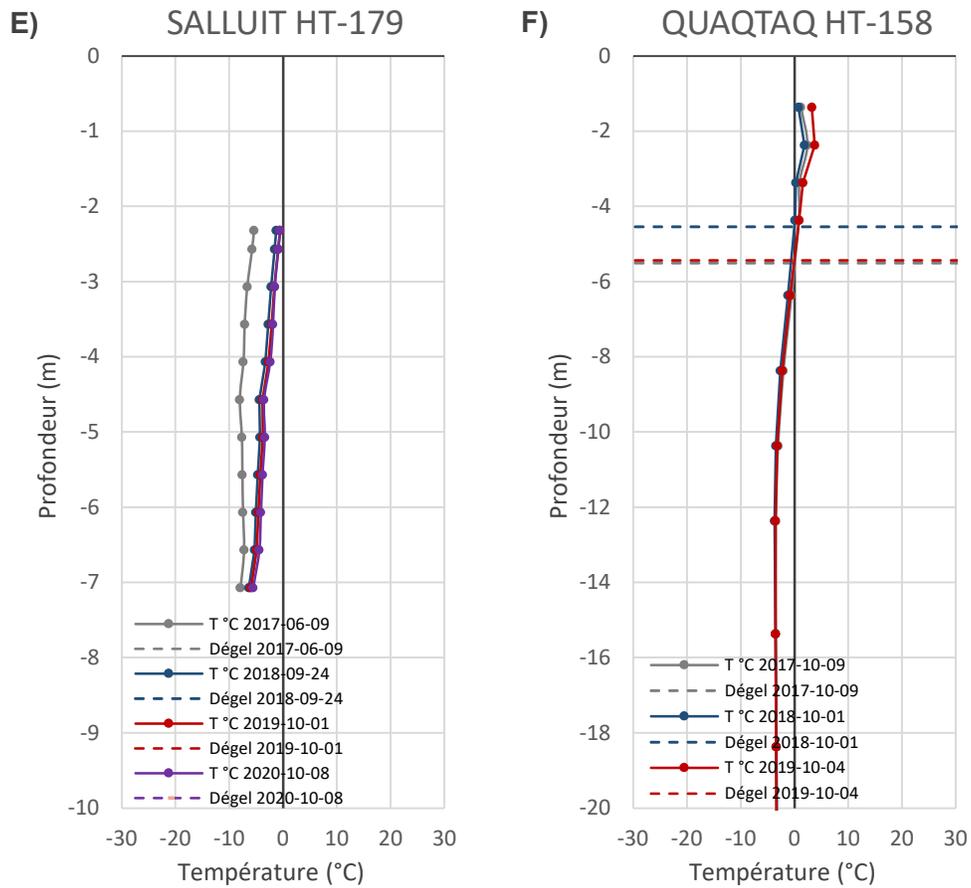


Figure 34 Profils thermiques des câbles à lecture manuelle E) à l'aéroport de Salluit (HT-179) à 10 m du bord dans le remblai de la piste au chaînage 2+900 m, ainsi qu'à F) l'aéroport de Quaqtaq (HT-158) du côté ouest de la piste, dans le roc, à la hauteur du chaînage 1+150 m à 54 m du pied du remblai en terrain naturel, pour la période de 2017 à 2020.