

**L'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur la stabilité des pistes
d'atterrissage au Nunavik : première étape vers une stratégie d'entretien.**

Michel Allard¹, Centre d'études nordiques, Université Laval
Richard Fortier, Centre d'études nordiques, Université Laval
Fabrice Calmels, Centre d'études nordiques, Université Laval
Catherine Savard, Centre d'études nordiques, Université Laval
Anick Guimond, Transports Québec
Alexander Tarussov, Inspection Radar Inc.

(1- fera la présentation au congrès)

Exposé préparé pour

La séance sur la caractérisation et amélioration des sols et matériaux

du congrès annuel de 2007 de
L'Association des transports du Canada
À Saskatoon (Saskatchewan)

Remerciements :
Transports Québec
Consortium Ouranos

Fonds d'action pour le changement climatique de Ressources Naturelles Canada

Résumé

Réparties le long des côtes nordiques du Québec, les quatorze communautés inuites du Nunavik sont étroitement dépendantes du transport aérien pour la circulation des personnes et des biens et pour le déroulement de toutes les activités économiques et sociales. Ces aéroports ont été construits entre 1984 et 1992. Alors que le climat régional s'est réchauffé d'environ 3 °C entre 1992 et 2006, des tassements ont commencé à apparaître dans certaines des pistes construites sur le pergélisol. Une caractérisation poussée des propriétés du pergélisol a été réalisée entre 2004 et 2006 pour chaque piste à l'aide de travaux de cartographie des dépôts meubles à grande échelle, de sondages avec de la machinerie de chantier, de relevés de géophysique en résistivité électrique et de profilages au géoradar. À cela se sont ajoutées de nombreuses mesures de température dans le sol sous les pistes et à leur marge. Comme la nature des sols varie beaucoup dans les régions côtières du Nunavik, les modalités et l'ampleur des impacts varient d'une piste à l'autre et le réchauffement à venir affectera les pistes de façon très inégale. Un diagnostic est posé pour chaque aéroport relativement à la façon spécifique dont il sera affecté par le réchauffement climatique au cours des prochaines années. Les moyens d'intervention à utiliser pour maintenir le réseau opérationnel tout en justifiant les coûts de réparation pourront donc être planifiés selon les caractéristiques propres à chaque cas.

L'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur la stabilité des pistes d'atterrissage au Nunavik : première étape vers une stratégie d'entretien.

Introduction

Très éloignées et inaccessibles par la route, les quatorze communautés côtières du Nunavik sont reliées entre elles et avec le reste du monde par voie aérienne et par voie maritime (Figure 1). La desserte maritime est assurée à quelques reprises en été par des cargos venant du Sud et qui apportent les matériaux, les équipements industriels, les marchandises lourdes, les véhicules ainsi que les produits pétroliers. Mais pour quiconque voyage dans la région, il devient vite évident que le transport aérien joue un rôle crucial et stratégique. Le trafic régulier de passagers, de marchandises et la poste s'effectuent sept jours par semaine. Les aliments et les denrées périssables sont livrés régulièrement par avions cargo. L'administration publique et scolaire, les affaires commerciales, les voyages des spécialistes en services techniques de tout genre, le déplacement des professionnels de la santé et des malades, le déplacement de la cour de justice, les interventions de sécurité publique, toutes ces activités exploitent abondamment le réseau aérien. Sans le trafic aérien, les communautés seraient dans l'isolement. Dans ce contexte, les aéroports et les routes qui les relient à leurs communautés respectives sont des infrastructures stratégiques qui doivent absolument être maintenues en bon état d'opération.

Au moment de la signature de la Convention de la Baie James et du Nord québécois en 1975, dans laquelle il était convenu d'entreprendre « aussitôt que possible... des études concernant l'aménagement de pistes d'atterrissage » (art 29.0.36), et dans les années qui ont suivi, les connaissances sur le pergélisol en général et au Québec nordique en particulier n'étaient que très fragmentaires. De plus, les changements climatiques n'étaient pas une préoccupation. Toutefois, la situation a changé à l'échelle planétaire et régionale. Dans les régions arctiques, la fonte des glaciers, de la banquise et du pergélisol a même commencé à se manifester. Par exemple, l'évaluation récente de « l'Arctic Climate Impact Assessment » (1) fait le constat que la dégradation du pergélisol met à risque les infrastructures municipales, industrielles et de transport. Au Nunavik, les autorités gouvernementales, l'Administration régionale Kativik, le personnel sur place et les chercheurs de la présente étude ont eu l'occasion de constater au début des années 2000 que des impacts sur la stabilité de ces infrastructures commençaient à apparaître. Grâce à des données partielles sur la température du pergélisol obtenues à l'aide d'instruments qu'une prévoyance éclairée avait permis de mettre en place lors de la construction des pistes, on a pu détecter dès lors un réchauffement effectif du pergélisol.

Cette étude présente une description technique des modalités par lesquelles le réchauffement climatique commande la déstabilisation du régime thermique du pergélisol sous les pistes d'atterrissage du Nunavik. Cette description repose sur une caractérisation plus poussée de la nature du terrain, de la stratigraphie et des propriétés du pergélisol que ce qui était disponible suite aux études antérieures. Pour chaque aéroport, un diagnostic est posé relativement à la façon spécifique dont il est affecté en fonction des caractéristiques locales du pergélisol, du régime climatique et de l'évolution des températures du pergélisol (2). En effet, la nature des sols étant très variable dans les régions côtières du Nunavik, la sensibilité à la dégradation du pergélisol

varie d'un endroit à l'autre. Dépendant du contexte topographique des pistes et du climat local, notamment des conditions de vent et d'enneigement, les impacts sont appelés à prendre des formes différentes d'un endroit à l'autre. Les stratégies d'adaptation et les travaux de réfection requis pourront ainsi être planifiés en fonction de chaque cas de façon à bien définir les mesures nécessaires, pour choisir les concepts d'ingénierie les plus appropriés et pour contenir les coûts de ces mesures d'adaptation.

Concepts de construction des pistes et régime thermique du pergélisol

L'histoire des aéroports des communautés du Nunavik est liée à celle de l'évolution rapide des concepts relatifs au changement climatique et à l'observation de leurs impacts. Durant le programme de construction des aéroports, de 1984 à 1992, il était dans la norme en génie civil et en géophysique de considérer que le climat était relativement stable, tout en étant sujet à des écarts, même si on commençait à parler de l'impact des gaz à effet de serre sur le réchauffement possible de la planète. Les modèles climatiques globaux alors à leur balbutiement n'avaient pas encore fait une réelle percée dans la communication publique. De nombreux spécialistes avaient documenté des changements passés du climat par des méthodes indirectes (pollens, analyse de carottes dans les glaciers, dendrochronologie, analyses historiques, etc.) mais la vaste majorité des gens vivaient avec la perception que de tels changements sont d'une échelle temporelle à long terme et que nous ne vivrions pas assez longtemps pour en voir les impacts. Le pergélisol est fondamentalement un phénomène climatique. Même si des facteurs de surface comme le couvert végétal, les horizons organiques, l'humidité et le couvert de neige entrent en jeu de façon complexe dans les transferts de chaleur entre le sol et l'atmosphère, sa température est ultimement dépendante de celle de l'atmosphère. À un climat stable (ou contenu à l'intérieur de limites de fluctuations statistiquement déterminées) correspondait donc l'idée d'un pergélisol stable. D'ailleurs, aucune des études avant construction dans le programme d'implantation des aéroports du Nunavik ne s'est questionnée sur les variations possibles du climat et du régime thermique du pergélisol.

Dépendant de la nature du matériau géologique de surface qui régit la granulométrie, la teneur en eau et la perméabilité, le pergélisol contient de plus ou moins grandes quantités de glace. C'est en fait un matériau géologique à l'intérieur duquel la glace est le principal minéral de liaison entre les particules minérales. Très résistant mécaniquement, sa capacité de support est très grande. En construisant les pistes et les routes en remblai, les concepteurs s'attendaient à ce que le plafond du pergélisol remonte sous les ouvrages, voire même à ce qu'il remonte à l'intérieur des remblais eux-mêmes, assurant le gel permanent et la stabilité. Quelques erreurs ont certes été commises ici et là et quelques sections en déblais ont été creusées pour s'adapter à la topographie malgré des études préliminaires qui n'avaient pas caractérisé le terrain de façon à connaître adéquatement la sensibilité du pergélisol affecté. Néanmoins, le principe général a été respecté dans la vaste majorité des cas.

Non seulement la figure 2 montre-t-elle que le climat des trois décennies précédant la construction des pistes ne se réchauffait pas, elle révèle en fait que les températures moyennes annuelles connaissaient, malgré des fluctuations pluri-annuelles, une légère tendance au refroidissement. Par exemple, cette tendance fut de l'ordre de -0.028 °C/a à Kuujuaq de 1948 à

1992. Toutefois, à partir de cette année particulièrement froide, le climat s'est mis à se réchauffer, passant au-dessus de la moyenne à long terme aux alentours de 1995 et atteignant des valeurs élevées dans les années 2000. Depuis le début du XXI^e siècle, les températures se maintiennent à des valeurs plus élevées. Ainsi, l'année 2006 a été une des plus chaudes depuis 1948 au Nunavik, avec des températures moyennes annuelles de -2.41 °C à Kuujuaq, -1.54 °C à Kuujuarapik et de -3.52 °C à Inukjuak, selon les données d'Environnement Canada (figure 2); il s'agit de valeurs de 3 à 4 degrés plus chaudes que ce que ces stations enregistraient au début des années 1990.

Dans le contexte d'adaptation au réchauffement climatique et en ce qui concerne la stabilité future et l'entretien des pistes d'atterrissage et des routes, la vitesse et l'ampleur du réchauffement climatique dans les années à venir sont des données importantes. En effet, une planification correcte des travaux d'entretien et des rénovations et la prise de décisions (ex. paver ou non; appliquer ou non des solutions d'ingénierie et lesquelles) découlent de la vitesse à laquelle les changements surviendront. Le rythme des investissements requis en dépend aussi. Le consortium Ouranos a produit des projections, certaines basées sur le modèle régional canadien du climat, d'autres à partir de sorties de différents modèles climatiques globaux et suivant des scénarios différents d'émission de gaz à effet de serre. Bien que cette approche permette d'envisager des marges d'erreur pour le réchauffement futur et offre le moyen de proposer des options pour les décisions à venir, ces scénarios ne fournissent en bout de ligne qu'une appréciation générale.

Ainsi, il est évident à la figure 3 qu'à la fois les températures atmosphériques et les précipitations vont augmenter au Nunavik. Selon plusieurs modèles, sur l'horizon de 2020, les plus fortes augmentations de températures prévues sont pour les mois d'hiver, de printemps et d'automne. Il en est de même des précipitations qui sont appelées à jouer un rôle important dans la problématique du pergélisol, car le couvert de neige exerce un rôle isolant qui accentue le réchauffement du sol. Toutes les projections de modèles indiquent qu'autour de 2050, les températures hivernales seront supérieures de plus de 4 °C aux températures actuelles alors que les températures estivales seront plus chaudes d'environ 3 °C. Une simulation avec le modèle régional canadien du climat en vue de prévoir l'évolution du pergélisol au Nunavik a permis de calculer que durant la période 2041-2071, les températures moyennes annuelles à la surface du sol, qui commandent directement la température du pergélisol, seront plus chaudes d'environ 3 °C au moins pour l'ensemble du Nunavik, voire de 4 °C pour la côte de la baie d'Hudson et du détroit d'Hudson (3). La température du pergélisol dans les sites les plus froids du Nunavik, par exemple dans le village de Salluit, se situant déjà dans les - 4 °C, il en découle que le point de congélation sera dépassé vers la moitié du XXI^e siècle dans les couches supérieures du pergélisol, à l'extrême nord du Québec. Il semble bien que le pergélisol risque de disparaître près de la surface du sol au Nunavik avant la fin du siècle, advenant la justesse du modèle. En effet, de masses gelées en profondeur pourront alors persister à cause des faibles flux de chaleur et de la chaleur latente; ces masses sans lien avec l'atmosphère constitueront alors ce qu'on appelle du pergélisol relique. Les infrastructures construites sur le pergélisol en seront nécessairement affectées.

Méthodologie

En plus de découler de travaux de recherche et d'observations sur le terrain, l'étude met à profit des données de températures obtenues au moyen de câbles à thermistances implantés au cours de la construction des aéroports. Dans plusieurs cas, les lectures de ces câbles, qui étaient faites manuellement par des particuliers, avaient été interrompues dans le courant des années 1990 faute de financement. Reprises de façon automatisées depuis 2004, les nouvelles lectures permettent d'évaluer les changements survenus dans les températures et dans les profondeurs de dégel sous les ouvrages et dans le terrain naturel avoisinant au cours des récentes années. Maintenant automatisées, le suivi de l'évolution thermique des pistes est assuré pour les années à venir.

Parmi les documents consultés relativement aux aéroports du Nunavik figurent en premier lieu les plans des pistes et des routes telles que construites ainsi que les plans originaux utilisés durant la construction. Ces plans ont surtout servi à préciser l'épaisseur des remblais et des routes par dessus le terrain naturel et à identifier les zones en déblais qui sont particulièrement sensible à la pénétration du dégel. En effet, l'excavation lors de la construction décape les horizons organiques relativement isolants et expose le pergélisol riche en glace alors que le remblai mince qui est remis par-dessus ensuite laisse pénétrer la chaleur dans le sous-sol. Les études de caractérisation avant-projet effectuées dans les années 1980 par les consultants ont été relues, de même que les rapports produits par le Centre d'études nordiques durant le programme de construction(4).

L'équipe a réalisé des forages et des carottages peu profonds (jusqu'à environ 3.2 m) dans les sols en bordure des pistes afin de mieux caractériser le pergélisol. Lorsque les sols étaient trop pierreux et avaient un contenu trop pauvre en glace pour obtenir de bonnes conditions de carottage avec la foreuse portative du CEN (5), des pelles mécaniques ont été louées dans les communautés pour dégager des coupes. Mené en parallèle, un projet de caractérisation du pergélisol dans les communautés à des fins d'aménagement urbain a conduit à l'inclusion des sites aéroportuaires sur les cartes de dépôt de surface des communautés (6). En retour, l'analyse géomorphologique et stratigraphique propre à chaque site a bénéficié des connaissances du contexte géomorphologique régional découlant de ces relevés.

Deux méthodes géophysiques ont été utilisées pour caractériser certaines pistes : le profilage en résistivité électrique (OHM-mapper) et le profilage au géoradar. La première méthode permet de produire des coupes (profils bidimensionnels) représentant la distribution de la résistivité électrique dans les terrains. La résistivité électrique est une propriété qui dépend de trois facteurs : la granulométrie des matériaux, la température et la teneur en glace (ou en eau). C'est donc un outil qui aide au diagnostic de la stratigraphie et des propriétés du pergélisol. Le géoradar, quant à lui, permet de produire des profils bi-dimensionnels qui sont en fait des images en coupe sur lesquelles on peut interpréter le front de dégel et la présence de masses de glace dans le sol. On peut aussi définir de façon générale la stratigraphie et la nature du sol. Ces deux méthodes connaissent chacune leurs limitations, par exemple quant à la résolution (niveau de détail observable) et aux profondeurs limite de détection. Complémentaires entre elles, elles offrent toutefois l'avantage de visualiser la continuité latérale d'observations de surface (exemple

le prolongement du toit du roc sous la surface des dépôts entre les affleurements rocheux). Des explications détaillées de leur application se trouvent dans Savard (2006) (7).

Résultats

Certains sites aéroportuaires ne présentent que très peu de problèmes car le roc sur lequel ils sont construits est très stable au dégel ; c'est le cas notamment des aéroports d'Ivujivik et de Kangiqsujuaq. Celui d'Umiujaq est aussi presque totalement construit sur le roc ou sur des champs de blocailles quaternaires, sauf pour une courte section à surveiller; par contre sa route d'accès sur des dépôts de silt et de sable instables au dégel a déjà subi des déformations importantes. Un autre aéroport, celui de Kangiqsualujuaq est selon toute évidence (à moins qu'une lentille de sols gélifs en profondeur n'ait échappé à la détection géophysique) construit sur des sols graveleux d'origine marine qui ne présentent pas de risques d'affaissement en situation de dégel. Par contre les aéroports d'Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq présentent des caractéristiques qui soit posent déjà problème soit risquent fort d'en poser dans le futur à mesure que le réchauffement climatique s'accroîtra. Les principaux problèmes rencontrés les suivants :

- L'enneigement différentiel provoqué par le vent le long des remblais et qui réchauffe localement le sol, conduisant ainsi à des affaissements. C'est le cas notamment à Tasiujaq et à Salluit.
- L'enneigement différentiel combiné à la présence de fossés latéraux. En plus de retenir la neige en hiver, ces fossés ont perdu leur pente originale à cause de tassements différentiels et retiennent maintenant des flaques d'eau en été. Cette eau absorbe le rayonnement solaire et réchauffe le sol en marge des pistes. Cas d'Inukjuak, de Quaqaq, d'Akulivik et d'Aupaluk.
- L'accroissement de la profondeur de dégel (de la couche active) dans du pergélisol sensible au dégel (du till ou un diamicton marin contenant une matrice de silt avec des lentilles de glace) sous des sections de piste aux endroits où la construction originale a été faite en déblai (Akulivik, Salluit, Quaqaq, Kangirsuk) ou, encore, à des endroits où le réchauffement climatique récent a provoqué l'approfondissement de la couche active sous les ouvrages (Tasiujaq).
- La présence menaçante de coins de glace dans le pergélisol sous les pistes. Associés originalement à des sols polygonaux, ces coins de glace sont actuellement « fossilisés » sous les pistes. Mais le réchauffement climatique menace à terme de les faire fondre à mesure que la couche active va s'approfondir. Concomitamment, ces coins de glace risquent d'être un jour brusquement érodés thermiquement par l'écoulement d'eau sous les pistes qui pourrait survenir à la faveur d'inondation dans des fossés défectueux. Les cas les plus patents sont les pistes d'Aupaluk et d'Akulivik, quoique les sites d'Inukjuak et de Quataq présentent aussi ce risque, mais de façon moindre, les coins de glace probablement présents y étant moins nombreux et non détectés de façon absolue par des sondages.

Certains sites sont affectés par une combinaison de ces problèmes. Deux exemples de tels cas complexes sont présentés à titre illustratif : Tasiujaq et Salluit. Un cas de piste construite sur un réseau de coins de glace est illustré : Aupaluk.

Tasiujaq

L'aéroport est construit à proximité de la rivière Bérard sur une terrasse d'origine fluviale. D'une longueur effective standard de 1070 mètres (longueur totale de 1180 m) et d'une largeur de 44 m, la piste est orientée selon un axe nord-est sud-ouest ($057-237^\circ$ N), à une altitude moyenne de 34 m (32 m à son extrémité NE et 37 m à son extrémité SO). Plusieurs tassements différentiels sont répartis sur toute sa longueur. Cependant, ceux-ci affectent davantage son accotement est (figure 4). Les affaissements les plus notables sont situés à proximité de la voie de circulation et des fissures de tension accompagnent les dépressions ; l'une d'elle faisait 35 m de largeur et atteignait 30 cm de profondeur par rapport à la surface originale en juillet 2004 (N.B. elle a été réparée !).

Les relevés géophysiques, les sondages avec de la machinerie, et l'étude d'une coupe stratigraphique dans la falaise le long de la rivière à proximité immédiate ont mis en évidence que les dépôts quaternaires sous la piste sont disposés suivant quatre couches stratigraphiques (figure 5). Une de ces couches, en particulier, un diamicton sis entre 0.7 et 3 m de profondeur, contient une fraction importante de silt et d'argile avec une teneur importante en glace disposée en fines lentilles. De surcroît, l'eau (et la glace) dans ce sédiment d'origine marine a une salinité moyenne de 8 gr/L, ce qui abaisse son point de fusion d'un demi-degré. Ces sédiments se liquéfient en dégelant. Les autres couches entre 3 et 11 m de profondeur sont constituées de sables, de graviers et de blocs avec une faible teneur en glace interstitielle. Elles ne tassent donc pas au dégel.

La figure 6 présente les variations des températures du sol sur une période de 12 ans enregistrées par le câble Tas304 situé dans le terrain naturel non perturbé par l'activité humaine, à 42 m de la piste. Ce câble peut donc servir de référence pour illustrer l'effet du réchauffement climatique. L'enregistrement thermique peut être considéré comme représentatif de la tendance climatique à long terme au Nunavik. Malgré un trou de 3 ans dans l'acquisition des données, une augmentation des températures dans le pergélisol est observée. Cette hausse atteint 1.3°C à 11 m de profondeur, soit de -4.0 à -2.7°C . Au début de la période d'enregistrement, le mollisol atteignait une épaisseur de 130 cm. Actuellement, l'épaisseur du mollisol fait environ 2 m et elle a même dépassé cette profondeur à la fin de l'été 2005.

Parallèlement, les enregistrements thermiques acquis durant une période de 16 ans (1989-2005) par deux câbles de 5 m situés dans la piste montrent que la profondeur du dégel estival s'est accrue de 40 cm sous l'ouvrage dans un cas et de 70 cm dans l'autre. Le dégel atteint donc maintenant le pergélisol sous la fondation. On observe qu'il n'y a pas encore eu de tassement à l'endroit précis où les câbles plongent verticalement dans la piste (à 20 m du bord ; ex. Tas181). La raison probable pour cette absence de tassement est que cet approfondissement de la profondeur maximum de dégel est encore confiné dans les 70 cm supérieurs du sol, en sable non gélif (figure 5).

Toutefois, les faibles valeurs de résistivité électrique mesurées à l'endroit des affaissements le long de la piste indiquent que le pergélisol y est dégelé sur une profondeur pouvant atteindre 7-8 m. L'explication de la fonte localisée du pergélisol sur les marges de la piste réside dans l'enneigement différentiel.

De manière à en estimer les effets possibles, deux types de mesures ont été faites. D'une part, on a procédé à un relevé des épaisseurs de neige le long de dix transects répartis des deux côtés de la piste, sur des distances de 15 à 25 m en partant de la base du remblai. D'autre part, des enregistreurs autonomes de température ont été placés dans le champ, juste sous la surface de la couche organique, suivant quatre de ces transects. Trois enregistreurs ont été utilisés par transect, répartis de la base du remblai jusqu'à 10 à 20 m dans le champ. L'impact thermique de l'enneigement ainsi mesuré est majeur. Une corrélation statistique établie entre l'épaisseur du banc de neige au début d'avril et la température moyenne annuelle enregistrée à la surface du sol en dessous montre que pour des épaisseurs de neige supérieures à environ 77 cm les températures sont positives; le pergélisol en dessous ne peut que fondre. Or ces épaisseurs sont largement dépassées en marge de la piste (figure 7), parfois jusqu'à une distance de 15 mètres.

En somme, la piste de Tasiujaq subit présentement l'impact combiné de l'enneigement causé par l'accumulation éolienne de la neige contre le remblai et du réchauffement climatique. L'accumulation nivale réchauffe le sol au point d'entraîner la fonte de la couche sensible entre 0.7 et 3 m de profondeur, puis les zones affectées s'étendent vers l'intérieur de l'ouvrage. Entre temps le profil thermique réchauffe sous l'ouvrage et le dégel s'approfondit annuellement. Toute la piste est appelée à tasser progressivement (figure 8) au fil des années à venir.

Salluit

La figure 9 résume très bien la situation de l'aéroport de Salluit. Un premier secteur s'est légèrement affaissé (environ 20 cm) du côté nord de la voie de circulation (vis-à-vis le chaînage 2+770). Vérification faite sur les plans d'origine, cette section a été construite en déblai sur un till. La chaleur transmise à travers la piste a donc atteint ce matériau qui contient une matrice fine et de la glace de ségrégation. Cependant, les secteurs en remblai épais ailleurs le long de l'ouvrage sont encore bien gelés, la couche active restant encore confinée au remblai, malgré un réchauffement au fil des dernières années (figure 10). En effet le dégel saisonnier atteignait environ 2.75 m à la fin de l'été 2006 au câble Sal-172 dans le centre de la piste (figure 9), là où le remblai fait 5.3 m d'épaisseur. Les autres secteurs affaissés le long de la piste de Salluit sont tous situés le long du remblai du côté est, vers où la neige est balayée par le vent dominant légèrement oblique à la piste et, aussi, par les opérations de déneigement. D'autres études réalisées à Salluit (8) ayant montré que le pergélisol fond sous les épaisseurs de neige supérieures à 1 m, on peut déduire que c'est ce facteur qui est en cause. Il est aussi accentué par l'absence d'un système de drainage organisé.

Aupaluk

La figure 11 montre un sillon de forme typique en surface du terrain qui pénètre sous la piste. Sous ces sillons s'étendent des coins de glace (figure 12) formés au fil des ans par la percolation d'eau de fonte printanière dans les fentes de contraction thermique encore ouvertes depuis l'hiver précédent (9). À Aupaluk, le réseau de sillons et de coins s'est développé à travers des sables et graviers appartenant à d'anciennes plages marines soulevées. Ces sols sont peu gélifs. Présentement les mesures thermiques montrent que le dégel saisonnier se maintient dans le remblai épais de la piste et que, par conséquent, les coins en dessous sont encore protégés du dégel. Toutefois, avec l'approfondissement à venir de la couche active, le risque d'assister à un écoulement d'eau sous la piste va augmenter. Un tel écoulement qui longerait un coin de glace le ferait fondre et provoquerait un affaissement linéaire en travers de la piste. Comme la piste recoupe de nombreux coins de glace (figure 13), ce risque va devenir de plus en plus menaçant.

Conclusions

L'enneigement des bordures des pistes et des fossés est présentement le facteur principal qui contribue à la dégradation du pergélisol. Cette dégradation tend ensuite à progresser vers l'intérieur des ouvrages. Toutes les pistes sont sensibles à ce processus à cause de la géométrie des remblais qui favorise l'accumulation de la neige redistribuée par le vent. Avec le réchauffement climatique, ce facteur est appelé à s'accroître parce que plus la température atmosphérique est élevée de façon générale moins l'épaisseur de neige requise pour isoler le pergélisol est importante. Comme les données thermiques le démontrent dans tous les cas documentés, la fonte du pergélisol ne se produit actuellement que de façon localisée sous quelques pistes. Dans la majorité des cas, ce processus survient sous des sections de pistes construites en déblai. En conséquence du réchauffement climatique qui va se poursuivre, l'approfondissement du mollisol sous les remblais, avec ses conséquences, va se faire sentir progressivement, en commençant par les secteurs les plus minces.

Des travaux d'entretien importants sont à prévoir pour maintenir les pistes et les routes pleinement opérationnelles. Dans un premier temps, l'adaptation aux conditions d'enneigement et l'amélioration des dispositifs de drainage sont prioritaires. Dans un deuxième temps, il faut prévoir des travaux récurrents pour l'entretien, en fonction de la vitesse de dégradation du pergélisol. Terminé au début des années 1990, il y a donc plus de 17 ans, le réseau est de toutes façons parvenu à une étape normale de travaux d'entretien, certains ayant déjà commencé. Les réfections requises doivent s'inclure dans le cycle d'entretien des infrastructures de transport, comme c'est le cas du réseau de routes et de ponts ailleurs au Québec.

Références

- 1- Arctic Climate Impact Assessment » (2004) Impacts of a warming Arctic. Cambridge University Press, 139 p.
- 2- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D. Savard, J.P., et A. Tarussov (2007) L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik.

Caractéristiques du pergélisol et caractérisation du processus de dégradation des pistes. Université Laval, Centre d'études nordiques, Rapport à Transports Québec, Ouranos et au Fonds d'action pour le changement climatique. 192 p.

- 3- Sushama, L., Laprise, R. and Allard, M. (2006) Modeled current and future soil thermal regime for northeast Canada. *Journal of Geophysical research*, 111. D18111, DOI:10, 1029/2005JD007027/2006.
- 4- Allard, M., Pilon, J.A. et Frydecki, J. (1994). Le pergélisol et les aéroports du Québec nordique. Rapport final au Ministère des transports du Québec. 72 p.
- 5- Calmels, F.C., Gagnon, O. and Allard, M. (2005). A portable earth-drill system for permafrost studies. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16: 311-315.
- 6- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C. et Vinet, F. (2007). Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Rapport au Fonds d'action pour le changement climatique et à Ouranos. 42 p.
- 7- Savard, C. (2006) Imagerie Électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Mémoire de maîtrise, Département de géologie et génie géologique, Faculté des sciences et génie, Université Laval, Québec, 223 p.
- 8- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O. et Michaud, Y. (2004) Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Rapport final. Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique. Ministère de la sécurité publique du Québec. 93p.
- 9- Lachenbruch, A.H. (1962) Mechanics of thermal contraction cracks and ice wedge polygons in permafrost. *Geological Society of America, Special Paper 70*, New-York.



Figure 1. Les communautés du Nunavik.

Évolution des températures moyennes annuelles, 1948-2006
Nunavik et Iqaluit

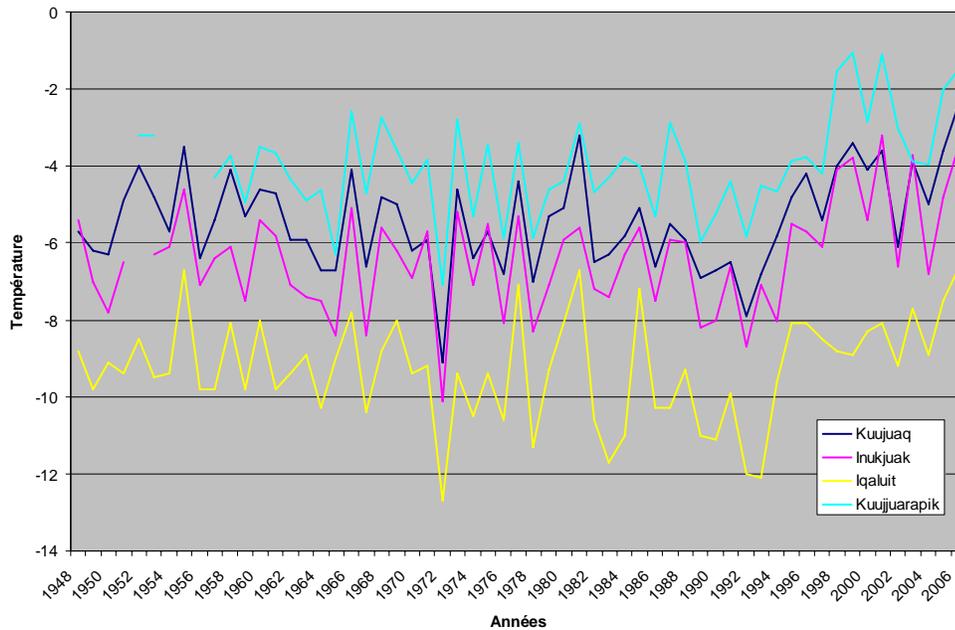


Figure 2. Évolution des températures au Nunavik et à Iqaluit, 1948-2006.

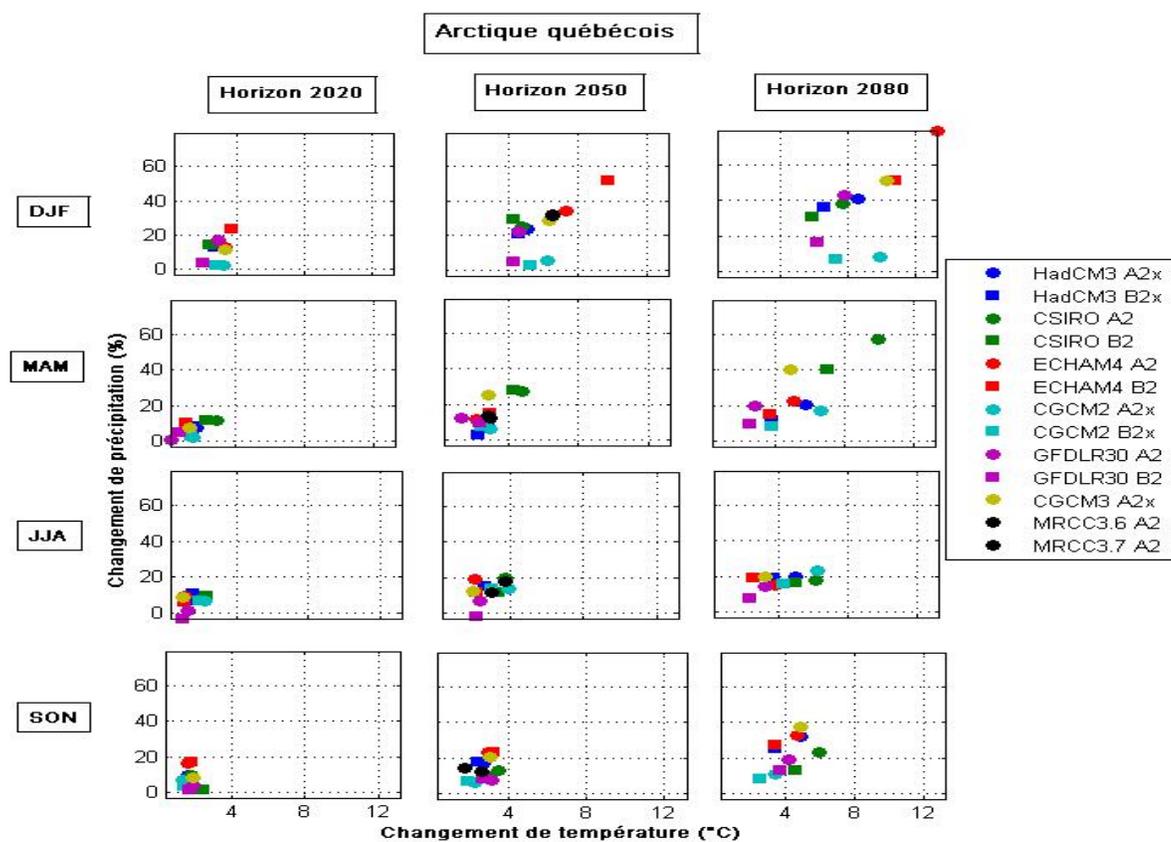


Figure 3. Prévisions climatiques pour le Nunavik au 21^e siècle, selon plusieurs modèles.

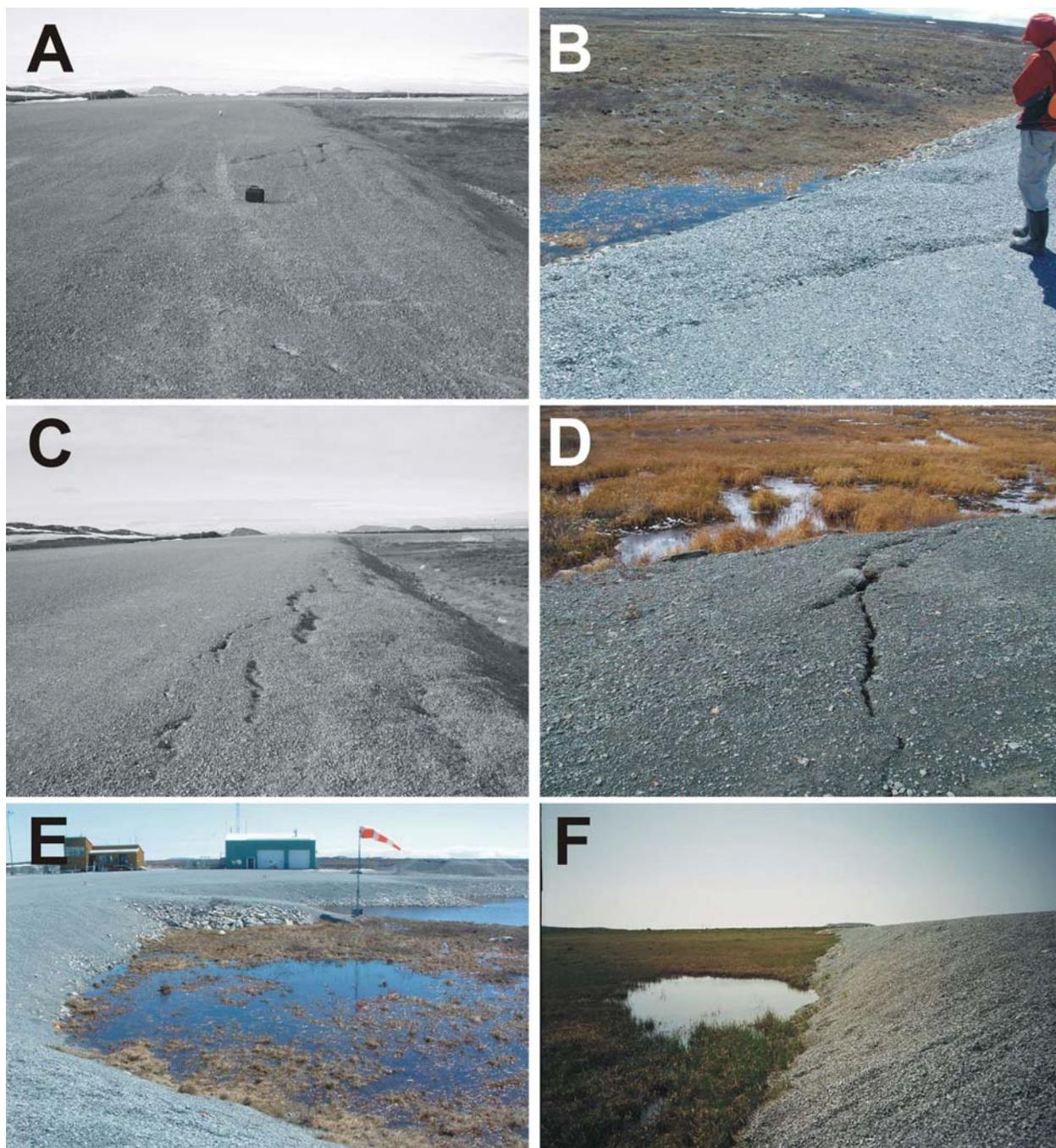


Figure 4. Tassements et déformations en bordure de la piste de Tasiujaq, en 2004 et 2005. Notez les flaques d'eau le long du remblai, surtout du côté sud (B, D, F) et près de la voie de circulation (E).

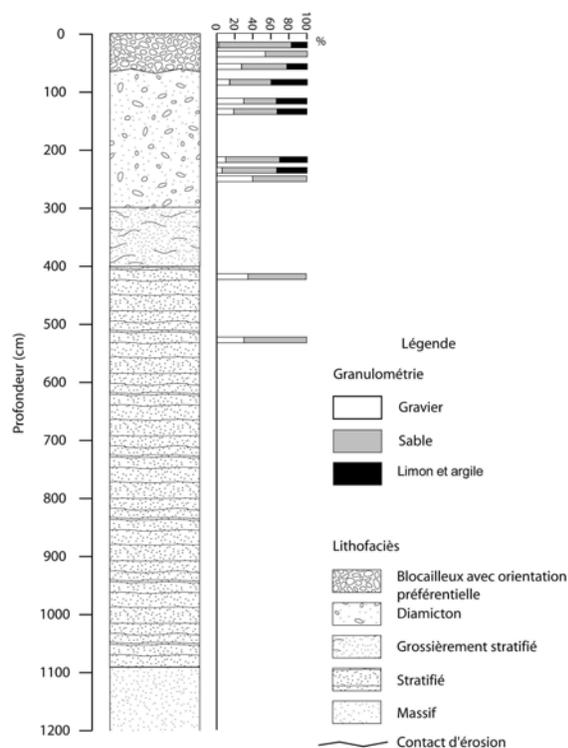


Figure 5. Séquence stratigraphique sous la piste de Tasiujaq.

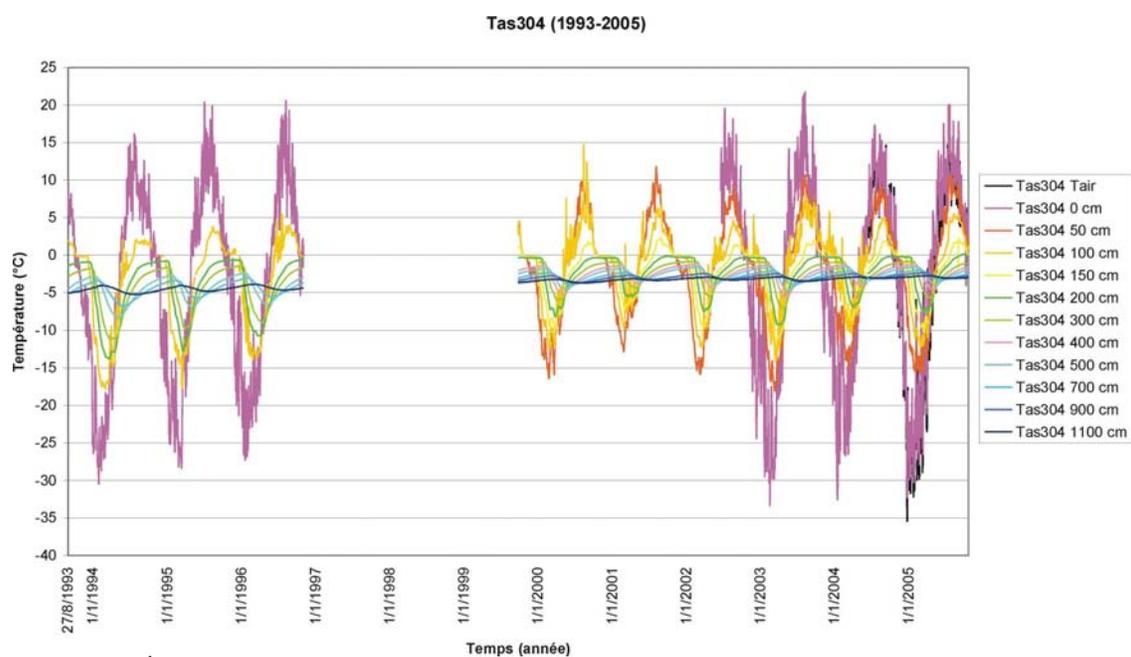


Figure 6. Évolution des températures du pergélisol à Tasiujaq, de 1993 à 2005.

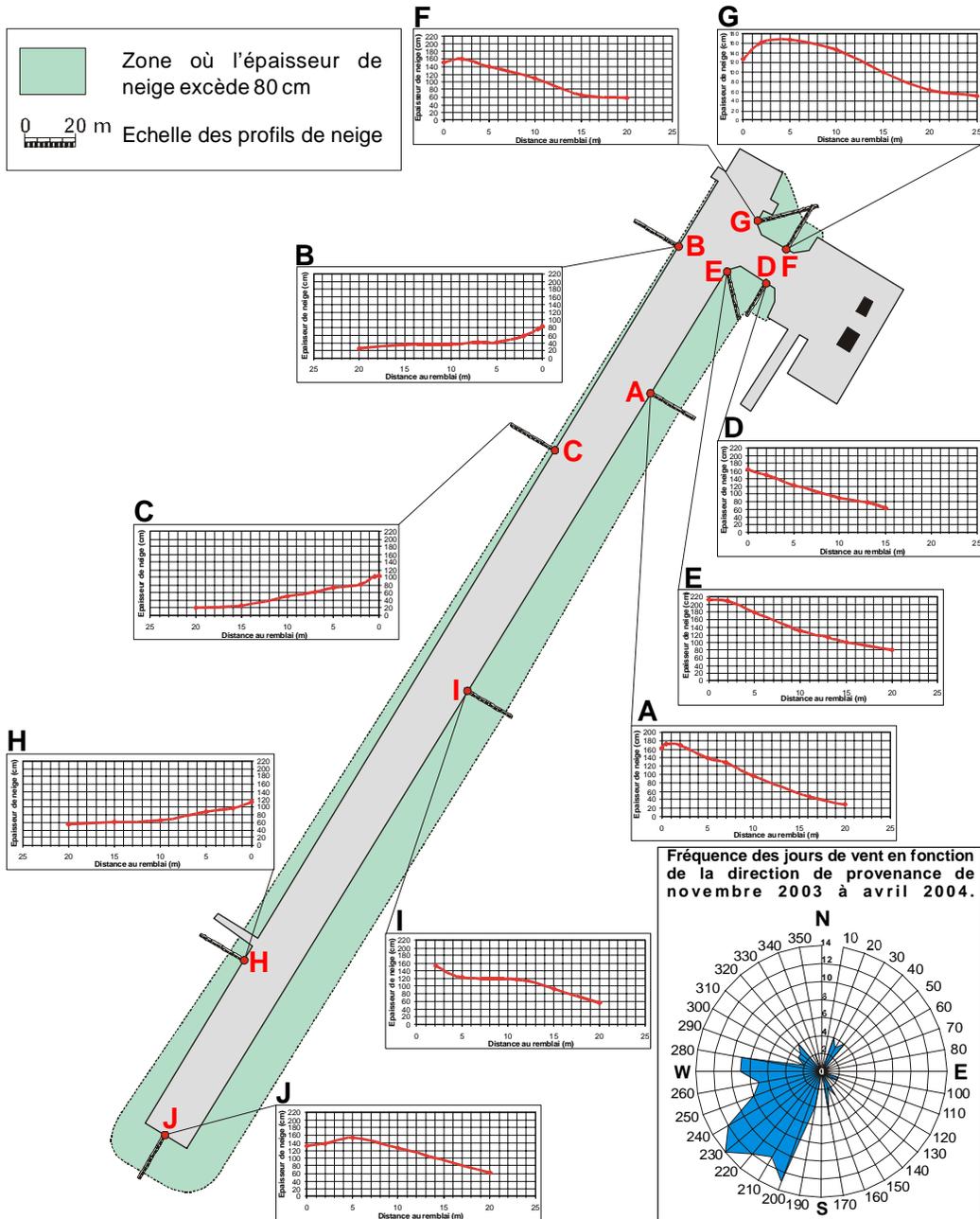


Figure 7. Profils d'enneigement autour de la piste de Tasiujaq. La zone ombragée (verte) a une épaisseur de neige suffisante pour forcer la fonte du pergélisol. En encadré, la rose des vents montre que la dominante est oblique à la piste, forçant l'accumulation accrue du côté est.

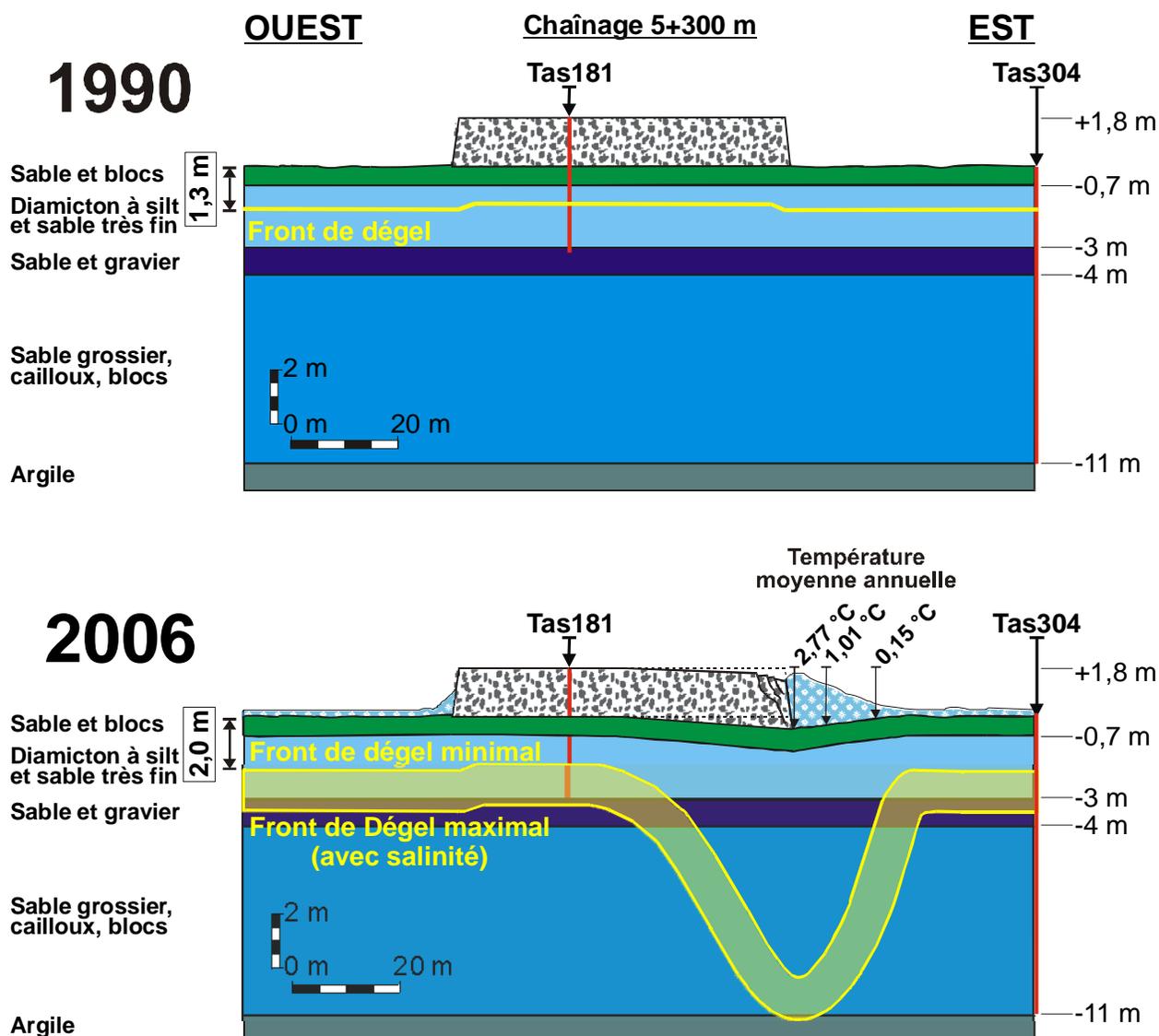


Figure 8. Changements survenus sous la piste de Tasiujaq entre la fin de la construction en 1990 et la fonte localisée de la couche gélive entre 0.7 et 3 m de profondeur sous l'impact de l'accumulation de neige en 2006. Remarquez que le tassement n'est pas encore commencé à l'emplacement du câble à thermistances Tas-181, malgré l'augmentation des températures du pergélisol et un début d'approfondissement de la couche active.

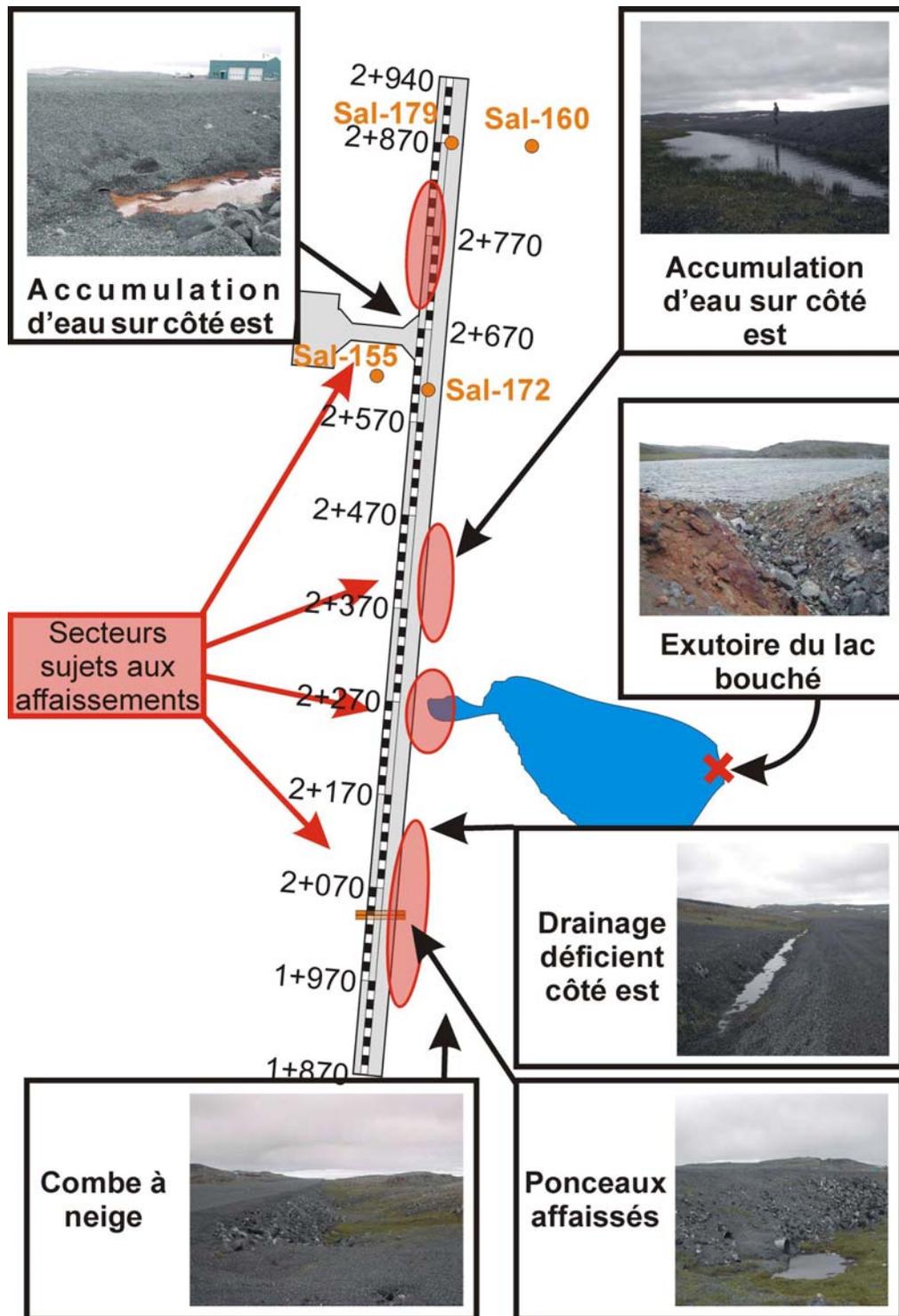


Figure 9. Secteurs affectés par la dégradation du pergélisol de part et d'autre de la piste de Salluit.

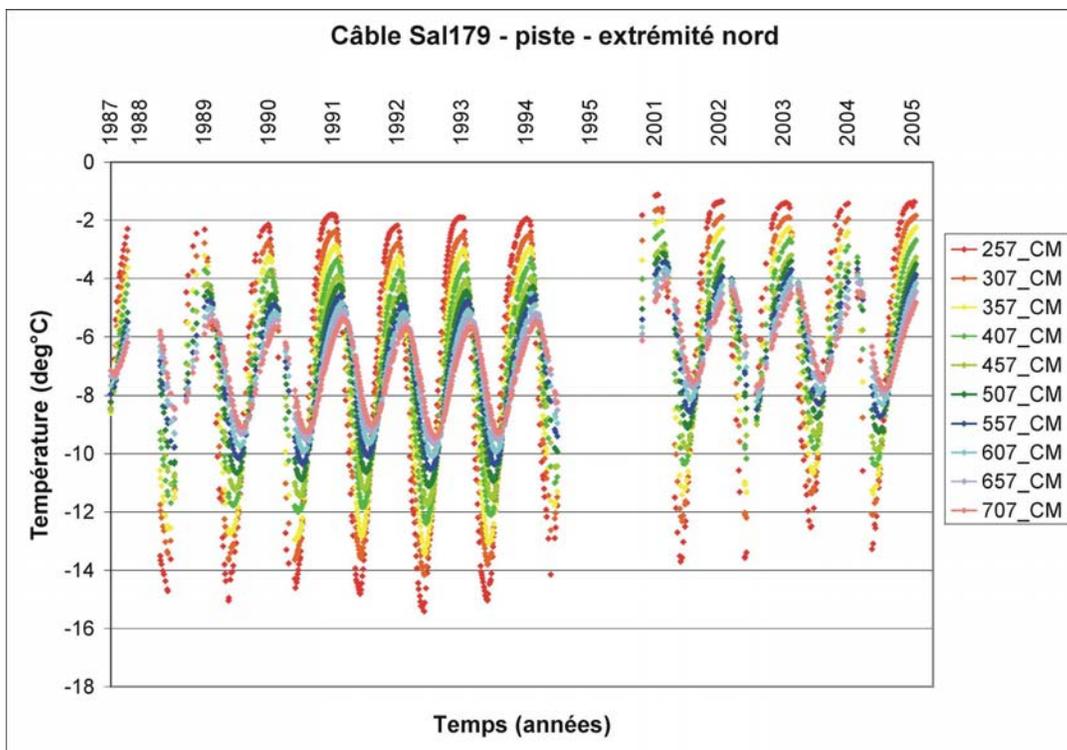


Figure 10. Évolution thermique du sol sous la piste de Salluit au câble Sal179 (voir figure 9 pour la localisation). Remarquez le réchauffement survenu depuis 1993 (manque de données de 1994 à 2001). Malgré cela, la première thermistance à 2.57 m de profondeur (remblai de 2 m) est encore à une température inférieure à 0 °C.



Figure 11. Sillon de coin de glace passant sous la piste d'Aupaluk.



Figure 12. Coin de glace observé à Aupaluk lors de la construction en 1990.



Figure 13. Réseau de coins de glace sous la piste d'Aupaluk.