

TASSEMENT ET CONSOLIDATION AU DÉGEL D'UN SILT ARGILEUX À KANGIQSUALUJUAQ

Serge LEROUEIL¹, Guy DIONNE² et Michel ALLARD³

¹Département de Génie civil, Université Laval, Ste-Foy, Qué, G1K 7P4

²Inspec-Sol Inc., 4600 Côte Vertu, Suite 200, Ville St-Laurent, Qué, H4S 1C7

³Département de Géographie, Université Laval, Ste-Foy, Qué, G1K 7P4

Résumé

Les caractéristiques physiques, de compressibilité et de consolidation d'un silt argileux pergélisolé de Kangiqsualujuaq, Québec, ont été étudiées en laboratoire et sur le terrain, par fonte du pergélisol dans le fond d'une excavation. Il s'avère que les valeurs du paramètre de tassement de fonte (A_0) obtenues en laboratoire et sur le terrain coïncident parfaitement entre elles et aussi avec celles de la littérature pour le même type de sol. Il a aussi été observé sur ce site que la fonte du pergélisol pourtant riche en glace ne génère pas de surpressions interstitielles.

Abstract

The physical, compressibility and consolidation characteristics of a clayey silt permafrost from Kangiqsualujuaq, Québec, have been studied both in laboratory and in situ, by thawing of permafrost in an excavation. It comes out that the thaw settlement parameter (A_0) presents values which are similar in laboratory and in situ, and which correspond to values reported in the literature for the same type of soil. It has also been observed that the thawing of this ice rich permafrost does not generate excess pore pressures.

Introduction

Le problème de l'évaluation de tassements de sols pergélisolés se pose dès que l'on vient perturber l'équilibre thermique existant et que l'on amène une partie des dépôts au-dessus du point de congélation. De tels changements thermiques peuvent être dus à la construction d'oléoducs (Watson *et al.*, 1973-a; McRoberts *et al.*, 1978; Nelson *et al.*, 1982), à la construction de digues (Brown and Johnston, 1970; Kiel *et al.*, 1973), à la construction de bâtiments (Gur'yanov, 1975) ou encore à des travaux d'excavation (Tremblay et Doré, 1988).

Les développements dans la vallée du fleuve Mackenzie, la construction du Trans-Alaska pipeline et l'harnachement de la rivière Nelson au Manitoba ont conduit à des études sur le comportement du pergélisol de ces régions il y a 15 à 20 ans (Watson *et al.* 1973-a; Speer *et al.* 1973; Keil *et al.* 1973; Nelson *et al.* 1982). Les dépôts pergélisolés du nord québécois ont par contre été très peu étudiés d'un point de vue géotechnique.

Suite à la signature en 1977 d'une entente entre les populations autochtones et les gouvernements fédéral et provincial du Québec, la construction de 13 aéroports dans autant de villages du nord québécois a été commencée dans les années 80. Le fait que des tassements importants de la piste d'atterrissage aient été observés à Kangirsuk, l'un des premiers aéroports construits, et aussi la perspective de développements importants et prochains dans cette région

ont amené les autorités à initier un projet de recherche sur la compressibilité de fonte du pergélisol du nord québécois.

Compte tenu de la très bonne connaissance de la région de Kangiqsualujuaq acquise au fil des années par le Centre d'Études Nordiques de l'Université Laval, c'est ce village qui a été choisi pour la présente étude. Le site retenu est une butte minérale cryogène constituée essentiellement de silt et sur laquelle une excavation peu profonde d'environ 80 cm a été réalisée. Le front de dégel, les tassements et les pressions interstitielles ont été suivies pendant tout l'été 1989 et la compressibilité de fonte du pergélisol a pu être comparée à celle mesurée en laboratoire.

Contexte géologique

Le village de Kangiqsualujuaq est situé à une quinzaine de kilomètres de la baie d'Ungava, le long du fleuve George, dans une zone de « pergélisol discontinu et abondant », c'est-à-dire recouvrant plus de 50% de la surface du terrain (Allard et Séguin, 1987). Le gneiss granitique observé à l'échelle régionale est recouvert de till glaciaire compact et, aux altitudes inférieures à 100 m, de sables, graviers et blocs glacio-marins.

Des matériaux silteux, constituant maintenant des buttes minérales cryogènes, ont été déposés en milieu marin dans la mer d'Iberville qui a submergé une partie de la région lors de la déglaciation, il y a 7400 BP (Allard *et al.*, 1989). On

retrouve une douzaine de ces buttes dans la baie de Kangisualujuaq dont la hauteur au-dessus du niveau de la mer varie de 3 à 11 m. Le soulèvement isostatique de cette région se produisant au cours des 5 derniers millénaires à une vitesse de 0.5 m/siècle (Allard *et al.*, 1989), on peut dire que ces dépôts ont commencé à émerger et à geler il y a environ 2000 ans. Les épaisseurs de pergélisol, estimées par des méthodes géophysiques, y sont de 15 à 25 m (Allard *et al.*, 1988).

Méthodes d'investigation et caractéristiques géotechniques de la butte investiguée

La butte qui a fait l'objet de la présente étude est localisée près de la décharge municipale de Kangisualujuaq, à environ 900 m à l'est du village et est accotée à un éperon rocheux. Le site choisi est à une altitude approximative de 10 m par rapport au niveau des hautes marées.

Une première investigation avec réalisation de 2 forages de 3 m de profondeur a été effectuée en 1988 mais l'étude principale a eu lieu en juin 1989 avec l'ajout de 2 forages de 3 m et un de 5 m de profondeur. Le carottier utilisé a été développé par le Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), puis modifié par la Commission géologique du Canada (Veillette, 1975). Il a été adapté sur un bâti léger et permet de prélever des carottes de 5.1 cm ou de 7.6 cm de diamètre. Sa longueur est de 41 cm. Tous les échantillons prévus pour la réalisation d'essais mécaniques ont été carottés en 7.6 cm de diamètre.

Plusieurs types d'essais étant prévus, les échantillons prélevés ont été préparés de différentes façons. Immédiatement après extraction du carottier, des échantillons étaient soumis à des essais calorimétriques afin d'estimer leur teneur en eau non gelée; d'autres étaient conservés gelés dans une glacière remplie de neige afin d'être soumis ultérieurement à des essais de compression; certains échantillons du mollisol ont été placés dans des tubes de plastique hermétiquement fermés pour la réalisation d'essais triaxiaux et de perméabilité dans le laboratoire de l'université Laval à Québec; finalement, des échantillons, plus ou moins remaniés, ont été conservés dans des sacs de plastique pour des essais de granulométrie, de densité des grains solides et pour la détermination des limites de consistance.

La butte est constituée d'un silt qui serait très homogène si ce n'était la présence de quelques cailloux et blocs épars. Le faisceau déduit d'une douzaine de courbes granulométriques est en effet très serré et montre que le sol contient environ 65 % de silt, 12 % de sable et 23 % d'argile (fig. 1). Cette argile confère au sol une certaine plasticité reflétée par un indice de plasticité typiquement de 13 %. La densité relative des grains est en moyenne de 2.72.

La figure 2 montre les profils de teneur en eau (poids total de la glace et de l'eau non gelée/poids de sol sec). Elle n'est que d'environ 22 % jusqu'à 1.1 m, croît légèrement par la suite mais devient vraiment importante soit 50 à 60 % en moyenne, à partir de 1.45 m alors que des lentilles de glace apparaissent. L'apparition des lentilles de glace, tel qu'on

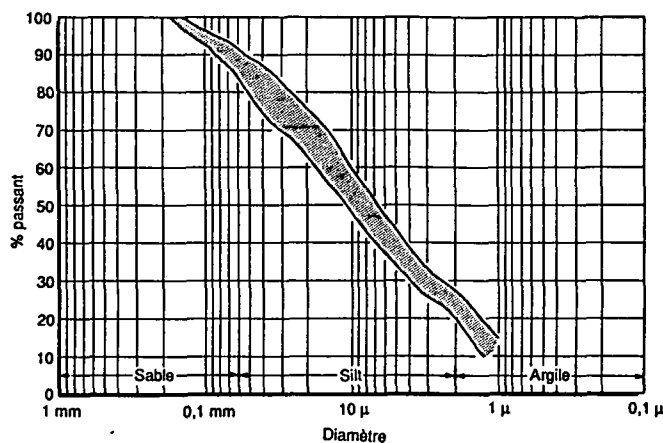


Figure 1. Granulométrie des sols constituant les buttes pergélisolées.

peut l'observer lors de l'échantillonnage, est très nette et semble marquer le plafond du pergélisol. Dans la suite de l'article, le terme « mollisol » décrit le matériau sans glace lenticulaire contenant environ 22 % d'eau tandis que le terme « pergélisol » est réservé au sol présentant de la glace lenticulaire et réticulaire, et ayant une teneur en eau d'environ 50 % dans notre cas. Les essais calorimétriques indiquent qu'environ 25 % de l'eau serait non gelée dans les conditions naturelles du sol.

Les essais oedométriques ont été réalisés pour la plupart dans un laboratoire de chantier, dans des cellules de plexiglas présentant un diamètre intérieur de 7.6 cm et un diamètre extérieur de 12.8 cm. Les échantillons avaient une hauteur initiale d'environ 4.5 cm et dégelait sous une contrainte de 5 kPa. Le chargement était ensuite poursuivi par paliers jusqu'à une charge finale de 80 kPa.

La figure 3 présente trois courbes typiques contrainte-déformation. Elles sont semblables à celles observées par

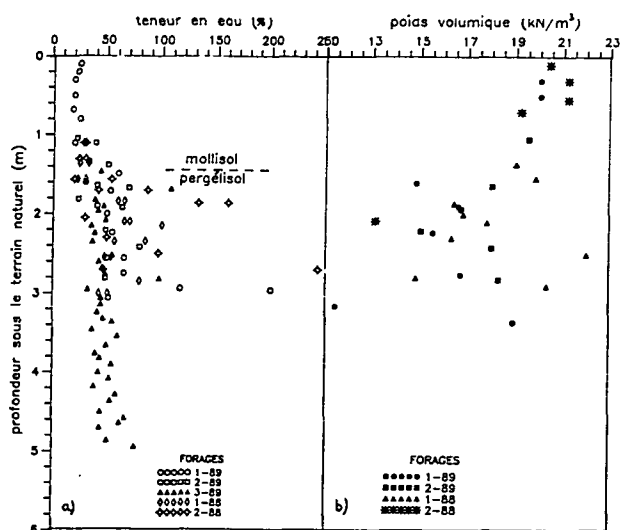


Figure 2. Relation profondeur vs teneur en eau et poids volumique gelé.

Watson *et al.* (1973-b), et peuvent être décrites par l'équation linéaire

$$\epsilon_v = A_0 + m_v \sigma'_v \quad [1]$$

dans laquelle ϵ_v est la déformation axiale, A_0 le paramètre de tassement de fonte, m_v le coefficient de compressibilité et σ'_v la contrainte effective.

Les figures 4-b et 5-b montrent le paramètre de tassement de fonte A_0 en fonction du poids volumique gelé et de la teneur en eau respectivement. Les courbes qui y sont tracées en pointillées sont les courbes moyennes déduites de données de la littérature obtenues sur des sols pergélisolés de nature similaire, c'est-à-dire essentiellement silteux et de faible plasticité (figures 4-a et 5-a). Le comportement au

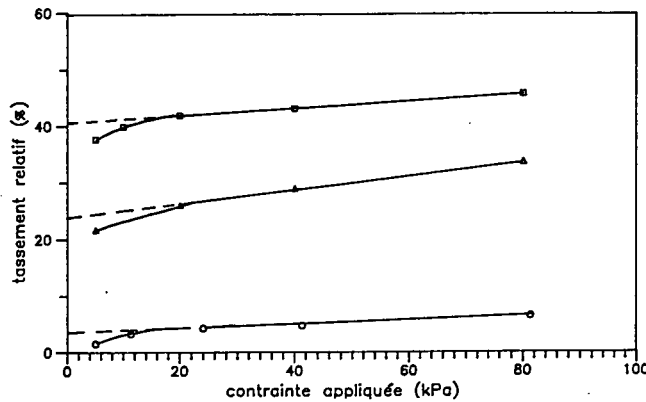


Figure 3. Courbes typiques contrainte-déformation.

dégel des silts de Kangiqsualujuaq est assez semblable à celui qui a été observé ailleurs. Cependant, on peut noter sur la figure 4-b que pour un poids volumique donné, les silts de Kangiqsualujuaq donnent des valeurs de A_0 plus élevées que la moyenne déduite de la figure 4-a. Ceci peut s'expliquer par le fait que les silts de Kangiqsualujuaq sont moins plastiques que ceux investigués par Speer *et al.* (1973) et Watson *et al.* (1973-b), ($I_p = 15$ à 25). Une fois dégelé, un sol peu plastique vient, en effet, à un poids volumique d'équilibre plus élevé qu'un sol plus plastique, et par conséquent, à un poids volumique gelé donné, il générera plus de tassement.

La figure 5-b par contre montre un très bon accord entre la corrélation établie à Kangiqsualujuaq et celle obtenue à la figure 5-a. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette dernière est très fortement influencée par les données de McRoberts *et al.* (1978) obtenues sur des sols de plasticité semblable ($I_p = 0$ à 20). En fait, un examen détaillé de la figure 5-a montre que les sols étudiés par Watson *et al.* (1973-b) donnent pour une même teneur en eau initiale des valeurs de A_0 plus faibles que celles de McRoberts *et al.* (1978). En conclusion, les pergélisols silteux de Kangiqsualujuaq présente des caractéristiques de compressibilité au moment de la fonte qui sont identiques à celles observées ailleurs sur des sols semblables.

La valeur de m_v a tendance à croître avec la teneur en eau initiale mais, comme pour les études antérieures de Watson *et al.* (1973-b), McRoberts *et al.* (1978) et de Changjiang et Enyuan (1985), la dispersion est très importante et empêche de conclure. En moyenne, m_v est de $6 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$.

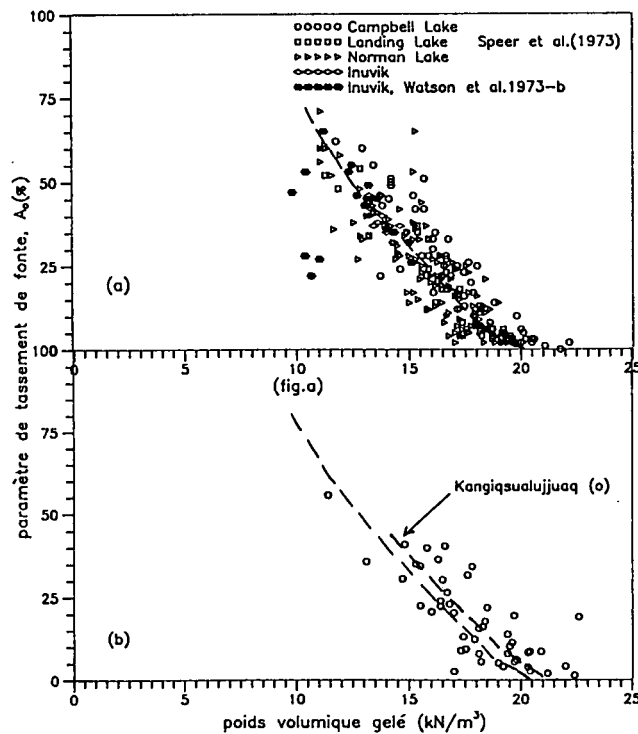


Figure 4. Paramètre de tassement de fonte vs poids volumique gelé.

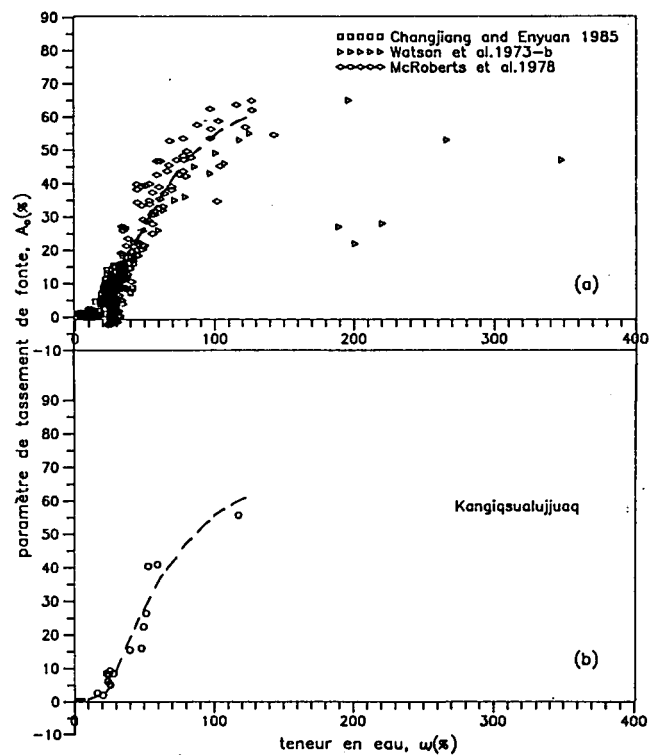


Figure 5. Paramètre de tassement de fonte vs teneur en eau.

Des mesures de perméabilité ont été effectuées sur certains échantillons de sol. Pour cela, entre 2 paliers de chargement, le sol dégelé dans la cellule oedométrique était soumis à un essai de perméabilité à charge variable. La figure 6 montre les résultats obtenus. Dans son état intact, le mollisol présente une perméabilité variant selon les échantillons entre 10^{-9} et 1.5×10^{-8} m/s. Le pergélisol dégelé a une perméabilité généralement beaucoup plus grande, ce qui peut s'expliquer d'une part par de mauvais contacts entre le sol et la paroi de la cellule oedométrique et d'autre part par le fait qu'après dégel et compression sous de faibles contraintes, il reste dans le sol des cavités créant des chemins préférentiels.

EXCAVATION D'ESSAI

Dans le but de vérifier la représentativité des caractéristiques de compressibilité mesurées en laboratoire et d'améliorer notre compréhension du processus de consolidation in situ, il fut décidé d'excaver la partie supérieure de la butte investiguée de manière à faire pénétrer le front de dégel dans le pergélisol.

Instrumentation

L'excavation fait approximativement 9 m par 9 m. Les premiers travaux d'excavation jusqu'à environ 55 cm de profondeur ainsi que la mise en place de l'instrumentation furent réalisés le 23 juin 1989. Cependant, constatant que les objectifs de la recherche seraient plus facilement atteints si l'épaisseur de mollisol était davantage réduite, il fut décidé de surcreuser la planche d'essai le 28 juin jusqu'au front de dégel, soit environ 80 cm sous le niveau du terrain initial. Cette dernière date sera considérée comme étant le jour «0» dans la suite de cet article.

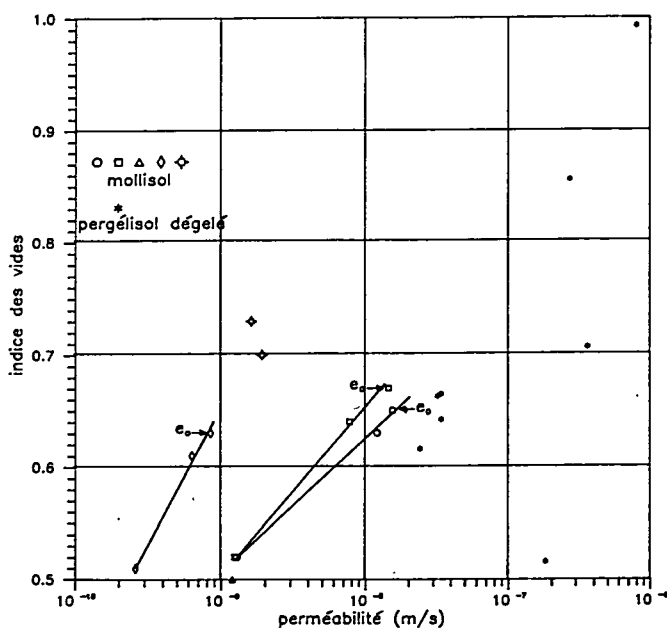


Figure 6. Relation indice des vides vs perméabilité.

Tel que montré schématiquement sur la figure 7, l'instrumentation consiste en 2 câbles à thermistances, 5 piézomètres et 4 tassomètres.

Les câbles comportent 11 thermistances dont les deux premières sont espacées de 25 cm tandis que les autres sont distantes de 50 cm. Ils furent placés dans des tubes de 4 cm de diamètre, l'un dans l'excavation et l'autre dans le sol non perturbé, à environ 25 m de là.

Les piézomètres sont de type hydraulique avec un élément poreux de 4.8 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur. Ils furent mis en place dans le fond de forages de 10 cm de diamètre, à des profondeurs de 0.18, 0.31, 0.85, 1.09 et 1.32 m. Les éléments poreux ont été entourés et recouverts de sable, et ont été scellés avec un mélange de bentonite et de méthanol tel que suggéré par Guthrie (1972). Ce mélange a la propriété de rester plastique jusqu'à des températures de -4°C . Sa perméabilité mesurée en laboratoire est de 8.5×10^{-9} m/s, donc suffisamment faible pour qu'il puisse être utilisé comme bouchon d'étanchéité.

Les tassomètres ont aussi été placés dans le fond de quatre forages, à des profondeurs de 0.5, 0.82, 1.30 et 1.72 m. Ils sont constitués d'une base de plastique de 5 cm de diamètre et de 3.8 cm de hauteur et sont surmontés d'un tube de PVC de 4 cm de diamètre rempli de granules d'isolant. Les variations d'élévation sont mesurées sur le dessus du tube de PVC. Afin que les trous de forages ne constituent pas des cheminées pouvant favoriser le drainage de l'eau au moment de la fonte du pergélisol, ils ont été remplis d'un mélange de kaolinite, bentonite, ciment et eau (Tavenas *et al.*, 1973). Aussi, afin d'éviter un frottement trop élevé du sol en consolidation sur les tubes des tassomètres, ceux-ci ont été enduits de gelée de pétrole puis entourés d'une gaine de plastique.

Les élévations et les variations de celles-ci ont été prises par rapport à un repère situé sur un affleurement rocheux à environ 500 mètres de l'excavation. Cependant, la zone étudiée et en particulier l'excavation n'étant pas parfaitement horizontale, on se référera le plus souvent à des profondeurs et non pas à des altitudes.

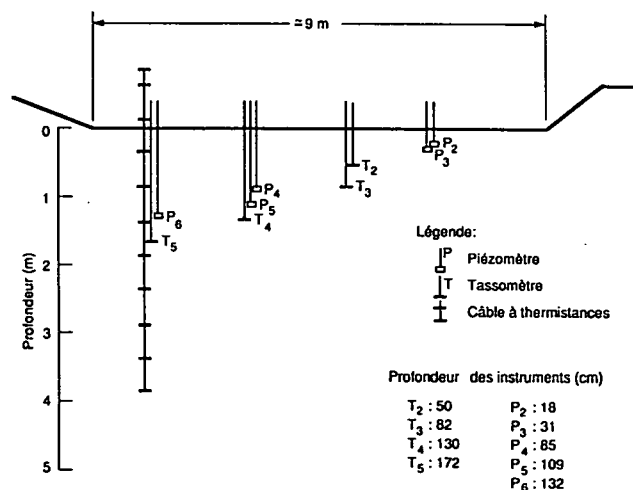


Figure 7. Projection en coupe de la zone excavée.

OBSERVATIONS

Profils de température

La figure 8 montre les profils de température observés à différentes dates dans le sol non perturbé, à l'extérieur de l'excavation. Au 30 juin, la température est de -1.9°C entre 2 et 4.8 m de profondeur et le front de dégel était à une profondeur de 0.70 m. Avec le temps, et ce jusqu'au 24 septembre, le front de dégel descend jusqu'à une profondeur de 1.4 m et les températures augmentent sur tout le profil. À 4.8 m cependant, la température reste stationnaire. Au 14 octobre, le gel commence à remonter.

La figure 9 montre les profils de température aux mêmes dates dans la zone excavée. Au 30 juin, la température dans le sol était de -1.4°C , donc légèrement plus élevée qu'à l'emplacement du câble à thermistances considéré précédemment ce qui peut s'expliquer par le fait que ce dernier est plus près de la face exposée de la butte. Le front de dégel descend également au cours de l'été d'une profondeur nulle le 28 juin jusqu'à une profondeur de 1.09 m le 24 septembre.

L'évolution du front de dégel avec le temps est présentée à la figure 10 pour la zone non perturbée et la zone excavée. On notera que pour la zone non perturbée, le contact mollisol-pergélisol observé dans le forage réalisé pour la mise en place du câble à thermistances est à une profondeur de 1.5 m alors qu'il se trouve à une profondeur de 0.7 m sous le fond de l'excavation. Dans la zone non perturbée, le front de dégel évolue régulièrement dans le mollisol à une vitesse décroissante; à la fin septembre, il atteint presque le contact mollisol-pergélisol et commence à remonter. Dans la zone excavée, l'évolution du front de dégel est moins régulière. Très rapide dans le mollisol qui présente une teneur en glace faible, elle est beaucoup plus lente dans le pergélisol à forte teneur en glace. La figure 11-b montre la vitesse de

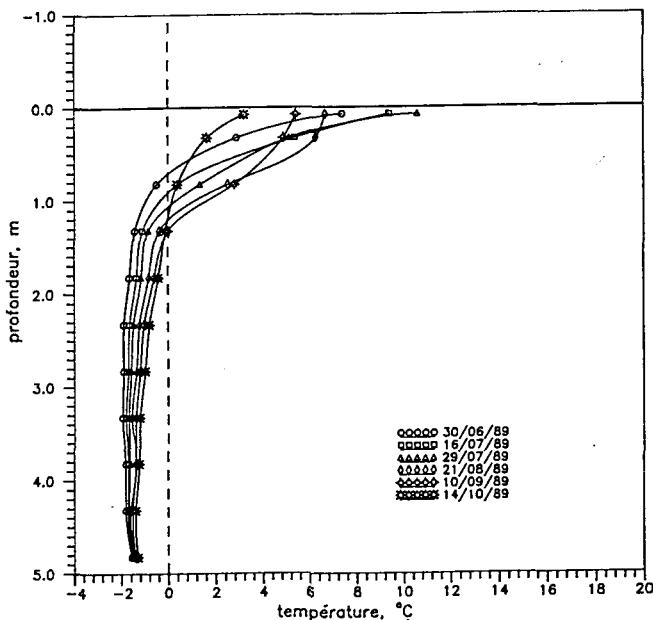


Figure 8. Relation profondeur vs température : zone non perturbée

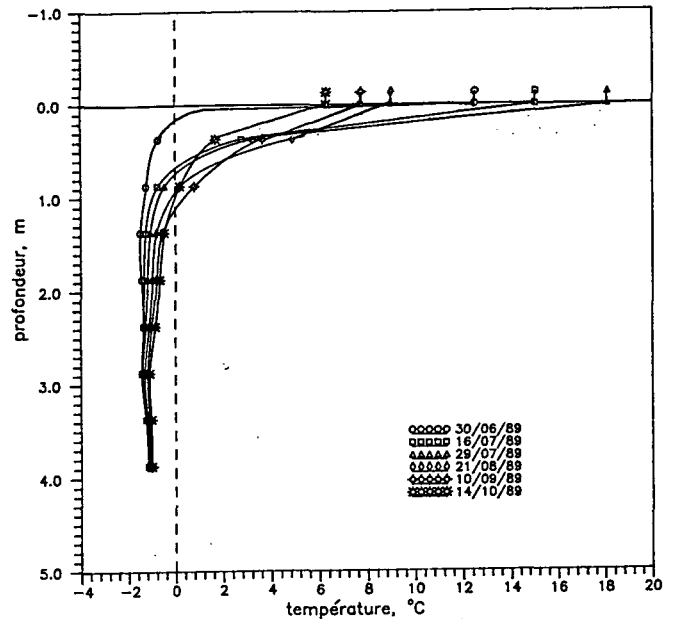


Figure 9. Relation profondeur vs température : zone excavée

propagation du front de dégel avec le temps. Elle est de l'ordre de 3 cm/jour les 18 premiers jours (jusqu'au 16 juillet), diminue substantiellement à 0.5 cm/jour alors que le front de dégel est dans la partie supérieure du pergélisol, augmente de nouveau à environ 0.9 cm/jour à la mi-août puis diminue progressivement pour atteindre 0 cm/jour à la fin septembre. En octobre, la limite de gel remonte.

La figure 11-a montre la température moyenne journalière mesurée au niveau du sol à Kangiqsualujjuag pour la même période. On peut noter que la courbe des vitesses de dégel dans le pergélisol suit assez bien celle des températures. En particulier, dès que les températures deviennent négatives, le dégel cesse de progresser.

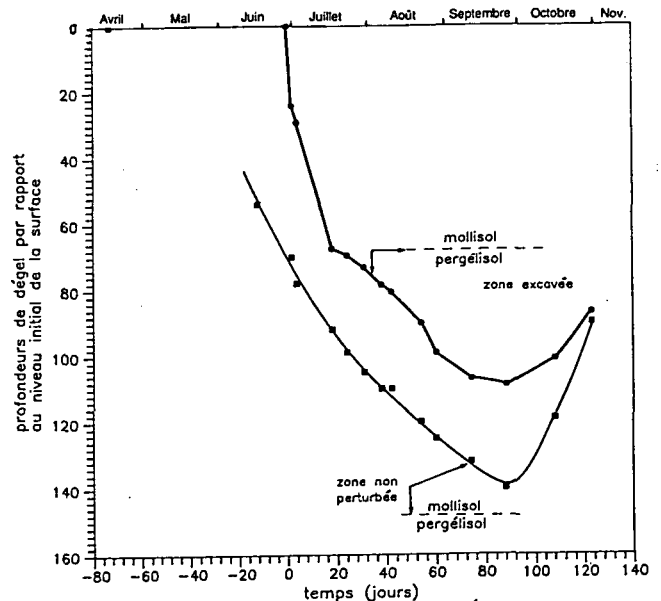


Figure 10. Relation profondeur de dégel vs temps.

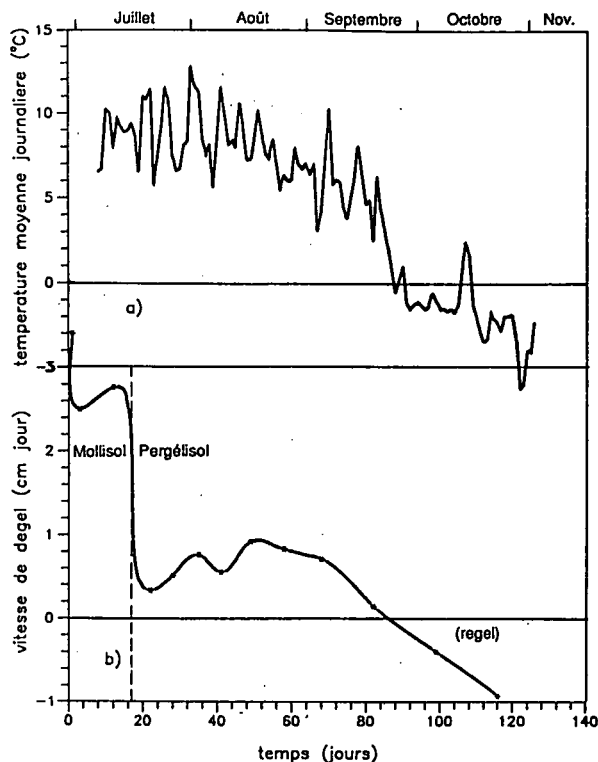


Figure 11. Température moyenne journalière et vitesse de progression du front de dégel dans la zone excavée en fonction du temps.

Tassements

Au moment de la surexcavation, aucun tassomètre de surface n'a été laissé et le tassement du fond de l'excavation n'est donc pas connu précisément. Un relevé de plusieurs points de surface indique cependant que le tassement total de la zone excavée entre le 28 juin et le 23 septembre est d'environ 15 cm.

La figure 12 montre le tassement des différents tassomètres. On peut d'abord remarquer que même les tassomètres les plus profonds, à 1.30 et 1.72 m, qui n'ont pas été atteints par le front de dégel et celui à 0.82 m avant qu'il ne soit atteint ont baissé d'un peu plus de 2 cm pendant l'été. La cohérence des résultats obtenus empêche de penser qu'il puisse s'agir d'un problème de mesure et indique plutôt un fluage de toute la butte qui est constituée de pergélisol relativement tiède.

Le tassomètre situé à une profondeur de 0.5 m, donc dans le mollisol, commence à tasser vers le 10 juillet et poursuit son tassement très régulièrement, bien qu'à une vitesse de plus en plus faible. Vers le 24 septembre, lorsque le front de dégel cesse de progresser, le tassement se stabilise à une valeur de 16.4 cm. Par la suite, alors que le front de gel remonte, on ne note pas de gonflement significatif.

Le tassomètre situé à 0.82 m de profondeur commence à tasser vers le 10 août, lorsque le front de dégel passe à son niveau. La courbe de tassement correspondante est essentiellement une translation de la courbe de tassement observée à 0.5 m, indiquant un tassement de 8 à 9 cm de la couche de sol entre les niveaux des deux tassomètres.

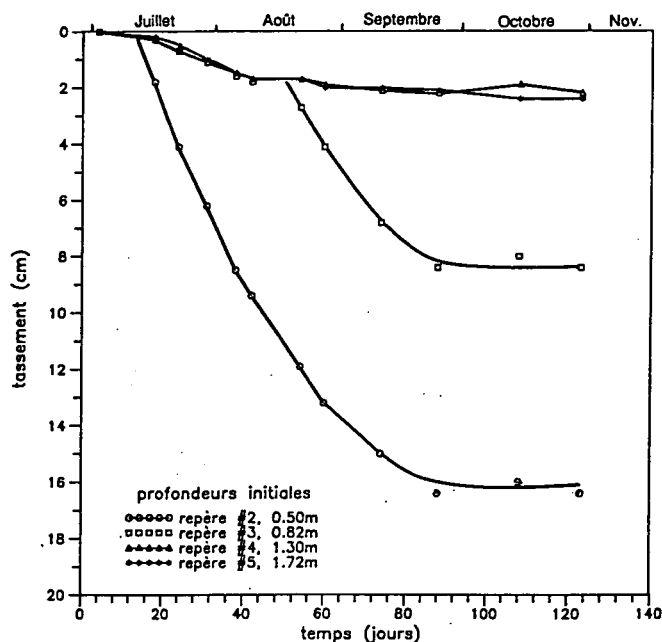


Figure 12. Relation tassement vs temps.

Le front de dégel n'ayant pas atteint la profondeur de 1.3 m en 1989, le tassomètre correspondant n'a pas tassé.

Pressions interstitielles

Les niveaux d'eau dans les piézomètres ont été régulièrement mesurés mais seules les valeurs obtenues alors que le piézomètre était dans la zone dégelée ont été reportées à la figure 13 sous la forme profondeur sous le niveau de la surface courante en fonction du temps. La précision recherchée et la légère inclinaison du terrain nous empêchaient en effet de reporter ces données en élévation.

Les observations faites dans les différents piézomètres sont très cohérentes, avec des variations de niveaux avec le temps entre quelques centimètres sous la surface au début d'août et 23 cm sous la surface à la fin septembre.

Les niveaux mesurés dans les piézomètres à 0.85 et 1.09 m, donc dans la zone de pergélisol qui a dégelé, suivent approximativement ceux mesurés dans les piézomètres à 0.18 et à 0.32 m de profondeur. Comme ces derniers niveaux correspondent à la nappe phréatique, cela indiquerait que le dégel du pergélisol ne génère pas de surpressions interstitielles.

Discussion

Compte tenu de l'aspect compact du mollisol ($w = 20-25\%$) et de sa perméabilité apparemment faible (figure 6), on pourrait s'attendre à ce que l'eau de fonte du pergélisol soit emprisonnée entre la masse de pergélisol encore gelé et ce mollisol. Il s'ensuivrait des surpressions interstitielles dans cette zone. Or, les piézomètres n'indiquent pas de surpressions et il faut, d'une part s'assurer que les valeurs mesurées sont représentatives et d'autre part, chercher à comprendre pourquoi il en est ainsi.

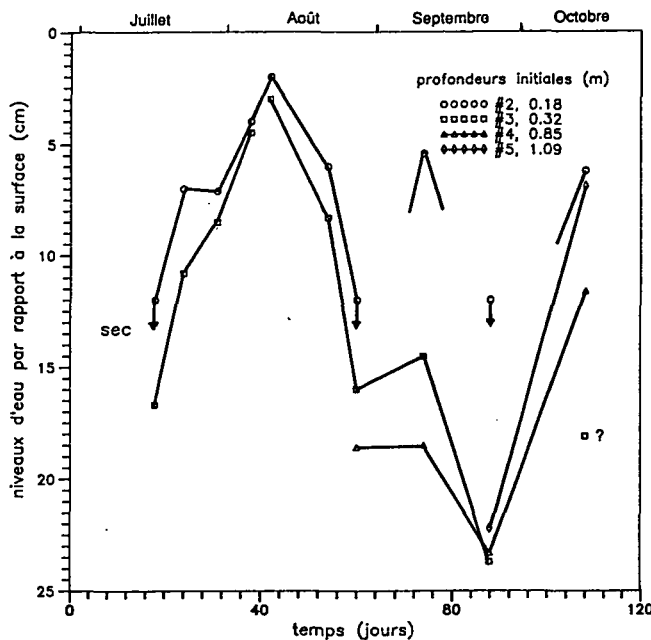


Figure 13. Niveaux d'eau dans les piézomètres par rapport à la surface vs temps.

La cohérence des résultats indique que les piézomètres fonctionnent bien. Par ailleurs, s'il y avait des surpressions interstitielles, il y aurait consolidation et par conséquent tassement du sol au-dessus du front de dégel. Or, la figure 12 montre que dès que le front de dégel passe sous le tassomètre placé à 0.82 m de profondeur, la compression de la couche entre les tassomètres situés à 0.5 et 0.82 m n'évolue plus, indiquant de ce fait que la consolidation s'effectue complètement au fur et à mesure que le front de dégel progresse. Ceci est confirmé par le fait que dès que le front de dégel cesse de progresser, soit vers le 24 septembre, le tassement s'arrête lui aussi. Les pressions interstitielles mesurées sont donc représentatives de ce qui se passe réellement.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer l'absence de surpressions interstitielles significatives:

- 1) Possibilité que les forages effectués pour la mise en place des appareils aient créé des cheminées d'évacuation pour l'eau. Ceci est peu probable compte tenu des précautions prises pour obstruer les trous et compte tenu aussi du fait que les tassements ont tendance à compacter le sol autour des instruments et donc à diminuer sa perméabilité. Par ailleurs, aucune venue d'eau particulière n'a été observée en surface à proximité des instruments.
- 2) Forte perméabilité du mollisol. En émettant l'hypothèse que le mollisol est homogène et que l'écoulement de l'eau se fait verticalement à travers celui-ci à une vitesse correspondant à la vitesse de tassement, il faudrait qu'il ait une perméabilité d'au moins 10^{-7} m/s pour expliquer l'absence de surpressions interstitielles. Les valeurs de k mesurées en laboratoire sont de l'ordre de 10^{-9} - 10^{-8} m/s et sont donc beaucoup plus faibles.

Cependant, il est possible que le mollisol présente des macrofissures et des ostioles qui augmenteraient la perméabilité globale de la masse.

- 3) Forte perméabilité du pergélisol gelé. Avec environ 25% de son eau en état non gelé, le pergélisol a une porosité effective importante qui pourrait lui conférer une perméabilité assez élevée pour permettre un drainage latéral de l'eau de fonte. Malheureusement, la perméabilité du pergélisol n'a pas été mesurée et cette hypothèse n'a pu être vérifiée.

Il ressort de cette analyse que les explications possibles à l'absence de surpressions interstitielles sont la présence de macrofissures dans le mollisol et une forte perméabilité du pergélisol tiède (température supérieure à -2°C). Malheureusement, notre étude ne nous permet pas de choisir entre ces explications possibles.

Le fait que la consolidation se fasse au fur et à mesure que le front de dégel progresse permet une évaluation simple de la compressibilité du pergélisol au dégel. Il suffit en effet de reporter le tassement du pergélisol en fonction de l'épaisseur de pergélisol dégelé, tel que montré à la figure 14. Le début de la courbe est surprenant puisqu'il indique un tassement de 2 cm pour une épaisseur dégelée de 2 cm. Cela pourrait s'expliquer par la fonte d'une lentille de glace mais peut aussi résulter d'une certaine incertitude sur la détermination de l'épaisseur de pergélisol dégelé. Quoiqu'il en soit, il y a globalement un tassement de 12.5 cm pour une épaisseur dégelée de 42 cm, donc une déformation de 30%. Si on ne considère que la partie linéaire de la courbe, pour des tassements entre 4 à 12.5 cm, la déformation est de 25%.

Cette compressibilité peut être comparée à celle qui a été obtenue par essais de laboratoire. La figure 2-a indique une teneur en eau moyenne de 50-55% pour le pergélisol, ce qui donnerait, selon la courbe tracée à la figure 5-b un A_0 de 28 à 30%. La figure 2-b indique un poids volumique moyen de 16.5 kN/m^3 pour le pergélisol, ce qui donnerait, selon la courbe tracée à la figure 4-b un A_0 d'environ 27%.

Compte tenu du fait que le terme $m_v \sigma'_v$ de l'équation 1 est très faible et inférieur à 1% dans le cas présent, la déformation de terrain peut être comparée directement aux valeurs de A_0 . Toutes les valeurs se trouvant entre 25 et 30%, on peut en conclure qu'il y a un excellent accord entre les valeurs moyennes de terrain et de laboratoire.

Conclusion

Les caractéristiques physiques, de compressibilité et de consolidation d'un silt argileux pergélisolé ont été étudiées en laboratoire et sur le terrain.

Les essais de compressibilité en laboratoire ont permis de définir des relations entre le paramètre de tassement de fonte A_0 d'une part et la teneur en eau et le poids volumique gelé d'autre part. Ces relations se comparent très bien avec celles qui ont été obtenues dans la littérature sur des matériaux de plasticité semblable.

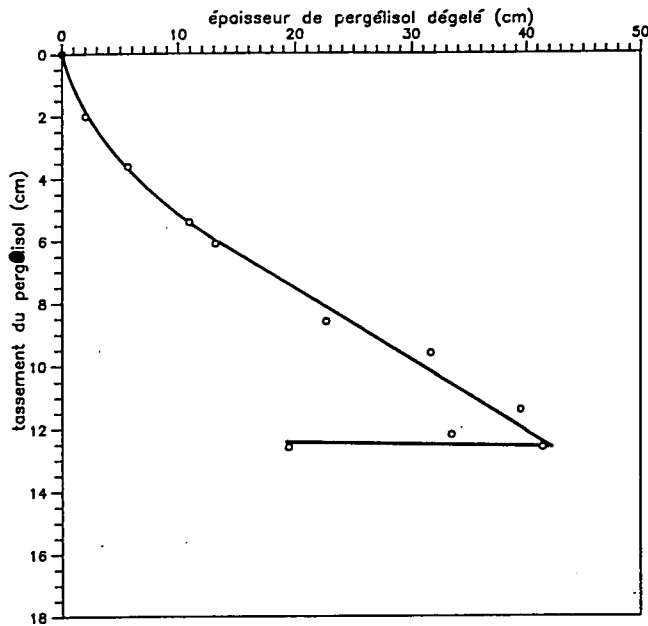


Figure 14. Relation tassement du pergélisol vs épaisseur de pergélisol dégelé.

Une excavation de 80 cm a été réalisée de manière à faire fondre la pergélisol situé sous le mollisol. Les déductions suivantes peuvent être faites:

- Alors que le front de dégel progresse très rapidement dans le mollisol à faible teneur en glace (=3 cm/jour), il progresse beaucoup plus lentement (=0.7 cm/jour) dans le pergélisol beaucoup plus riche en glace;
- La fonte du pergélisol ne génère pas de surpressions interstitielles mais on ne peut dire si cela est dû à la présence de macrofissures dans le mollisol ou à une perméabilité élevée du pergélisol relativement chaud;
- La compressibilité au dégel du pergélisol correspond très bien aux valeurs moyennes déduites des essais de laboratoire.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Association pour les Routes et Transports du Canada et le Ministère des Transports du Québec pour le financement de cette recherche ainsi que le fonds FCAR-Transport pour l'octroi d'une bourse d'étude au deuxième auteur. Ils sont aussi très reconnaissants envers Nelson Rioux et Luc Tanguay du Ministère des Transports du Québec, envers Carl Henry de Polytec inc. et également envers l'équipe du Centre d'Études Nordiques de l'université Laval.

Références

- ALLARD, M. et SÉGUIN, M.K., 1987. Le pergélisol au Québec nordique: bilan et perspectives. *Géographie physique et quaternaire*, vol. 41 (1): 141-152.
- ALLARD, M. SÉGUIN, M.K. et PELLETIER, Y., 1988. Shoreline permafrost in Kangisualujjuaq bay, Ungava, Quebec. 5th International conference on permafrost, Trondheim, Norway: 113.
- ALLARD, M., FOURNIER, A., GAHÉ, É., SÉGUIN, M.K., 1989. Le quaternaire de la côte sud-est de la baie d'Ungava, Québec nordique. *Géographie physique et quaternaire*, vol. 43: 325-336.
- BROWN, R.G. and JOHNSTON, G.H., 1970. Dikes on permafrost: predicting thaw and settlement. *Canadian geotechnical journal*, vol.7 (4): 365-371.
- CHANGJIANG, T. and ENYUAN, C., 1985. Thaw-consolidation behavior of seasonally frozen soils. 4th International symposium on ground freezing, Sapporo: 159-163.
- GUR'YANOV, I.E., 1975. Relations of calculated and actual settlement of a thawing foundation bed. *Soil mechanics and foundation engineering*, vol. 12 (1): 29-33.
- GUTHER, H.H., 1972. Bentonite seals for piezometers in frozen soil. *Canadian geotechnical journal*, vol.19: 115-116.
- KEIL, L.D., NEILSEN, N.M. and GUPTA, R.C., 1973. Thaw-consolidation of permafrost dyke foundation at Long Spruce generating station, 26th Canadian geotechnical conference, Toronto: 134-141.
- McROBERTS, E.C., LAW, T.C. and MONIZ, E., 1978. Thaw settlement studies in the discontinuous permafrost zone. 3rd International conference on permafrost, Edmonton: 701-706.
- NELSON, R.A., LUSCHER, U., ROONEY, J.W. and STRAMLER, A.A., 1982. Thaw strain data and thaw settlement predictions for Alaskan soils. 4th International conference on permafrost, Fairbanks: 912-917.
- SPEER, T.L., WATSON, G.H. and ROWLEY, R.K., 1973. Effects of ground-ice variability and resulting thaw settlements on buried warm-oil pipelines. 2nd International conference on permafrost, Yakutsk, North American Contribution volume: 746-752.
- TAVENAS, F., ROY, M. et LA ROCHELLE, P., 1973. An artificial material for simulating Champlain clays. *Canadian geotechnical journal*, vol. 10 (3): 489-504.
- TREMBLAY, C. and DORÉ, G., 1988. Airport network and housing construction programmes in northern Quebec, Canada. 5th International conference on permafrost, Trondheim, Norway: 1500-1506.
- VEILLETTE, J., 1975. Modified CRREL ice coring augers. Commission géologique du Canada. Paper 75-1, part A: 425-426.
- WATSON, G.H., ROWLEY, R.K. and SLUSARCHUK, W.A., 1973-a. Performance of warm pipeline buried in permafrost. 2nd International conference on permafrost, Yakutsk, North American Contribution volume: 759-766.
- WATSON, G.H., SLUSARCHUK, W.A. and ROWLEY, R.K., 1973-b. Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils. *Canadian geotechnical journal*, vol. 10 (4): 592-606.