

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

## Salluit

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

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



Novembre 2020

## AVANT-PROPOS

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

Auteurs :

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

### **Citation recommandée (rapport général) :**

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

### **Citation recommandée (par rapport) :**

Allard, M., Mathon-Dufour, V., Chiasson, A., B. St-Amour, A., Aubé-Michaud, S., L’Hérault, E., Bilodeau, S. et Deslauriers, C., (2020). Caractérisation géotechnique et cartographie améliorée du pergélisol dans les communautés nordiques du Nunavik : Salluit. Québec, Centre d’études nordiques, Université Laval. 115 pages.

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

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

# TABLE DES MATIÈRES

<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS.....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>CONTEXTE.....</b>	<b>1</b>
1.2. <b>MANDAT.....</b>	<b>3</b>
1.2.1. <i>Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.1.....</i>	<i>3</i>
1.2.2. <i>Rappel du mandat et des objectifs de la mesure 5.2.2.....</i>	<i>4</i>
<b>2.    MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>6</b>
2.1. <b>MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.1.....</b>	<b>6</b>
2.1.1. <i>Localisation des villages étudiés.....</i>	<i>6</i>
2.1.2. <i>Observations sur le terrain.....</i>	<i>6</i>
2.1.3. <i>Cartographie étendue et révisée des dépôts de surface.....</i>	<i>14</i>
2.1.4. <i>Technologie du géoradar (GPR).....</i>	<i>15</i>
2.1.5. <i>Caractérisations géotechniques des propriétés du pergélisol.....</i>	<i>16</i>
2.1.6. <i>Compilation des informations géoscientifiques et analyses multicritères....</i>	<i>18</i>
2.1.7. <i>Production des cartes de conditions de pergélisol et de contraintes sévères à l'aménagement.....</i>	<i>19</i>
2.1.8. <i>Production des cartes de pentes.....</i>	<i>22</i>
2.1.9. <i>Analyses multicritères et production des cartes indicielles du risque.....</i>	<i>24</i>
2.1.10. <i>Introduction dans l'étude des cartes des aléas naturels.....</i>	<i>30</i>
2.2. <b>MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.2.....</b>	<b>35</b>
2.2.1. <i>Suivi climatique et géothermique dans les villages du Nunavik.....</i>	<i>35</i>
2.2.2. <i>Modélisation géothermique du pergélisol et simulation numérique des variations de l'épaisseur de la couche active.....</i>	<i>38</i>
2.2.3. <i>Projections et simulations.....</i>	<i>39</i>
<b>3.    LE PERGÉLISOL, LES RISQUES NATURELS ET L'AMÉNAGEMENT DE SALLUIT.....</b>	<b>42</b>
3.1. <b>CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS GÉOMORPHOLOGIQUES ET DES PROPRIÉTÉS DU PERGÉLISOL.....</b>	<b>42</b>
3.1.1. <i>Carte de la géologie de surface.....</i>	<i>42</i>
3.1.2. <i>Carte des conditions de pergélisol.....</i>	<i>44</i>
3.1.3. <i>Carte des aléas naturels.....</i>	<i>44</i>
3.1.4. <i>Carte de potentiel de construction.....</i>	<i>45</i>

3.2. RÉGIME THERMIQUE ACTUEL DU PERGÉLISOL ET ANALYSES PRÉDICTIVES EN FONCTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	46
3.2.1. <i>Climat et pergélisol</i> .....	46
3.2.2. <i>Analyses prédictives du régime thermique du pergélisol (par câbles)</i> .....	55
3.2.3. <i>Projections et simulations climatiques</i> .....	69
<b>4. FAITS SAILLANTS .....</b>	<b>85</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>87</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>91</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>92</b>
A. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE GÉORADAR.....	93
<b>CARTES DE LA COMMUNAUTÉ.....</b>	<b>102</b>
CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE .....	103
CARTE DES CONDITIONS DE PERGÉLISOL .....	105
CARTE DE POTENTIEL DE CONSTRUCTION .....	107
CARTE DES ALÉAS NATURELS ACTUELS ET APPRÉHENDÉS.....	109
<b>PLANCHES SYNTHÈSES .....</b>	<b>111</b>
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ DE SALLUIT .....	112
PLANCHE SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET CLIMATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ DE SALLUIT - CARTES SYNTHÈSES .....	114

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Carte de distribution du pergélisol et localisation des communautés au Nunavik (modifiée de L'Hérault et Allard, 2018).....	8
<b>Figure 2</b> : Répartition des conditions géocryologiques au Nunavik (adapté de L'Hérault et al., 2017 et L'Hérault et Allard, 2018).....	9
<b>Figure 3</b> : Rencontre avec les responsables locaux de la communauté d'Akulivik, août 2018.....	13
<b>Figure 4</b> : Enregistrement de levés de géoradar sur les routes de la communauté d'Akulivik, août 2018.....	13
<b>Figure 5</b> : Diagramme synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées dans l'analyse matricielle en vue de produire des cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes (tirée de L'Hérault et al., 2013). .....	18
<b>Figure 6</b> : Informations géoscientifiques utilisées pour la construction des cartes de conditions du pergélisol pour la communauté d'Inukjuak. Tiré de Carbonneau et al. (2015). .....	21
<b>Figure 7</b> : Carte des contraintes sévères à l'aménagement pour la communauté d'Inukjuak. La couleur rouge identifie les endroits non constructibles, à savoir le littoral marin, les zones intertidales, les plaines alluviales actuelles, les berges de lacs et les ruisseaux. ....	22
<b>Figure 8</b> : A) Orthomosaïque générée à partir des photographies aériennes prises en 2010. B) MNE de 2010 de faible résolution (4 m x 4 m) disponible pour la zone en périphérie du milieu bâti. C) Superposition du MNE haute résolution (1 m x 1 m) produit à partir des données LIDAR de 2010 sur le MNE faible résolution (zone bleue). D) Comblerment des zones non couvertes par les deux MNE de 2010 (zone bleue et rose) avec le MNE haute résolution (1 m x 1 m) de 2002 produit par procédé photogrammétrique. E) MNE mixte qui couvre la totalité de la superficie de la nouvelle carte des dépôts de surface et des conditions du pergélisol (cadre rouge). Carte de relief ombragé (F) et carte des pentes (G) produites à partir du MNE mixte. Tiré de L'Hérault et al. (2013).....	23
<b>Figure 9</b> : Structure et pondération de l'information géospatiale à l'intérieur de l'équation matricielle utilisée pour calculer l'indice de risque. Tiré de Carbonneau et al. 2015.....	28
<b>Figure 10</b> : Détermination du niveau de risque par l'intermédiaire de huit catégories de critères.....	32
<b>Figure 11</b> : Matrice de risque accompagnée de ses légendes.....	33
<b>Figure 12</b> : Légende des cartes des aléas naturels actuels et appréhendés dans les villages du Nunavik.....	34
<b>Figure 13</b> : Comparaison d'une année climatique, formée du couplet des saisons de gel et de dégel, et d'une année calendaire, du 1 <sup>er</sup> janvier au 31 décembre, en fonction du temps (Allard et al., 2018 – adapté de Mathon-Dufour, 2014). ....	38
<b>Figure 14</b> : Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29) pour la sous-région du Nord-du-Québec (tiré de Ouranos, 2015).....	40
<b>Figure 15</b> : Simulations retenues par Ouranos et utilisées par le CEN, sauf le modèle HadGEM2 (encadré en rouge), car leur calendrier comprime les données sur 360 jours	41
<b>Figure 16</b> : Localisation des forages ainsi que des levés de géoradar réalisés à l'été 2019 dans le village de Salluit. ....	43

<b>Figure 17</b> : a) Précipitations journalières totales d’octobre 2014 à août 2018 et b, c, d, e : précipitations totales mensuelles par année climatique de 2014 à 2018. Les zones en gris indiquent des manques dans les séries d’environnement Canada.....	48
<b>Figure 18</b> : Direction et vitesse des vents à la station SILA dans la vallée de Salluit de 2002 à 2018.....	49
<b>Figure 19</b> : Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel enregistré aux câbles à thermistances, en fonction des dépôts de surface (indiqués entre parenthèses), à Salluit pour la période de 1987 à 2018.....	51
<b>Figure 20</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps au câble SILA, localisé dans le till dans la vallée de Salluit pour la période de 2002 à 2016. La période en gris correspond à la construction d’un remblai au-dessus du câble pour le stationnement du garage municipal en 2010 et b) enveloppe des températures minimales, maximales et moyenne annuelle 2015-2016 enregistrée au câble SILA localisé dans le till dans la vallée de Salluit. * Les données de l’année 2015-2016, dernière disponible pour le câble SILA, sont incomplètes.....	51
<b>Figure 21</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2003 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017, ainsi que le maximum atteint par le dégel, enregistré au câble HT-154, localisé dans le roc à l’aéroport de Salluit. ....	52
<b>Figure 22</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2002 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP2, localisé dans l’argile dans le village de Salluit. ....	52
<b>Figure 23</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP1-V2, localisé dans les colluvions dans village de Salluit. ....	53
<b>Figure 24</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP4-V2, localisé dans les argiles, dans le secteur résidentiel Salluit 2. ....	53
<b>Figure 25</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2006 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2017, enregistré au câble SALGLIS, localisé dans les argiles de la vallée de Salluit, près du secteur résidentiel Salluit 2. ....	54
<b>Figure 26</b> : a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FS26-V2, localisé dans l’argile, sous une route pavée du village de Salluit.....	54
<b>Figure 27</b> : Température moyenne annuelle de l’air (TMAA) simulée à partir de 10 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5 moyens d’augmentation de gaz à effet de serre pour Salluit de 1950 à 2100. ....	55
<b>Figure 28</b> : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) températures de départ pour le câble à thermistances FP-2, localisé dans les argiles marines dans le village de Salluit. ....	59

<b>Figure 29</b> : a) Maillage, B) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques de départ réel et modélisé (calibration de départ) au câble FP-3, localisé dans le till dans la vallée de Salluit. Le câble est identifié comme étant SILA (Till). .....	61
<b>Figure 30</b> : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux au câble FP4, localisé dans des silts et argiles, à Salluit.....	63
<b>Figure 31</b> : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux au câble SALGLIS, localisé dans des argiles marines, à Salluit. ....	65
<b>Figure 32</b> : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux du modèle FP-26, localisé dans des argiles marines, sous une route pavée à Salluit. ....	67
<b>Figure 33</b> : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP2 de 2018 à 2100. ....	69
<b>Figure 34</b> : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL_FP2. ....	70
<b>Figure 35</b> : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP2. ....	71
<b>Figure 36</b> : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP3 de 2018 à 2100. ....	72
<b>Figure 37</b> : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL_FP3. ....	73
<b>Figure 38</b> : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP3. ....	74
<b>Figure 39</b> : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP4 de 2018 à 2100. ....	75
<b>Figure 40</b> : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL_FP4. ....	76
<b>Figure 41</b> : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP4. ....	77

**Figure 42** : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP4 de 2018 à 2100. .... 78

**Figure 43** : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SALGLIS. .... 79

**Figure 44** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SalGLIS. .... 80

**Figure 45** : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP-26 de 2018 à 2100. .... 81

**Figure 46** : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL\_FP-26. .... 82

**Figure 47** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle FP-26. .... 83

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Calendrier des travaux de terrain réalisés au cours des étés 2017 et 2018. ..	10
<b>Tableau 2</b> : Tableau synthèse des travaux de terrain réalisés aux étés 2017 et 2018 .....	12
<b>Tableau 3</b> : Indice de sensibilité au tassement et valeurs de pentes critiques selon les conditions de pergélisol. Tiré de Carbonneau et al. (2015). .....	25
<b>Tableau 4</b> : Classification du potentiel à la construction selon la valeur de l'indice de risque. Tiré de Carbonneau et al. 2015. ....	28
<b>Tableau 5</b> : Corrélations générales entre les unités géologiques de surface et les conditions de pergélisol au Québec nordique accompagnées des types de fondations adaptés et la valeur de pente critique pour chacune des classes. ....	29
<b>Tableau 6</b> : Liste des sites de mesures sélectionnés, du type de données, de la couverture temporelle des données disponibles et du type de matériel géologique dans lequel se retrouvent les câbles à thermistances pour les 13 communautés du Nunavik. ....	35
<b>Tableau 7</b> : Caractéristiques principales de chaque scénario RCP (tiré de Ouranos, 2015, adapté de Rogelt et al., 2012). ....	40
<b>Tableau 8</b> : Grille d'analyse des contraintes au développement de la communauté de Salluit (Tiré de Aubé-Michaud et al., 2019). ....	45
<b>Tableau 9</b> : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station SILA, localisée dans la vallée de Salluit, pour la période de 2002 à 2018. ....	47
<b>Tableau 10</b> : Précipitations annuelles en pluie, neige et totales pour le village de Salluit, de 2014 à 2018 (gouvernement du Canada, 2018). Les valeurs de précipitations sont calculées sous forme de neige (équivalent en cm) lorsque la température de l'air est en dessous de 0°C et sous forme de pluie (mm) lorsque la température de l'air est supérieure à 0°C. ....	49
<b>Tableau 11</b> : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble FP-2, localisé dans les argiles marines dans le village de Salluit. ....	60
<b>Tableau 12</b> : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble FP-3. ..	62
<b>Tableau 13</b> : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble FP4. ..	64
<b>Tableau 14</b> : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble.....	66
<b>Tableau 15</b> : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble SAL-FP-26.....	68

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

**ARK** : Administration régionale Kativik

**CEN** : Centre d'études nordiques

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

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

**GES** : Gaz à effet de serre

**GIEC** : Groupe international d'étude sur le climat

**GPR** : Géoradar

**ICP** : Indice de contrainte des pentes

**IST** : Indice de sensibilité attribué au tassement

**MAMH** : Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation

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

**MERN** : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

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

**MNE** : Modèle numérique d'élévation

**MSP** : Ministère de la Sécurité publique du Québec

**MTQ** : Ministère des Transports du Québec

**RCP** : Representative Concentration Pathways

**SHQ** : Société d'habitation du Québec

**SIG** : Système d'information géographique

# INTRODUCTION

## 1.1. CONTEXTE

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

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

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

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

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

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

## 1.2. MANDAT

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

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

Les objectifs spécifiques du projet sont :

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

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

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

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

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

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

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

#### Les objectifs spécifiques initiaux du projet sont :

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

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

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

#### Changements d'approche en cours de réalisation des mandats

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

## 2. MÉTHODOLOGIE

### 2.1. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.1

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

#### 2.1.1. Localisation des villages étudiés

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

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

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

#### 2.1.2. Observations sur le terrain

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

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

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

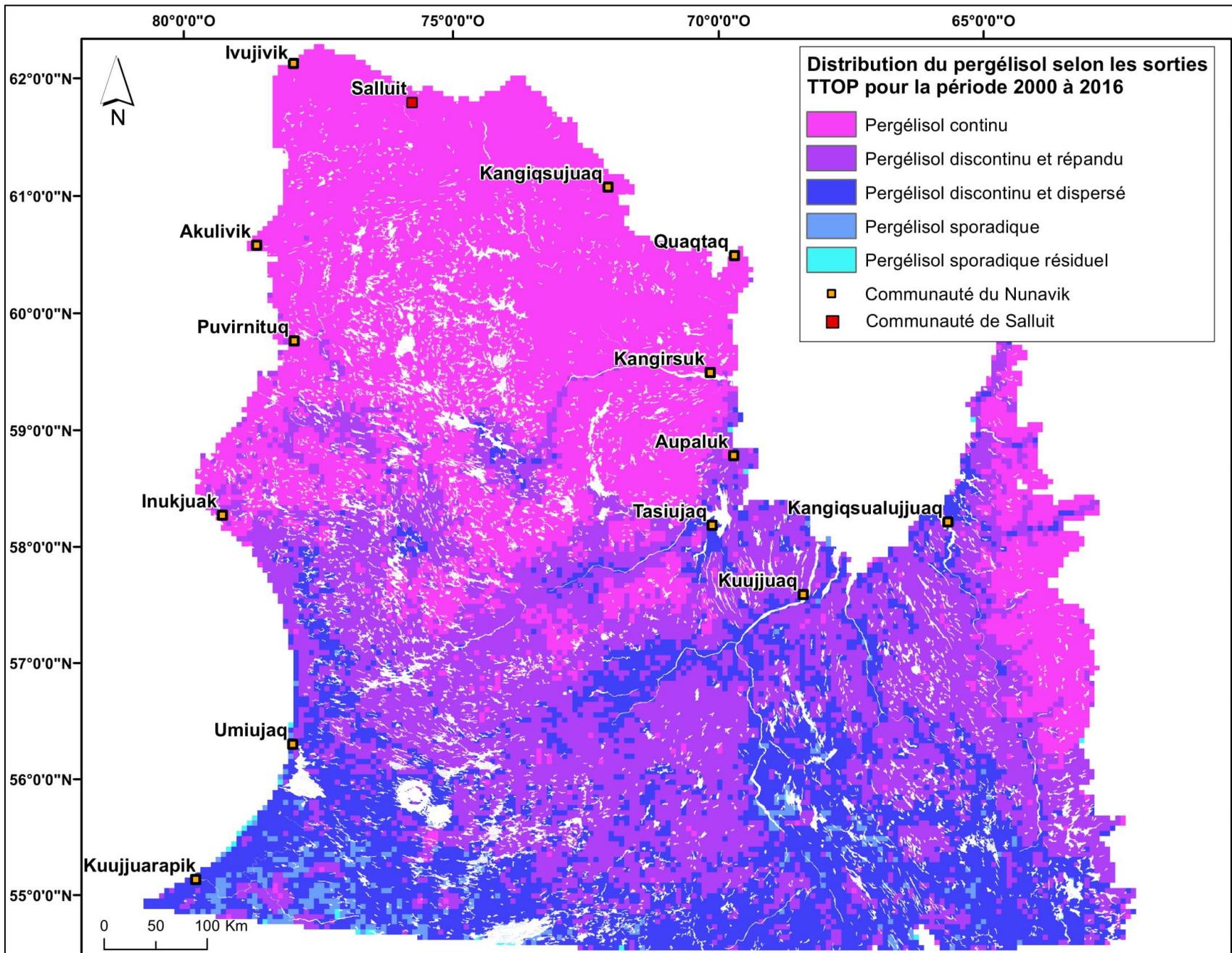
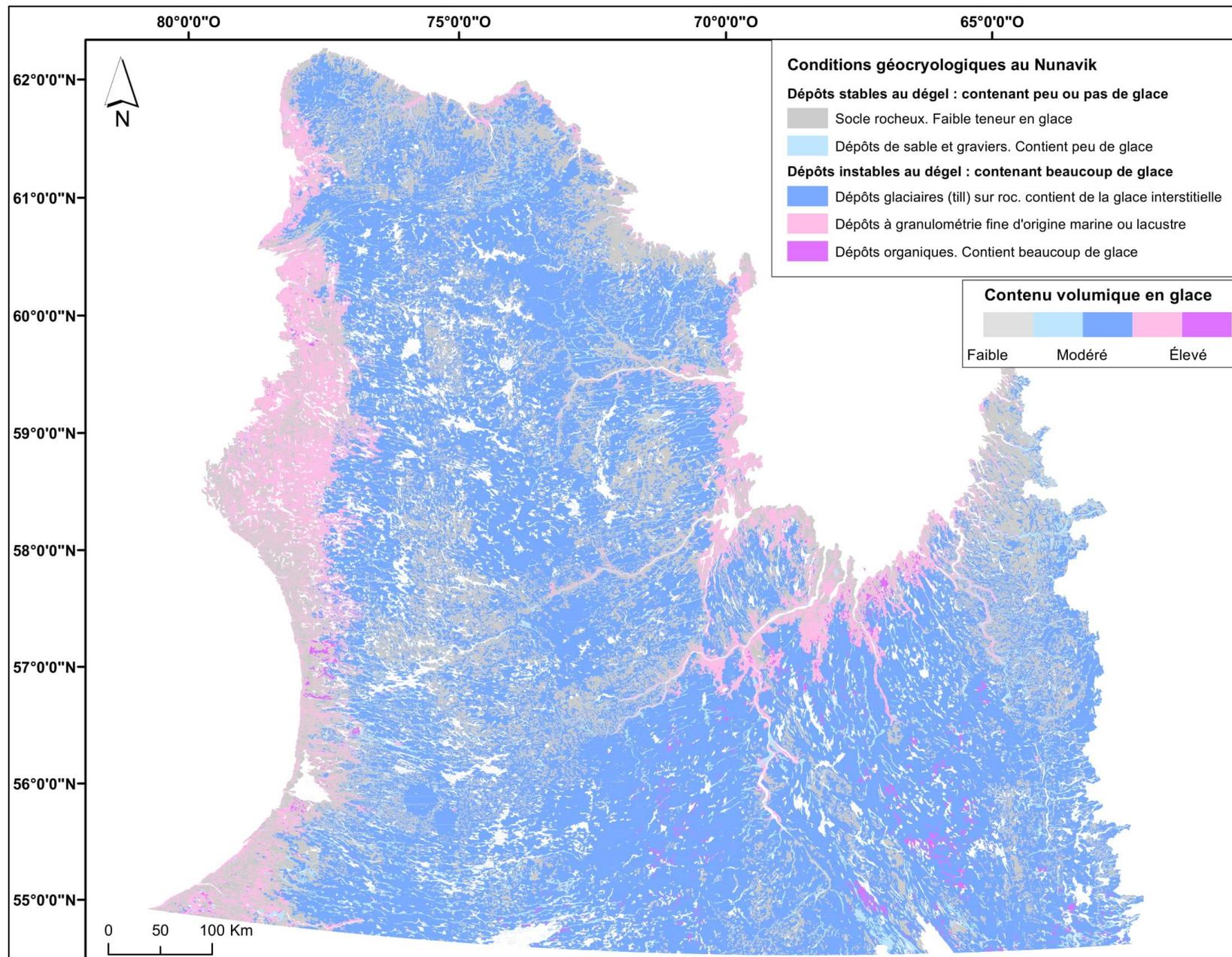


Figure 1 : Carte de distribution du pergélisol et localisation des communautés au Nunavik (modifiée de L'Hérault et Allard, 2018).



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

### 2.1.3. Cartographie étendue et révisée des dépôts de surface

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

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

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

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

#### 2.1.4. Technologie du géoradar (GPR)

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

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

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

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

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

#### 2.1.5. Caractérisations géotechniques des propriétés du pergélisol

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

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

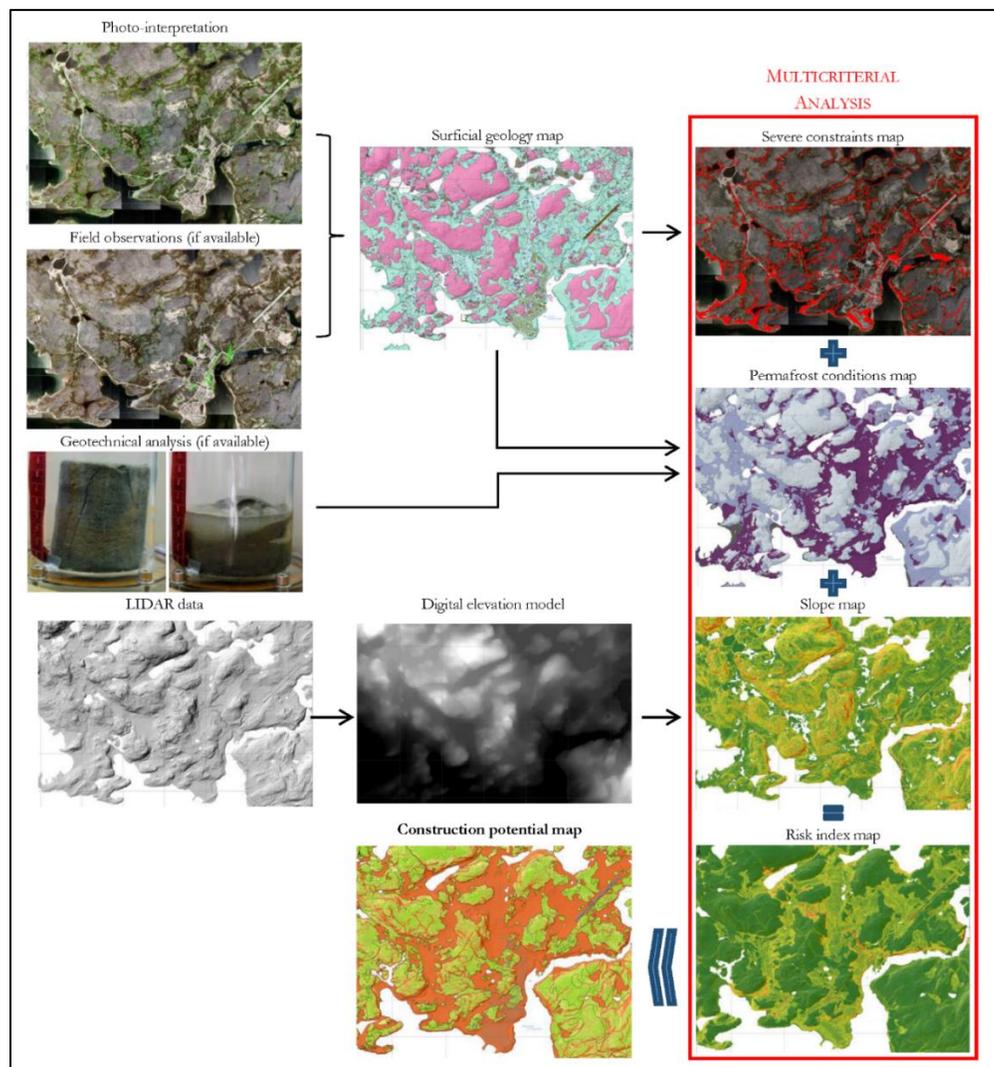
l'orientation des bulles d'air, indicatrices du sens des flux thermiques dans le sol; 3) le type de sédiment; et 4) la présence de matière organique. Ces observations permettent également de noter la profondeur des discontinuités (s'il y a lieu) correspondantes aux limites entre les couches cryostratigraphiques.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

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

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

### 2.1.6. Compilation des informations géoscientifiques et analyses multicritères

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



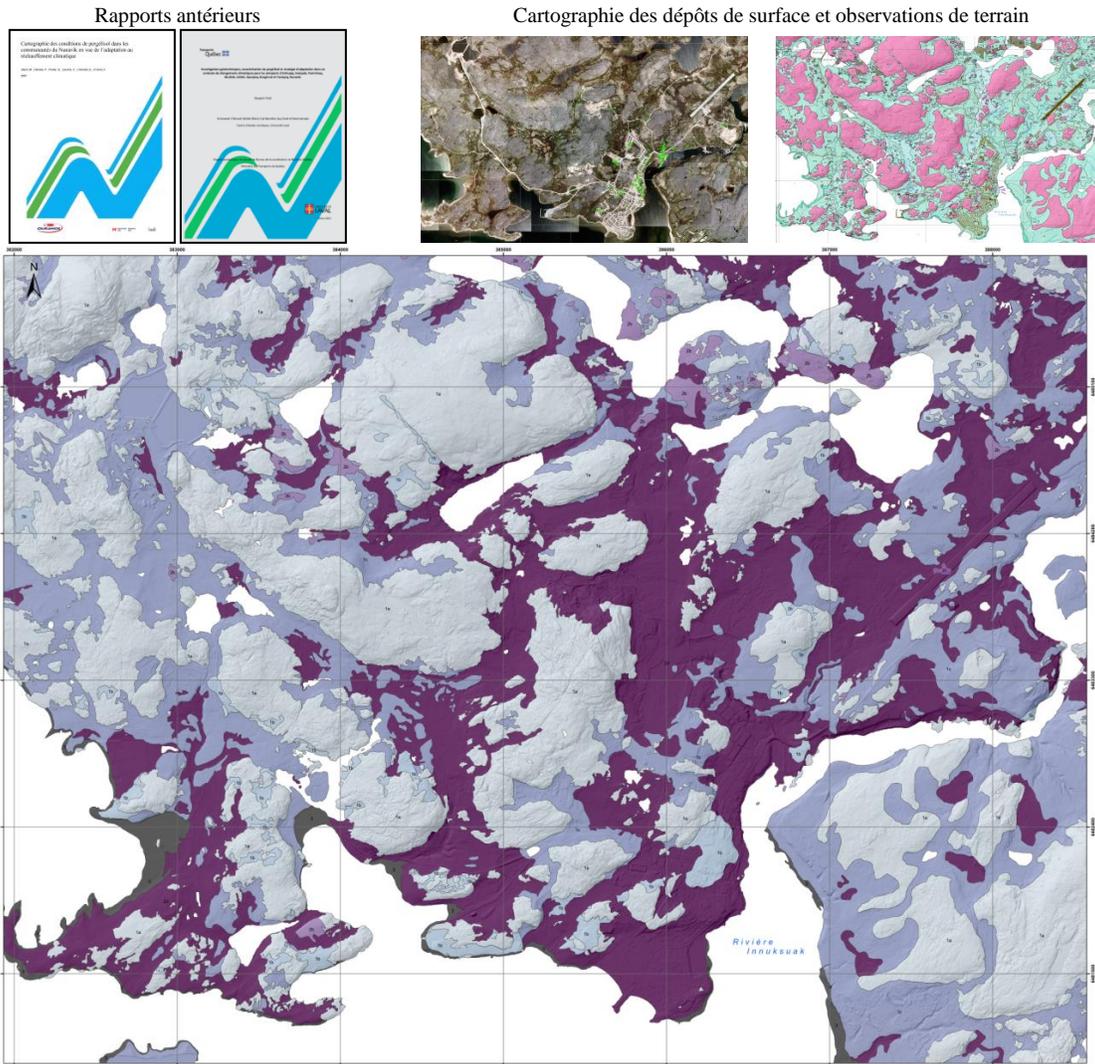
**Figure 5** : Diagramme synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées dans l'analyse matricielle en vue de produire des cartes de potentiel de construction selon les conditions de pergélisol et les pentes (tirée de L'Hérault *et al.*, 2013).

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

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

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

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



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

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

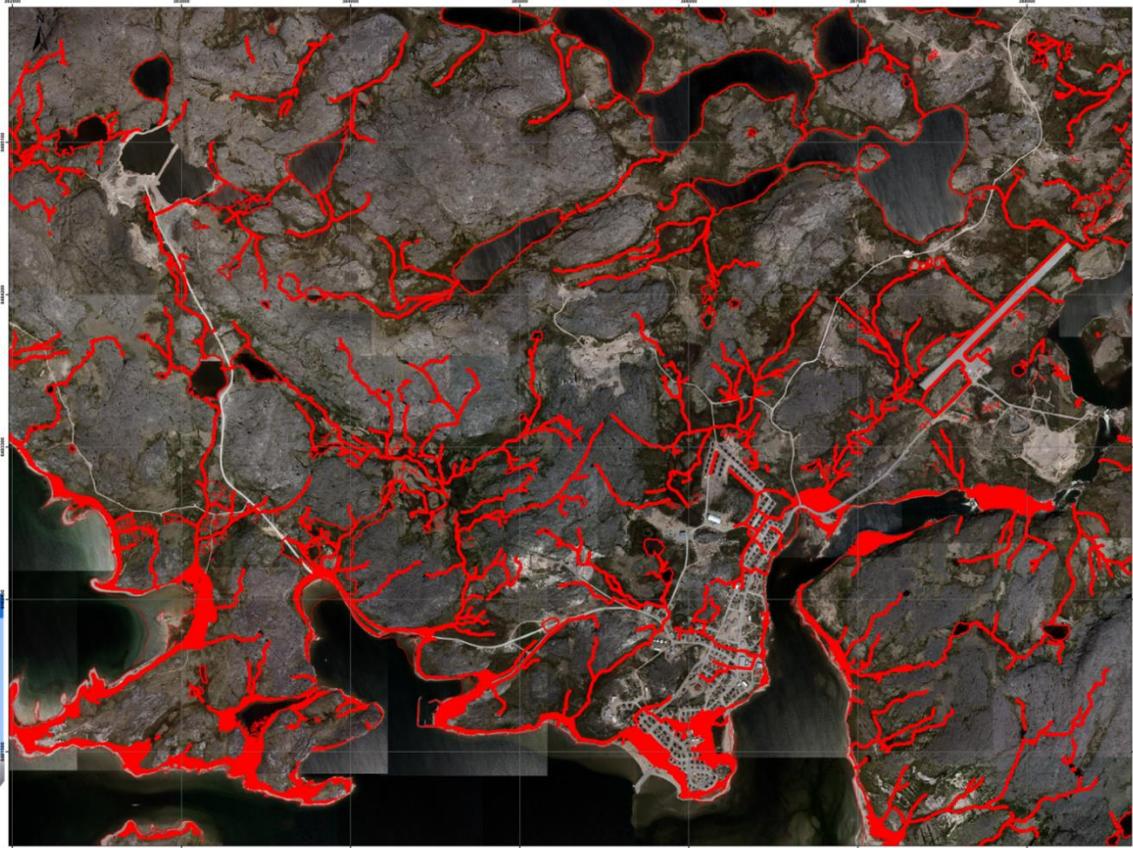
**Dépôts instables au dégel : Dépôts meubles contenant beaucoup de glace**

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

**Contraintes sévères**

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

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

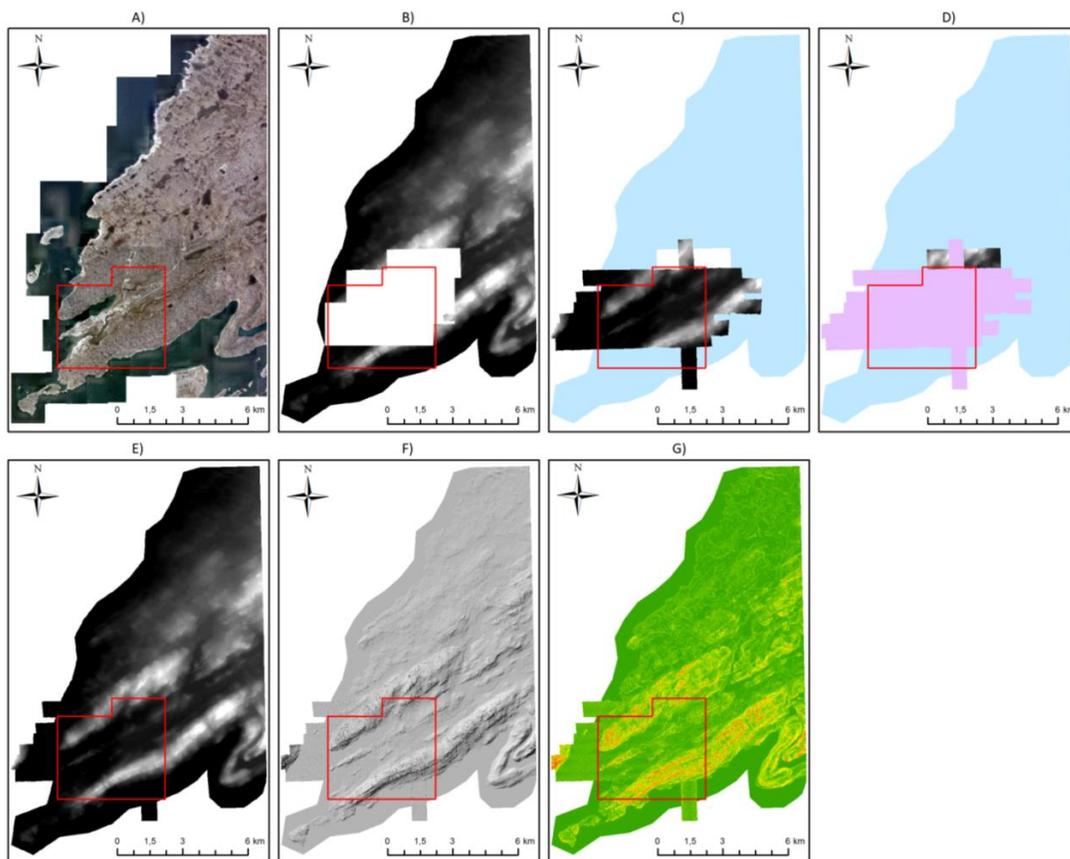


**Figure 7** : Carte des contraintes sévères à l'aménagement pour la communauté d'Inukjuak. La couleur rouge identifie les endroits non constructibles, à savoir le littoral marin, les zones intertidales, les plaines alluviales actuelles, les berges de lacs et les ruisseaux.

#### 2.1.8. Production des cartes de pentes

À l'automne 2010, le MTQ, le MAMH et le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) ont fait l'acquisition de photographies aériennes et de levés LIDAR aéroportés pour la production d'orthophotographies (**Figure 8A**) et de modèles numériques d'altitude dans les 14 villages du Nord-du-Québec. La couverture des données LIDAR se limite au milieu bâti des communautés. Conséquemment, la création d'un modèle numérique d'élévation (MNE) étendu qui couvre la superficie des nouvelles cartes de dépôts de surface (s'étendant au-delà du milieu bâti des communautés) a nécessité la manipulation de plusieurs sources de données d'élévation d'une précision et d'une résolution différentes. Pour les zones non bâties en périphérie des communautés, des MNE d'une résolution initiale de quatre mètres et ré-échantillonnée au mètre ont été utilisés (**Figure 8B**). Par la suite, pour les zones bâties des communautés, des MNE ont été générés à partir des levés LIDAR, dont la précision altimétrique et géographique est inférieure à 10 cm et la résolution supérieure à 1 point/m<sup>2</sup>. Les données LIDAR ont fait l'objet d'une série de traitements pour éliminer les erreurs et les points de mesure redondants afin de produire des MNE de grande qualité sous forme de grille d'une résolution de 1 m par 1 m (**Figure 8 et 8C**). La superposition de ces deux MNE n'englobe pas toujours la même superficie

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



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

### 2.1.9. Analyses multicritères et production des cartes indicielles du risque

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

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

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

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

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

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

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

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

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

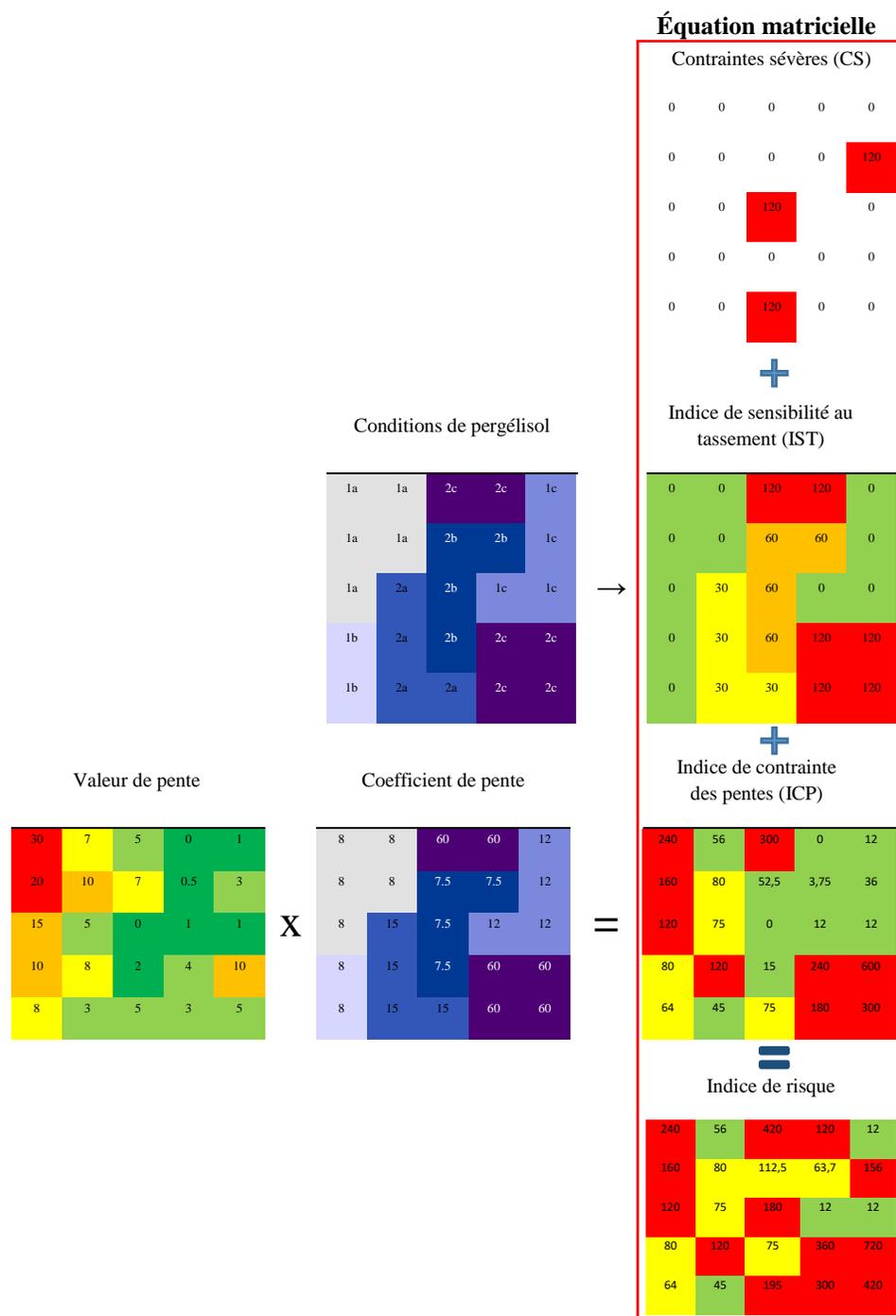
$$[ICP_{ij}] = [\alpha_{ij}] [S_{ij}]$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

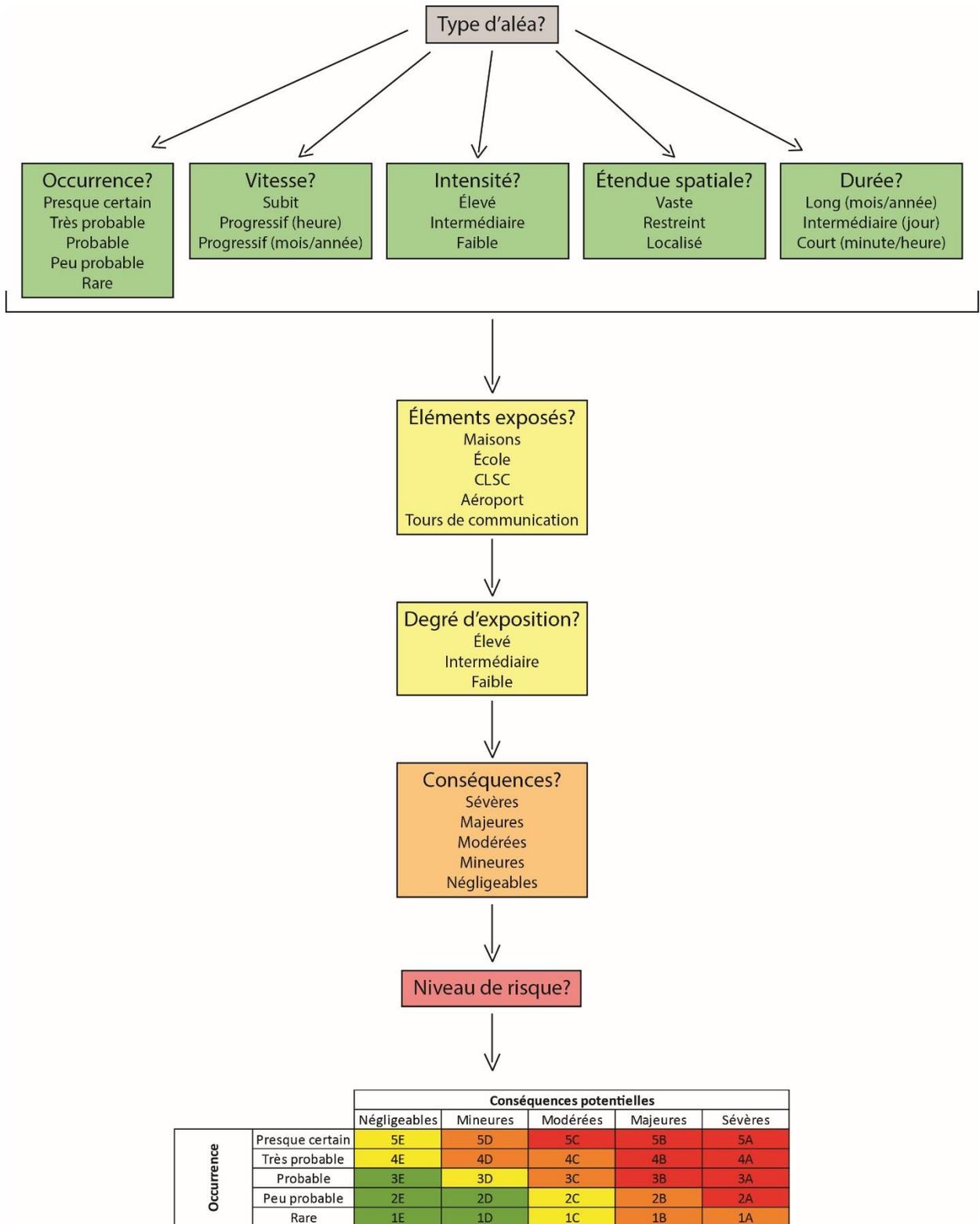


Figure 10 : Détermination du niveau de risque par l'intermédiaire de huit catégories de critères.

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

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

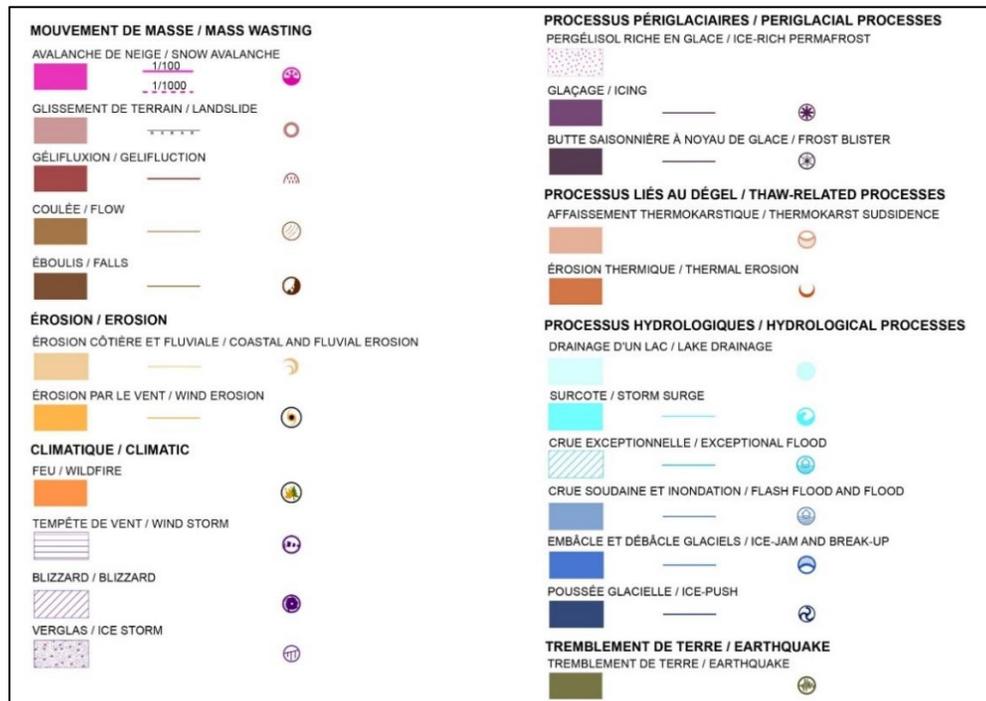
Conséquences		
Conséquences potentielles	Description	Valeur
<b>Sévères</b>	Mort Infrastructures et équipements détruits Coût économique très élevé Large impact environnemental	A
<b>Majeures</b>	Blessures graves nécessitant une évacuation Infrastructures et équipements endommagés Coût économique élevé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

Figure 11 : Matrice de risque accompagnée de ses légendes.

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

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

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



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

## 2.2. MÉTHODOLOGIE DE LA MESURE 5.2.2

### 2.2.1. Suivi climatique et géothermique dans les villages du Nunavik

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

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

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

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

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

### 2.2.1.1. Prétraitement et analyse des données climatiques et géothermiques

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

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

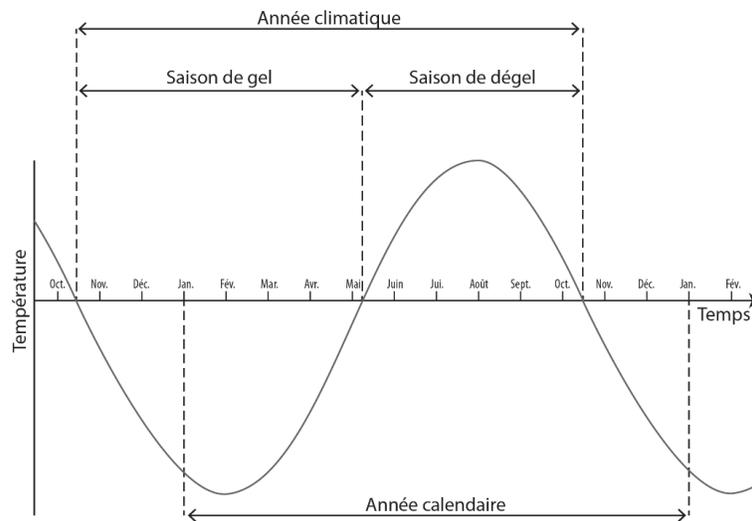
Toutes les séries de données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes. Les températures de l'air ont été utilisées afin de calculer plusieurs indices climatiques, tels que les moyennes journalières, saisonnières et annuelles, les indices de gel et de dégel, la durée des saisons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

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

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

### 2.2.1.2. Détermination des années climatiques

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



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

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

### 2.2.2.1. Le modèle géothermique

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

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

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

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

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

### 2.2.3. Projections et simulations

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

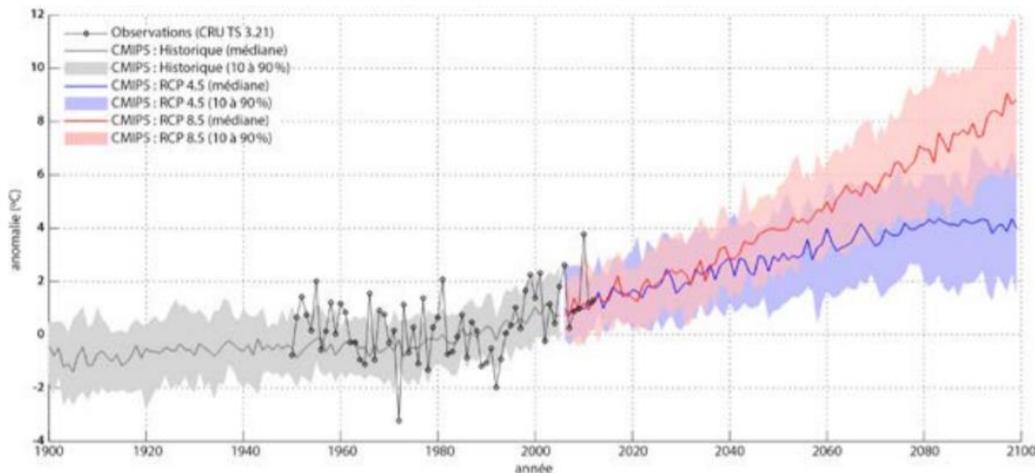
Trois simulations différentes, à savoir un scénario extrême inférieur, un médian et un extrême supérieur, sont basées sur le scénario RCP4.5 prévoyant une stabilisation sans dépassement de la production de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2100. Ce scénario modéré

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

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

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

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



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

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

Pour chacune des 13 communautés, les températures maximums et minimums journalières de 1950 à 2100, pour 11 modèles climatiques identifiés à la **figure 15**, selon un RCP de 4.5 et de 8.5 ont été traitées (pour un total de 572 fichiers). Parmi les 11 modèles de référence utilisés chez Ouranos, seul le modèle HadGEM2 (no. 8) n'a pas été utilisé par nous, car son calendrier comprimé sur 360 jours (12 mois de 30 jours) par année le rend difficile à intégrer dans les simulations de régime thermique du pergélisol qui sont fondées des valeurs mensuelles et des cycles thermiques annuels de 365 jours.

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

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

### 3. LE PERGÉLISOL, LES RISQUES NATURELS ET L'AMÉNAGEMENT DE SALLUIT

La communauté de Salluit (62° 12' 5" N, 75° 38' 30" O), est le deuxième village le plus septentrional du Québec après Ivujivik. Situé sur la rive sud du fjord de Sugluk, le village est construit dans le creux d'une vallée entourée par un relief de plateaux à des altitudes variant entre 225 et 325 m. L'emplacement de Salluit en fond de vallée lui confère une position stratégique : accès facile à la mer et protection des vents dominants. En 2011, le village comptait une population de 1 347 habitants. Entre 2011 et 2016, la population a connu une hausse de la population de 10,1 % passant ainsi à 1 483 habitants. En 2016, 320 logements étaient disponibles pour la population totale et plus de 50 % (n = 165) des logements abritaient 5 personnes ou plus. La taille moyenne des ménages dans la communauté de Salluit est 4,5 (Statistique Canada, 2017; **Figure 16**).

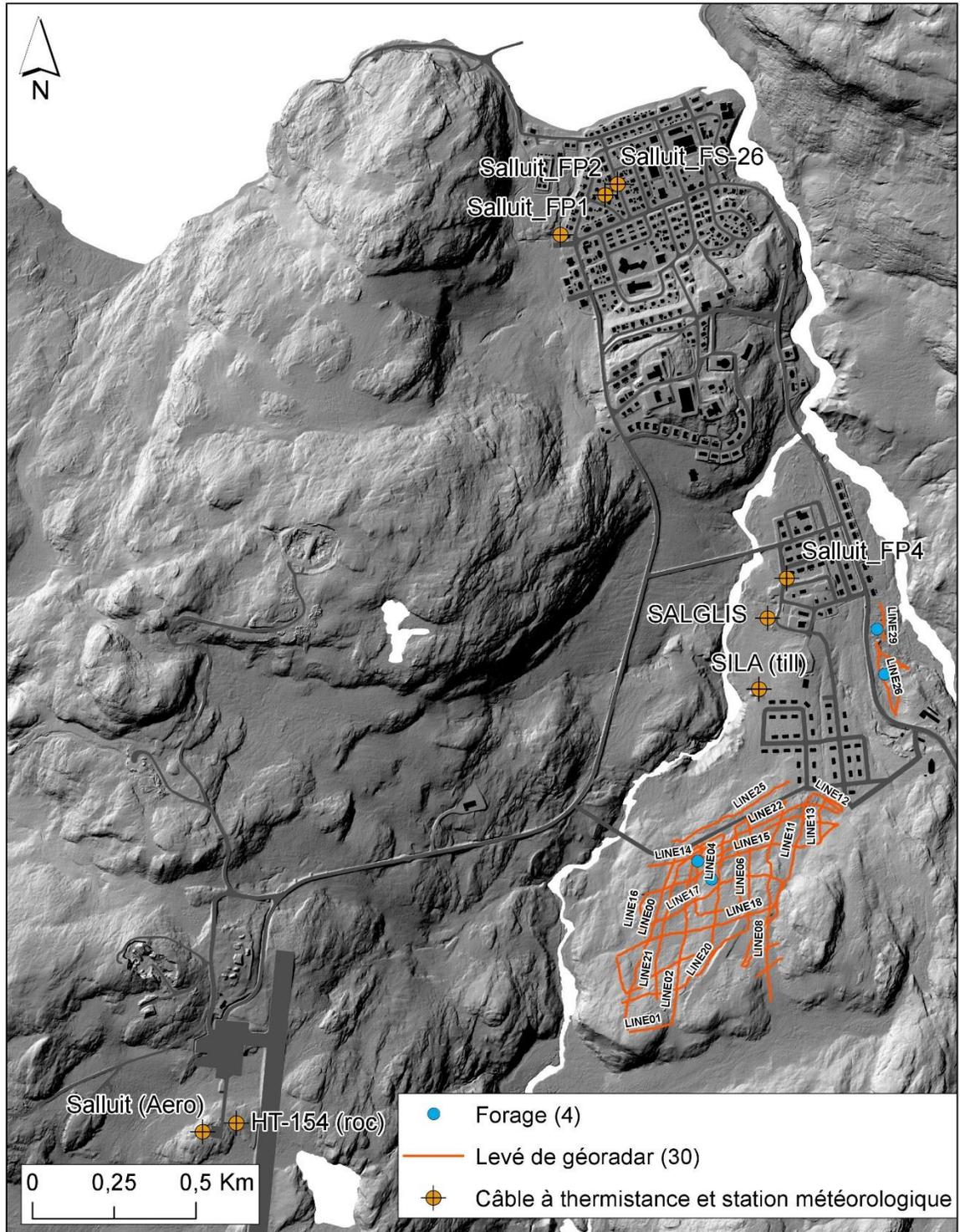
La communauté de Salluit est située en zone de pergélisol continu. La température moyenne annuelle (années climatiques) entre 2002 et 2018 oscillait autour de -6,29 °C.

#### 3.1. Cartographie des conditions géomorphologiques et des propriétés du pergélisol

##### 3.1.1. Carte de la géologie de surface

Des travaux de terrain réalisés à l'été 2019 ont permis d'améliorer la précision de la carte de dépôts de surface produite par Allard et L'Hérault (2010) grâce aux photos aériennes à haute résolution de 2016 et davantage d'observations. Cette campagne de terrain a permis de réaliser un bon nombre d'observations de surface, un forage supplémentaire dans le pergélisol, des levés de géoradar ainsi que l'installation d'un nouveau câble à thermistance dans le secteur de la phase de développement *Salluit-4*. Cette récolte d'information a permis d'appuyer et d'améliorer l'interprétation cartographique de la géologie de surface sur le territoire de la communauté.

Trois unités géologiques principales dominant sur le territoire de Salluit : des affleurements rocheux, des dépôts glaciaires et des dépôts marins. Dans le village, c'est principalement des sédiments marins d'eau profonde, du till épais et des dépôts de sables intertidaux et alluviaux littoraux riches en glace qui recouvrent le fond de la vallée. Sous le cœur du village entre 4,5 m et 6 m de profondeur, les forages ont révélé une couche très riche en glace et saline d'environ 1 m d'épaisseur (Allard *et al.*, 2010). Affleurant sur de grandes superficies sur les versants de la vallée et les plateaux avoisinants, le roc consiste surtout en des gneiss granitiques de structure massive. Le roc affleure également dans certains secteurs du village.



**Figure 16 :** Localisation des forages ainsi que des levés de géoradar réalisés à l'été 2019 dans le village de Salluit.

### 3.1.2. Carte des conditions de pergélisol

Une grande partie de la communauté à Salluit est construite sur un pergélisol de classe 2d, c'est-à-dire sur un sol contenant beaucoup de glace de ségrégation dont le contenu volumique dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %, notamment juste sous la couche active. Plusieurs signes de dégradations d'infrastructures ont été observés dans la communauté, tels que l'apparition de fissures dans les maisons, les empattements inclinés, et les tassements différentiels liés à la dégradation du pergélisol. Lourdemment affectée par la dégradation du pergélisol, la route d'accès à l'aéroport a subi une restauration majeure par le MTQ en 2012. Comme le démontre la carte de conditions de pergélisol, certains secteurs ayant des sols stables au dégel (classe 1a,1b) dans la vallée ne sont pas encore aménagés ou occupés. Il est d'ailleurs souhaitable que les affleurements rocheux (classe 1a) soient privilégiés pour l'expansion de la communauté. Ces secteurs favorables, actuellement libres, seraient un choix judicieux dans l'optique d'accommoder la communauté.

### 3.1.3. Carte des aléas naturels

Le territoire de Salluit contient de grandes superficies de pergélisol riche en glace et la présence de plusieurs affaissements thermokarstiques dans le village représente une contrainte au développement. La probabilité d'occurrence des affaissements thermokarstiques est presque certaine et ses conséquences sont jugées mineures. Le risque associé à ce phénomène sur le territoire de Salluit est donc estimé élevé (5D). L'installation d'infrastructures sur des dépôts gélifs risque d'accélérer le dégel d'horizons riches en glace et de provoquer des tassements. Le territoire est également exposé à la formation de glaçages, de buttes saisonnières à noyau de glace et d'érosion thermique là où il y a présence d'une source d'eau. Toutefois, leur niveau de risque est estimé modéré (5E) et leurs conséquences, jugées négligeables. Notons cependant sur une note positive que les buttes de glaçage formées par l'extrusion d'eau souterraine en hiver dans le lit de la rivière dans le village fournissent en hiver un apport d'appoint apprécié en eau potable.

Quelques secteurs de la communauté sont exposés à des glissements de terrain de type décrochement de la couche active. Plusieurs ont d'ailleurs été documentés aux années 1985, 1998, 2005, 2006 et 2010. Ce type d'aléa survient de façon subite et est d'intensité élevée. Sa probabilité d'occurrence dans la région est très probable et les conséquences sont jugées modérées. Le niveau de risque de cet aléa naturel est donc estimé élevé (4C). D'autres mouvements de masse, tels que les avalanches (4C), la gélifluxion (4E) et les éboulements rocheux (3E), sont courants et leur niveau de risque varie de modeste à élevé.

Par ailleurs, suite à une évaluation de risque d'avalanche faite en 2000 pour le MSP, le pied des versants abrupts dans le village est déjà zoné à risque d'avalanche et exclu des zones constructibles.

La zone littorale de Salluit peut être exposée à une surcote extrême de 1 m en cas de conditions climatiques particulières (3E) (Massé et Gallant, 2016, Boisson, 2019). Ce risque est évalué bas sur le territoire, puisqu'il est considéré probable et ayant des conséquences négligeables. Également, la basse terrasse située en bordure du littoral de la rivière Kuuguluk et du ruisseau Saniqimatik est à risque d'inondation. La probabilité que cet aléa se produise sur le territoire de Salluit est peu probable et ses conséquences potentielles sont mineures. Le niveau de risque d'inondation est donc estimé bas (2D). La probabilité d'occurrence d'érosion fluviale dans la région est aussi probable, mais les conséquences potentielles sont négligeables. Son niveau de risque est donc estimé bas (3E).

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

Types d'aléas		Contraintes	
Mouvements de masse	Glissements de terrain	4C	
	Gélifluxion	5E	
	Coulée de débris		
	Éboulement rocheux		
	Avalanche (sèche et humide)		
Processus hydrologiques	Crue et inondation	3E	
	Submersion côtière	2D	
	Drainage d'un lac	3E	
	Embâcle et débâcle		
	Poussée glacielle		
Processus reliés au pergélisol	Affaissement thermokarstique	5D	
	Glaçage	5E	
	Érosion thermique	5E	
	Butte saisonnière à noyau de glace	5E	
Érosion	Côtière		
	Fluviale	3E	
	Éolienne		
Climatique	Blizzard	5B	5D
	Tempête de vent	5B	5D
	Feu		
	Verglas	5B	5D
Tremblement de terre			

#### 3.1.4. Carte de potentiel de construction

Le relief et le pergélisol posent des difficultés pour l'expansion de la communauté et la construction de bâtiments. En effet, les versants abrupts de la vallée et la présence d'horizons riches en glace dans le sol (classe 2d) limitent l'expansion du village. Plus de la majorité des infrastructures reposent sur un sol riche en glace susceptible d'être instable au dégel du pergélisol.

Malgré les nombreux terrains problématiques pour la construction, le territoire de Salluit comprend encore des secteurs potentiels pour le développement futur. Allard *et al.* (2010) identifient une zone à proximité d'une ancienne piste d'aviation nommée *Bloc C*. Ce secteur présente beaucoup de roc et de till mince, surtout sur les hauteurs. Il contient aussi des aires en till épais et riche en glace, surtout en bas de pente et dans les creux du relief. Toutefois, les premières analyses au géoradar révèlent que l'étendue de till épais s'avère moins vaste qu'on le supposait (Gauthier, inédit). La vue depuis ce plateau domine la vallée et le fjord et sa position dans l'axe de la vallée confère une perspective de continuité à la morphologie du village. Les fondations nordiques sur pieux ou sur radier et chevalets ajustables sont envisageables sur ces terrains. Toutefois, comme les ressources granulaires sont pratiquement épuisées à Salluit, il serait préférable d'opter pour des fondations sur pieux qui ont l'avantage de réduire la quantité nécessaire de ressources granulaires de remblayage.

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

#### **3.2.1. Climat et pergélisol**

Les températures saisonnières et annuelles ainsi que les indices de gel et de dégel à Salluit sont présentées au **tableau 9** pour la période de 2002 à 2018. La température moyenne annuelle pour la période de -6,29 °C est typique de la zone de pergélisol continu. Les valeurs pour la période sont relativement stables sauf pour les années particulièrement chaudes de 2005-2006 (- 4,54 °C) et 2009-2010 (-3,57 °C). Ces deux années ont d'ailleurs connu des glissements de terrain de type décrochement de couche active lors d'étés anormalement chauds; notamment l'été 2010 a cumulé 1067 degrés-jours de dégel, occasionnant un approfondissement temporaire de la couche active. Les précipitations totales annuelles enregistrées de 2014 à 2018 sont très variables soit du simple au double si on considère les deux années (2014 à 2016) pour lesquelles les données sont presque complètes (92 %). Les mois d'août à septembre sont en gros les plus humides, quoique le mois d'avril 2015 ait connu des précipitations exceptionnelles. Tombant sur le sol gelé et accélérant la fonte de la neige, de telles précipitations printanières peuvent provoquer des crues abondantes dans les deux rivières qui coulent dans le village (**Figure 17; Tableaux 9-10**).

Même s'ils sont ralentis par rapport à la surface des plateaux avoisinants très exposés, les vents peuvent souffler très fort à Salluit, y compris dans le fond de la vallée où ils sont canalisés par le relief (**Figure 18**). Les pointes au-delà de 75 km/heure surviennent souvent. C'est un facteur important à considérer pour la disposition des bâtiments, surtout lorsque le développement urbain grimpera sur les versants en altitude dans le secteur Salluit-4. Notons que le caractère quasi-unidirectionnel des vents à Salluit est un facteur important à considérer en architecture et en aménagement urbain à cause de la redistribution de la neige

au sol en hiver, laquelle s'accumule préférentiellement sur de grandes épaisseurs sous le vent des talus, des remblais et des bâtiments.

### Température de l'air et principaux indices climatiques

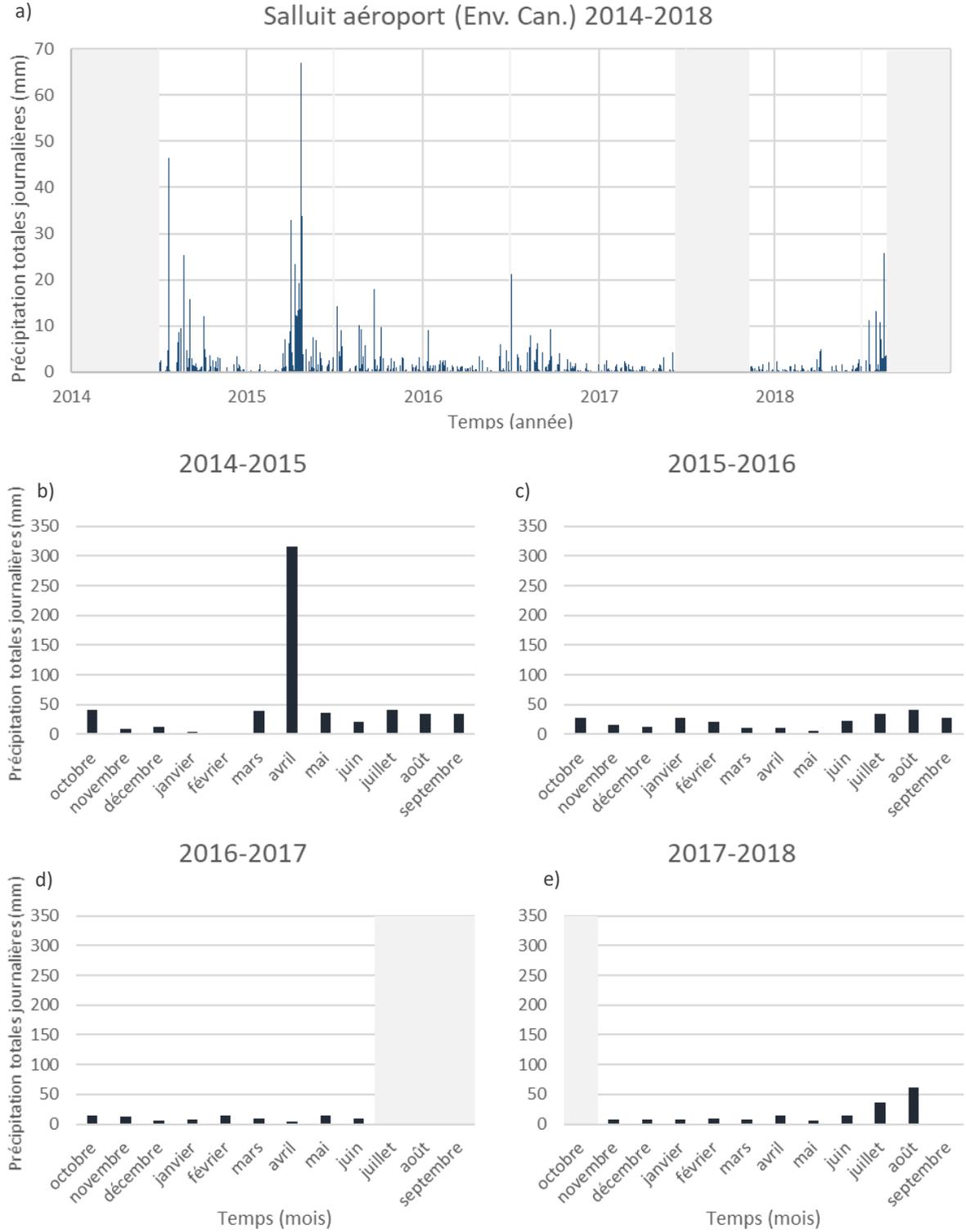
**Tableau 9** : Principaux indices climatiques issus des températures de l'air enregistrées à la station SILA, localisée dans la vallée de Salluit, pour la période de 2002 à 2018.

Année climatique		2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	Moyenne 2002-2018
Saison de gel	Début	02-10-25	03-10-22	04-10-26	05-10-30	06-10-25	07-10-07	08-10-10	09-10-12	16-oct
	Fin	03-05-14	04-06-10	05-05-13	06-05-09	07-06-03	n.d.	09-06-02	10-05-23	27-mai
	Durée	201	232	199	191	221	n.d.	235	223	222
	Indice de gel (FI)	3303	3163	3257	2578	2754	n.d.	3322	2451	3129
Saison de dégel	Début	03-05-15	04-06-11	05-05-14	06-05-10	07-06-04	n.d.	09-06-03	10-05-24	28-mai
	Fin	03-10-21	04-10-25	05-10-29	06-10-24	07-10-06	08-10-09	09-10-11	10-11-03	13-oct
	Durée	159	136	168	167	124	n.d.	130	163	140
	Indice de dégel (TI)	888	712	969	945	809	n.d.	856	1067	858
Moyenne annuelle (clim.)		-6.67	-6.62	-6.20	-4.54	-5.72	n.d.	-6.72	-3.57	-6.29
Ratio (FI/TI)		3.72	4.44	3.36	2.73	3.40	n.d.	3.88	2.30	3.74

Année climatique		2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	Moyenne 2002-2018
Saison de gel	Début	10-11-04	11-10-11	12-10-03	13-10-24	14-10-10	15-10-05	16-10-05	17-10-16	16-oct
	Fin	11-06-01	12-05-29	13-06-06	14-05-21	15-06-01	16-06-02	17-05-24	18-06-09	27-mai
	Durée	209	231	246	209	234	241	231	236	222
	Indice de gel (FI)	2768	3119	3090	3572	3529	3519	3046	3469	3129
Saison de dégel	Début	11-06-02	12-05-30	13-06-07	14-05-22	15-06-02	16-06-03	17-05-25	18-06-10	28-mai
	Fin	11-10-10	12-10-02	13-10-23	14-10-09	15-10-04	16-10-04	17-10-15	18-09-24	13-oct
	Durée	130	125	138	140	124	123	143	106	140
	Indice de dégel (TI)	871	981	689	847	799	951	855	630	858
Moyenne annuelle (clim.)		-5.56	-5.97	-6.22	-7.76	-7.71	-7.02	-5.87	-8.25	-6.29
Ratio (FI/TI)		3.18	3.18	4.48	4.22	4.42	3.70	3.56	5.50	3.74

## Précipitations

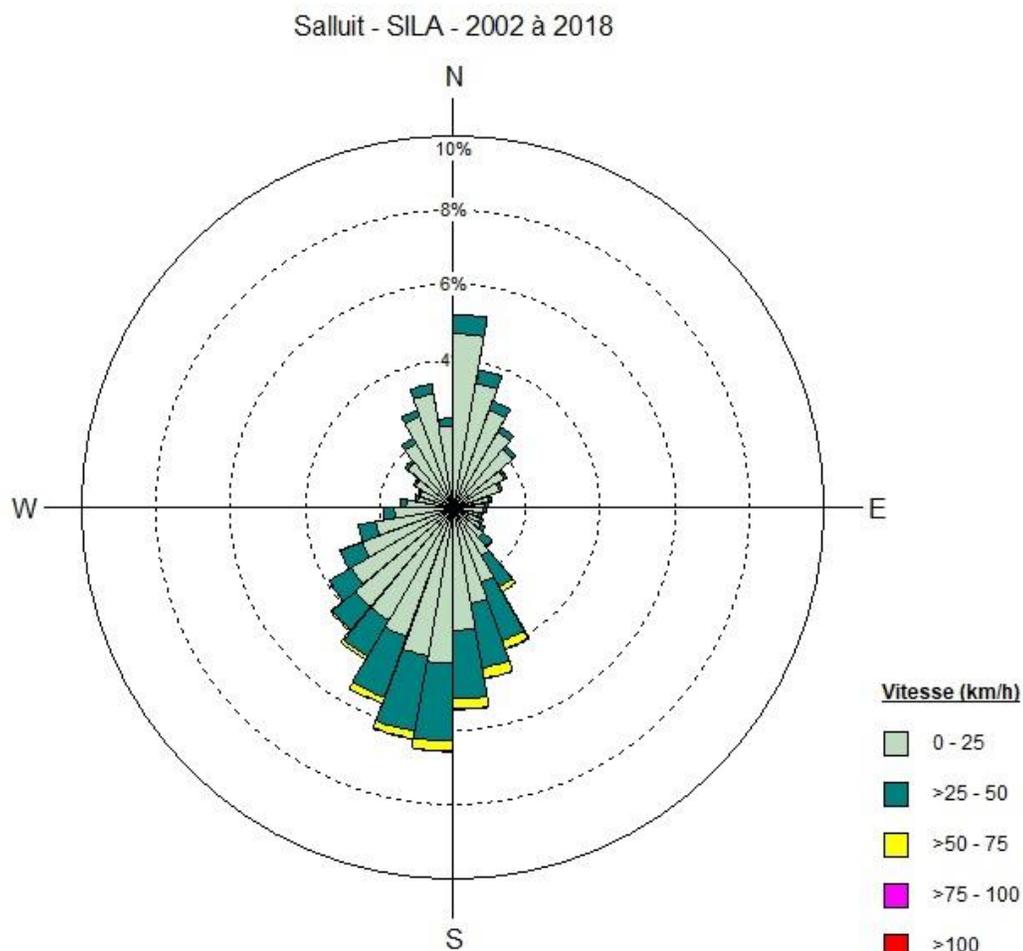


**Figure 17** : a) Précipitations journalières totales d'octobre 2014 à août 2018 et b, c, d, e : précipitations totales mensuelles par année climatique de 2014 à 2018. Les zones en gris indiquent des manques dans les séries d'environnement Canada.

**Tableau 10** : Précipitations annuelles en pluie, neige et totales pour le village de Salluit, de 2014 à 2018 (gouvernement du Canada, 2018). Les valeurs de précipitations sont calculées sous forme de neige (équivalent en cm) lorsque la température de l'air est en dessous de 0°C et sous forme de pluie (mm) lorsque la température de l'air est supérieure à 0°C.

Année climatique	Total annuel			% de couverture des données
	Pluie (mm)	Neige (cm)	Précipitations (mm)	
2014-2015	132,5	457,8	590,3	92
2015-2016	129,4	131,2	260,6	92
2016-2017	3,5	79,3	82,8	61
2017-2018	104,5	56,7	161,2	73

### Régime éolien



**Figure 18** : Direction et vitesse des vents à la station SILA dans la vallée de Salluit de 2002 à 2018.

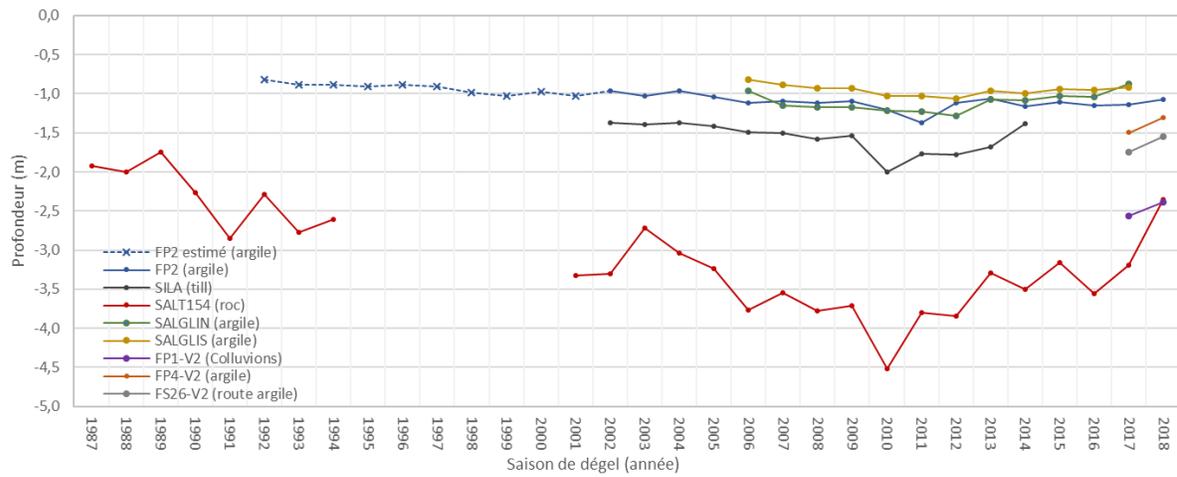
La **figure 19** illustre les variations de la profondeur de la couche active dans les différents types de matériaux de sol tandis que les **figures 20 à 26** montrent des profils d'évolution des températures au fil des ans dans le sol, chacun accompagné d'un diagramme trompette (profils verticaux minimum, moyen et maximum pour la dernière année de lecture complète disponible). Les différences de profondeur de dégel entre les matériaux sont dues à leurs conductivités thermiques respectives, le roc étant le plus conducteur, suivi du till, puis de l'argile. Toutes les courbes de la **figure 19** montrent que la couche active s'est épaissie avec le réchauffement climatique de 1987 à 2010 et 2011 pour ensuite diminuer légèrement avec le refroidissement observé jusqu'en 2018.

En 2018, la profondeur maximale du dégel (ou épaisseur de la couche active) atteignait 2.5 m dans le roc. Elle était d'environ 1,6 m dans le till en 2016. Toutefois, tous les sites de mesure dans les silts et argiles en milieu naturel ont vu leur couche active rester à moins de 1 m de profondeur. Certains cas se distinguent : le site du câble FP1 (**Figure 23**) est aussi froid que le site FP2 en profondeur (**Figure 22**), mais a une couche active de 1,5 m d'épaisseur parce qu'il reçoit beaucoup de chaleur par un écoulement d'eau en surface. Installé en terrain naturel en 2002 et instrumenté en 2017, le site FP4 se trouve en marge d'un remblai, dans un chenal d'écoulement construit lors de l'expansion du secteur Salluit 2 (**Figure 24**). Le profil se réchauffe graduellement près de la surface et la couche active atteint 1,5 m suite à la perturbation anthropique. Ce câble qui diagnostique l'impact de la construction urbaine sera à suivre attentivement dans le futur.

Doté d'un système d'acquisition de données seulement en 2017, mais installé depuis 2003, le câble FS-26 mesure la température sous le centre d'une rue pavée dans le village. La couche active y atteint 1,55 m d'épaisseur (**Figure 26**).

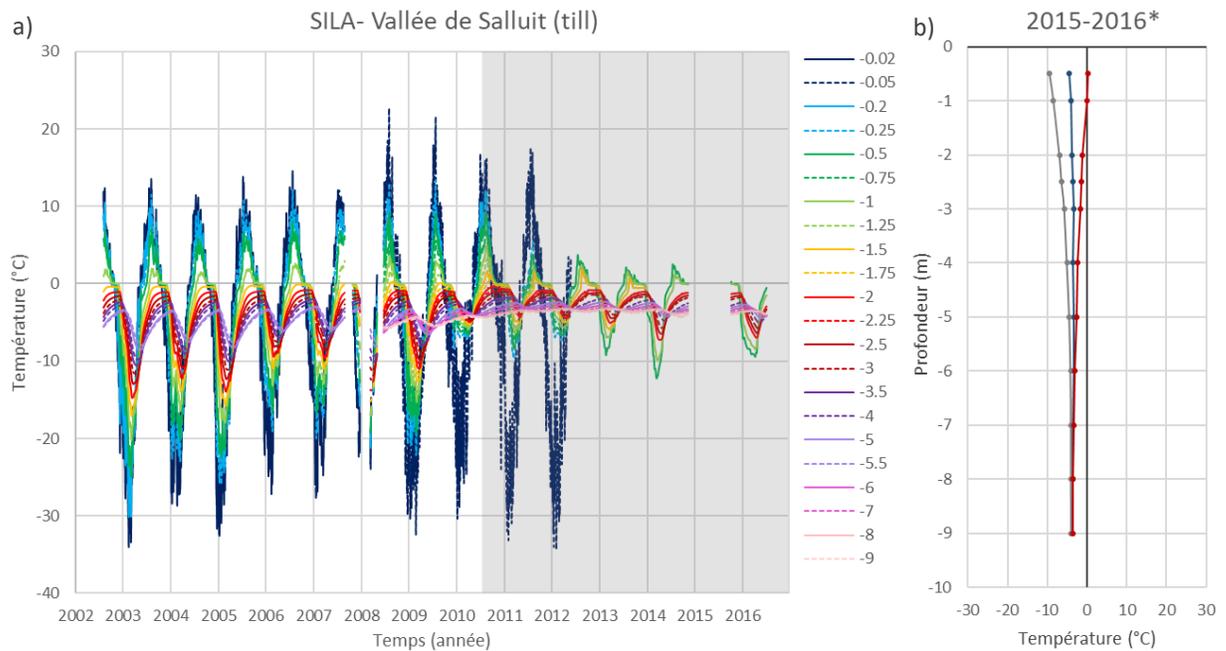
En somme, la couche active est restée relativement stable dans les argiles en milieu naturel au cours des dernières années, soit dans le sol le plus sensible aux tassements en cas de dégel (**Figures 22-23 et 25**). Les perturbations anthropiques comme la construction (**Figure 24**) et le pavage de rues (**Figure 26**) ont eu un certain effet sur le régime thermique, mais pas au point d'engendrer des impacts remarquables sur les constructions et les infrastructures.

## Profondeur maximale du dégel annuel (syn. épaisseur maximale de la couche active)



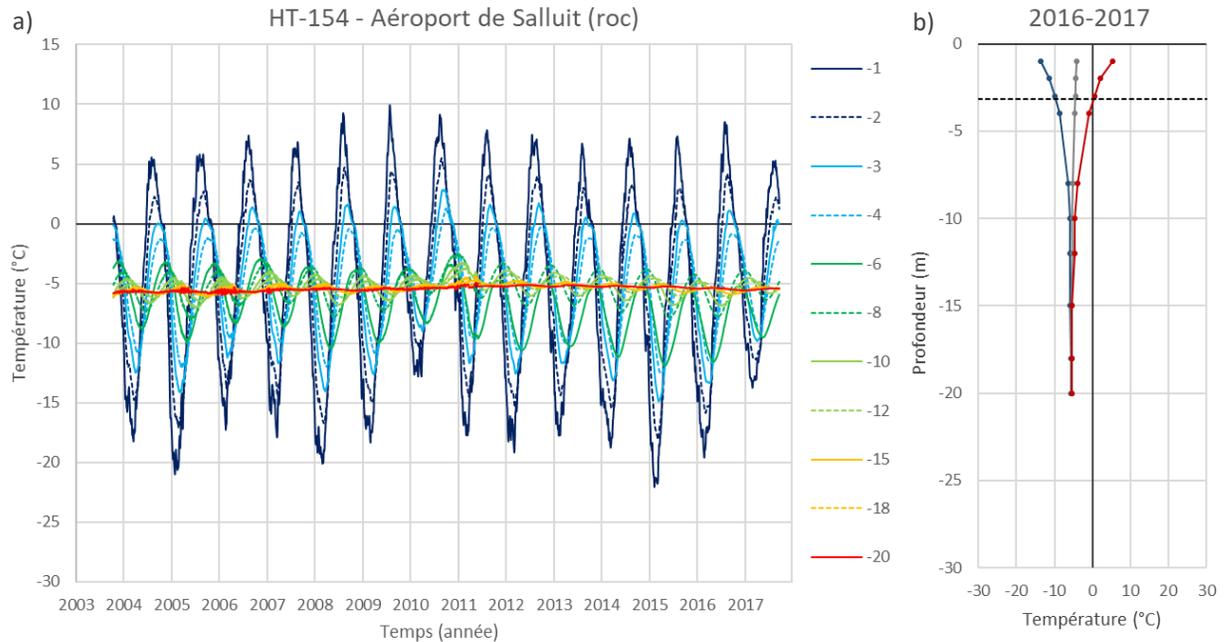
**Figure 19 :** Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel enregistré aux câbles à thermistances, en fonction des dépôts de surface (indiqués entre parenthèses), à Salluit pour la période de 1987 à 2018.

## Régime thermique dans le till



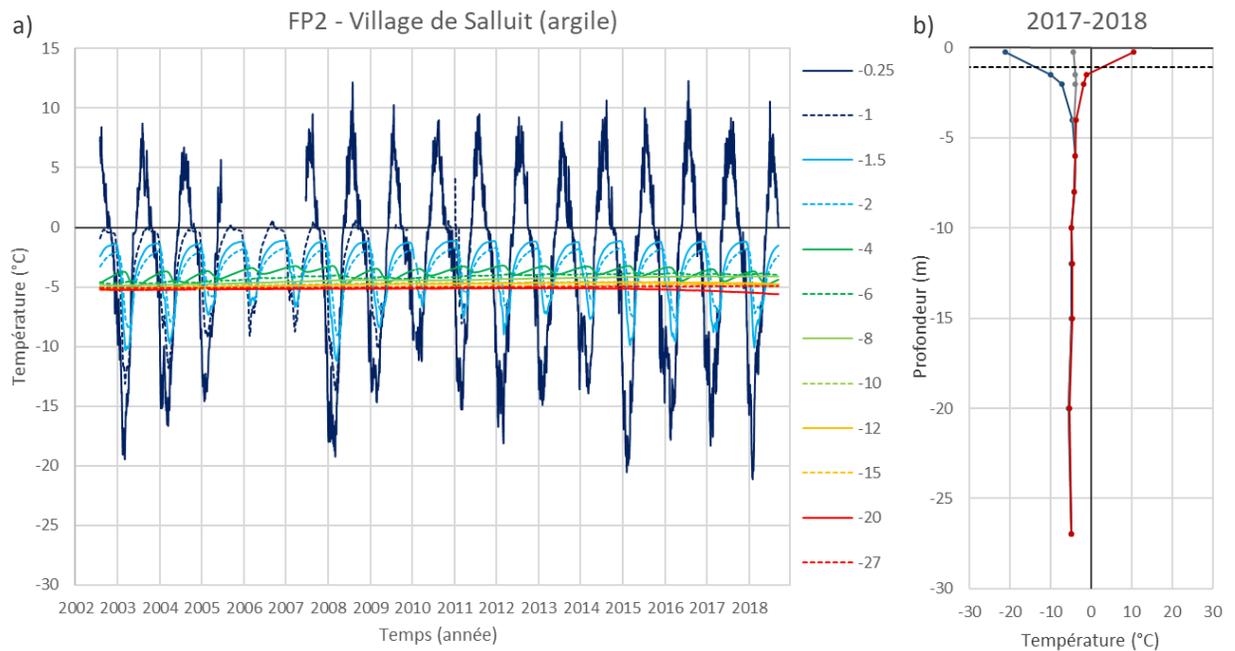
**Figure 20 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps au câble SILA, localisé dans le till dans la vallée de Salluit pour la période de 2002 à 2016. La période en gris correspond à la construction d'un remblai au-dessus du câble pour le stationnement du garage municipal en 2010 et b) enveloppe des températures minimales, maximales et moyenne annuelle 2015-2016 enregistrée au câble SILA localisé dans le till dans la vallée de Salluit. \* Les données de l'année 2015-2016, dernière disponible pour le câble SILA, sont incomplètes.

## Régime thermique dans le roc



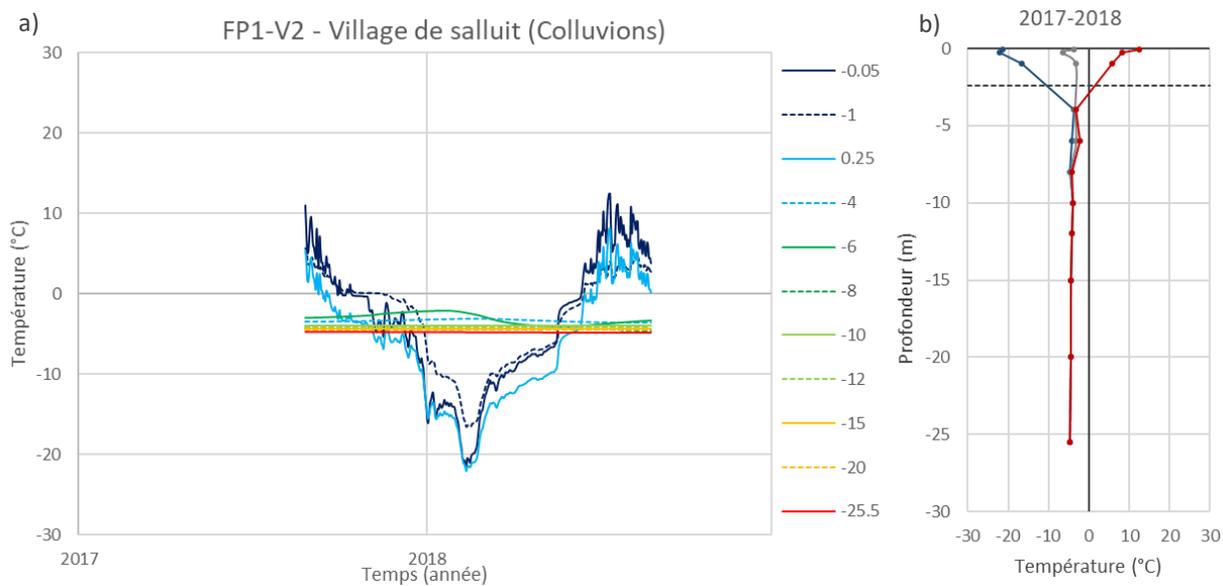
**Figure 21 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2003 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017, ainsi que le maximum atteint par le dégel, enregistré au câble HT-154, localisé dans le roc à l'aéroport de Salluit.

## Régime thermique dans les silts et argiles



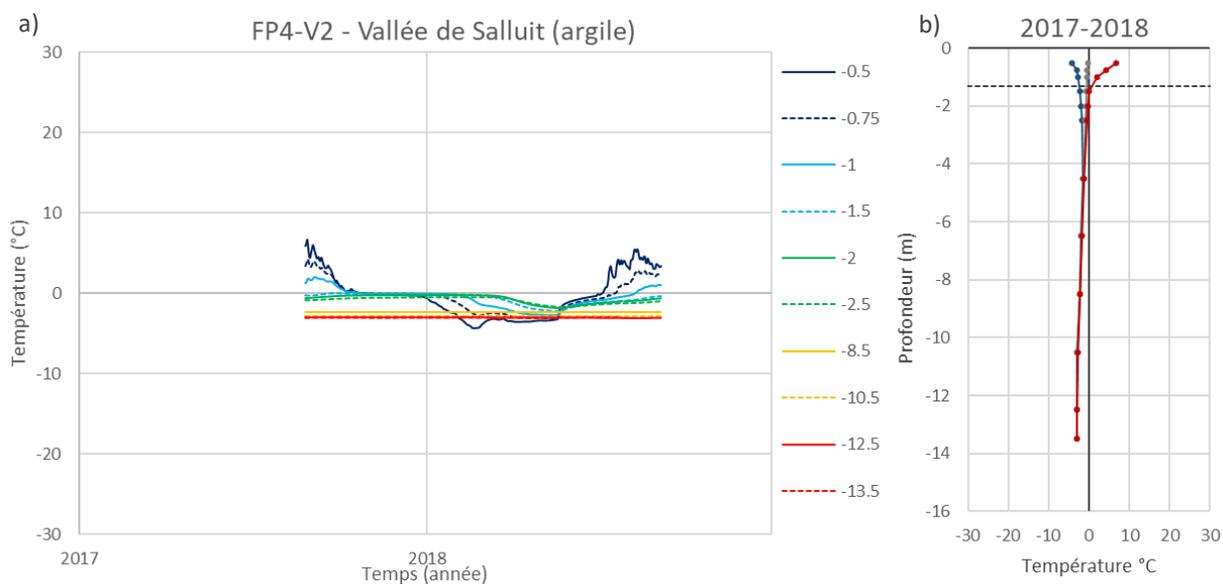
**Figure 22 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2002 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP2, localisé dans l'argile dans le village de Salluit.

## Régime thermique dans les colluvions/silt et argile



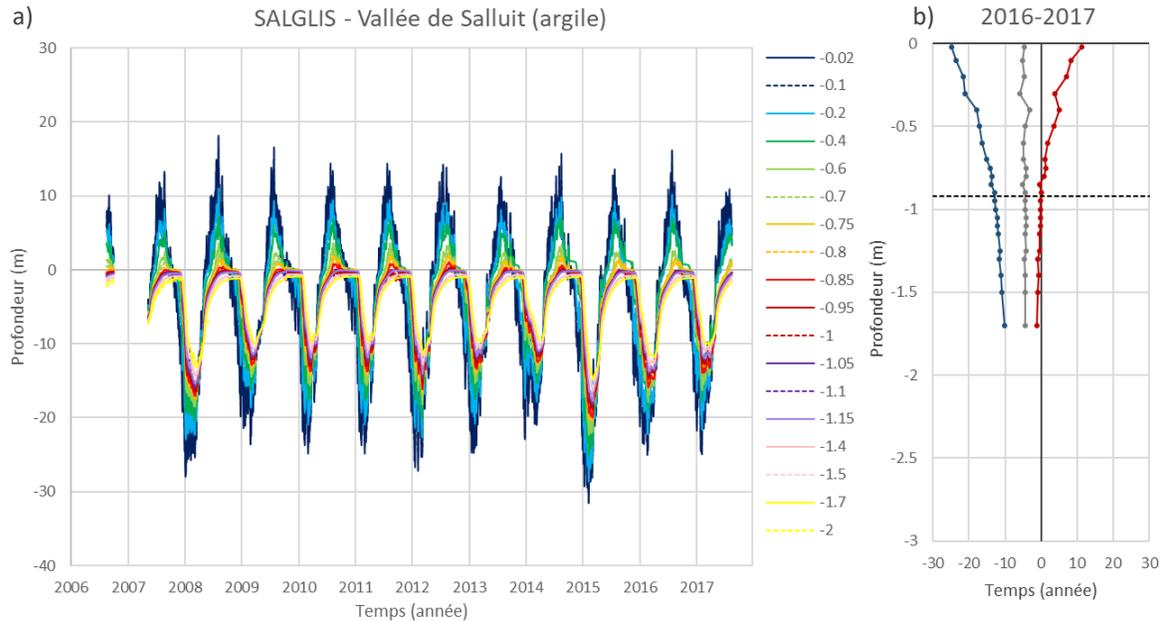
**Figure 23 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP1-V2, localisé dans les colluvions dans village de Salluit.

## Régime thermique dans les silts et argiles dans le secteur résidentiel de Salluit 2



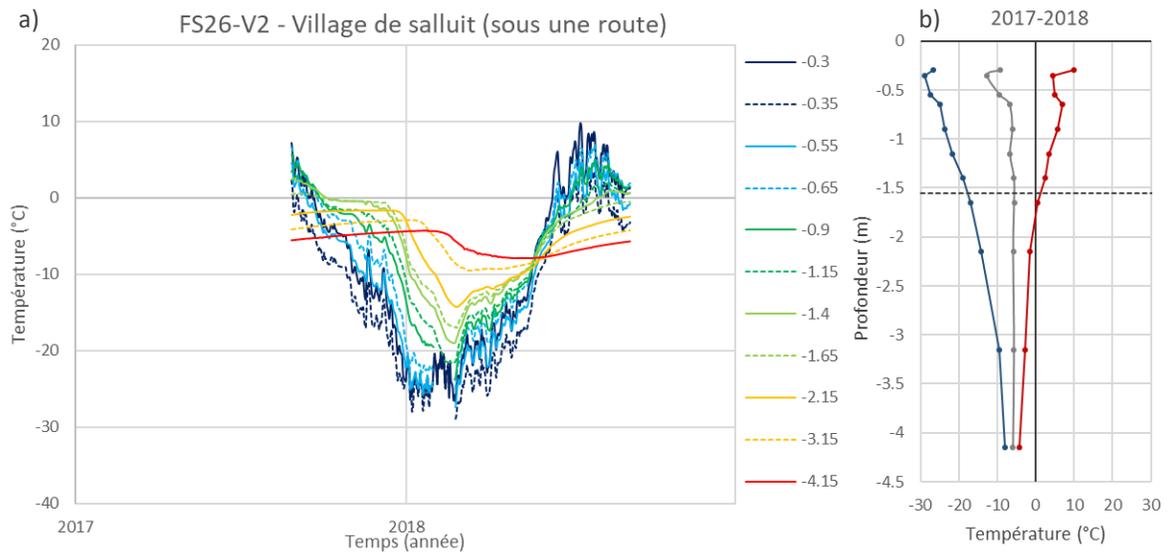
**Figure 24 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FP4-V2, localisé dans les argiles, dans le secteur résidentiel Salluit 2.

## Régime thermique dans les argiles et silts près du secteur résidentiel de Salluit 2



**Figure 25 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2006 à 2017 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2016-2017, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2017, enregistré au câble SALGLIS, localisé dans les argiles de la vallée de Salluit, près du secteur résidentiel Salluit 2.

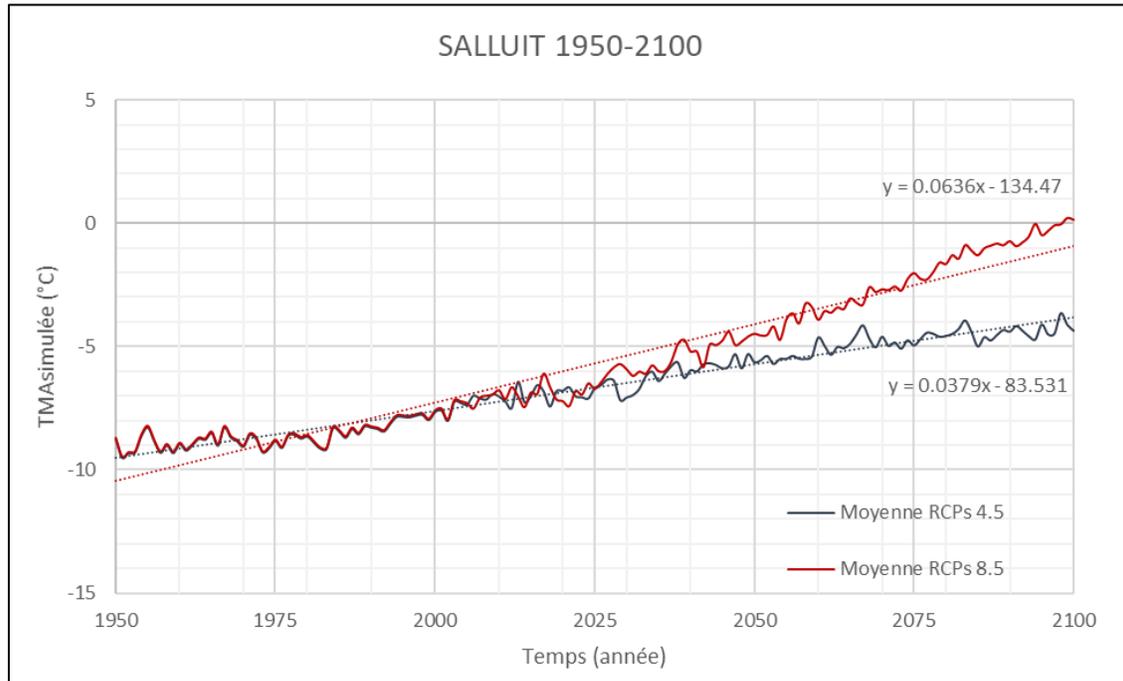
## Régime thermique dans les argiles sous une infrastructure



**Figure 26 :** a) Température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période de 2017 à 2018 et b) enveloppe de la température minimale, maximale et la moyenne annuelle 2017-2018, ainsi que le maximum atteint par le dégel en 2018, enregistré au câble FS26-V2, localisé dans l'argile, sous une route pavée du village de Salluit.

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

#### Température historique et simulée jusqu'en 2100 pour le village de Salluit



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

Les projections climatiques selon les scénarios moyens pour Salluit suggèrent que dans le cas du RCP 4.5 le réchauffement climatique entre maintenant (2020) et 2050 serait d'environ 1 °C. Il serait d'environ 1.8 °C d'ici 2100. Selon le RCP 8.5, le réchauffement serait de 1.8 °C d'ici 2050 et de l'ordre de 6 °C d'ici 2100. Notons toutefois que le scénario maximum RCP 4.5 résulte en un réchauffement presque aussi grave que le scénario maximum RCP 8.5. Considérant que la moyenne actuelle à Salluit est de -6.26 °C, Salluit serait encore en zone de pergélisol continu en 2100 selon le RCP 4.5 moyen; mais le pergélisol dans le village serait forcément en dégradation avancée selon le scénario 8.5. Les incertitudes engendrées par la divergence entre les scénarios, eux-mêmes dépendants d'hypothèses socio-économiques non contrôlables ont pour résultat que notre appréciation de risque associé à la dégradation à venir du pergélisol est fortement influencée par le jugement humain et fait bonne part à la déduction des auteurs, sinon à la spéculation (**Figure 27**).

## Calibration des modèles

Les modèles climatiques reprennent la stratigraphie et les propriétés géotechniques de l'environnement des câbles à thermistances. Au total, 4 contextes stratigraphiques ont fait l'objet de simulations à Salluit, soit dans une épaisse couche d'argile dans le village (câble FP-2), dans le till dans la vallée près du garage municipal (câble FP-3), dans un site argileux à risque de glissement de terrain près de la route de l'aéroport (câble SALGLIS) et sous une rue dans le village (câble FP-26) (**Figures 28-32; Tableaux 11-15**).

### Modèle unidimensionnel FP2 : Argile

Advenant que le scénario de génération de gaz à effet de serre RCP 4.5 minimum se réalise, les changements dans le régime thermique du pergélisol seraient relativement mineurs dans les argiles marines sous le village jusqu'à la fin du siècle. Selon le RCP 4.5 moyen, le profil thermique réchaufferait, mais la couche active ne devrait pas dépasser 2 m d'épaisseur d'ici 2050. Si le scénario RCP 4.5 maximum se réalisait, les conséquences d'ici 2050 seraient autrement plus graves avec un réchauffement rapide du pergélisol et un dégel annuel qui pourrait atteindre 3 m de profondeur en 2030 et 5 m en 2040. Les scénarios RCP 8.5 moyen et maximum accéléreraient l'approfondissement de la couche active, celle-ci pouvant atteindre aussi 5 m autour de 2040. À long terme, c'est-à-dire à partir de 2050, l'effet sur le régime thermique et l'approfondissement de la couche active serait le même pour les scénarios 4.5 et 8.5 maximum, à savoir une dégradation catastrophique du pergélisol argileux, à la différence que cette dégradation surviendrait environ 10-12 ans plus tôt (2050) dans le cas du scénario RCP 8.5 maximum. Compte tenu de la haute teneur en glace et de la salinité du pergélisol sous cette partie du village, les tassements et les instabilités qui en résulteraient auraient un impact catastrophique (**Figures 28 et 33-34**).

### Dépôt de till : Câble FP-3 (SILA : Till)

Sans surprise, les résultats des simulations vont dans le même sens dans le dépôt de till (Câble FP-3) : le réchauffement du pergélisol et l'approfondissement de la couche active resteraient sans grande conséquence si ce n'est un approfondissement graduel de la couche active jusqu'en 2100 jusqu'à des profondeurs dépassant 1 m selon les scénarios minimaux RCP 4.5 et RCP 8.5 (**Figure 36a-d**). Cependant, les scénarios moyens produiraient une augmentation importante de la couche active dès les années 2020 avec des profondeurs approchant les 3 m. La dégradation serait ensuite très importante à partir des années 2070. Les scénarios RCP 4.5 et 8.5 maximum impliquent pratiquement la disparition du pergélisol dans les cinq premiers mètres du till dès les années 2030 (**Figure 36b-f**). Le dégel profond du pergélisol dans le till serait susceptible d'avoir des effets divergents dans divers secteurs de Salluit. Ainsi le dégel pourrait affecter certaines sections sur till sous la piste d'atterrissage là où le remblai est à une épaisseur inférieure à environ 3 m (**Figure 37**). Des tassements se produiraient dans certaines sections de la piste. Le garage municipal

construit sur till dans le secteur Salluit 2 resterait en principe stable, car sa fondation est refroidie par des thermosyphons, mais le terrain autour subirait des tassements. Par contre, les plateaux avoisinants vers l'aéroport et le secteur en développement de Salluit 4 où la couverture de till sur le roc ne dépasse pas 3 m deviendraient totalement stables et facilement constructibles.

#### Argile sous remblai et chenal dans Salluit-2 : Câble FP-4

Certes, les simulations numériques suivent les mêmes tendances d'un site à l'autre. Toutefois, ce site de remblai de Salluit 2, et le fait que le câble s'est retrouvé dans un fossé humide ont eu comme résultat que le profil est déjà réchauffé. La couche active est appelée à s'y approfondir un peu plus vite et le dégel se produire dans un avenir plus proche, comme on le voit dans les scénarios moyens et, surtout, les scénarios maximums, qu'il s'agisse du RCP 4.5 ou du RCP 8.5. Il est probable toutefois que ce câble illustre une situation non représentative de l'ensemble de la zone remblayée de Salluit 2, se retrouvant dans un fossé humide. Néanmoins, il souligne l'importance de limiter les perturbations du régime thermique du pergélisol par des transformations liées à l'aménagement du territoire (**Figures 39-40**).

#### Câble SALGLIS

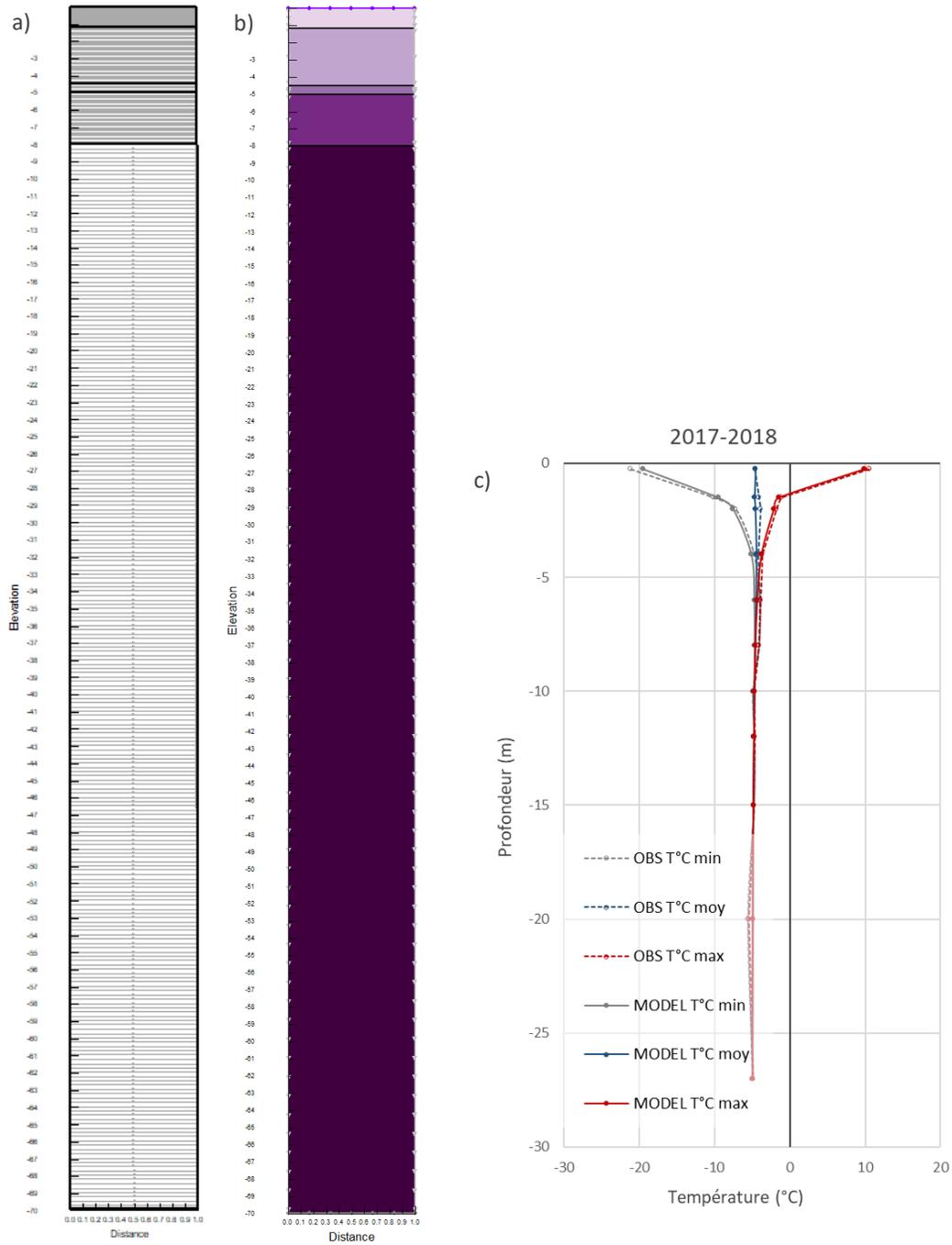
Ce câble à thermistances a été installé originalement pour des fins de recherche sur les déclenchements de glissements de terrain de type décrochement de couche active sur un site argileux en pente. Le câble n'atteint que deux mètres de profondeur, car les thermistances sont concentrées autour de 1 mètre pour obtenir une plus grande précision dans la mesure de la profondeur du front de dégel annuel. Les sorties des modèles basés sur les RCP 4.5 et RCP 8.5 minimums proposent des profondeurs de couche active inférieures à ce qu'on observe déjà. Par contre, les projections établies sur RCP 4.5 et RCP 8.5 moyen partent avec des profondeurs de dégel et des températures identiques aux conditions actuelles. Dans le cas du RCP 4.5, la profondeur de la couche active demeurerait de l'ordre de 0.8 m jusqu'à la fin du siècle; dans le cas du RCP 8.5, elles augmenteraient graduellement pour atteindre 1.2 m en 2100. Les scénarios maximums RCP 4.5 et 8.5 suggèrent une fonte du pergélisol sur les deux premiers mètres du terrain d'ici la fin des années 2020. Comme les décrochements de couche active surviennent à l'occasion d'années plus chaudes où le dégel dépasse en profondeur les années précédentes, cette augmentation indique un risque réel de glissement de terrain dans ce secteur de la vallée de Salluit. Ce secteur est déjà zoné « non constructible » (**Figures 42-43**).

#### Câble FP-26 (sous une rue du village)

Comme dans le cas précédent, les simulations basées sur les RCP 4.5 et 8.5 moyens présentent les conditions actuelles les plus proches de la réalité avec une couche active de l'ordre de 1,5-1,6 m d'épaisseur. Selon ces deux simulations, la couche active

s'approfondirait graduellement pour atteindre environ 2 m autour de 2070. Après cette date, le scénario RCP 8.5 ferait approfondir davantage et plus rapidement la couche active jusqu'à 3 m en 2100. Les RCP 4.5 et 8.5 maximums feraient disparaître le pergélisol des quatre premiers mètres du terrain avant 2030, ce qui semble fort improbable compte tenu des conditions actuelles et de la forte teneur en glace du sol qui impose une importante chaleur latente de fusion. Les hypothèses climatiques RCP maximums semblent en général peu probables. Un abaissement graduel de l'ordre de 50 cm du plafond du pergélisol sous la rue d'ici 2070 entraînerait des déformations lentes de la chaussée nécessitant des remises à niveaux, mais somme toute gérables (**Figures 45-46**).

## Modèle unidimensionnel FP2 : Argile

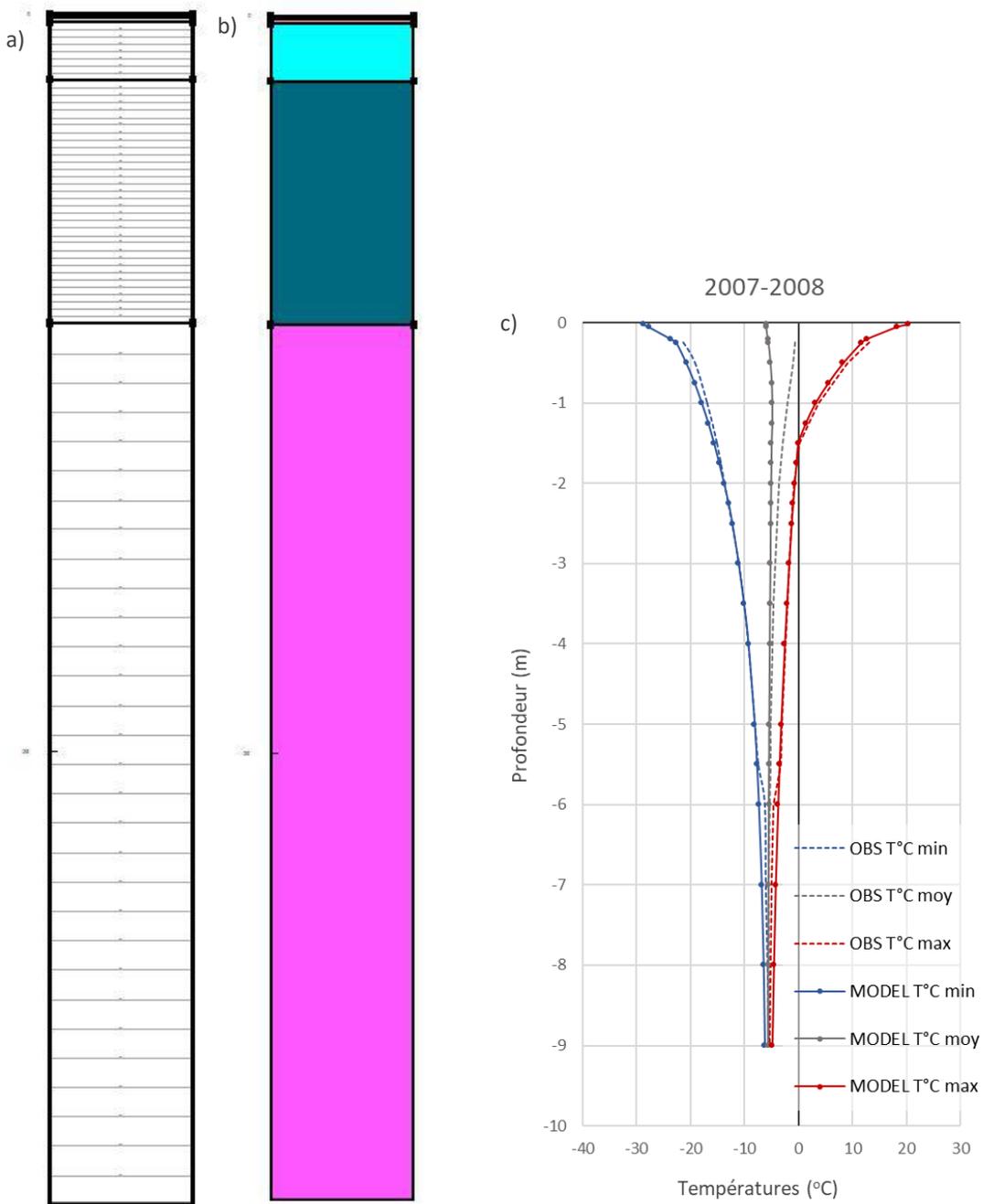


**Figure 28 :** a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) températures de départ pour le câble à thermistances FP-2, localisé dans les argiles marines dans le village de Salluit.

**Tableau 11** : Stratigraphie et propriétés thermiques détaillées en fonction des matériaux au câble FP-2, localisé dans les argiles marines dans le village de Salluit.

<b>FP2 village de Salluit argile marine</b>						
Profondeur	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m <sup>3</sup> /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		Gelée	Non- gelée	Gelée	Non- gelée	
0 à 1,15	Silt et Argile avec M.O. - Couche active	2040	2760	129,60	95,04	0,38
1,15 à 4,50	Argile peu saline et pauvre en glace	2040	2760	190,08	125,28	0,38 (dégèle à - 0,4 °C)
4,50 à 5,00	Glace avec inclusions d'argile	2090	3720	142,56	78,48	0,78
5,00 à 8,00	Argile saline avec lentilles de glace	2080	3040	190,08	125,28	0,40 (dégèle à - 2 °C)
8 à 70,00	Argile saline et pauvre en glace	2040	2760	190,08	125,08	0,38 (dégèle à - 1 °C)
70 à 150	Roc	2500	2500	290	290	0

## Modèle unidimensionnel FP-3

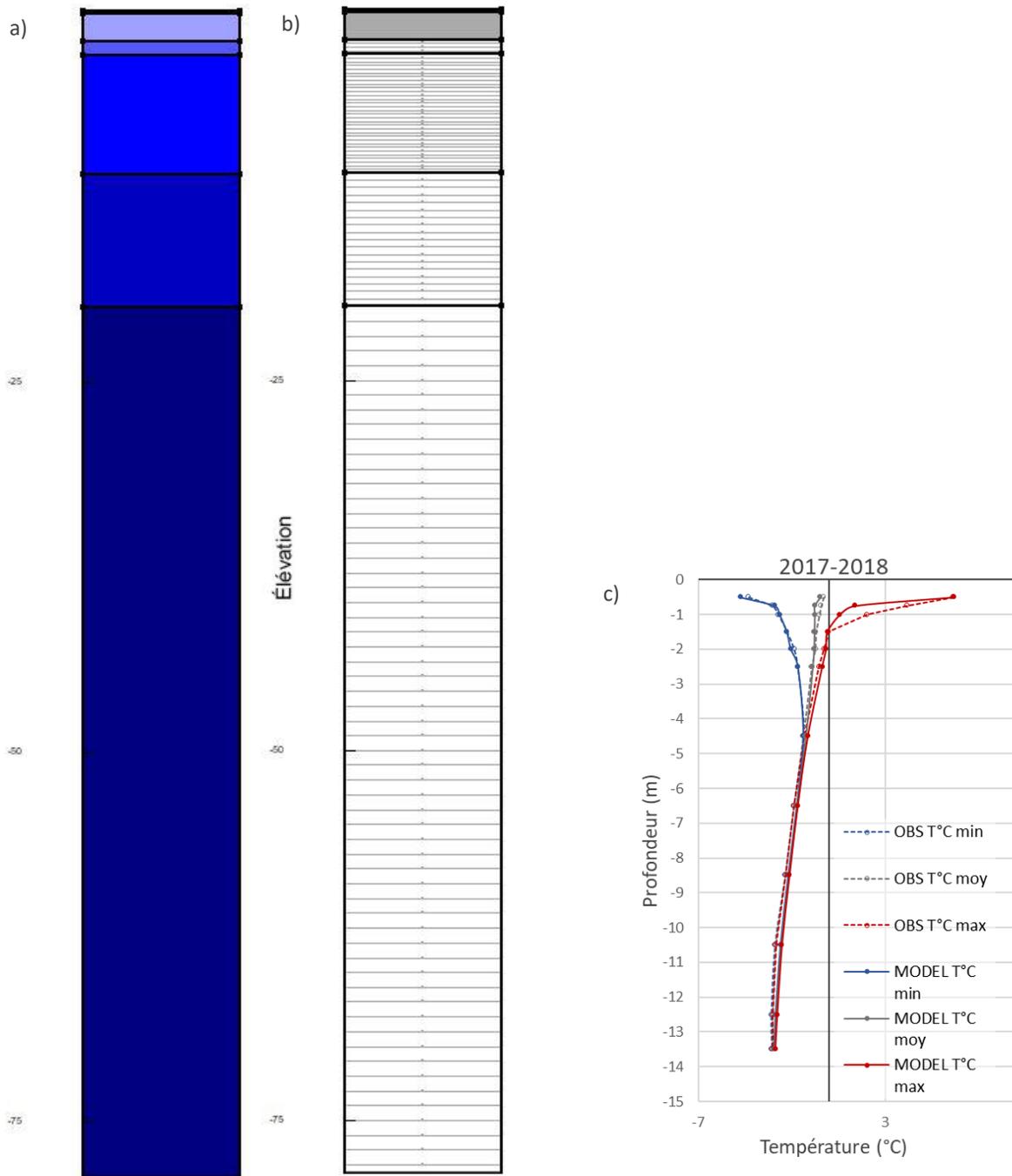


**Figure 29** : a) Maillage, B) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques de départ réel et modélisé (calibration de départ) au câble FP-3, localisé dans le till dans la vallée de Salluit. Le câble est identifié comme étant SILA (Till).

**Tableau 12** : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble FP-3.

<b>FP3 vallée de Salluit, till</b>						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m <sup>3</sup> /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		Gelée	Non-gelée	Gelée	Non-gelée	
	Tourbe	100	65	1990	3900	0,4
0 à 0,30	Silt	2600	3280	110	115	0,4
0,30 à 10,80	Till riche en glace	2300	2650	175	145	0,5
	Till	2000	2650	195	145	0,3
10,80 à 70	Roc	1300	1300	235	235	0

## Modèle unidimensionnel FP4 : Silts et argiles

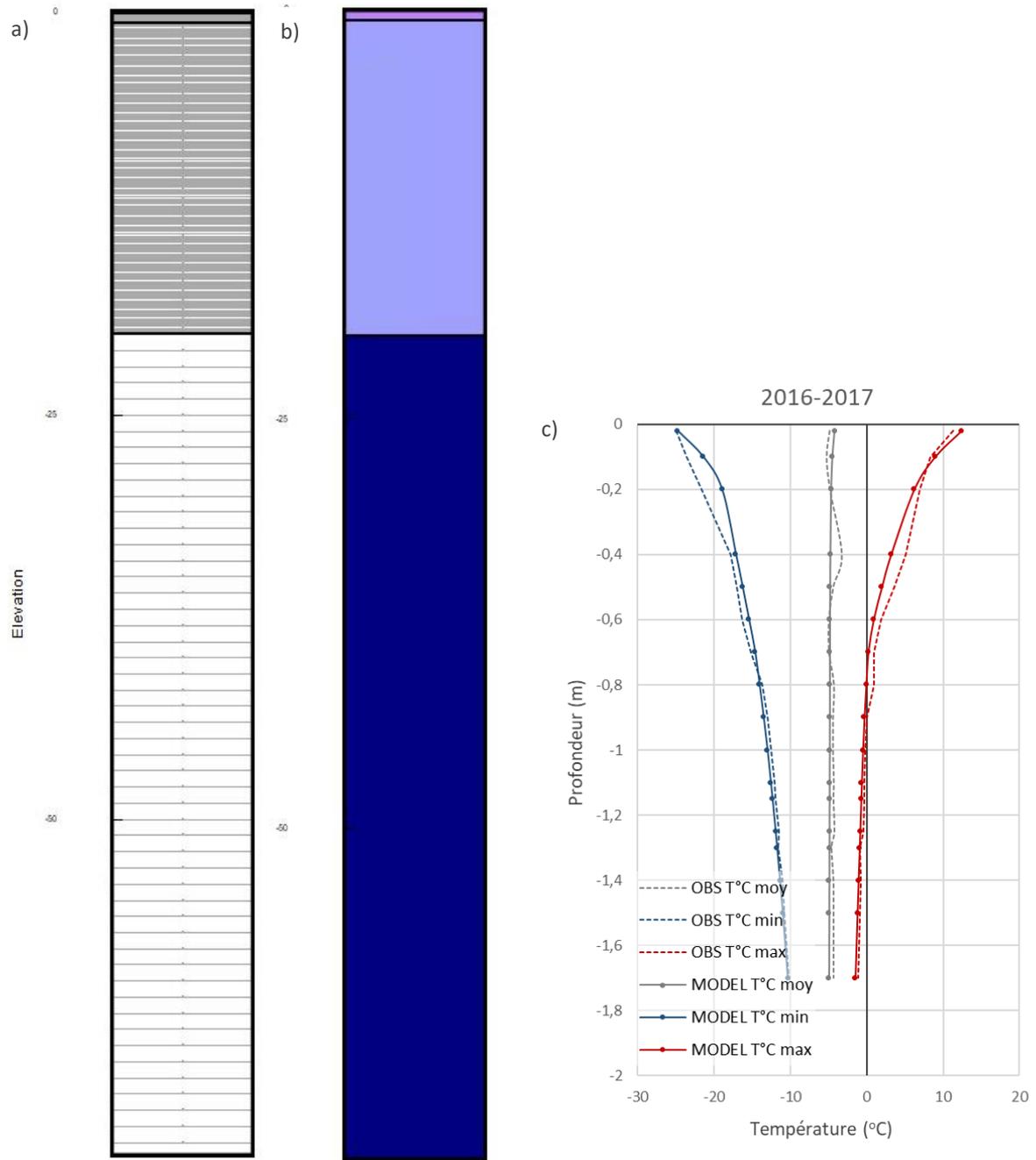


**Figure 30** : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux au câble FP4, localisé dans des silts et argiles, à Salluit.

**Tableau 13** : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble FP4.

<b>FP4-V2 Salluit : Silt et argile</b>						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m <sup>3</sup> /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		Gelée	Non-gelée	Gelée	Non-gelée	
0 à 0,1	Tourbe	95	45	3000	3600	0,6
0,1 à 2	Argile silteuse avec argile	400	395	1700	2000	0,3
2 à 3	Glace riche en sédiments	130	110	1990	3000	0,9
3 à 11	Argile avec lentilles	105	95	1891	3125	0,6
11 à 50	Till	185	160	1620	1840	0,3
50 à 150	Roc	196,99	196,99	1340	1340	0

## Modèle unidimensionnel SALGLIS



**Figure 31** : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux au câble SALGLIS, localisé dans des argiles marines, à Salluit.

**Tableau 14** : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble

<b>SALGLIS : Argile silteuse</b>						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m <sup>3</sup> /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		Gelée	Non- gelée	Gelée	Non-gelée	
0 à 0,15	Tourbe	3000	3900	75	45	0,4
0,15 à 0,75	Argile silteuse	2040	2760	129,6	95,04	0,4
0,75 à 20	Argile silteuse avec lentilles	2080	3040	129,6	95,04	0,5
20 à 150	Roc	1340	1340	196,99	196,99	0

Modèle unidimensionnel FP-26 : Argiles marines sous une route pavée

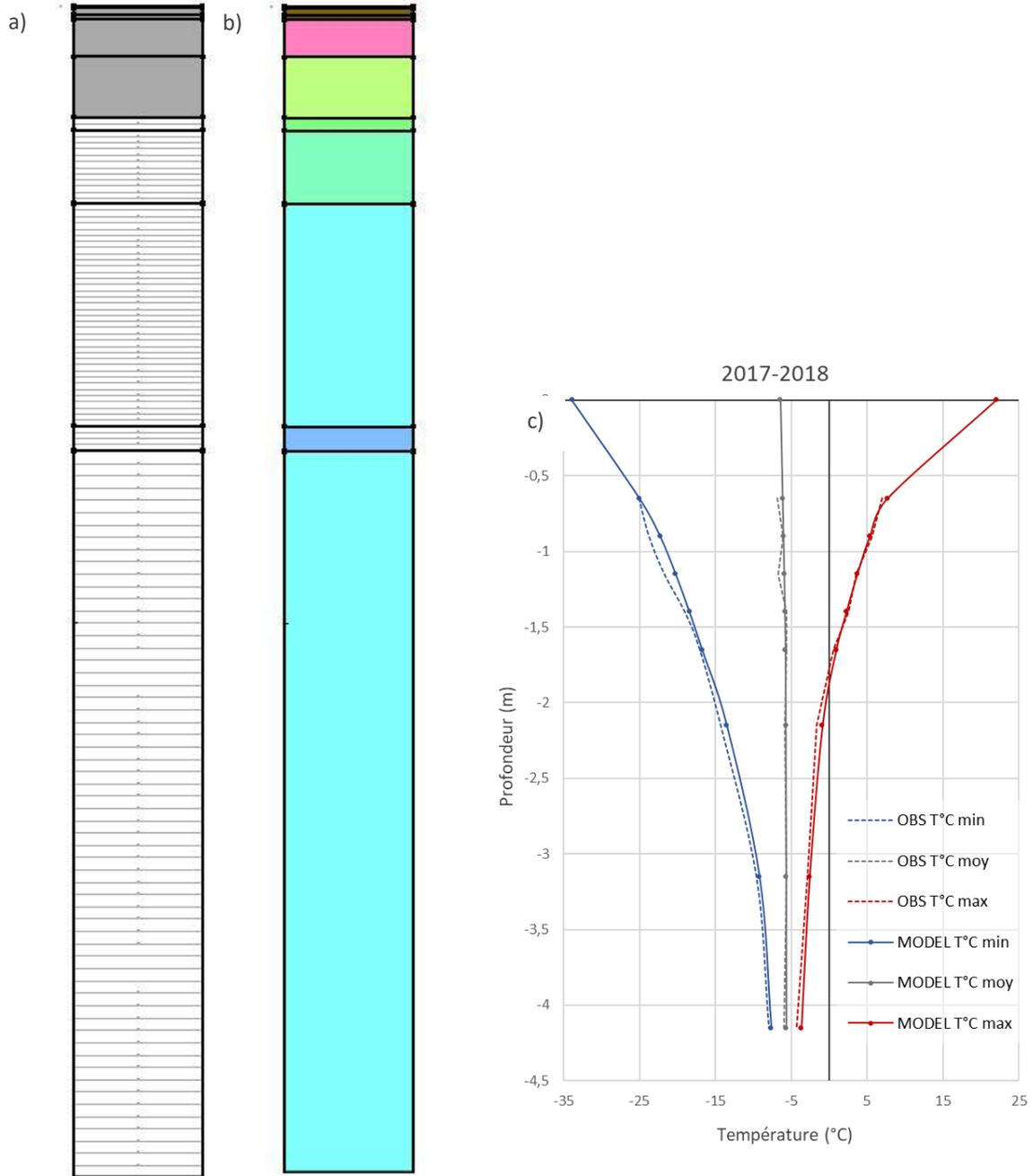


Figure 32 : a) Maillage, b) géométrie et conditions limites, ainsi que c) profils thermiques initiaux du modèle FP-26, localisé dans des argiles marines, sous une route pavée à Salluit.

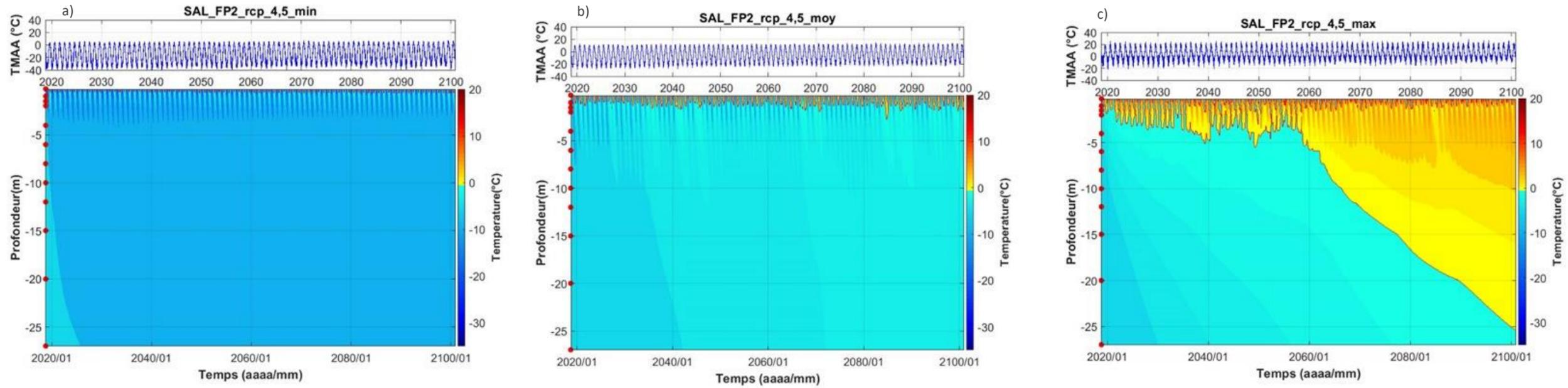
**Tableau 15** : Propriétés thermiques appliquées aux couches du modèle au câble SAL-FP-26

<b>SAL- FP-26 : Argiles marine sous une route pavée</b>						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Capacité calorifique volumique KJ/m <sup>3</sup> /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Teneur en eau vol. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		Gelée	Non-gelée	Gelée	Non-gelée	
0 à 0,05	Asphalte	2500	2500	185	185	0
0,05 à 0,5	Remblai	1500	1660	190	140	0,1
0,5 à 2	Sable	1850	2480	130	190	0,2
2 à 4,5	Silt argileux salin et pauvre en glace	3200	3800	92,7	52,27	0,5 (dégèle à -2)
4,5 à 5	Glacé + intrusion d'agglomérats silto-argileux	2700	3800	142,56	52,27	0,78 (dégèle à -2)
5 à 8	Argile saline et riche en glace	2650	3700	92,7	52,27	0,6 (dégèle à -2)
8 à 17	Argile saline avec lentilles de glace	2600	3200	92,7	52,27	0,38 (dégèle à -0,4)
17 à 18	Couche de sable silteux pauvre en glace et peu saline	1850	2480	188,35	140,83	0,32
18 à 50	Argile saline avec lentilles de glace	2600	3200	92,7	52,27	0,38 (dégèle à -0,4)
50 à 150	Roc	1200	1200	220	220	0

### 3.2.3. Projections et simulations climatiques

#### Modèle FP2

##### Scénario RCP 4.5



##### Scénario RCP 8.5

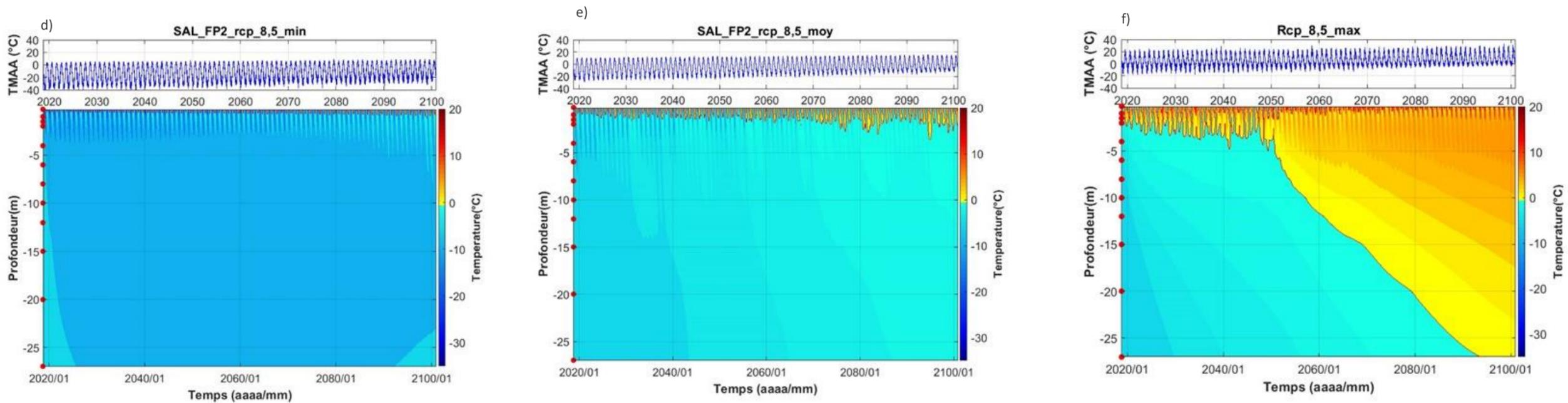


Figure 33 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP2 de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

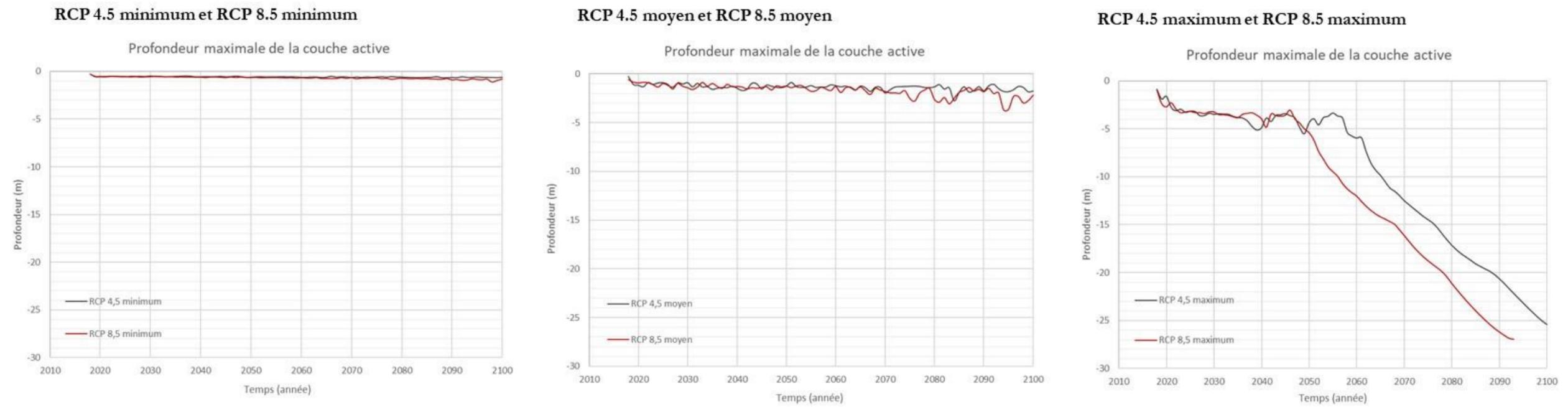
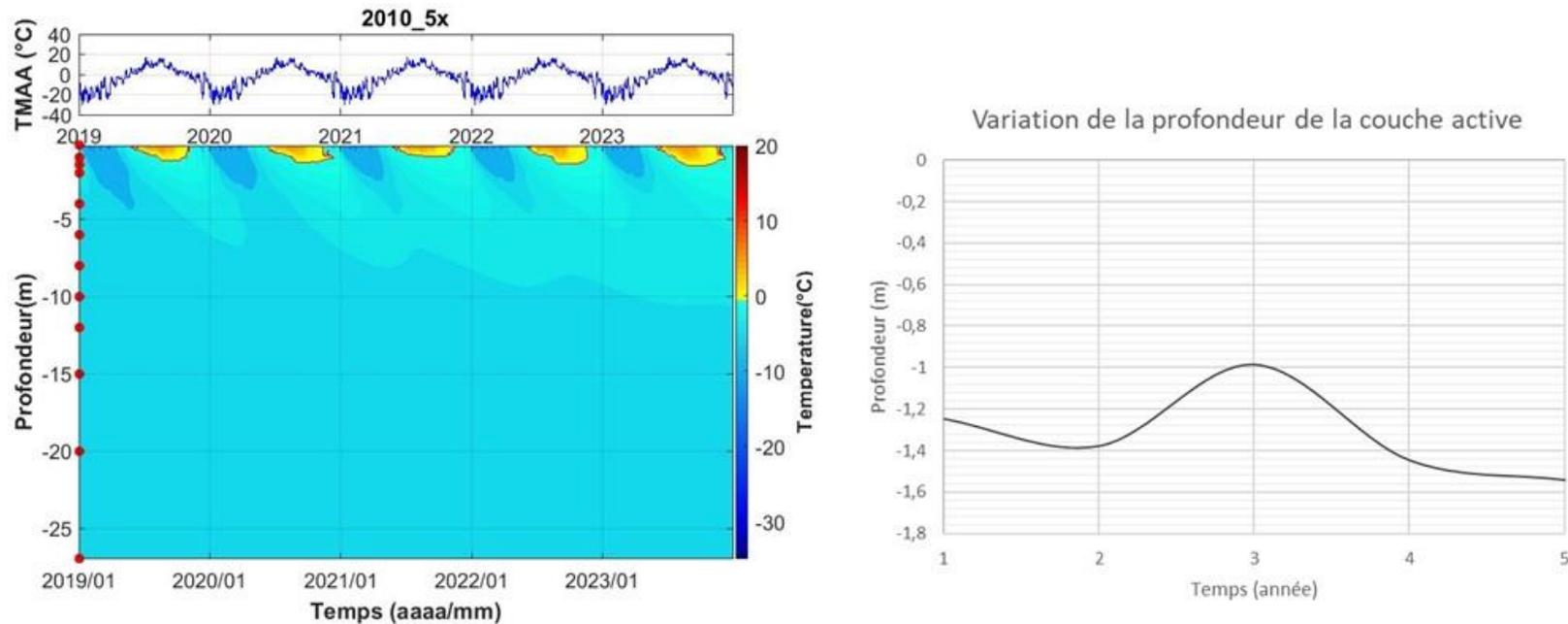


Figure 34 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL\_FP2.

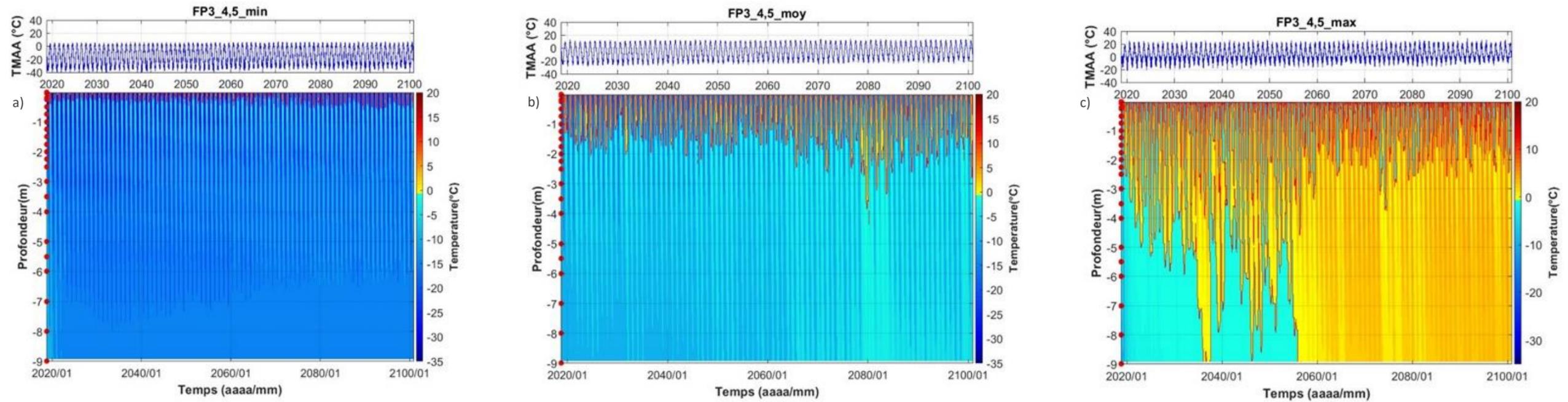
Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x année 2010)



**Figure 35** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP2.

## Modèle FP3

### Scénario RCP 4.5



### Scénario RCP 8.5

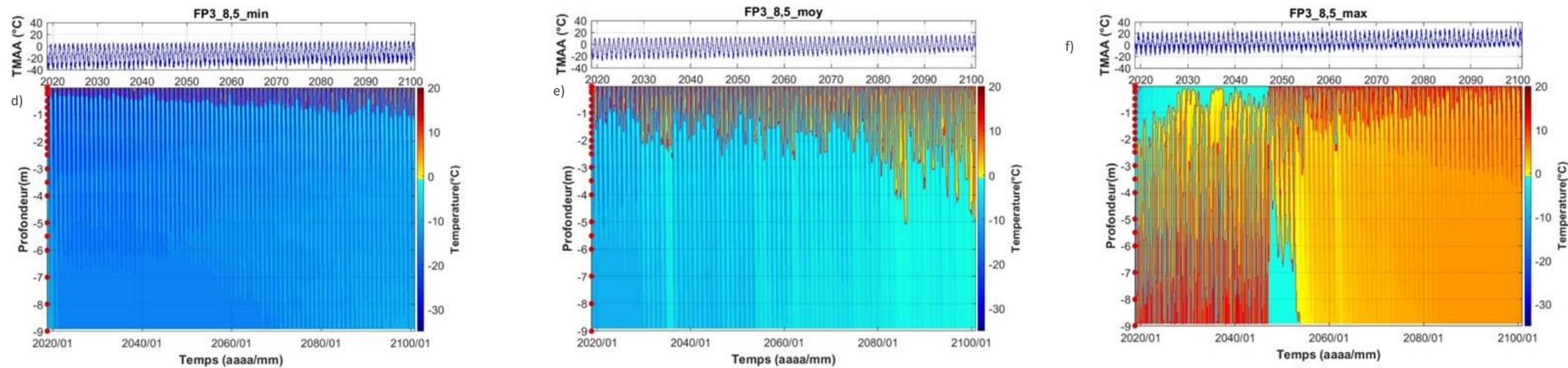
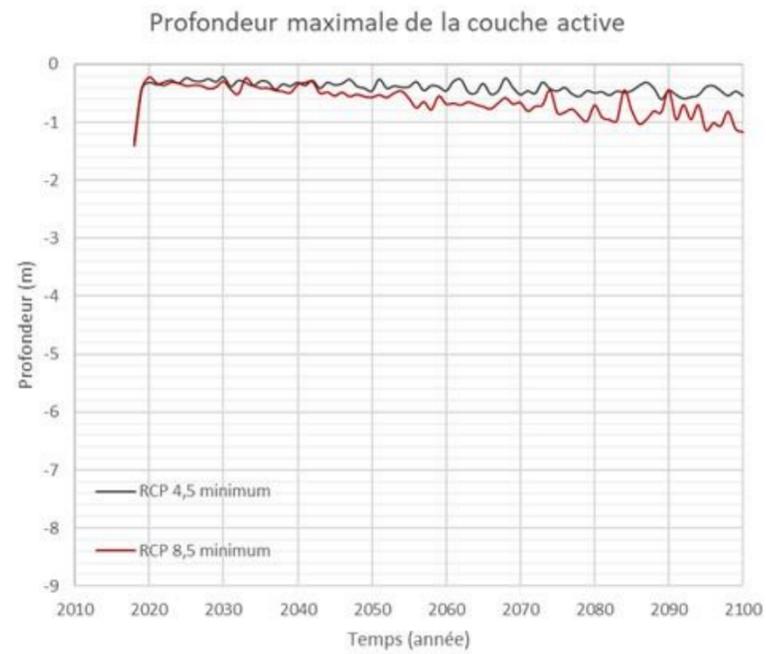


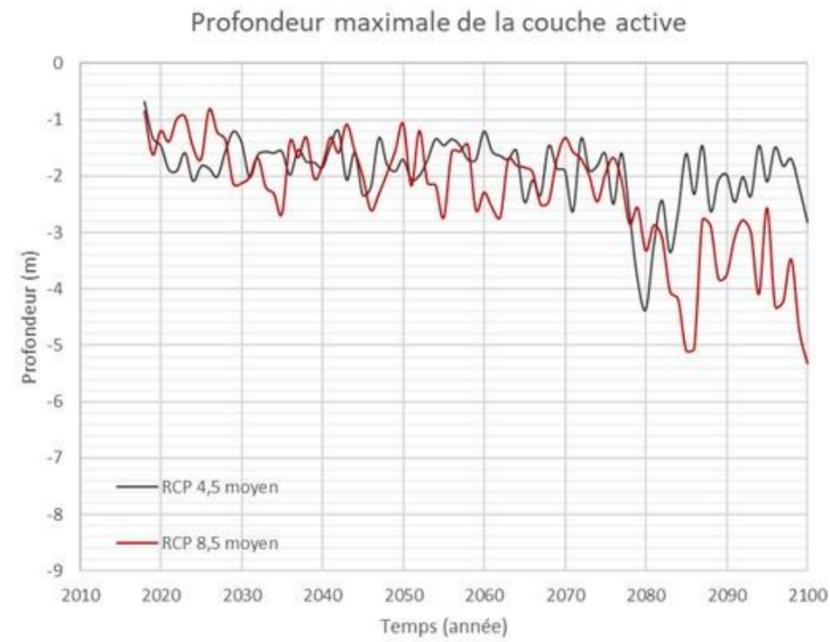
Figure 36 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP3 de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen



RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum

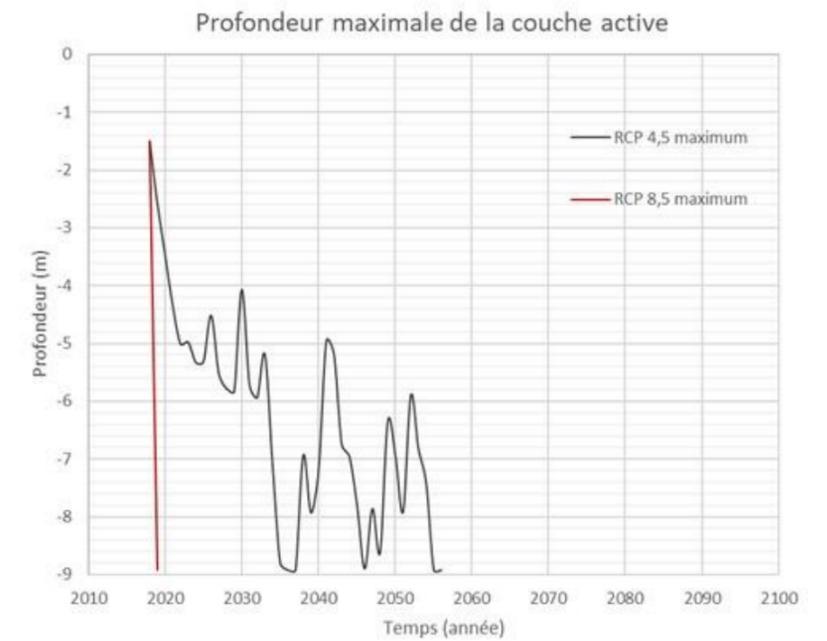
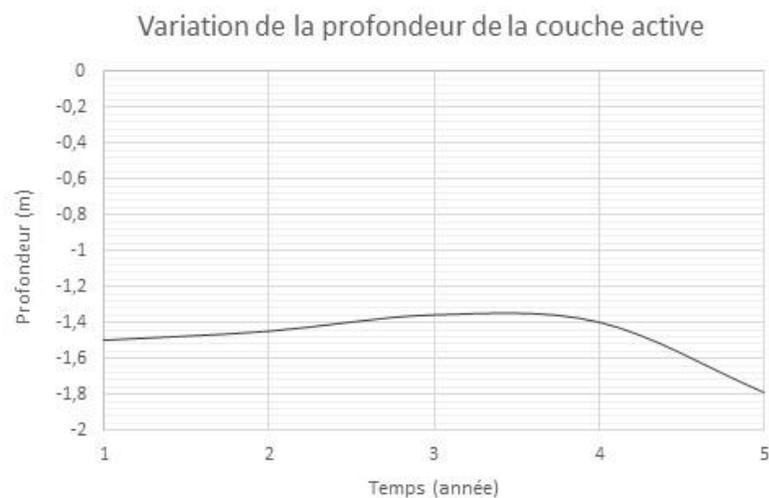
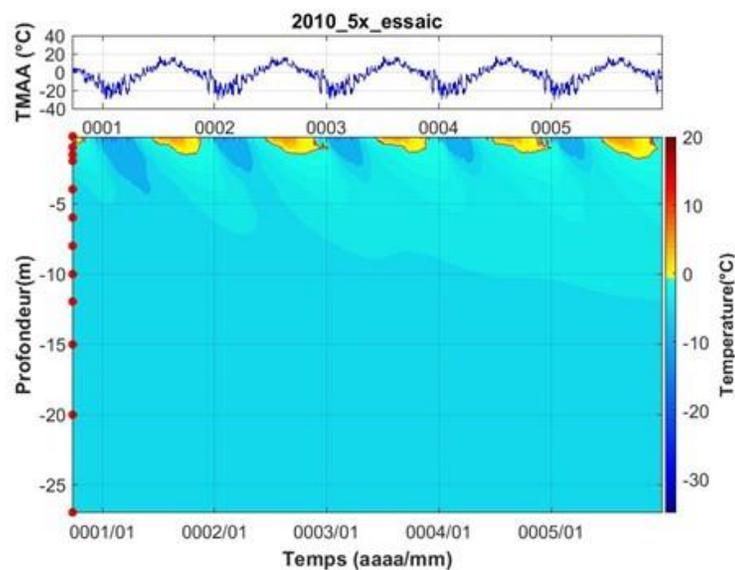


Figure 37 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL\_FP3.

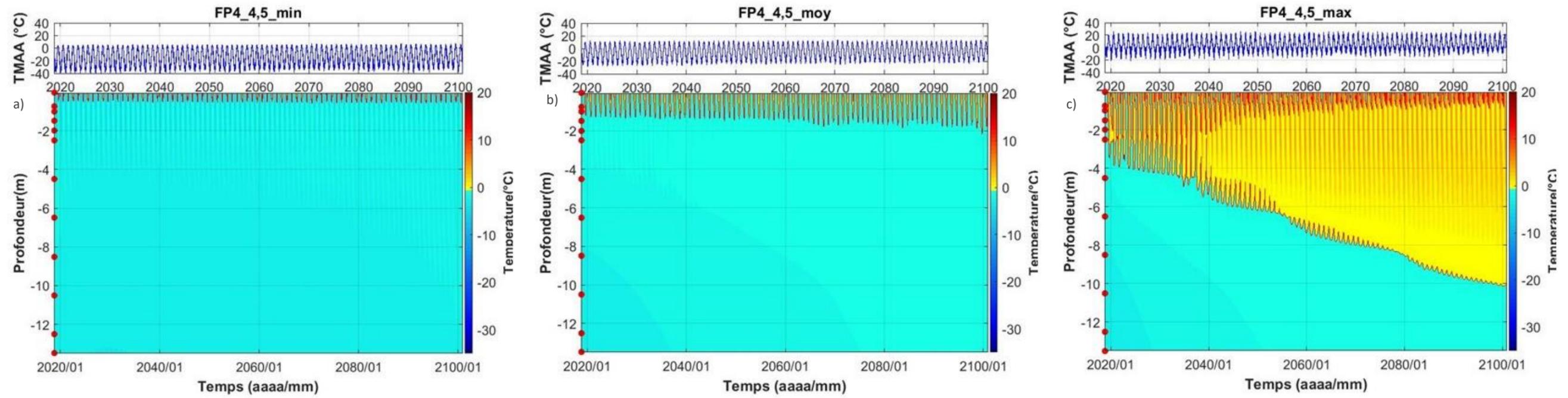
Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x année 2010)



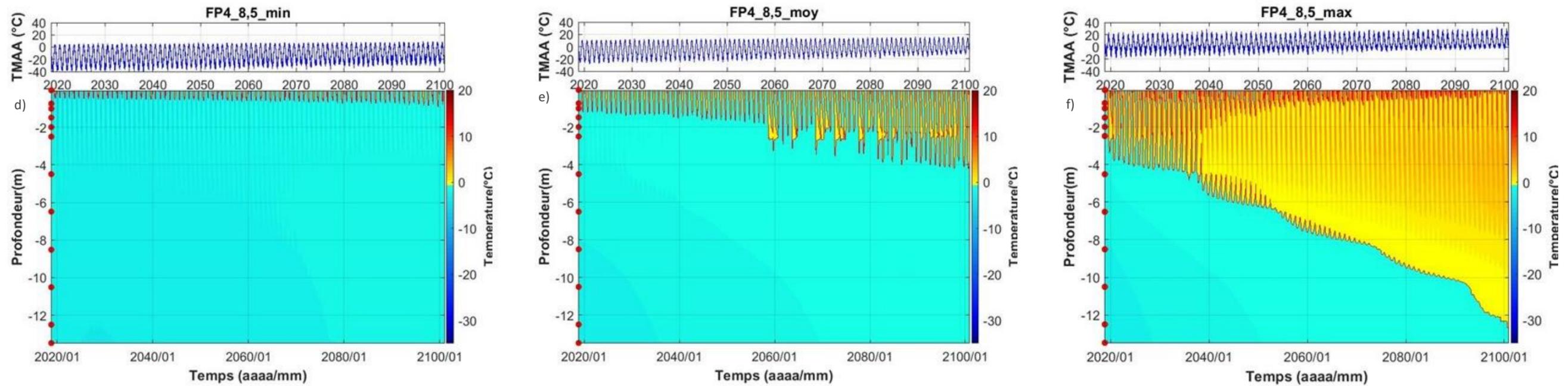
**Figure 38** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP3.

**Modèle FP4-2**

**Scénario RCP 4.5**



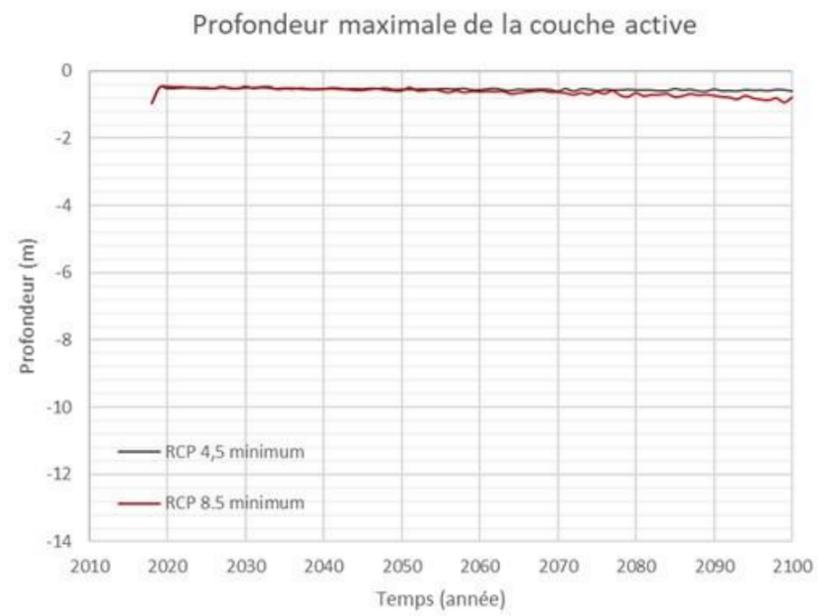
**Scénario RCP 8.5**



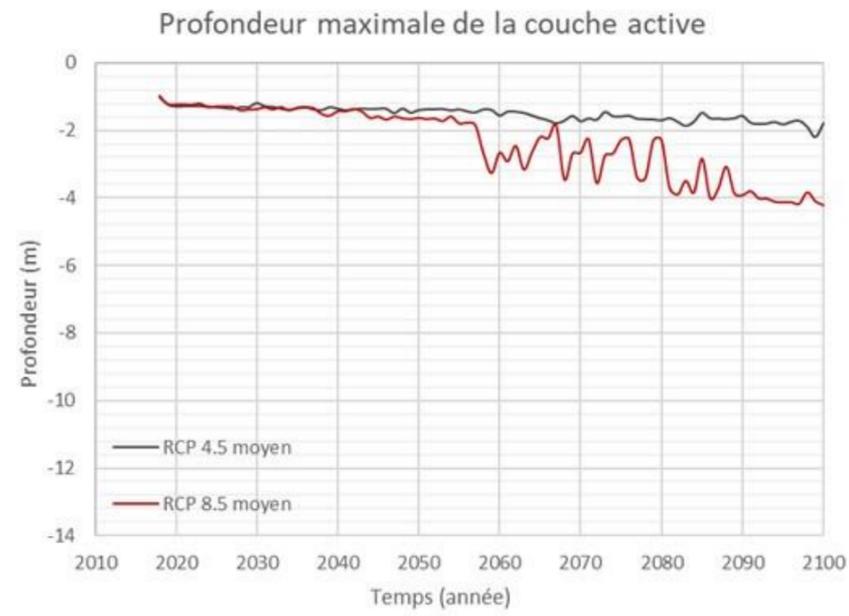
**Figure 39** : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP4 de 2018 à 2100.

## Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

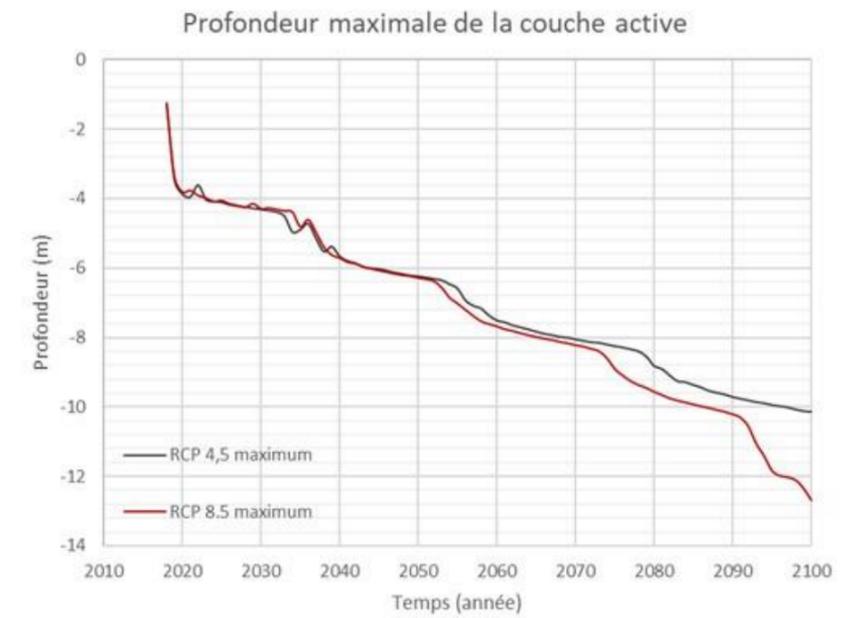
### RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



### RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen

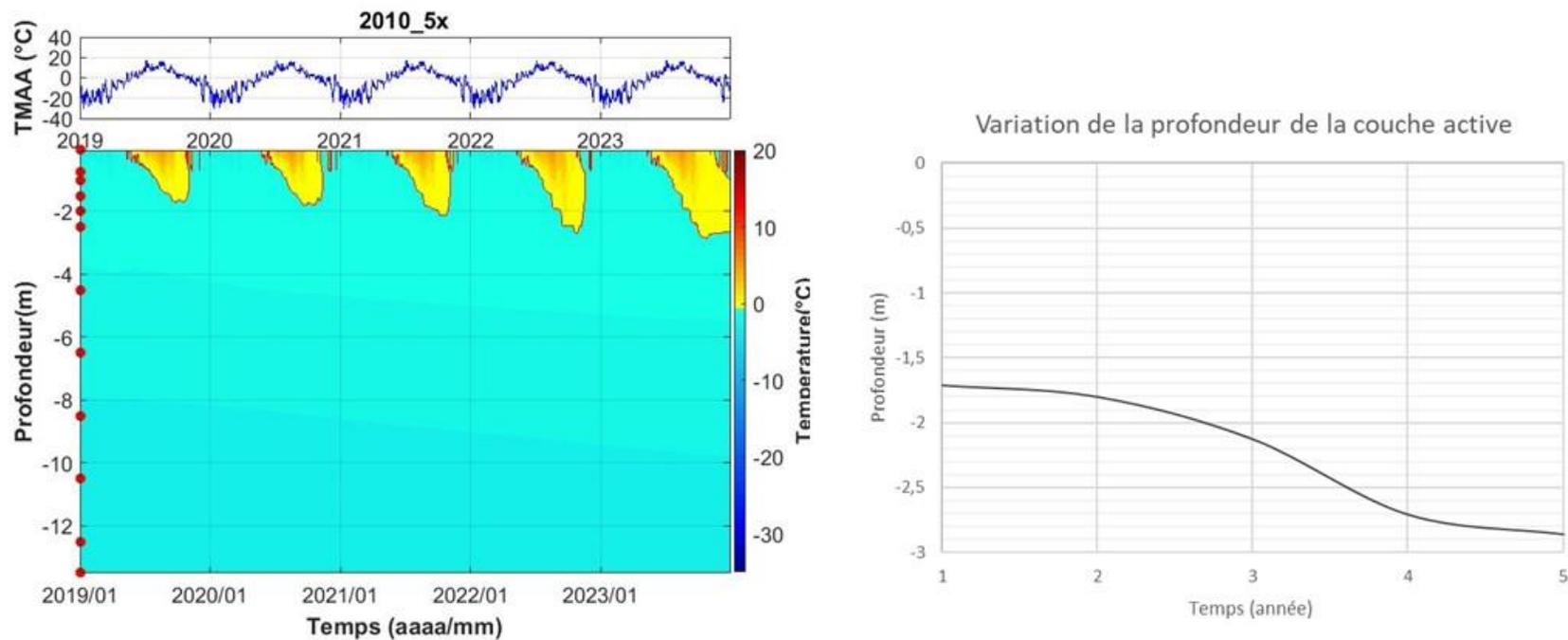


### RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum



**Figure 40** : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL\_FP4.

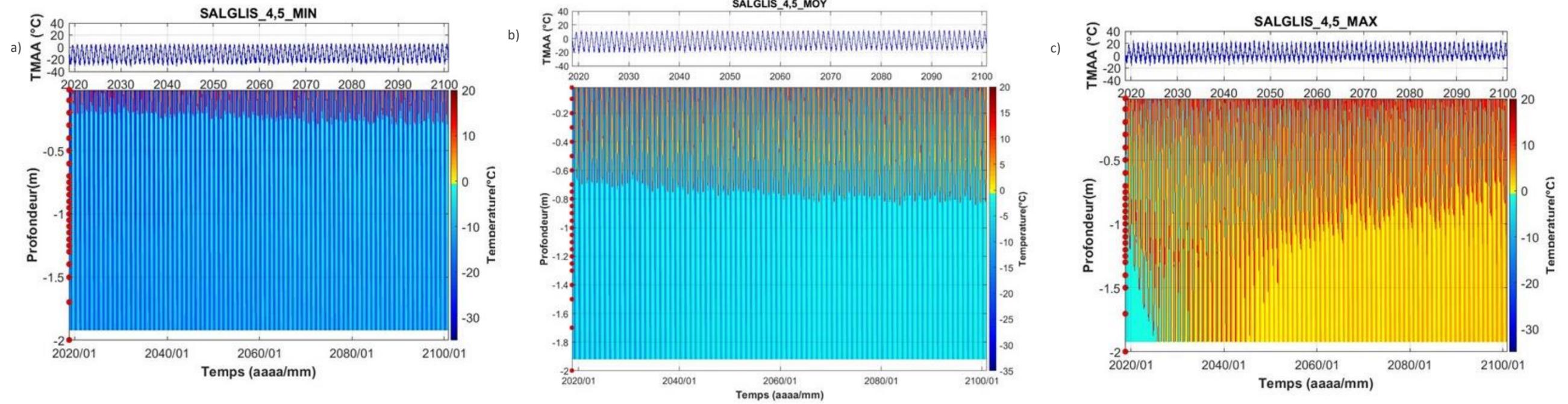
Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x année 2010)



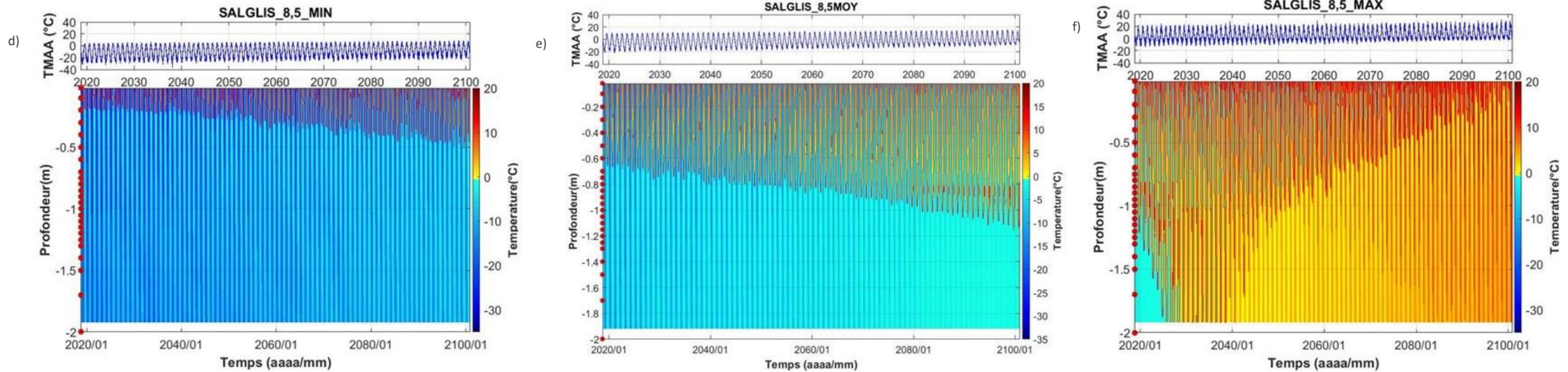
**Figure 41** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SAL-FP4.

## Modèle SALGLIS

### Scénario RCP 4.5



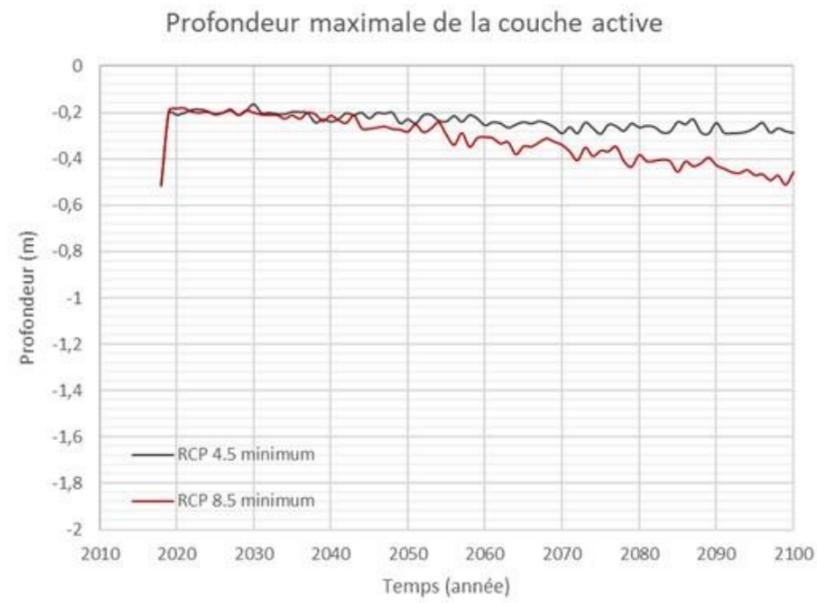
### Scénario RCP 8.5



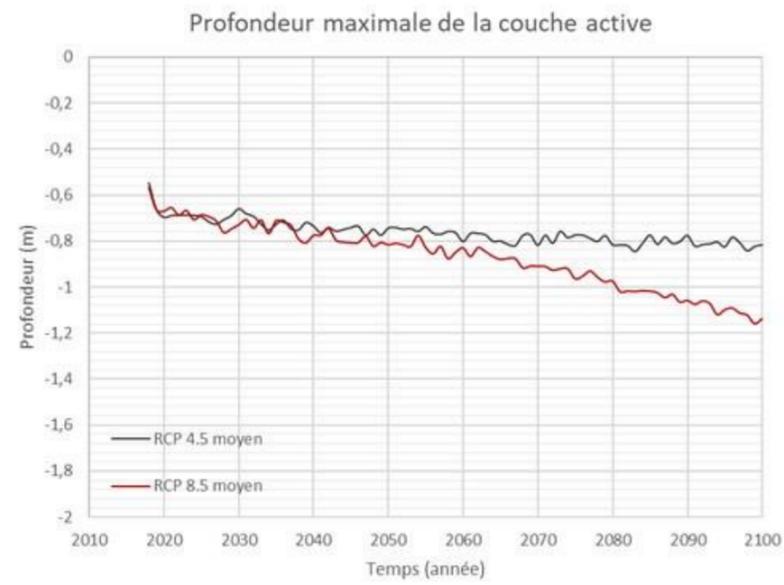
**Figure 42 :** Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP4 de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen



RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum

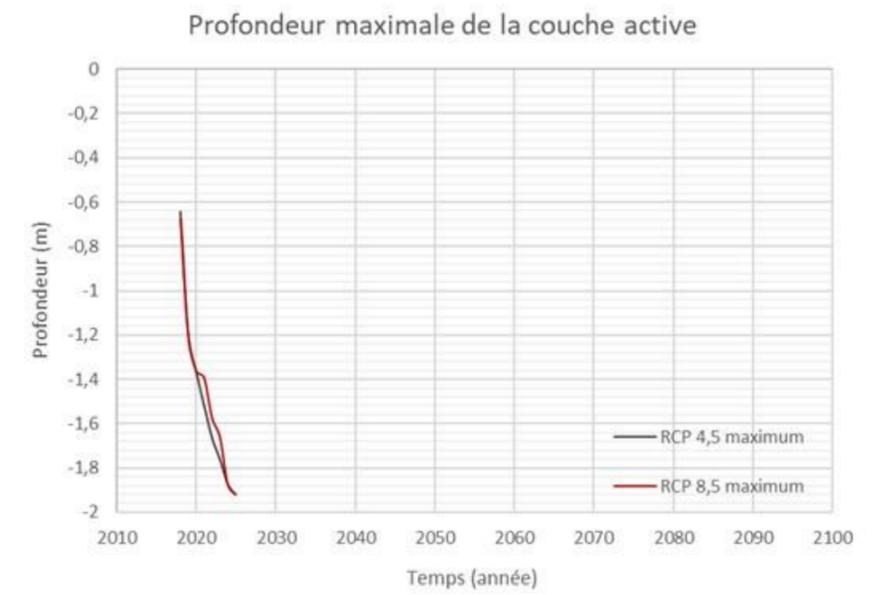
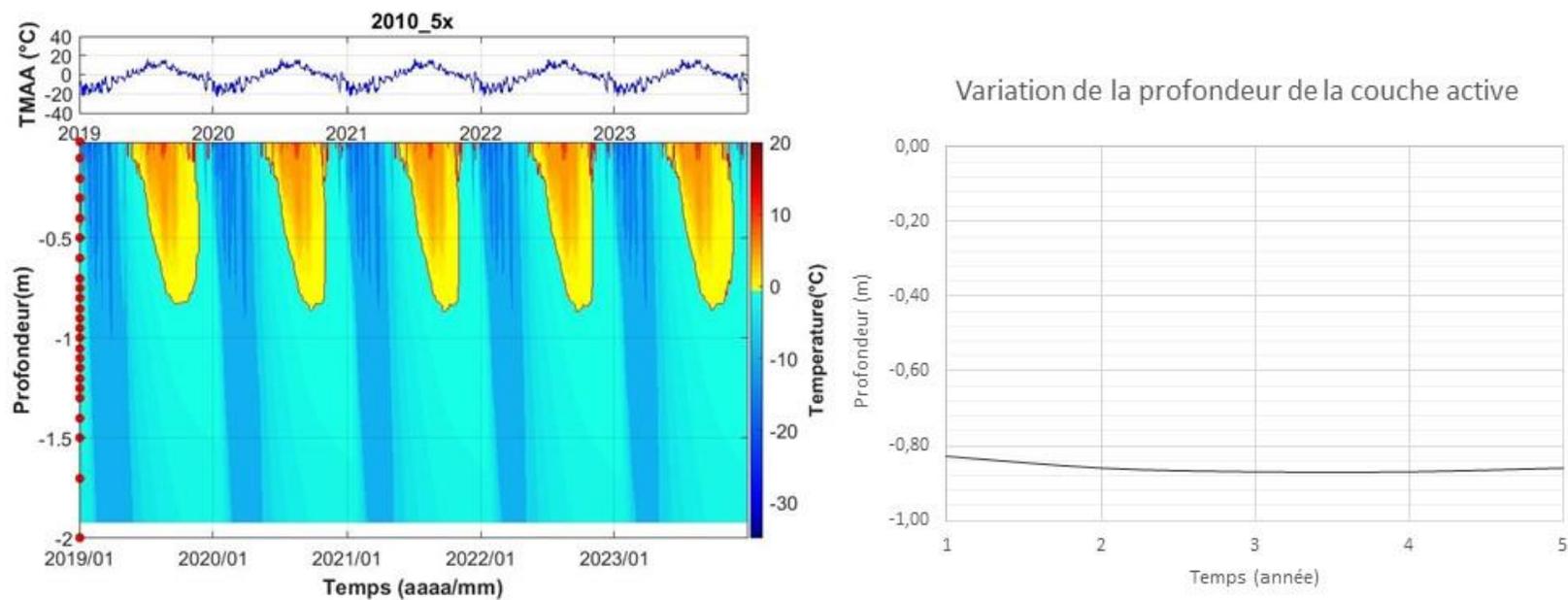


Figure 43 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SALGLIS.

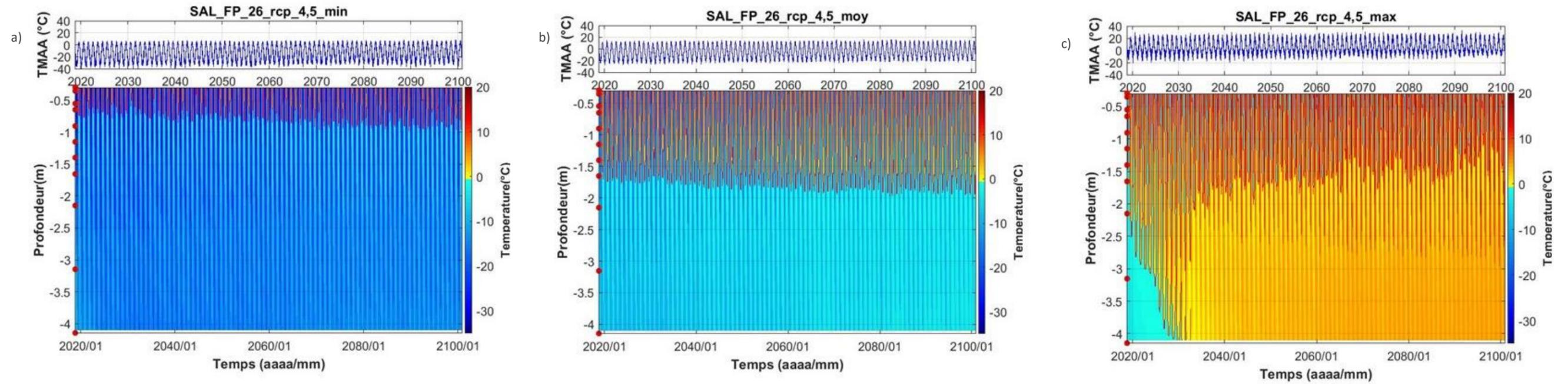
Variation de la température et de la profondeur de la couche active du pergélisol, lorsque soumise à une série de 5 années particulièrement chaudes (5x année 2010)



**Figure 44** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle SalGLIS.

## Modèle FP-26

### Scénario RCP 4.5



### Scénario RCP 8.5

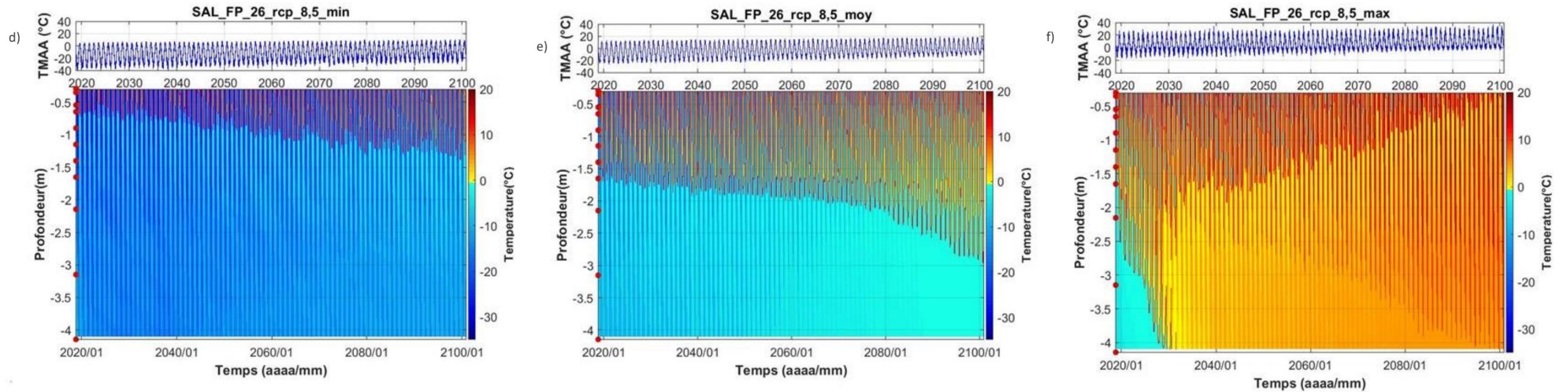
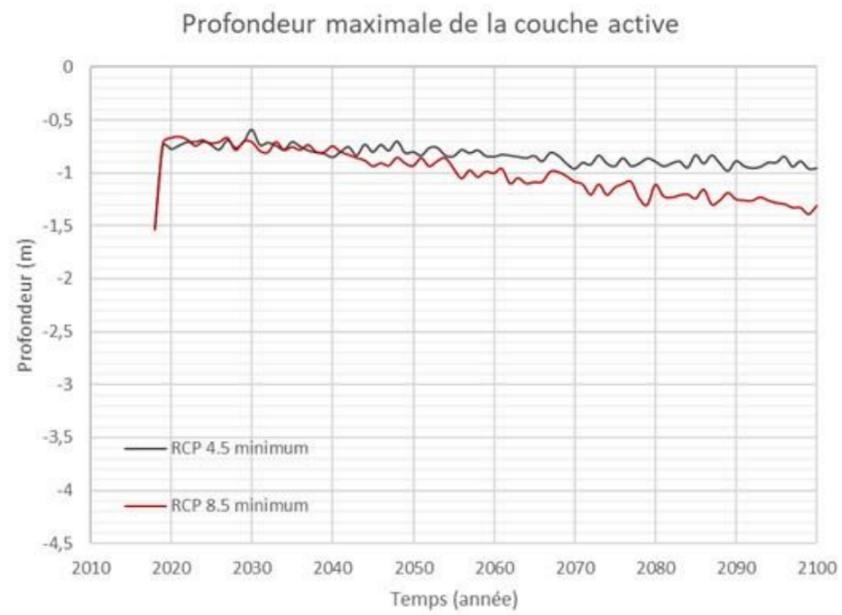


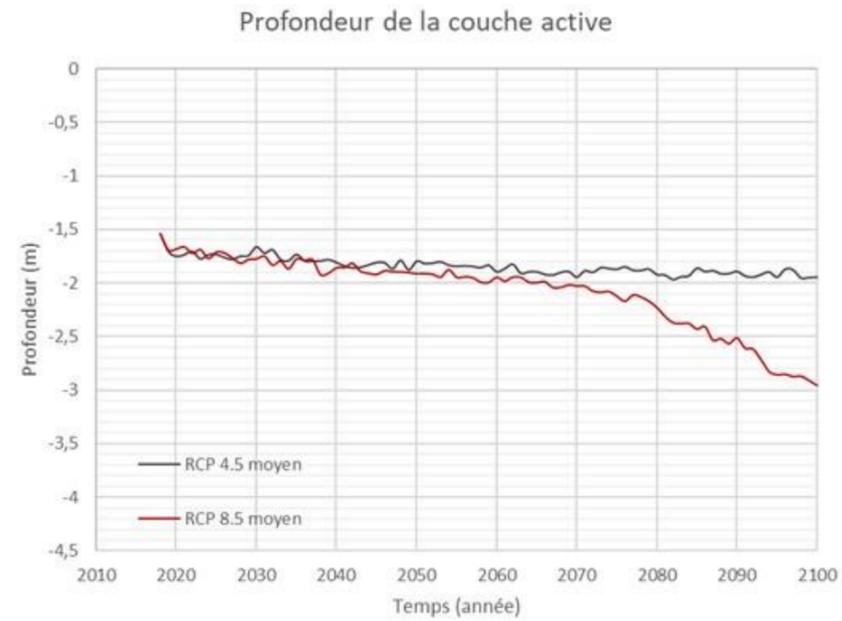
Figure 45 : Température du sol en fonction du temps, simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios a) 4.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, b) 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, c) 4.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, d) 8.5 minimum d'augmentation de gaz à effet de serre, e) 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre et f) 8.5 maximum d'augmentation de gaz à effet de serre, pour le modèle SAL-FP-26 de 2018 à 2100.

Comparaison entre les températures simulées des scénarios 4.5 et 8.5

RCP 4.5 minimum et RCP 8.5 minimum



RCP 4.5 moyen et RCP 8.5 moyen



RCP 4.5 maximum et RCP 8.5 maximum

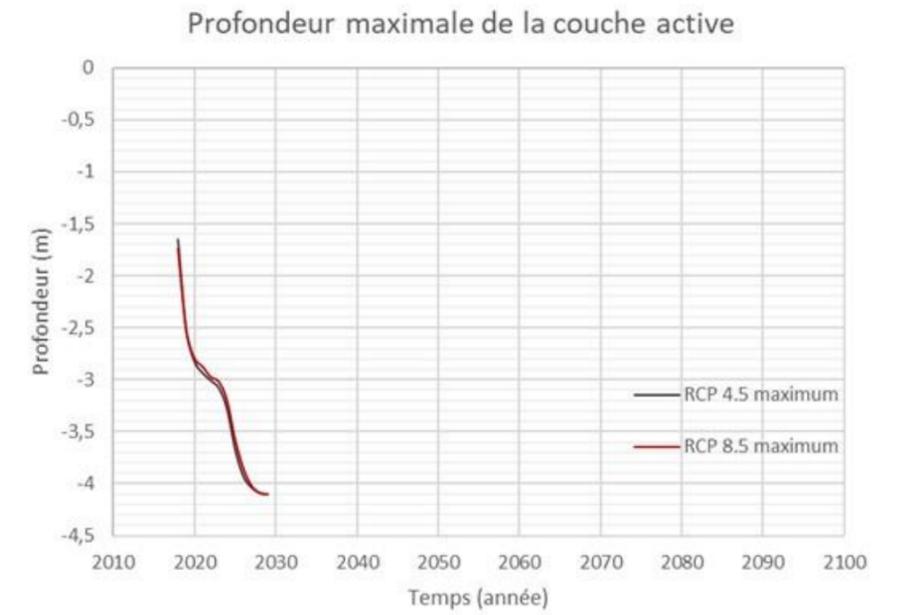
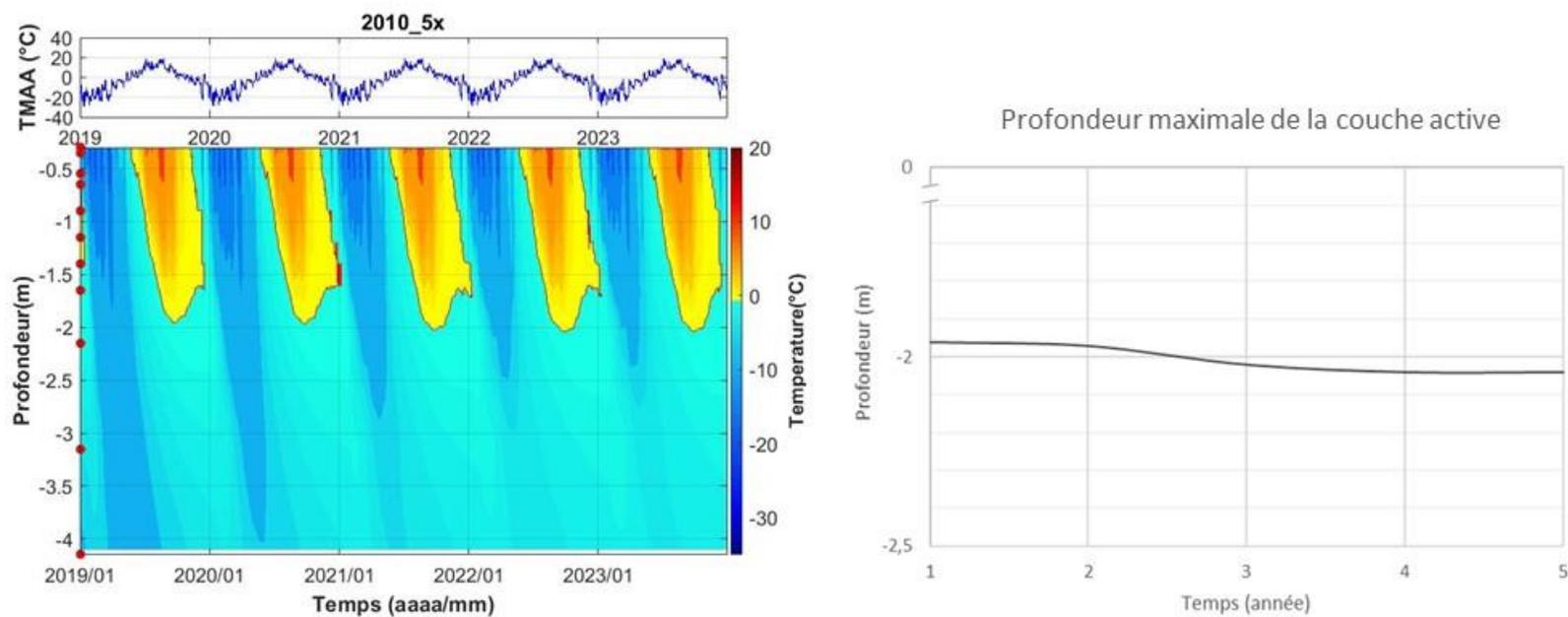


Figure 46 : Comparaison de la profondeur maximale de la couche active simulée à partir de 6 sorties du modèle MRCC5 selon les scénarios 4.5 et 8.5, pour le modèle SAL\_FP-26.

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



**Figure 47** : Variation de la température du pergélisol et de la profondeur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année 2010, pour le modèle FP-26.

## **Impacts d'une hausse soudaine de température**

À titre exploratoire, nous avons simulé qu'elle serait l'effet d'une année particulièrement chaude qui serait récurrente sur une période de cinq ans à trois sites dans le village. Pour ce faire, les températures de l'année climatique la plus chaude jamais enregistrée au Nunavik, soit 2009-2010, ont été introduites dans le modèle après l'année 2019 et la simulation a roulé sur 5 ans (**Figures 35, 38, 41, 44 et 47**). L'intention est d'estimer l'impact associé au risque que poserait une variation à court terme du climat, soit un pic exceptionnel sur la courbe de tendance climatique à long terme. Dans le village (câble FP-2), la couche active s'épaissirait de 20 cm dès l'année chaude, elle fluctuerait ensuite à cause de changements dans la teneur en glace du sol pour plonger d'un total de 35-40 cm en 5 ans. Considérant une teneur en glace estimée de l'ordre de 50 % près du plafond du pergélisol, on peut entrevoir des tassements de 10 à 20 cm de la surface dans le village. Le principal impact serait qu'il faudrait procéder diligemment à une mise à niveau des maisons sur chevalets pour prévenir les dommages causés par les déformations structurales. Des rues, des fossés et des ponceaux (ou caniveaux) auraient possiblement à être réparés pour assurer la qualité des déplacements et le drainage urbain.

Dans le till (FP-3), la couche active s'épaissirait de 30 cm (1.8 à 2.1 m) la première année; après 5 ans l'augmentation de la profondeur estivale de dégel serait de 70 cm, jusqu'à 2,5 m. Des tassements de l'ordre de 15 à 30 cm surviendraient dans Salluit 2, autour du garage municipal. Par contre, cette fonte aurait un effet stabilisateur dans les secteurs à till mince sur le roc (**Figure 38**).

Dans des dépôts de silt et argile (FP4), la couche active pourrait s'approfondir d'environ 1 mètre après 5 ans (**Figure 41**). Cet approfondissement pourrait occasionner des tassements importants, puisqu'ils se produiraient dans la couche riche en glace du sol, située entre 2 et 3 mètres sous la surface.

Sur la pente sensible au glissement de terrain (SALGLIS), l'approfondissement de la couche active dans le pergélisol riche en glace serait susceptible de donner lieu à des mouvements de terrain. Cette observation s'applique à l'ensemble des terrains argileux en pente à Salluit, lesquels sont déjà zonés comme « non-constructibles » dans le plan d'aménagement (**Figure 44**).

Dans l'argile marine (FP-26) une séquence de cinq années particulièrement chaudes pourrait n'avoir qu'un effet très limité sur la profondeur de la couche active (**Figure 47**). Il est cependant important de noter que la couche de sédiments située à 4.5 mètres de profondeur est riche en sel et pourrait dégeler à des températures aussi faibles que -2°C (**Tableau 15**).

## 4. FAITS SAILLANTS

- État de la situation :
  - Le terrain de Salluit est particulièrement difficile à aménager en raison des contraintes topographiques, en fond de vallée et avec des versants escarpés.
  - Les simulations du régime thermique du pergélisol et des variations d'épaisseur de la couche active basées sur les simulations climatiques établies sur les RCP 4.5 et 8.5, ne permettent pas d'établir une chronologie certaine des changements qui risquent de survenir sur le terrain. En effet, les RCP (dépendants des choix politiques globaux), les modèles climatiques (répartis sur une large gamme de tendances) et les simulations numériques du pergélisol (présentant des simplifications mathématiques) intégrés dans les calculs introduisent des incertitudes temporelles importantes.
  - Les dépôts riches en glace sont appelés à connaître des instabilités à plus ou moins court terme lorsque des années chaudes surviendront et à connaître des dégradations graduelles, mais importantes avec le réchauffement climatique encore attendu.
  - Il découle de cette analyse aussi intuitive que numérique que la partie basse du village de Salluit construite sur des argiles marines épaisses et salines connaîtra fort probablement des problèmes de tassements et de détérioration concurrente du drainage superficiel dans les années à venir, probablement dans les années 2030, s'il ne survient pas d'impact d'années excessivement chaudes entretemps.
  - Les pentes à risque de glissement de terrain seront encore plus à risque.
  - Les plateaux rocheux vont en partie devenir plus stables, particulièrement là où la couverture de till est mince, car une fois le pergélisol dégelé dans la couche de till superficielle, le roc en dessous ne bougera jamais.
  
- Possibilités de développement :
  - La carte dépôts de surface montre qu'il y a encore des secteurs d'affleurement rocheux et de dépôts minces dans la vallée de Salluit qui pourraient recevoir un nombre significatif de maisons.
  
- Horizon d'action:
  - En considérant les températures actuelles du pergélisol et leur évolution au cours des années récentes, il appert que la réalisation du scénario fondé sur le RCP 4.5 moyen serait « probable » pour les 2-3 décennies à venir. Toutefois, le risque d'intense dégradation du pergélisol suggéré par les scénarios RCP 4.5 maximum (vers 2040) et RCP 8.5 dans la seconde moitié du siècle ne peut être ignoré du revers de la main compte tenu de la croissance continue de la concentration des GES dans l'atmosphère.

○ Recommandations :

- Le plan d'aménagement conçu par l'ARK et la communauté en 2010 offre encore la meilleure gamme de solutions pour construire et prendre de l'expansion, notamment par le développement du secteur de Salluit-4, terrain en pente, mais sur un dépôt discontinu de till peu épais sur le roc.
- Considérant d'autres contraintes, par exemple la déplétion des ressources granulaires à Salluit, il y a lieu d'envisager d'autres méthodes de fondation comme les pieux à friction dans les dépôts épais, les pieux ancrés au roc dans les dépôts relativement minces et la construction sur terrain rocheux avec de pentes acceptables, voire en taillant dans le roc des replats par déblai-remblai.
- Considérer la direction des vents dominants (sud-nord) dans la vallée en limitant le nombre et la hauteur des paliers topographiques et des remblais pour réduire les accumulations de neige. De même, éviter les « effets de mur » des bâtiments sur le déplacement de la neige par la poudrerie.
- Planifier un drainage urbain adéquat des nouveaux développements.

## RÉFÉRENCES

- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Hérault, E. et Vinet, F., 2007a. Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Réalisé pour le compte d'Ouranos, Ressources Naturelles Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 42 p.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarusov, A., 2007b. L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik: caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec et Ouranos. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 192 p.
- Allard, M. et L'Hérault, E. 2010. L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport d'étape : Cartographie du potentiel de construction de la vallée de Salluit selon les conditions de pergélisol et les pentes. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 29 p.
- Allard, M., Sarrazin, D. et L'Hérault, E., 2009. Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25 à Kuujuaq. Réalisé pour le compte de Transports Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 132 p.
- Allard, M., L'Hérault, E., Gibéryen, T. et Barrette, C. 2010. L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport final : Salluit : s'adapter et croître. Réalisé pour le compte du ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 64 p.
- Allard, M., Mathon-Dufour, V., L'Hérault, E. et Sarrazin, D., 2018. Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures de transport du MTMDET au Nunavik dans le contexte des changements climatiques. Rapport d'étape 2 produit pour le compte du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 107 p.
- Allard, M., Wang, B. and Pilon, J.A. (1995). Recent cooling along the Southern Shore of Hudson Strait, Québec, Canada, documented from permafrost temperature measurements. *Arctic and Alpine Research*, 27 : 157-166.
- Allard, M. & Seguin, M.K. (1987). Le pergélisol au Québec nordique: Bilan et perspectives. *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 141-152.
- Annan, A.P., 2003. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors and Software GPR Manual. 278 p.
- Aubé-Michaud, S., Allard, M., L'Hérault, E., Mathon-Dufour, V. et Deslauriers, C., 2019. Identification des risques actuels et appréhendés sur le territoire des 14 communautés du Nunavik en fonction des changements climatiques – phase 2.

- Rapport produit pour le compte du ministère de la Sécurité publique du Québec, gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval.
- Bilodeau, S., 2019. Analyse géomorphologique par l'utilisation du géoradar en appui à l'aménagement du village d'Akulivik. Essai de baccalauréat. Géographie. Université Laval, 62 p.
- Boisson, A., 2019. Caractérisation et modèles d'évolution des environnements côtiers du Nunavik, Québec, Canada. Thèse de Doctorat, Université Laval, 290 p.
- Calmels, F., 2005. Genèse et structure du pergélisol : étude de formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada. Québec, Thèse de Doctorat, Université Laval, 169 p.
- Calmels, F. et Allard, M., 2004. Ice segregation and gas distribution in permafrost using tomodensitometric analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15(4), 367-378.
- Carbonneau, A.-S., L'Hérault, E., Aubé-Michaud, S., Taillefer, M., Ducharme, M.-A., Pelletier, M. et Allard, M., 2015. Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour huit communautés du Nunavik. Rapport final, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 108 p.
- Centre d'études nordiques (CEN)., 2018. Réseau SILA. [En ligne] URL : <http://www.cen.ulaval.ca/sila.php> (page consultée le 17 novembre 2017).
- Charron, I., 2015. Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik, Ouranos, Montréal, 86 p.
- Environnement Canada., 2018. Données climatiques historiques. Gouvernement du Canada. [En ligne] URL : [https://climat.meteo.gc.ca/historical\\_data/search\\_historic](https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic) (page consultée le 25 mars 2018).
- Gauthier, S. (Inédit). Développement de méthodes de diffusion des données climatiques et environnementales en appui à l'aménagement du territoire en zone de pergélisol (Salluit, Nunavik). Département de géographie, Université Laval, thèse de doctorat [En cours de rédaction].
- GEOSLOPE International Ltd., 2014. *Thermal Modeling with TEMP/W: An Engineering Methodology*. Calgary, 163 p.
- L'Hérault, E., 2009. Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Département de Géographie, Université Laval, Québec. Thèse (M. Sc.), 149 p.
- L'Hérault, E. et Allard, M., 2018. Production de la 2<sup>ième</sup> approximation de la carte de pergélisol du Québec en fonction des paramètres géomorphologiques, écologiques, et des processus physiques liés au climat. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, 61 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Doré, G., Sarrazin, D. et Verreault, J., 2009. Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 1: État d'avancement du projet et

- résultats préliminaires. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 71 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Barrette, C., Doré, G. et Sarrazin D., 2012. Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 252 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A.-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M.-P., Ducharme, M.-A., Larrivée, K., Grandmont, K. et Lemieux, C., 2013. Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 90 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Lemay, M., Barrette, C. et Carbonneau, A.-S., 2014. Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujuaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 78 p.
- L'Hérault, E., Boisson, A., Allard, M., Aubé-Michaud, S., Sarrazin, D., Roger, J. et Barrette, C., 2017. Détermination et analyse des vulnérabilités du Nunavik en fonction des composantes environnementales et des processus physiques naturels liés au climat. Réalisé pour le compte du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 134 p.
- Massé, A. et Gallant, N., 2016. Marée et ondes de tempêtes dans la baie d'Hudson, la baie James, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava – Modélisation numérique des niveaux d'eau actuels et futurs dus aux changements climatiques. Rapport présenté à Ouranos, LaSalle NHC, Montréal.
- Mathon-Dufour, V., 2014. Caractérisation du pergélisol en vue de la réfection et de l'adaptation aux changements climatiques de l'aéroport d'Iqaluit, Nunavut. Mémoire de maîtrise. Géographie. Université Laval, 164p.
- Mathon-Dufour, V. et Allard, M., 2015. Understanding permafrost processes under the Iqaluit airport: Final report. Rapport produit pour le compte du Gouvernement du Nunavut et Transports Canada, 160 p.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)., 2018. Données climatiques, Observations quotidiennes. Gouvernement du Québec. [En ligne] URL : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees> (page consultée le 9 février 2018).
- Ouranos., 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.
- Rogelj, J., Meinshausen, M. et Knutti, R., 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2 (4), 248–253.

- Société d'habitation du Québec (SHQ)., 2018. Construction d'habitations au Nunavik. Guide des bonnes pratiques. Gouvernement du Québec, 238 p.
- Statistique Canada., 2017. Profil du recensement, Recensement de 2016, produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. [En ligne], URL : [www12.statcan.gc.ca/censusrecensement/2016/dppd/prof/index.cfm?Lang=F](http://www12.statcan.gc.ca/censusrecensement/2016/dppd/prof/index.cfm?Lang=F) (page consultée le 14 février 2018).
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. et Masui, T., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109 (1-2), 5-31.

## GLOSSAIRE

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

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

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

**Cryostratigraphie :** Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

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

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

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

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

**Glace interstitielle :** Glace contenue dans les vides du sol.

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

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

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

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

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

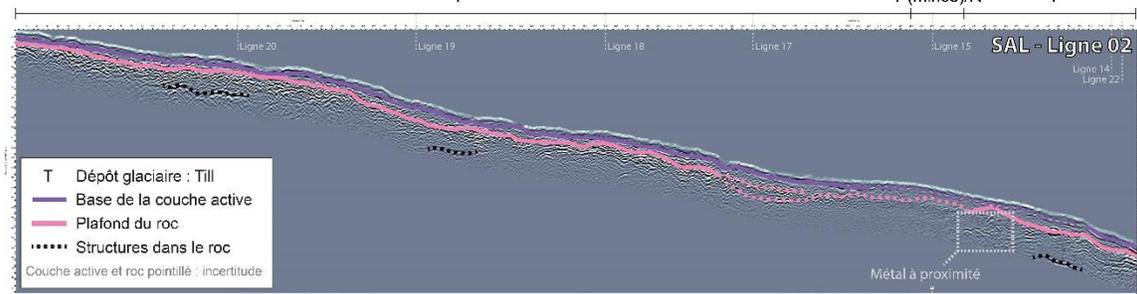
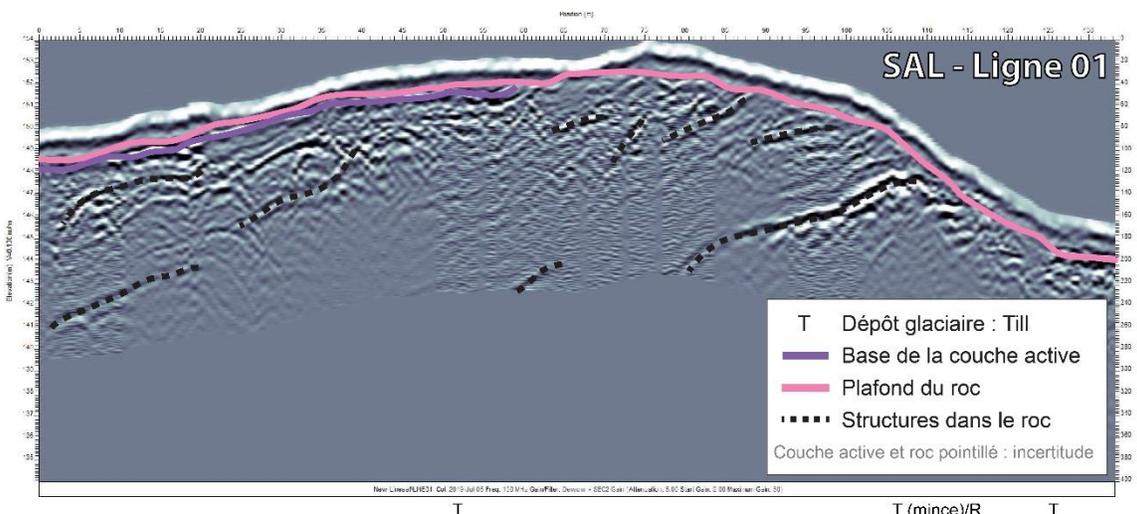
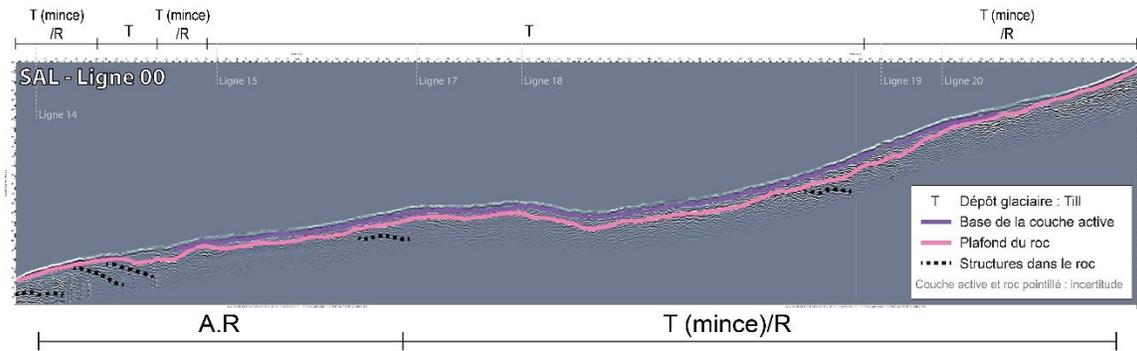
**Surcote :** Dépassement anormal du niveau de la marée haute ou du recul de la marée basse induit par des conditions météorologiques inhabituelles combinant leurs effets à ceux des marées induites par la lune et le soleil. Les surcotes peuvent être responsables d'inondations importantes en zone portuaire.

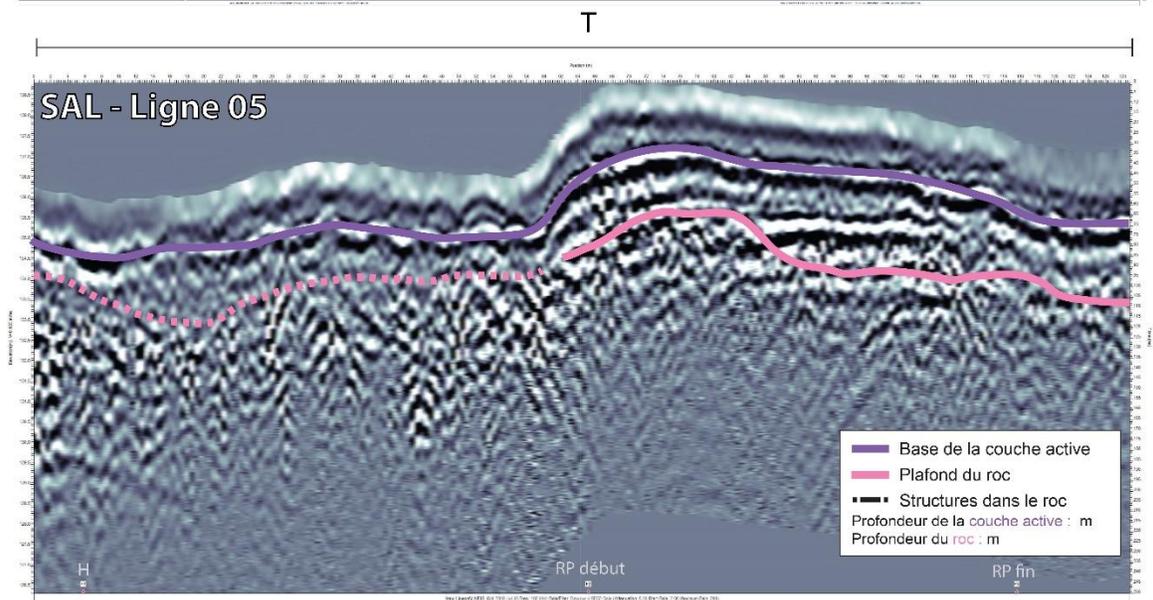
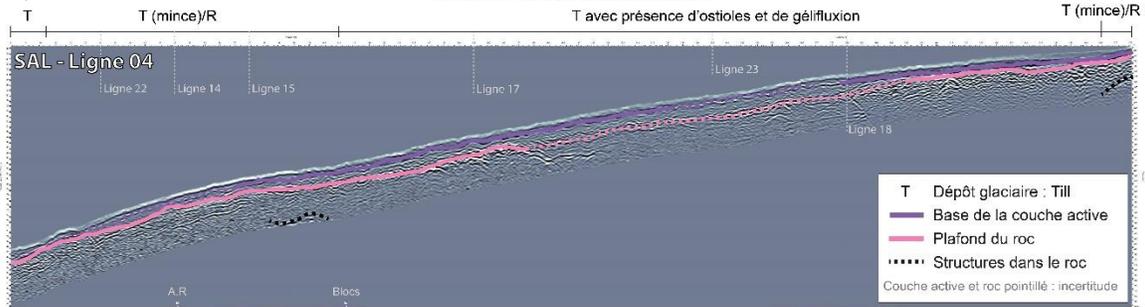
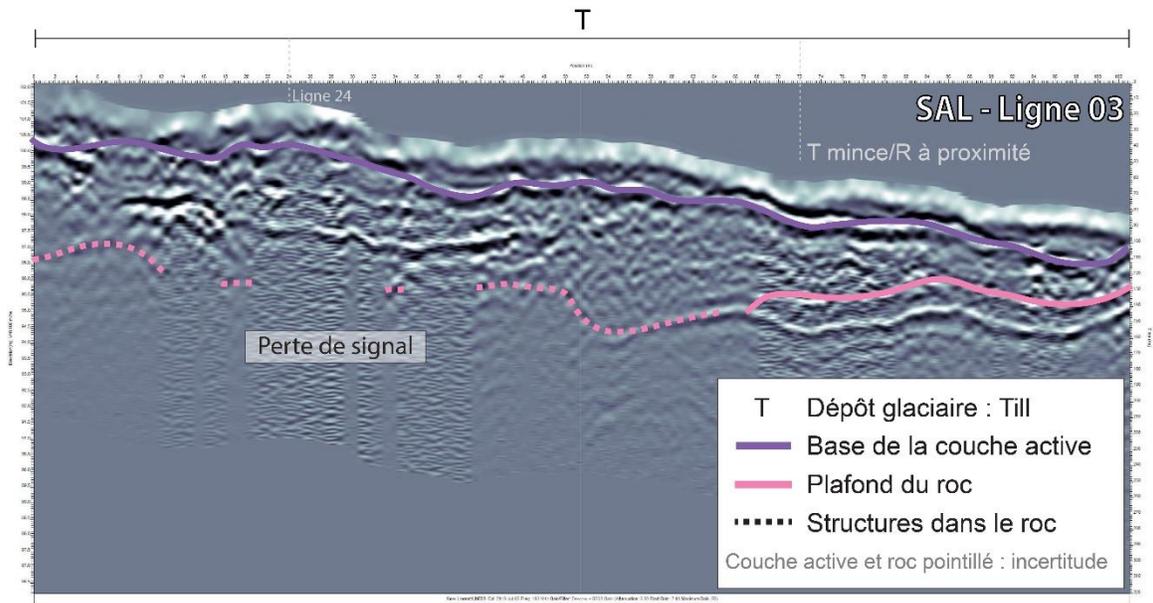
**Talik :** Couche ou partie de sol non gelée qui survient dans une zone de pergélisol en raison d'une anomalie locale dans les conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques.

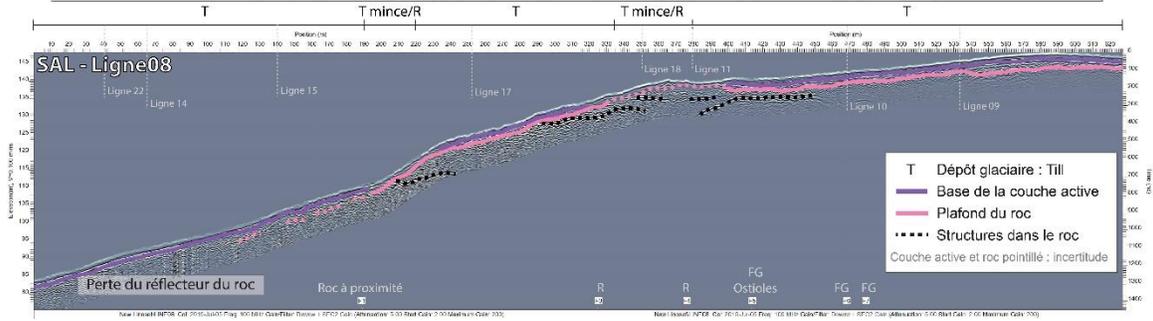
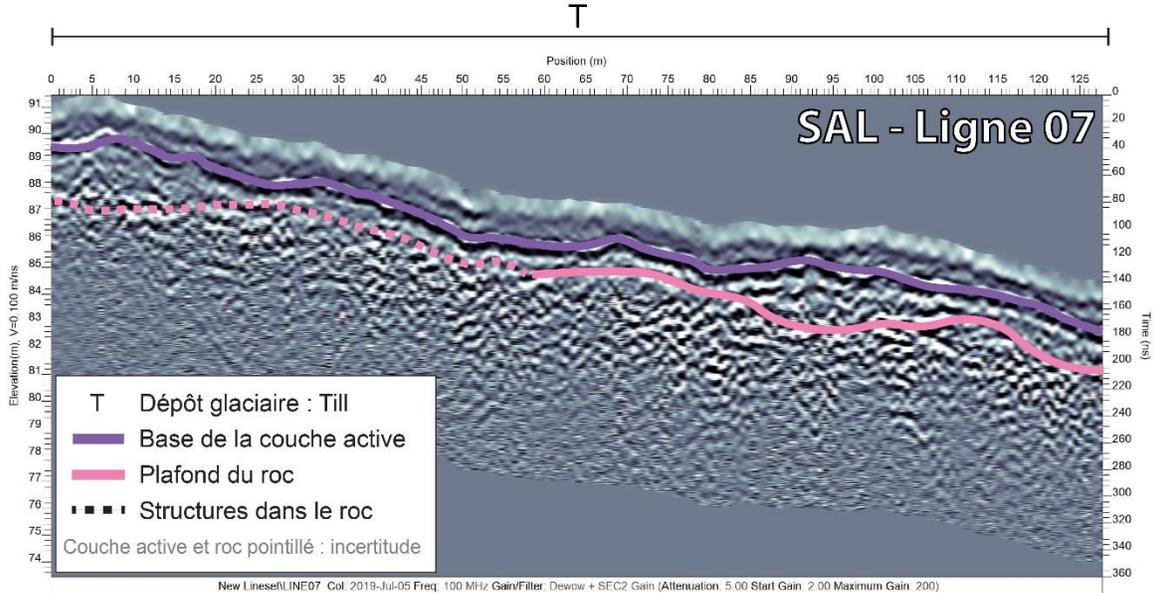
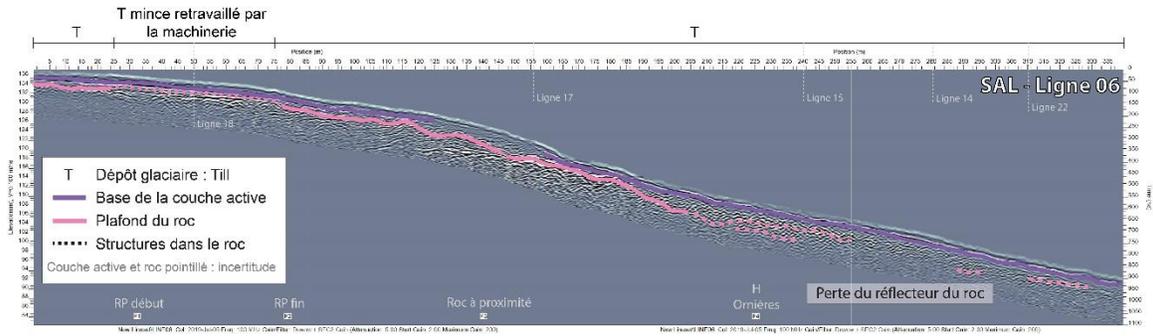
**Thermokarst :** Processus aboutissant à la fonte du pergélisol et à la formation d'une topographie irrégulière caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus à la perte de volume causée par la fonte de la glace. Cette fonte peut être généralisée et avoir une cause climatique (dégel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

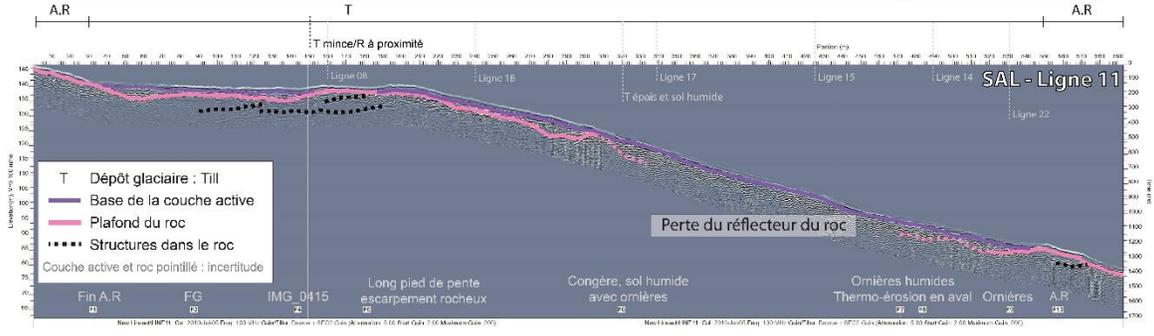
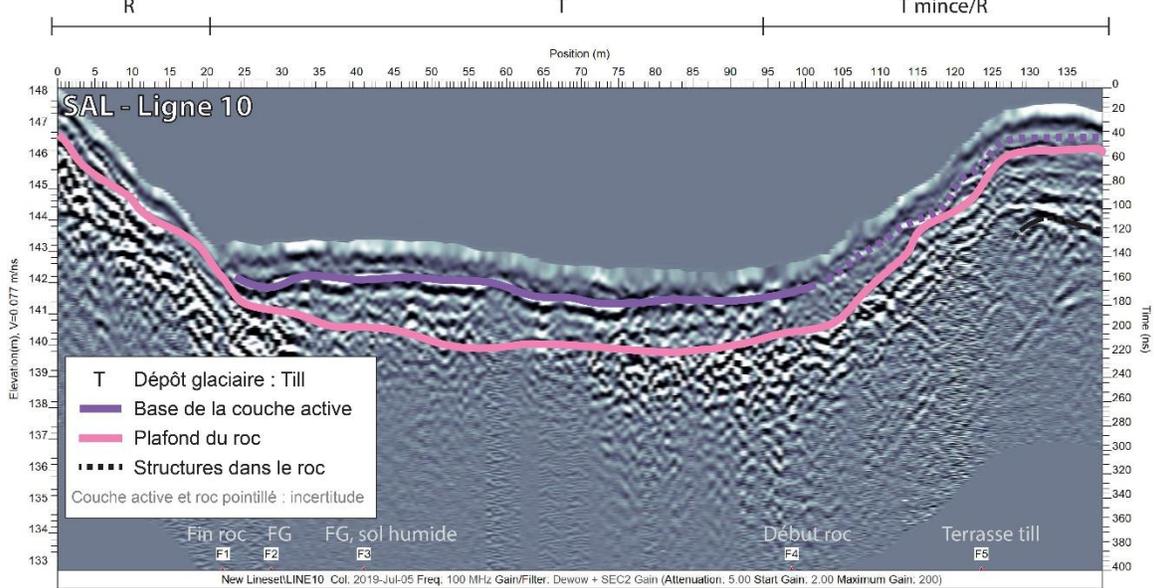
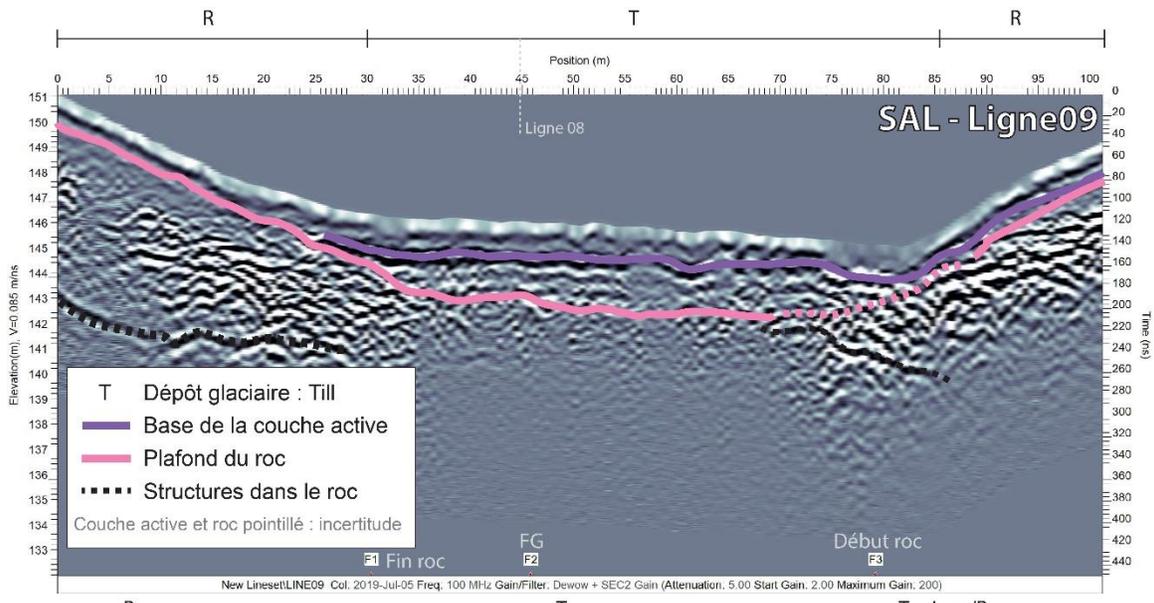
## **ANNEXE**

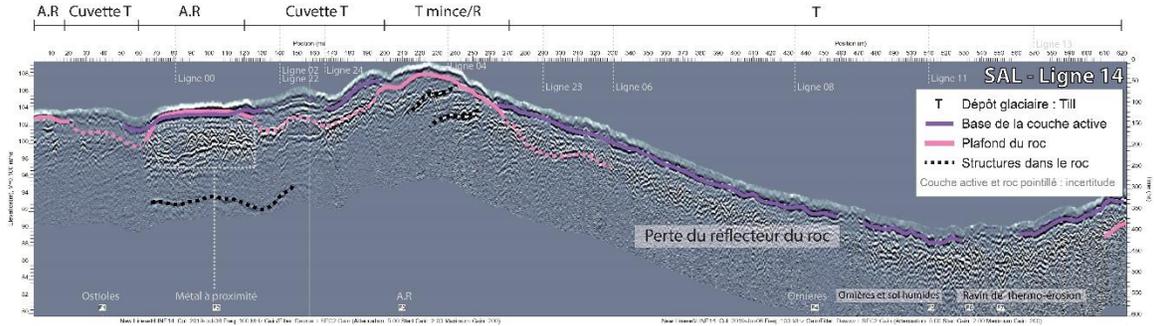
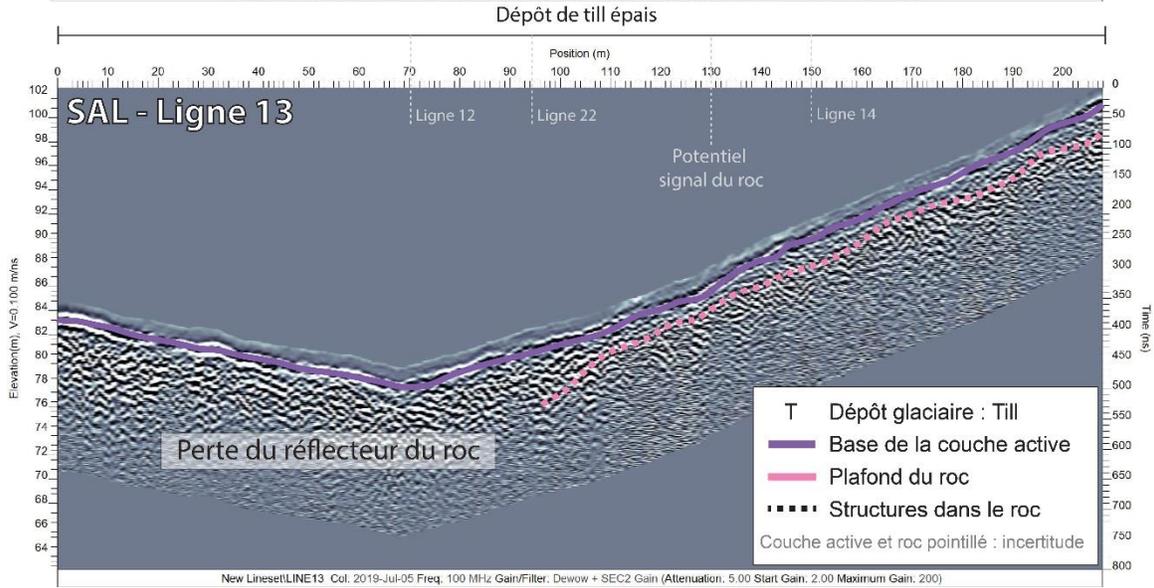
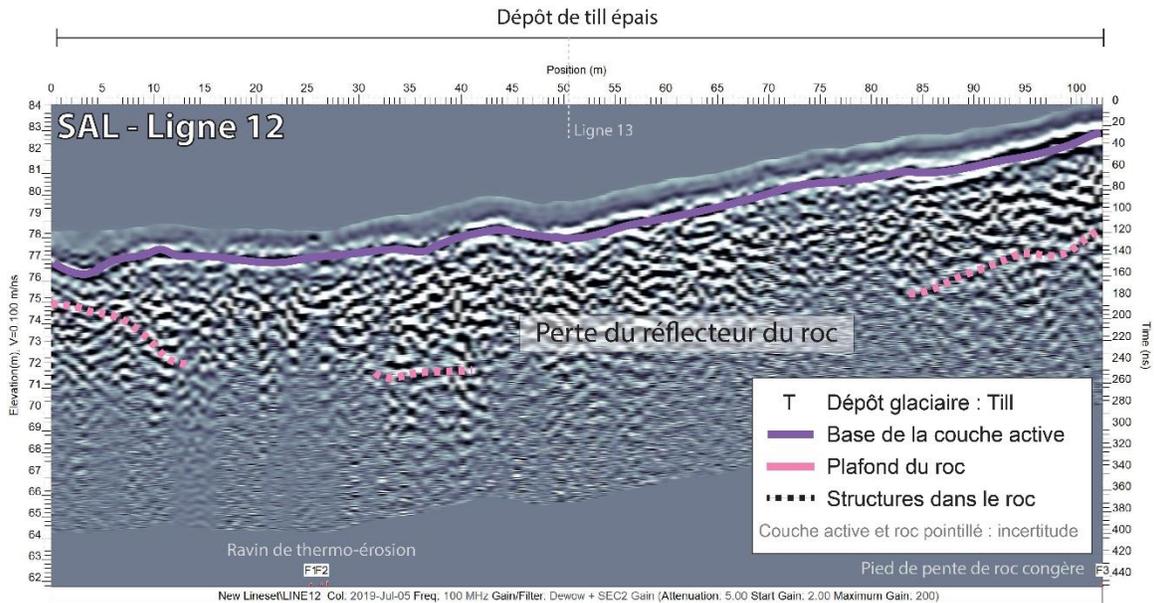
## **A. INTERPRÉTATION DES PROFILS DE GÉORADAR**

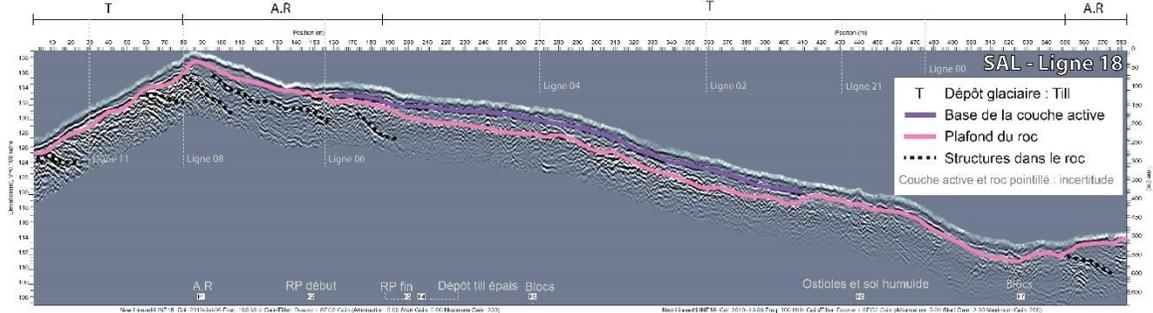
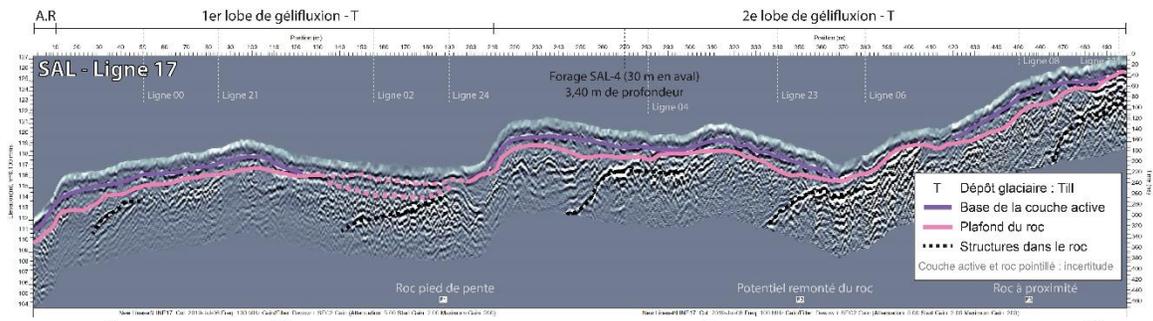
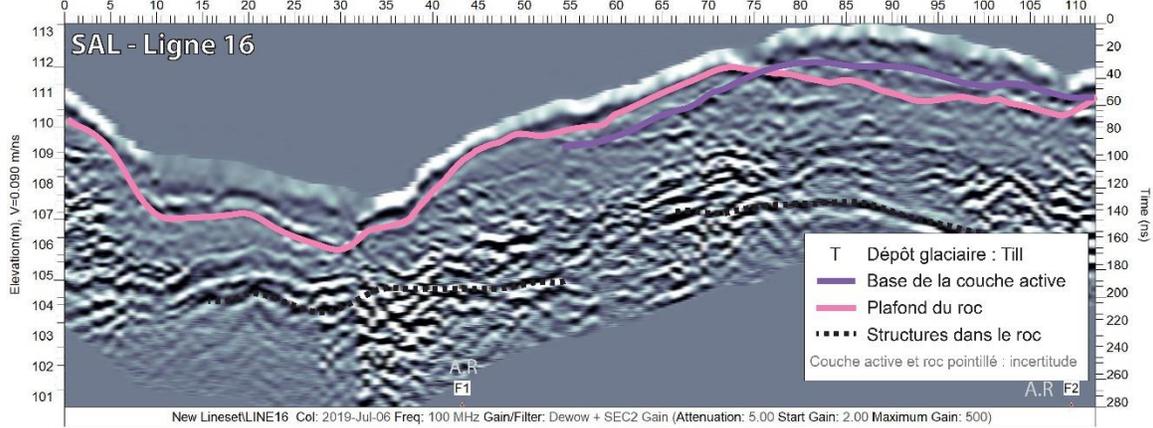
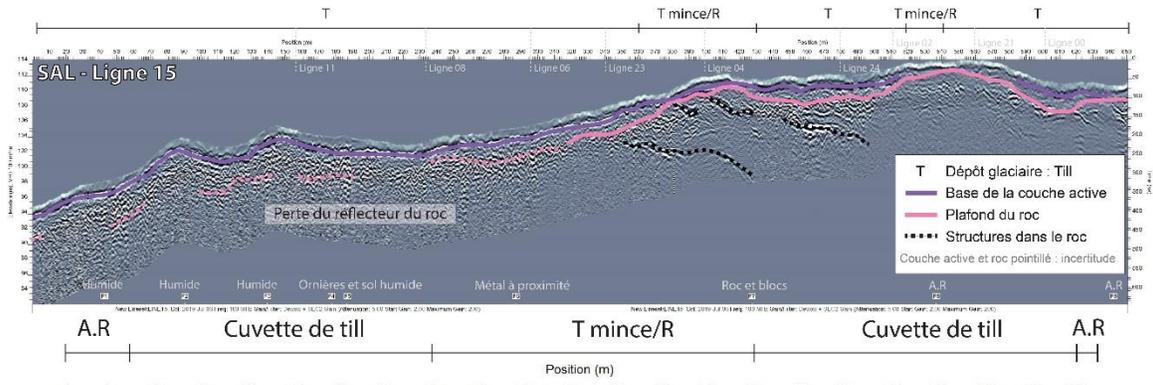


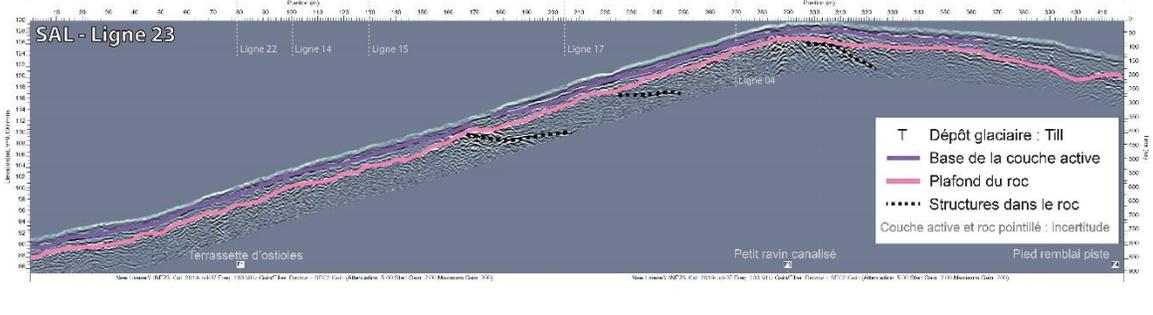
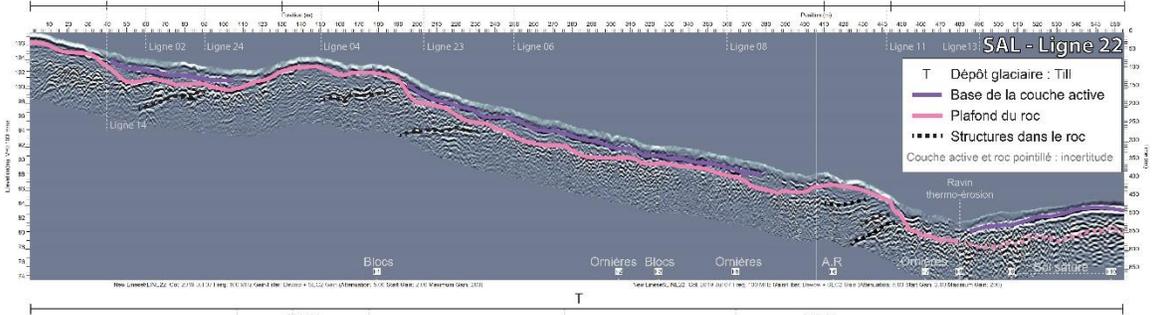
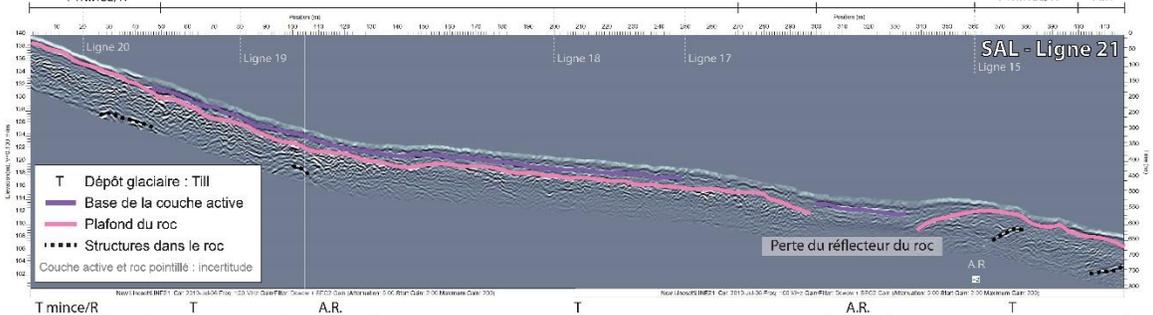
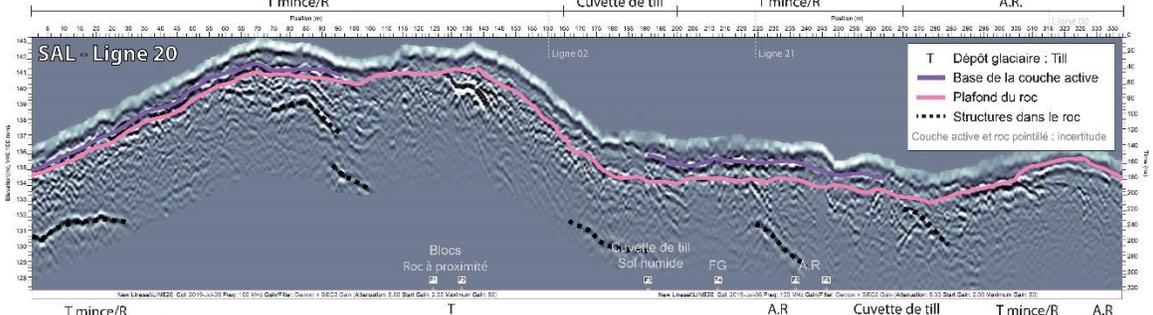
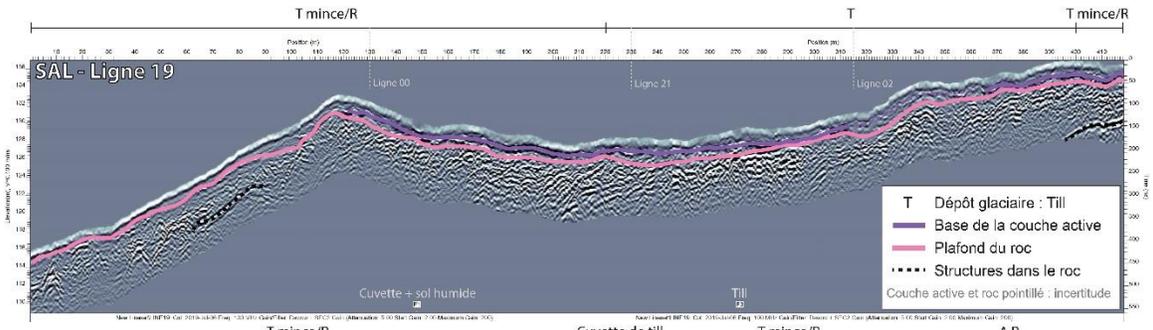


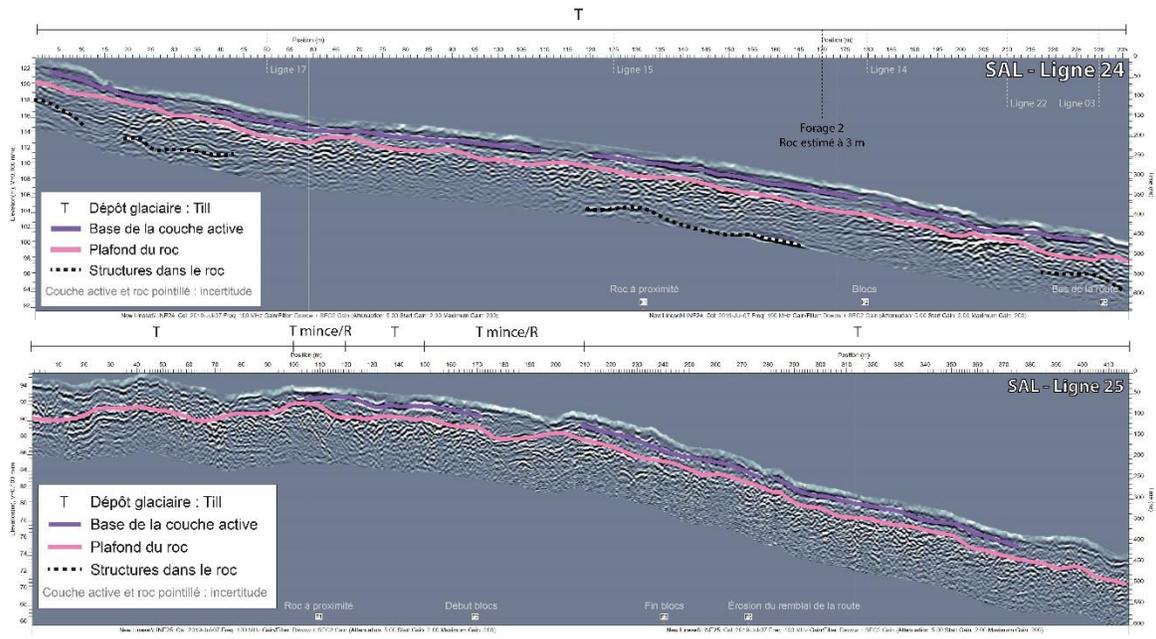












## **CARTES DE LA COMMUNAUTÉ**

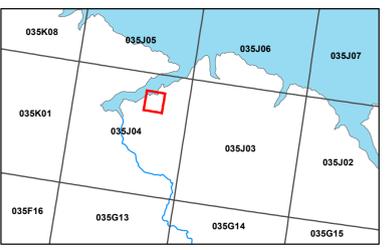
## **Carte des dépôts de surface**

**Résumé**  
 Cette carte présente les dépôts de surface de la région de Salluit. Ce village se situe au Nunavik, sur la rive sud du détroit d'Hudson, à 600 km au nord-ouest de Kuujuaq (62°12' N ; 75°39' O).

**Abstract**  
 This map shows surficial geology of the Salluit region. This Nunavik village is located on south shore of the Hudson Strait, at 600 km to the North-West of Kuujuaq (62°12' N ; 75°39' W).

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

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

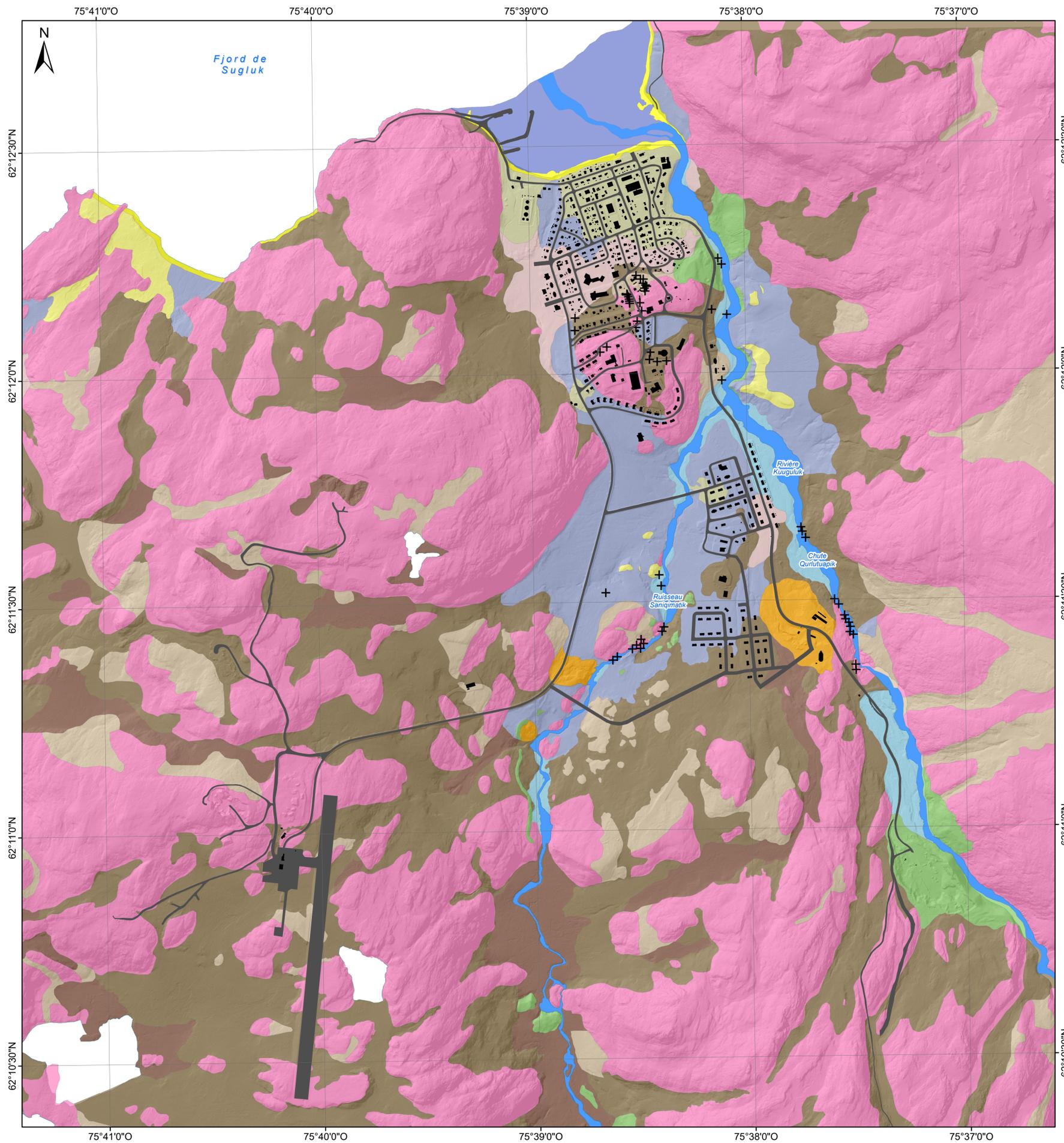


**Système national de référence cartographique**  
*The National Topographic System of Canada*

RNCan, gouvernement du Canada, centre d'information topographique (2008). Index vectoriels du système national de référence cartographique du Canada.

Vector Indexes of the National Topographic System of Canada. Government of Canada, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Mapping Information Branch, Centre for Topographic Information (2008).

**Illustration de couverture / Cover illustration:**  
 Salluit, Nunavik, Québec.  
 Photographie par Antoine Boisson / Photocredits: Antoine Boisson  
 Centre d'études nordiques, Québec, 2020



- ### DÉPÔTS DE SURFACE
- Estran
  - Plages actuelles
  - Lits fluviaux actuels
  - Alluvions : dépôts blocailleux mal triés sur sédiments marins d'eau profonde ou roc
  - Colluvions : dépôts de versant fins
  - Sables intertidaux et alluviaux littoraux : dépôts minces sur sédiments marins d'eau profonde
  - Sédiments littoraux de plage : dépôts sablo-graveleux sur roc ou sédiments marins d'eau profonde
  - Sédiments deltaïques : dépôts de sables moyens à fins stratifiés
  - Sédiments marins d'eau profonde : dépôts de silts et d'argiles
  - Sables et graviers fluvioglaciers
  - Till épais et ou sédiments sableux mal drainés avec réseaux de polygones à coins de glace
  - Till épais (> 2 m) avec ostioles et coulées de gélifluxion sur les versants. Possibilité d'affleurements rocheux ponctuels
  - Till mince (< 2 m). Topographie contrôlée par le roc avec affleurements rocheux dispersés
  - Socle rocheux avec placages de till d'ablation
  - Affleurements rocheux ponctuels
- ### INFRASTRUCTURES
- Bâtiments
  - Routes
  - Aéroport
  - Plans d'eau

## DÉPÔTS DE SURFACE

# SALLUIT

Québec, Nunavik  
 1 : 8 000

Image en relief ombragé dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec) préparée par L'Héroult, E.

Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

Hillshade created by L'Héroult, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec).

Illumination: azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 1x

Projection : MTM zone 9, NAD83

## DÉPÔTS DE SURFACE

# SALLUIT

Québec, Nunavik  
 1 : 8 000

Auteurs : Allard, M. et L'Héroult, E., 2010.  
 Mise à jour : Gauthier, S. et Allard, M., 2019.  
 Centre d'études nordiques, Université Laval.

Citation recommandée :  
 Allard, M., L'Héroult, E. et Gauthier, S. 2019. Dépôts de surface, Salluit, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1: 8 000.

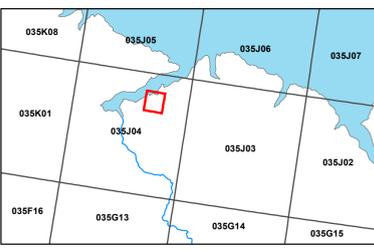
## **Carte des conditions de pergélisol**

**Résumé**  
 Cette carte présente les conditions de pergélisol de la région de Salluit. Ce village se situe au Nunavik, sur la rive sud du détroit d'Hudson, à 600 km au nord-ouest de Kuujuaq (62°12' N ; 75°39' O).

**Abstract**  
 This map shows permafrost conditions of the Salluit region. This Nunavik village is located on south shore of the Hudson Strait, at 600 km to the North-West of Kuujuaq (62°12' N ; 75°39' W).

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

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

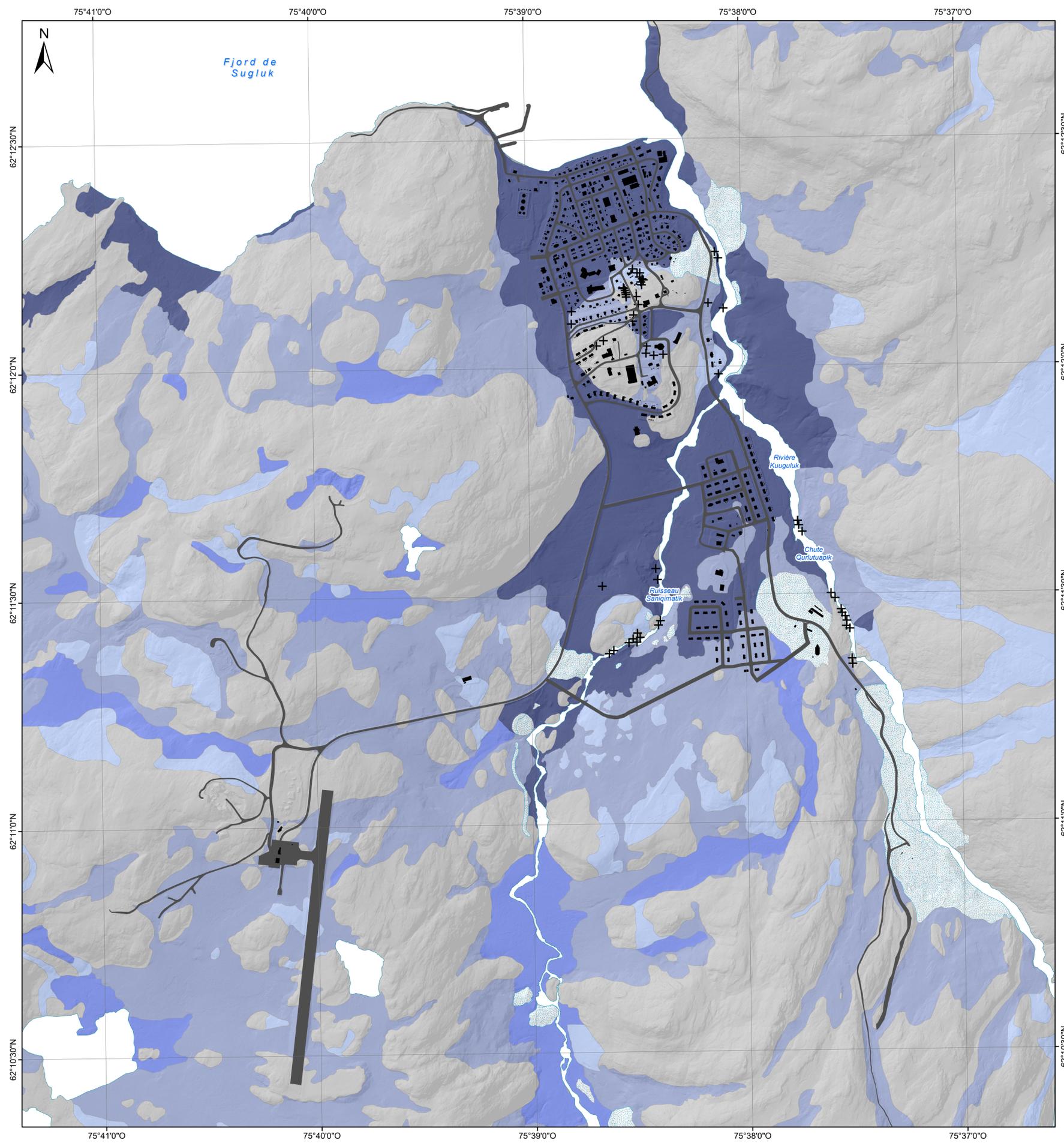


**Système national de référence cartographique**  
*The National Topographic System of Canada*

RNCan, gouvernement du Canada, centre d'information topographique (2008). Index vectoriels du système national de référence cartographique du Canada.

Vector Indexes of the National Topographic System of Canada. Government of Canada, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Mapping Information Branch, Centre for Topographic Information (2008).

**Illustration de couverture / Cover illustration:**  
 Salluit, Nunavik, Québec.  
 Photographie par Antoine Boisson / Photocredits: Antoine Boisson  
 Centre d'études nordiques, Québec, 2020



**CONDITIONS DE PERGÉLISOL**

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

**+** Affleurements rocheux ponctuels

**1a** Socle rocheux massif d'âge précambrien. Surface parsemée de blocs et parfois recouverte d'une mince couche de sable et gravier avec cailloux (till). L'épaisseur de la couche active varie sur le terrain entre 2,5 et 3,5 m.

**1b** Dépôts de sable et gravier stratifiés. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine.

**Dépôts instables au dégel : dépôts meubles contenant beaucoup de glace**

**2a** Sables, graviers et blocs en couverture mince sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m.

Tassements différentiels lors du dégel du pergélisol limité à la couche de couverture. Le contenu volumique en glace varie entre 15 et 70 %.

**2b** Sables, graviers et blocs (till) en couverture épaisse sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m avec possibilités d'affleurements rocheux ponctuels. La profondeur maximale au roc est estimée à environ 8 m. Présence d'ostioles et de coulées de gélifluxion sur les versants. Sujet aux tassements différentiels lors du dégel du pergélisol.

La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Le contenu volumique en glace varie entre 15 et 70 %.

**2c** Dépôts quaternaires épais mal drainés à couverture tourbeuse. Épaisseur supérieure à 2 m et pouvant atteindre plus de 6 m. Dépôts riches en glace avec réseaux de polygones à coins de glace bien développés.

L'épaisseur de la couche active varie de 0,5 m à 2,5 m.

**2d** Dépôts à granulométrie fine d'origine marine (silt et argile) très riches en glace. Parfois recouverts d'une couche mince de sable ou gravier. Sujet aux tassements différentiels et aux décrochements de couche active sur les pentes. Surface fréquemment recouverte d'ostioles.

La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 m et 1,2 m. La teneur volumétrique en glace du pergélisol dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100 %.

**INFRASTRUCTURES**

- Bâtiments
- Routes
- Aéroport
- Plans d'eau

**CONDITIONS DE PERGÉLISOL**

**SALLUIT**

Québec, Nunavik  
 1 : 8 000



**CONDITIONS DE PERGÉLISOL**

**SALLUIT**

Québec, Nunavik  
 1 : 8 000



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

Hillshade created by L'Hérault, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec).

Illumination: azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 1x

Projection : MTM zone 9, NAD83

Auteurs : Allard, M. et L'Hérault, E., 2010.  
 Mise à jour : Gauthier, S. et Allard, M., 2019.  
 Centre d'études nordiques, Université Laval.

Citation recommandée :  
 Allard, M., L'Hérault, E. et Gauthier, S. 2019. Conditions de pergélisol. Salluit, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1 : 8 000.

## **Carte de potentiel de construction**

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

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

**1a** Socle rocheux massif d'âge précambrien. Surface parsemée de blocs et parfois recouverte d'une mince couche de sable et gravier avec cailloux (till). L'épaisseur de la couche active varie sur le terrain entre 2,5 et 3,5 m.

Fondations nordiques de tous types. Des adaptations à la topographie accidentée sont souvent nécessaires.

- Terrains aménageables pour la construction (pente < 7,5°).
- Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 7,5 et 15°).
- Terrains défavorables à la construction (pente > 15°).

**1b** Dépôts de sable et gravier stratifiés. Contient de la glace interstitielle et possiblement de la glace sous forme de lentilles dans les couches de matériau à granulométrie fine.

Fondations nordiques sur radier et chevalets ajustables ou pieux. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier pourraient requérir des techniques élaborées de protection contre le dégel du pergélisol (ex. : thermosiphons).

- Terrains aménageables pour la construction (pente < 5°).
- Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 5 et 10°).
- Terrains défavorables à la construction (pente > 10°).

## Dépôts instables au dégel : dépôts meubles contenant beaucoup de glace

**2a** Sables, graviers et blocs en couverture mince sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement inférieure à 2 m et sa topographie est contrôlée par le roc. Présence d'affleurements rocheux dispersés. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Tassements différentiels lors du dégel du pergélisol limité à la couche de couverture. Le contenu volumique en glace varie entre 15 et 70 %.

Fondations nordiques profondes prenant appui sur le roc applicables (ex. : pieux). Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de préparation du terrain (ex. : excavation ou dégel du couvert de sédiments gelés et consolidation).

- Terrains aménageables pour la construction (pente < 4°).
- Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 4 et 8°).
- Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).

**2b** Sables, graviers et blocs (till) en couverture épaisse sur socle rocheux. L'épaisseur du dépôt est généralement supérieure à 2 m avec possibilités d'affleurements rocheux ponctuels. La profondeur maximale au roc est estimée à environ 8 m. Présence d'ostioles et de coulées de gélifluxion sur les versants. Sujet aux tassements différentiels lors du dégel du pergélisol. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 1,5 et 2,5 m. Le contenu volumique en glace varie entre 15 et 70 %.

Fondations sur pieux possibles, mais requérant des forages plus profonds pour l'installation. Fondations sur radier et chevalets également possibles. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre le dégel du pergélisol (ex. : thermosiphons). Certaines sections peuvent être affectées par la gélifluxion et les fondations devront en tenir compte.

- Terrains aménageables pour la construction (pente < 4°).
- Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants (pente entre 4 et 8°).
- Terrains défavorables à la construction (pente > 8°).

**2c** Dépôts quaternaires épais mal drainés à couverture tourbeuse. Épaisseur supérieure à 2 m et pouvant atteindre plus de 6 m. Dépôts riches en glace avec réseaux de polygones à coins de glace bien développés. L'épaisseur de la couche active varie de 0,5 m à 2,5 m.

Terrain problématique à éviter.

- Terrains problématiques défavorables à la construction.

**2d** Dépôts à granulométrie fine d'origine marine (silt et argile) très riches en glace. Parfois recouvert d'une couche mince de sable ou gravier. Sujet aux tassements différentiels et aux décrochements de couche active sur les pentes. Surface fréquemment recouverte d'ostioles. La couche active atteint une épaisseur comprise entre 0,5 m et 1,2 m. La teneur volumétrique en glace du pergélisol dépasse régulièrement 30 % et peut atteindre près de 100%.

Fondations sur radiers et chevalets ajustables. Les bâtiments avec dalle de fondation sur radier requièrent des techniques élaborées de protection contre la dégradation du pergélisol (ex. : thermosiphons).

- Terrains aménageables pour la construction (pente < 1°).
- Terrains aménageables pour la construction (pente entre 1 et 2°).
- Terrains défavorables à la construction (pente > 2°).



### INFRASTRUCTURES

- Bâtiments
- ~ Routes
- ✈ Aéroport
- ~ Plans d'eau
- + Aaffleurements rocheux ponctuels

Image en relief ombragé dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec) préparée par L'Hérault, E.

Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

Hillshade created by L'Hérault, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec).

Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 1x

Projection : MTM zone 9, NAD83

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

# SALLUIT

Québec, Nunavik

1 : 8 000



Auteurs : Allard, M., L'Hérault, E. et Gauthier, S. 2018.

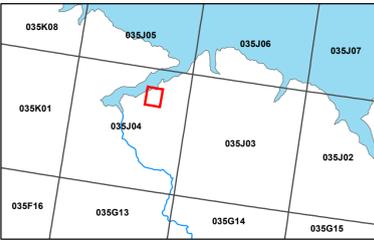
Centre d'études nordiques, Université Laval.

Citation recommandée :

Allard, M., L'Hérault, E. et Gauthier, S. 2019. Potentiel de construction et types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes, Salluit, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1 : 8 000.

**Résumé**  
 Cette carte présente le potentiel de construction et les types de fondations selon les conditions de pergélisol et les pentes de la région de Salluit. Ce village se situe au Nunavik, sur la rive sud du détroit d'Hudson, à 600 km au nord-ouest de Kuujuaq (62°12' N, 75°39' O).

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



### Système national de référence cartographique

RNCan, gouvernement du Canada, centre d'information topographique (2008). Index vectoriels du système national de référence cartographique du Canada.

Vector Indexes of the National Topographic System of Canada. Government of Canada, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Mapping Information Branch, Centre for Topographic Information (2008).

**Illustration de couverture / Cover illustration:**  
 Salluit, Nunavik, Québec.  
 Photographie par Antoine Boisson / Photocredits: Antoine Boisson  
 Centre d'études nordiques, Québec, 2020

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

# SALLUIT

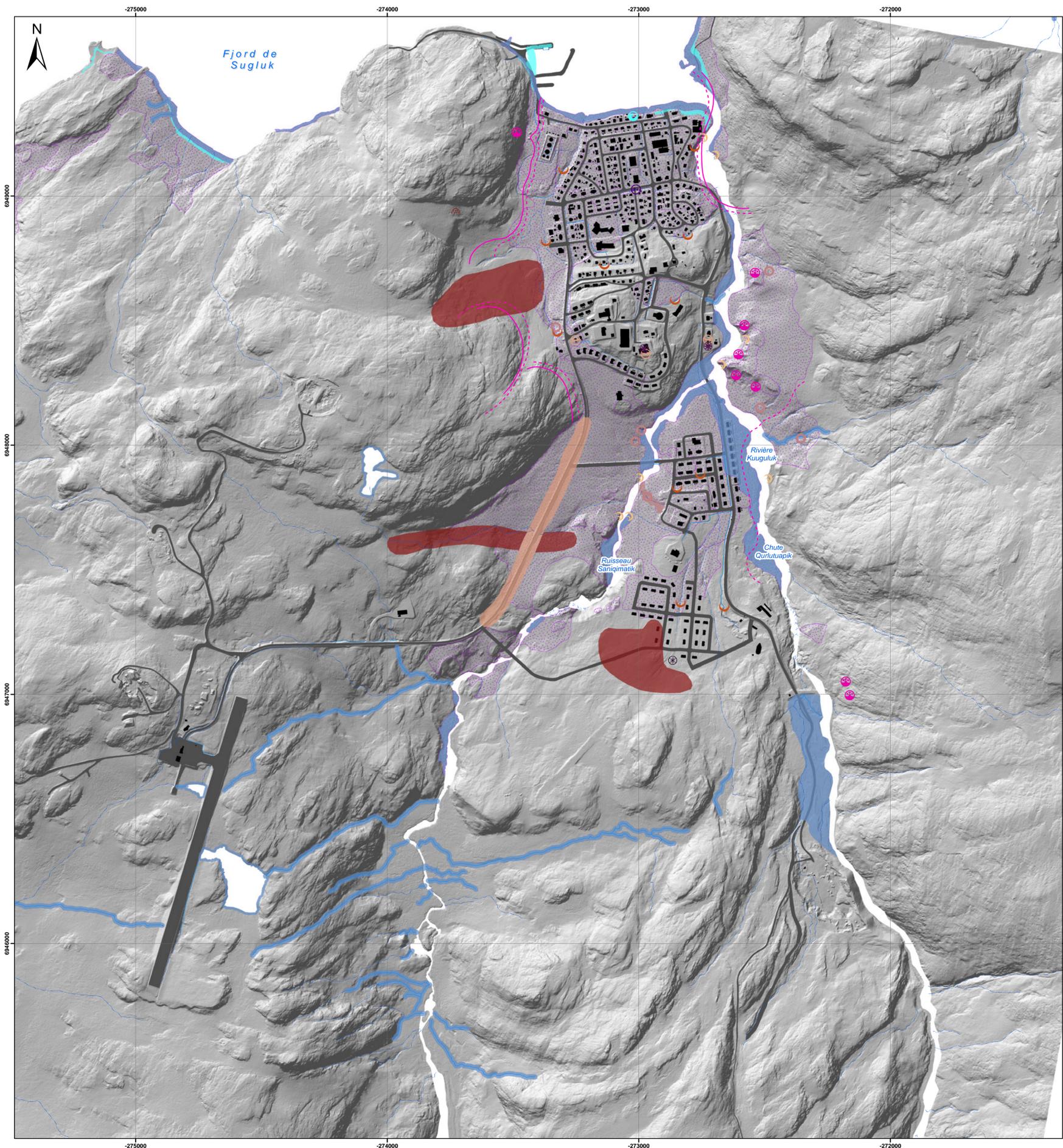
Québec, Nunavik

1 : 8 000



## **Carte des aléas naturels actuels et appréhendés**

5



- MOUVEMENT DE MASSE / MASS WASTING**
- AVALANCHE DE NEIGE / SNOW AVALANCHE
    - 1/100
    - 1/1000
  - GLISSEMENT DE TERRAIN / LANDSLIDE
  - GÉLIFLUXION / GELIFLUCTION
  - COULÉE / FLOW
  - ÉBOULIS / FALLS
- ÉROSION / EROSION**
- ÉROSION CÔTIÈRE ET FLUVIALE / COASTAL AND FLUVIAL EROSION
  - ÉROSION PAR LE VENT / WIND EROSION
- CLIMATIQUE / CLIMATIC**
- FEU / WILDFIRE
  - TEMPÊTE DE VENT / WIND STORM
  - BLIZZARD / BLIZZARD
  - VERGLAS / ICE STORM
- PROCESSUS PÉRIGLACIAIRES / PERIGLACIAL PROCESSES**
- PERGÉLISOL RICHE EN GLACE / ICE-RICH PERMAFROST
  - GLAÇAGE / ICING
  - BUTTE SAISONNIÈRE À NOYAU DE GLACE / FROST BLISTER
- PROCESSUS LIÉS AU DÉGEL / THAW-RELATED PROCESS**
- AFFAISSEMENT THERMOKARSTIQUE / THERMOKARST SUDSIDIENCE
  - ÉROSION THERMIQUE / THERMAL EROSION
- PROCESSUS HYDROLOGIQUES / HYDROLOGICAL PROCESSES**
- DRAINAGE D'UN LAC / LAKE DRAINAGE
  - SURCOTE / STORM SURGE
  - CRUE SOUDAINE ET INONDATION / FLASH FLOOD AND FLOOD
  - EMBÂCLE ET DÉBÂCLE GLACIÈRES / ICE-JAM AND BREAK-UP
  - POUSSÉE GLACIELLE / ICE-PUSH
- TREMBLEMENT DE TERRE / EARTHQUAKE**
- TREMBLEMENT DE TERRE / EARTHQUAKE
- HYDROLOGIE / HYDROLOGY**
- RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux permanents / RILLS AND WATERTRACKS - running throughout all arctic summer
  - RÉSEAU DE DRAINAGE - ruisseaux intermittents / RILLS AND WATERTRACKS - running occasionally during spring melt
- INFRASTRUCTURES / INFRASTRUCTURE**
- BÂTIMENTS / BUILDING
  - INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT / TRANSPORT INFRASTRUCTURE

**Résumé**

Cette carte présente les risques naturels actuels et appréhendés de la région de Salluit. Ce village se situe au Nunavik, sur la rive sud du détroit d'Hudson, à 600 km au nord-ouest de Kuujuaq (62°12' N, 75°39' O).

**Abstract**

This map shows the actual and potential natural hazards of the Salluit region. This Nunavik village is located on south shore of the Hudson Strait, at 600 km to the North-West of Kuujuaq (62°12' N, 75°39' W).

**Note**

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

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

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

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



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

EN/CAN, gouvernement du Canada, centre d'information topographique (2010), base vectorielle du système national de référence cartographique du Canada.

Vector Index of the National Topographic System of Canada  
Government of Canada, Natural Resources Canada, Geomatics Sector, Mapping Information Branch, Centre for Topographic Information (2010)

**Illustration de couverture / Cover illustration:**  
Salluit, Nunavik, Québec.  
Photographie par Antoine Boisson / Photocredits: Antoine Boisson

Centre d'études nordiques, Québec, 2017

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



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



Image en relief ombragé dérivée des données LIDAR 2010 (MRNF 2010, gouvernement du Québec) préparée par L'Hérault, E.

Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, exagération verticale 1x

Hillshade created by L'Hérault, E. from LIDAR data (MRNF 2010, gouvernement du Québec).

Illumination : azimuth 315°, altitude 45°, vertical exaggeration 1x

Projection : MTM zone 5, NAD83

Auteurs : S. Aubé-Michaud, M. Allard et E. L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, décembre 2017.  
Authors: S. Aubé-Michaud, M. Allard and E. L'Hérault, Centre d'études nordiques, Université Laval, December 2017.

Citation recommandée :  
Aubé-Michaud, S., Allard, M. et L'Hérault, E., 2017. Aléas naturels actuels et appréhendés, Salluit, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, échelle 1 : 8 000.

Recommended citation:  
Aubé-Michaud, S., Allard, M. and L'Hérault, E., 2017. Actual and potential natural hazards, Salluit, Québec, Nunavik, Centre d'études nordiques, scale 1: 8 000.

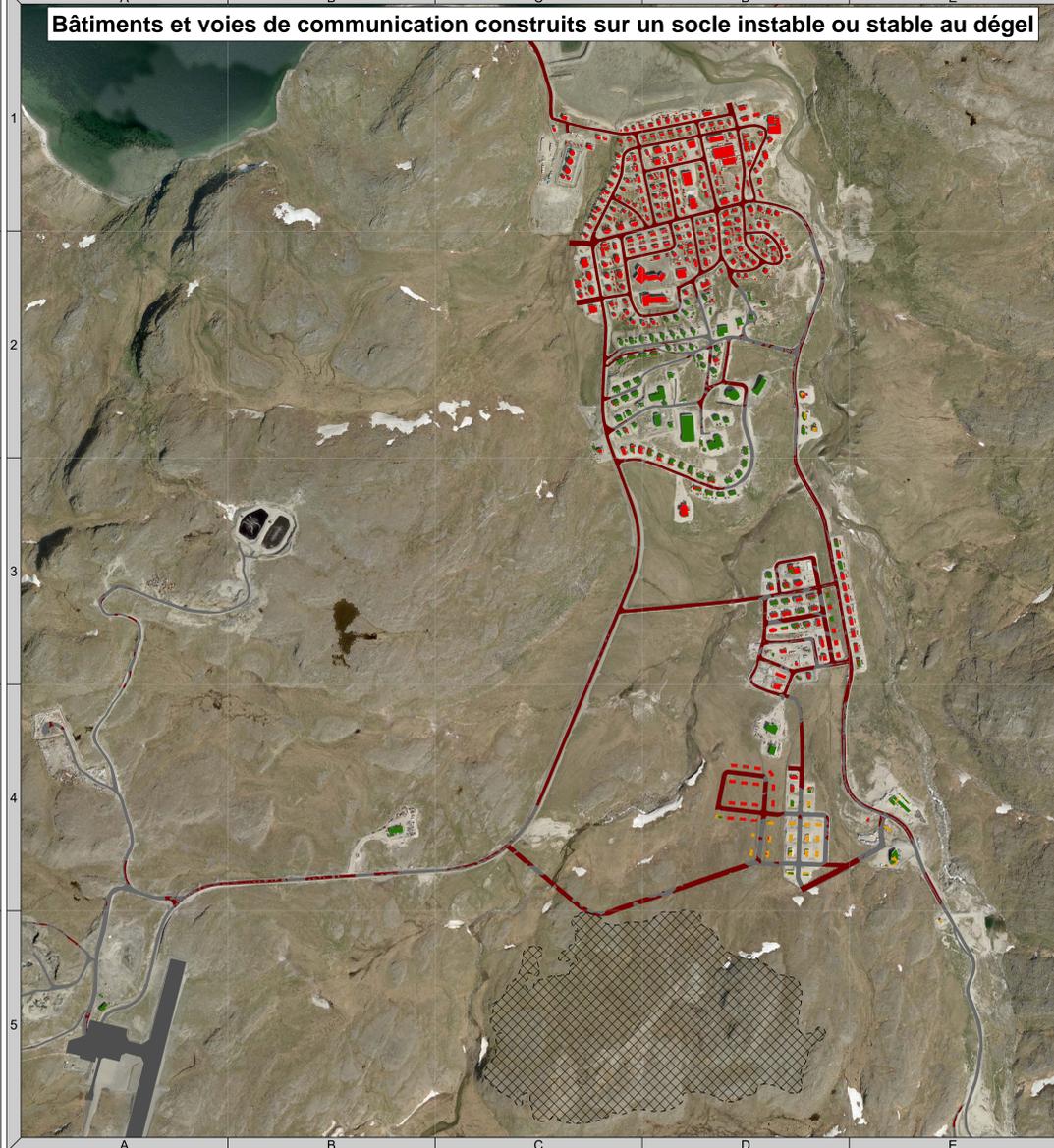
## **PLANCHES SYNTHÈSES**

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



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

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



### Légende

**Cartographie des faits saillants du village de Salluit**

**Dépôts de surface**

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

**Conditions de pergélisol et aménagement**

- Zones de terrain stable construit (Mn, Mn/R)
- Zones de terrain stable non construit (sans contraintes)
- Zones de terrain aménageable construit, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants ou des investigations supplémentaires et des fondations spécialisées (ex. : pieux)
- Terrains aménageables pour la construction, mais pouvant nécessiter des travaux de nivellement importants ou des investigations supplémentaires et des fondations spécialisées (ex. : pieux)
- Zones de terrain sensible construit
- Zones de terrain sensible non construit

**Aléas naturels actuels et appréhendés**

- Crue soudaine et inondation
- Submersion côtière
- Glissements de terrain
- Géfluxion
- Affaissement thermokarstique

**Instrumentation**

- Bâtiment / Infrastructure
- Voie de communication
- Station

**Limite de la zone d'avalanche**

- Avalanche de neige
- Zone d'avalanche centennale (1/100)
- Zone d'avalanche millénaire (1/1000)

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

- Bâtiment construit sur un socle étant sujet à être stable lors du dégel
- Bâtiment construit sur un sol aménageable, mais pouvant nécessiter des travaux
- Bâtiment construit sur un socle pouvant être instable au dégel
- Route construite sur un socle jugé instable au dégel du pergélisol

**Autres**

- Délimitation de Salluit-4

0 245 490 M

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

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

### Faits saillants

Les simulations du régime thermique du pergélisol et des variations d'épaisseur de la couche active basées sur les simulations climatiques établies sur les RCP 4.5 et 8.5, ne permettent pas d'établir une chronologie certaine des changements qui risquent de survenir sur le terrain.

Le terrain de Salluit est particulièrement difficile en raison des contraintes topographiques, en fond de vallée et avec des versants escarpés.

Les dépôts riches en glace sont appelés à connaître des instabilités à plus ou moins court terme lorsque des années chaudes surviendront et à connaître des dégradations graduelles mais importantes avec le réchauffement climatique attendu. Les pentes à risque de glissement de terrain seront encore plus à risque tandis que les plateaux rocheux vont en partie devenir plus stables, particulièrement là où la couverture de till est mince.

### Constats et commentaires

- Moins de 275\* bâtiments (en vert) sont construits sur des sols stables au dégel (Mn, Mn/R ou R).
- Près de 680\* bâtiments (en rouge), principalement situés près du fjord de Sugluk (C1-D1) et dans le nouveau secteur résidentiel (D3), ont été désignés sensibles à des problèmes et des instabilités reliés au dégel du pergélisol.
- Environ 75\* bâtiments (en orange) sont construits sur un sol stable mais pouvant nécessiter des travaux importants. Malgré tout, ces sols disposent d'un potentiel de construction non négligeable, mais la prudence est requise avant d'y entreprendre l'implantation d'infrastructures.

Le plan d'aménagement conçu par l'ARK et la communauté en 2010 offre encore la meilleure gamme de solutions pour construire et prendre de l'expansion, notamment par le développement du secteur de Salluit-4, terrain en pente (C5-D5), mais sur un dépôt discontinu de till peu épais et sur le roc.

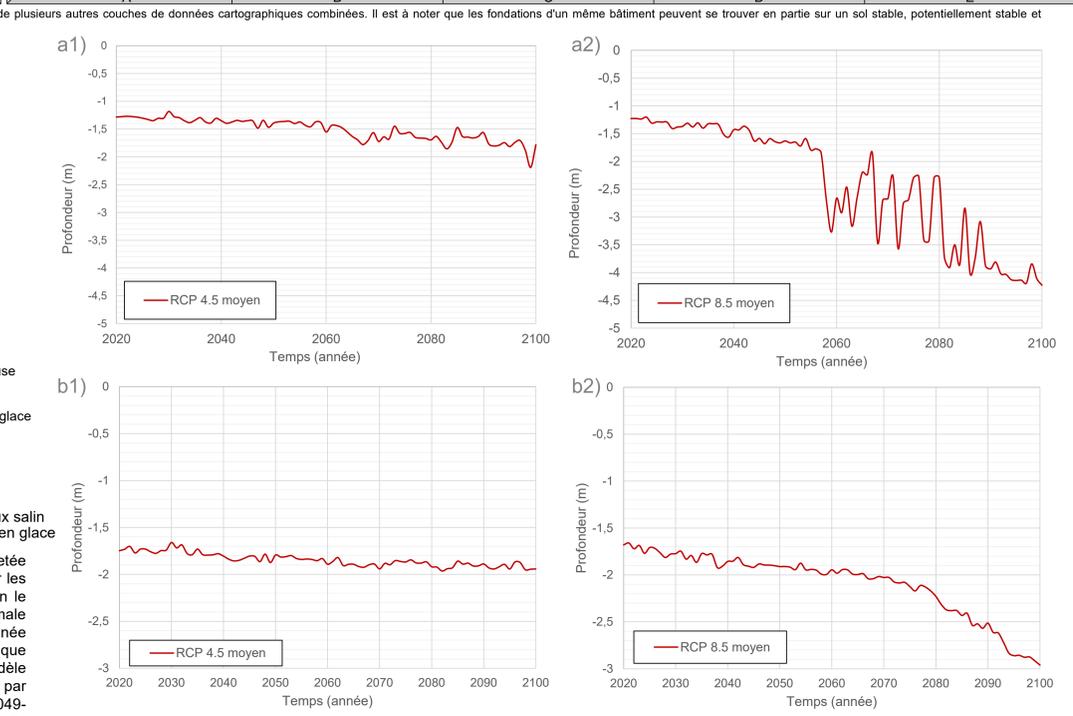
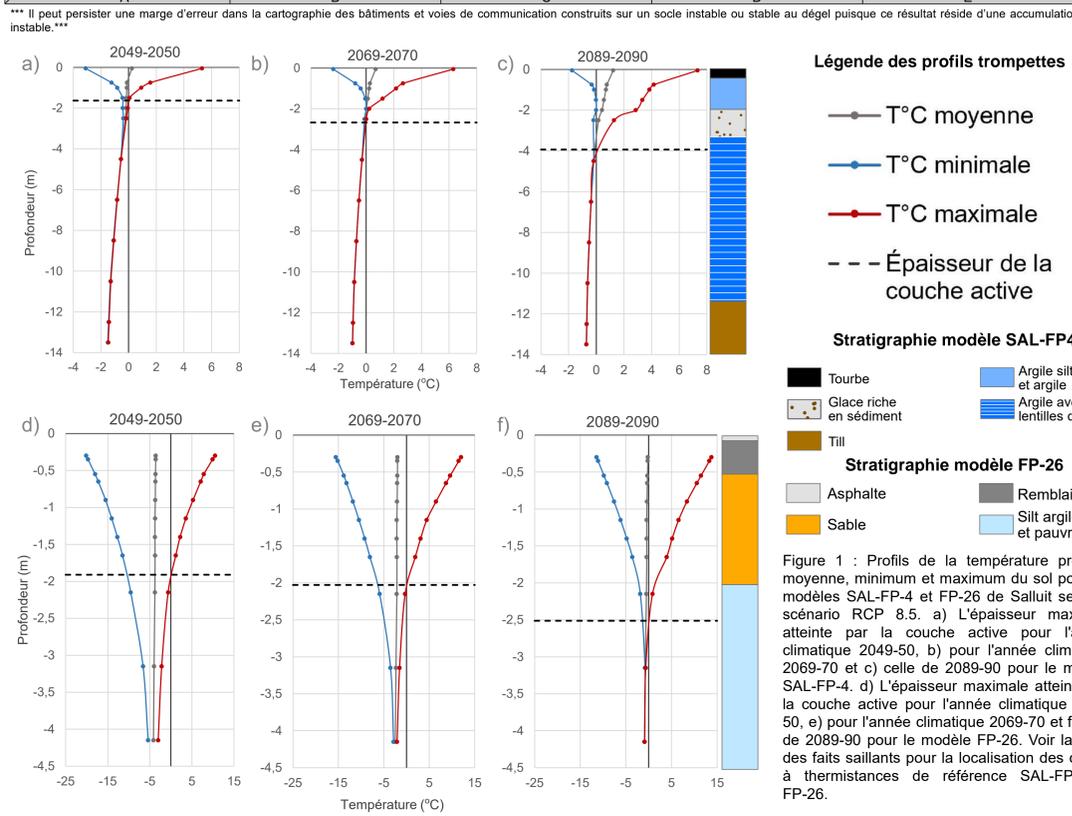


Figure 2 : Évolution de l'épaisseur de la couche active à partir du modèle MRCC5 selon les scénarios a1) RCP 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, a2) RCP 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre pour le modèle SAL-FP-4 de 2020 à 2100; et selon les scénarios b1) RCP 4.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre, b2) RCP 8.5 moyen d'augmentation de gaz à effet de serre pour le modèle FP-26 de 2020 à 2100.

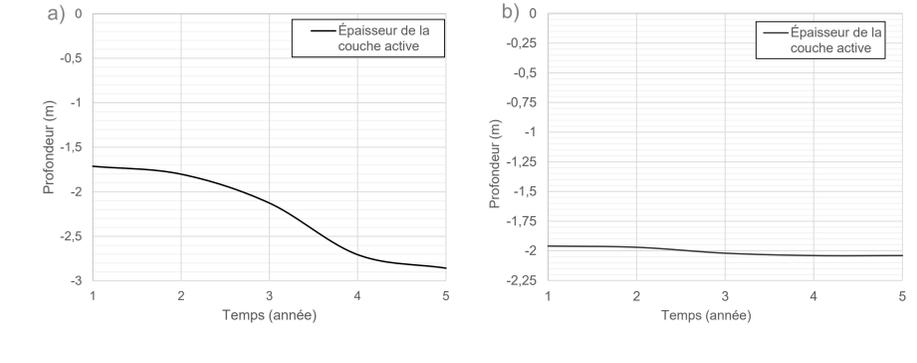


Figure 3 : Variation de la température du pergélisol et de l'épaisseur de la couche active, soumise à une série de 5x les températures observées durant l'année climatique de 2009-2010 pour le modèle a) SAL-FP-4; et b) pour le modèle FP-26.