

SUIVI DU FRONT DE DÉGEL DANS LE MOLLISOL À L'AIDE DU CAPACITANCEMÈTRE À FRÉQUENCE VARIABLE.

Richard FORTIER¹, Michel ALLARD¹, Régis DESBIENS² et Jean PILON³

¹ Centre d'études nordiques, Pavillon F. A. Savard, Cité universitaire
Université Laval, Ste-Foy (Québec). G1K 7P4

² Instrumentation GDD inc. 3700, Boul. de la Chaudière, Ste-Foy (Québec). G1X 4B7

³ Commission Géologique du Canada, Division de la science des terrains,
601 rue Booth, Ottawa (Ontario). K1A 0E8

Résumé

Pour l'ingénieur nordique ou le géomorphologue périglacialiste, la mesure directe ou indirecte sur le terrain des teneurs en eau et en glace du sol est nécessaire mais difficile à réaliser. Plusieurs techniques existent actuellement mais toutes ont des limitations diminuant l'intérêt ou la portée de leur utilisation. Le Capacitancemètre à Fréquence Variable (CFV) est un instrument récemment développé au Centre d'études nordiques de l'université Laval en collaboration avec la compagnie Instrumentation GDD inc. et la Commission Géologique du Canada. Très léger, robuste et facile à utiliser, il permet de suivre la progression du front de dégel dans le mollisol à l'intérieur d'un trou de forage. Constitué d'un capteur et d'un compteur de fréquence, le CFV produit un champ électromagnétique ou électrique oscillant dont la fréquence de résonance dépend de la constante diélectrique du matériel entourant le capteur. Mesurant l'écart de fréquence entre l'air libre, le référentiel, et le sol à une profondeur donnée dans le trou de forage, il est possible de mesurer les variations relatives de la teneur en eau du sol sachant qu'elles sont liées aux variations de constante diélectrique. En connaissant les caractéristiques physiques du sol, sa granulométrie et sa composition minéralogique, une relation entre la variation de fréquence et la teneur en eau peut être établie par une calibration en laboratoire de la réponse du capteur. Les essais préliminaires de l'instrument sur le terrain, réalisés dans deux types de sol (un sable grossier et un limon argileux) près du village de Kangisualujuaq au Québec nordique, ont donné de très bons résultats permettant le suivi des mouvements de la nappe d'eau perchée au-dessus du front de dégel dans le mollisol. Comparés aux résultats obtenus à l'aide du gradient thermique, du contenu en hydrogène et de la résistivité électrique à l'intérieur du sol, la réponse du CFV reflète adéquatement le mouvement du front de dégel dans le mollisol. De plus, il permet de suivre les variations relatives de la teneur en eau dans le mollisol et dans le pergélisol.

Abstract

For the northern engineer or the periglacial geomorphologist, the direct or the indirect field measurement of the water and ice content of the soil is a necessary but difficult task. Several techniques exist at the moment, but all have limitations that reduce the value or the scope of their use. The Variable-Frequency Capacitance meter (VFC) is an instrument developed recently at the Centre d'études nordiques of Laval University in co-operation with Instrumentation GDD inc. and the Geological Survey of Canada. It is very light, sturdy and easy to operate, and allows the user to monitor the advance of the thaw front through the active layer inside a bore hole. The VFC consists of a sensor and a frequency counter; it produces an oscillating electromagnetic or electric field, the resonance frequency of which depends on the dielectric constant of the material surrounding the sensor. By measuring the difference in frequency between the free air, the reference system and the soil at a given depth in the bore hole, we can measure the relative variations in soil water content, knowing they are related to the variations in dielectric constant. With a knowledge of the physical properties of the soil, its granulometry and its mineralogical content, a relationship between the variation in frequency and water content can be established by a laboratory calibration of the sensor response. The preliminary field tests of the instrument in two types of soil (a coarse sand and a clayey silt) near the village of Kangisualujuaq in northern Québec, have provided very good results, allowing us to monitor movements of the perched ground water above the thaw front in the active layer. Compared to the results obtained using the thermal gradient, hydrogen content and electrical resistivity within the soil, the response of the VFC adequately reflects the movement of the thaw front in the active layer. In addition, it allows us to follow the relative variations in water content in the active layer and in the permafrost.

Introduction

Le déplacement du front de dégel à l'intérieur du mollisol pendant l'été nordique peut être suivi de plusieurs façons, la plus simple et la plus directe étant le contact physique avec le gel dans une excavation ou dans un trou de forage. Il existe actuellement deux catégories de mesures de terrain pour évaluer le mouvement des fronts de dégel et de gel et suivre en même temps les variations de teneur en eau qui y sont associées: 1- les mesures directes telles que le gradient thermique et la calorimétrie adiabatique (Martynov, 1956; Sheriff & Fortier, 1986) et 2- les mesures indirectes. La seconde catégorie englobe 1- les mesures électriques telles que la résistivité électrique (Delaney *et al.*, 1988; Gahé *et al.*, 1988), le potentiel spontané (Gahé *et al.*, 1987; Parameswaran and Johnston, 1985; Parameswaran and Mackay, 1983) et la polarisation provoquée (Gahé *et al.*, 1987) sur des électrodes métalliques en contact avec le sol le long de câbles verticaux; 2- les mesures électromagnétiques comme le « Time Domain Reflectometry » (TDR) (Baker *et al.*, 1982) et comme le Géoradar (Pilon *et al.*, 1979) et 3- les mesures radioactives comme l'absorption des neutrons par l'hydrogène dans l'eau. (Harris, 1988). Le Capacitancemètre à Fréquence Variable (CFV) est une technique de mesure électromagnétique indirecte qui permet de suivre les variations relatives des teneurs en eau à l'intérieur d'un trou de forage. Par la mesure indirecte de la constante diélectrique du sol, le CFV permet de suivre le mouvement du front de dégel dans le mollisol et, par la même occasion, les variations relatives de teneur en eau qui y sont associées. La nappe d'eau perchée au-dessus du front de dégel crée une anomalie par rapport au sol gelé permettant d'évaluer la profondeur du front de dégel.

Théorie

Deux prototypes du CFV (le CFV électromagnétique et le CFV électrique) ont été développés au Centre d'études nordiques avec la collaboration d'Instrumentation GDD inc et de la Commission Géologique du Canada. Ils sont essentiellement constitués d'un détecteur placé dans une enveloppe cylindrique en matière plastique et relié par un câble électrique à un compteur de fréquence. Le détecteur est descendu à l'intérieur du sol au bout du câble dans un tuyau d'accès vertical en plastique. L'opérateur mesure sur le compteur de fréquence l'écart entre la fréquence de résonnance à l'air libre du champ électromagnétique (ou du champ électrique) produit par le détecteur et la fréquence de résonnance du champ à l'intérieur du trou de forage. Les lectures instantanées sont prises aux profondeurs désirées dans le sol. La fréquence de résonnance du champ du détecteur est associée à la constante diélectrique du matériel qui l'entoure. La variation de fréquence de résonnance du champ entre l'air libre, le référentiel de base, et le sol est alors liée au contraste de constante diélectrique entre l'air et le sol. Comme la constante diélectrique d'un sol est liée à sa teneur en eau volumique (Topp *et al.*, 1980), le CFV mesure indirectement cette quantité. On remarque que le capteur du CFV représente à la fois l'émetteur et le receveur. Un système appliquant ce principe de façon différente a été développé au Technical University de Prague pour une

application en laboratoire; l'échantillon de sol est placé entre les deux plaques métalliques de l'instrument de mesure. La fréquence de résonnance de l'instrument est associée à la teneur en eau de l'échantillon (Kuraz *et al.*, 1970).

Le CFV électromagnétique est construit d'un enroulement de fil électrique lequel est représenté par un circuit électrique résonnant à l'air libre composé d'une inductance L et d'une capacitance C en série. L'enroulement de fil électrique du capteur est représenté par l'inductance L . Sa valeur est déterminée par les dimensions physiques de l'enroulement. Si la résistance électrique du circuit est négligeable, la fréquence de résonnance f_r du circuit est donnée par l'équation suivante (Resnick & Halliday, 1977):

$$f_r = \frac{1}{2\pi(LC)^{1/2}} \quad (1)$$

Quatre phénomènes physiques peuvent affecter la fréquence de résonnance f_r du détecteur. Ce sont, par ordre décroissant d'importance, les effets inductif, magnétique, capacitif et thermique.

L'effet inductif ou d'inductance mutuelle est lié aux courants de Foucault induits dans un corps conducteur par la variation d'un champ électromagnétique proche. Cette induction crée elle-même son propre champ électromagnétique qui, à son tour, affecte le champ inducteur initial. Cette induction fait varier par un accroissement la fréquence de résonnance du champ inducteur (Fortier & Allard, 1988). En utilisant un trou d'accès fabriqué de matière plastique à l'intérieur du sol, ce phénomène sur le détecteur est évité. Cependant, les minéraux dissous dans l'eau interstitielle peuvent modifier la conductivité électrique du sol et ainsi créer l'effet inductif. Il est d'autant plus important qu'il y a de minéraux dissous dans l'eau. Pour l'étude du pergélisol intertidal (Allard *et al.*, 1988) ou salin, cette technique est limitée par la salinité de l'eau dans les pores.

L'effet magnétique est relié à la magnétite disséminée dans le matériel étudié. Contrairement à l'effet inductif, la fréquence de résonnance du circuit électrique du détecteur diminue en présence de la magnétite. La relation entre la fréquence de résonnance et la teneur pondérale en magnétite dans le sol est linéaire. Pour un sol donné, les teneurs pondérales en magnétite ne varient pas dans le temps et, de plus, lors du forage pour la mise en place du tuyau d'accès, il est possible de mesurer la teneur en magnétite dans les échantillons. L'effet magnétique se quantifie facilement et est discerné aisément lors de l'interprétation des résultats.

Quant à l'effet capacitif, lorsque le détecteur ou l'enroulement de fil électrique est plongé dans un environnement de constante diélectrique réelle k' , la fréquence de résonnance f_r du circuit électrique diminue. Ce phénomène est dû à l'apparition de capacitances parasites C_p aux bornes de l'enroulement de fil électrique ou aux bornes de l'inductance L . La nouvelle équation pour la fréquence de résonnance f_r' est (Fortier & Allard, 1988):

$$f_r' = \frac{1}{2\pi(L(C+C_p))^{1/2}} \quad (2)$$

Cette capacitance parasite est directement proportionnelle à la constante diélectrique relative du milieu (Resnick & Halliday, 1977). Si la constante diélectrique du milieu augmente, la capacitance parasite C_p augmente et la fréquence de résonance f_r diminue. Puisque la constante diélectrique d'un sol dépend de sa teneur en eau, la fréquence de résonance du CFV mesure indirectement cette quantité. La constante diélectrique d'un matériel donné dépend aussi de la fréquence d'oscillation où l'on effectue la mesure. Elle est formée d'une partie réelle k' et d'une partie imaginaire k'' . En général, la partie réelle est plus grande que la partie imaginaire. A la fréquence où le CFV travaille, entre 1 et 3 MHz, seulement la partie réelle doit être considérée et elle est constante. Il existe une grande différence de constante diélectrique entre l'eau et la glace. Ce phénomène se produit aussi pour un sol gelé en comparaison avec un sol dégelé mais de façon beaucoup moins accentuée. Le suivi de la progression du front de dégel dans le mollisol avec le CFV se base sur ce phénomène. La nappe d'eau perchée au-dessus du front de dégel crée une anomalie typique par rapport au sol gelé. La figure 1 présente la variation de la fréquence de résonance du CFV électromagnétique en fonction de la constante diélectrique réelle de différents matériaux. Pour de faibles valeurs de constante diélectrique, la variation de

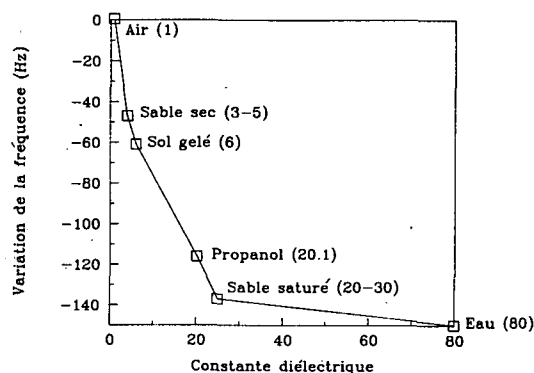


Figure 1. Variation de la fréquence de résonance du CFV électromagnétique par rapport à l'air libre en fonction de la constante diélectrique du matériel entourant le capteur (tirée de Fortier et Allard, 1988).

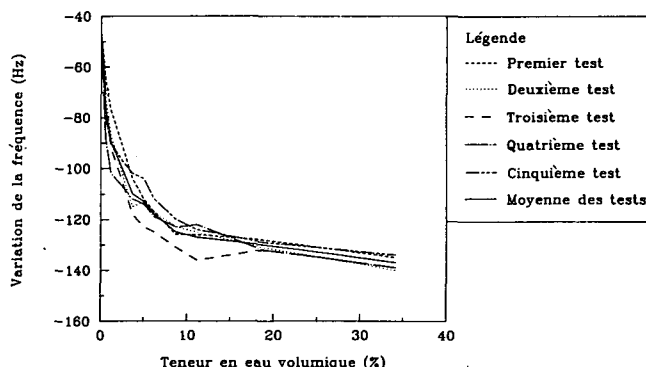


Figure 2. Variation de la fréquence de résonance du CFV électromagnétique par rapport à l'air libre en fonction de la teneur en eau volumique d'un sable moyen (tirée de Fortier et Allard, 1988).

fréquence est importante. Lorsque la constante diélectrique devient importante, la variation de fréquence est plus faible. La réponse du CFV par rapport à la constante diélectrique n'est pas linéaire et elle sature pour des valeurs élevées de celle-ci. Sur la figure 2, on voit la réponse du CFV électromagnétique en fonction de la teneur en eau volumique d'un sable moyen. Les tests réalisés en laboratoire étaient effectués dans un récipient rempli de sable dont on faisait varier la teneur en eau. La réponse n'est pas linéaire et la précision du CFV est plus grande pour de faibles teneurs en eau. En répétant ces tests pour différents sols, il sera possible de déterminer le comportement du CFV en fonction de la teneur en eau. Les données des figures 1 et 2 sont tirées du rapport de Fortier & Allard, 1988, et sont les résultats obtenus d'un prototype plus récent du CFV électromagnétique que celui utilisé dans le présent travail.

L'effet thermique, par dilatation ou par contraction du détecteur, modifie suffisamment la géométrie de l'enroulement (longueur et diamètre) de fil électrique et, donc, de l'inductance pour faire varier la fréquence de résonance du CFV. La fréquence est une fonction de la température d'opération du capteur. Cet effet se corrige en ajoutant au circuit électrique une capacitance variable en température de façon à éliminer la variation thermique de l'inductance.

Le détecteur du CFV électrique est composé de deux plaques métalliques hémicylindriques séparées l'une de l'autre. Le champ électrique produit par la différence de potentiel entre les plaques oscille à une fréquence déterminée par un cristal piézo-électrique. La fréquence de vibration d'un cristal piézo-électrique s'ajuste à l'aide d'une capacitance C_p placée aux bornes du cristal. Les plaques métalliques du capteur aux bornes du cristal prennent la place de cette capacitance qui varie suivant la constante diélectrique du matériel entourant les plaques. La fréquence de vibration du cristal ou la fréquence d'oscillation du champ électrique produit par les plaques métalliques est alors une fonction indirecte de la teneur en eau du matériel entourant le capteur. Le même genre de relation trouvée pour le CFV électromagnétique peut être établie pour le CFV électrique (Fortier & Allard, 1988). Cependant, la magnétite disséminée dans les sols et la température d'opération du capteur n'affectent pas la réponse du CFV électrique. Les matériaux conducteurs tel qu'un tuyau d'accès en aluminium ne font que diminuer la sensibilité du CFV électrique en limitant l'espace occupé par le champ électrique.

INSTRUMENTS UTILISÉS

La fréquence de résonance du CFV est mesurée avec un compteur de fréquence Hewlett Packard, Universal Counter Model 5314A. Une batterie rechargeable de 12 volts fournit l'énergie nécessaire pour l'oscillation des champs électromagnétique et électrique des capteurs (fig. 3). La fréquence de résonance à l'air libre du champ électromagnétique du CFV électromagnétique est près de 1.5 MHz. La fréquence d'oscillation à l'air libre du champ électrique du CFV électrique est près de 2 MHz. Le trou d'accès est construit d'un tuyau vertical en plastique ABS glissé à l'intérieur du trou de forage. Les mesures dans le tuyau d'accès sont prises aux 10 cm.

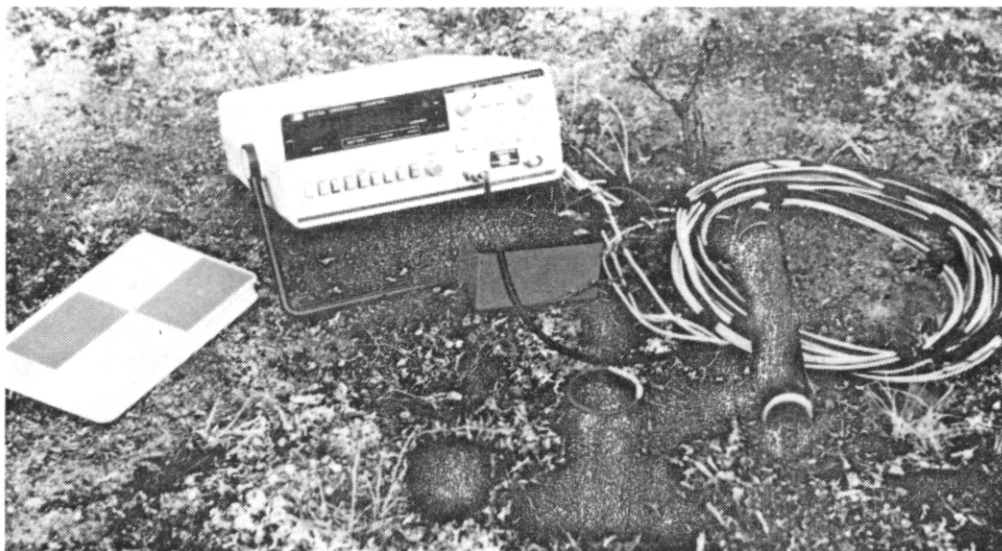


Figure 3. Le Capacitancemètre à Fréquence Variable sur le terrain.

Pour fin de comparaison, nous avons utilisé une sonde à neutrons de marque HYDROPROBE modèle 503DR dans un trou d'accès en aluminium. Le profil thermique est mesuré à l'aide de thermistances UUB31J1 de Fenwall Electronics distribuées à tous les 20 cm le long d'un câble électrique vertical dans le sol. Au même niveau que les thermistances, des électrodes métalliques en contact avec le sol sont placées sur un autre câble électrique. La résistivité électrique est mesurée le long du câble à électrodes métalliques à l'aide d'un résistivitémètre ABEM digital SAS 300 d'ATLAS COPCO. La configuration utilisée est celle de Wenner avec un espacement «a» de 20 cm (Telford *et al.*, 1976). C'est-à-dire: quatre électrodes métalliques consécutives sont utilisées, les deux aux extrêmes sont les électrodes de courant tandis que les deux au centre sont les électrodes de potentiel (Gahé *et al.*, 1987 et 1988; Delaney *et al.*, 1988).

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Les sites étudiés sont près du village nordique de Kangiqsualujjuaq en Ungava, Nunavik. Les trous d'accès en ABS et en aluminium et les sondes thermoélectriques se retrouvent dans deux milieux différents: a) dans un sable grossier d'une ancienne terrasse marine et b) dans un limon argileux d'une butte cryogène. Pour chacun des sites, les variations de fréquence d'oscillation par rapport à l'air libre des CFV électromagnétique et électrique, l'activité neutronique, le profil thermique et la résistivité électrique sont mesurés. Le tableau 1 résume les résultats obtenus et montre les différences de détermination de la profondeur du front de dégel entre les méthodes utilisées pour une période donnée.

Tableau 1

Suivi de la progression du front de dégel dans un sable grossier et dans un limon argileux à l'aide de la variation de la fréquence d'oscillation par rapport à l'air libre des CFV électromagnétique et électrique, de l'activité neutronique, du profil thermique et de la résistivité électrique.

A) Sable grossier

Date	CFV Électromagnétique	CFV Électrique	Activité Neutronique	Profil Thermique	Résistivité Électrique
29/06/86	110 cm	115 cm	100 cm	100 cm	105 cm
18/07/86	125 cm	125 cm	- (2)	115 cm	125 cm
04/08/86	140 cm	140 cm	150 cm	125 cm	150 cm
11/11/86	175 cm	- (1)	- (2)	225 cm	220 cm

B) Limon argileux

Date	CFV Électromagnétique	CFV Électrique	Activité Neutronique	Profil Thermique	Résistivité Électrique
18/07/86	100 cm	100 cm	- (2)	100 cm	90 cm
04/08/86	100 cm	120 cm	100 cm	125 cm	100 cm
11/11/86	200 cm	- (1)	- (2)	160 cm	130 cm

1) Les données du CFV électrique ne sont pas disponibles pour cette période car un mauvais contact électrique a endommagé le capteur

2) La sonde à neutrons n'était pas disponible à cette période.

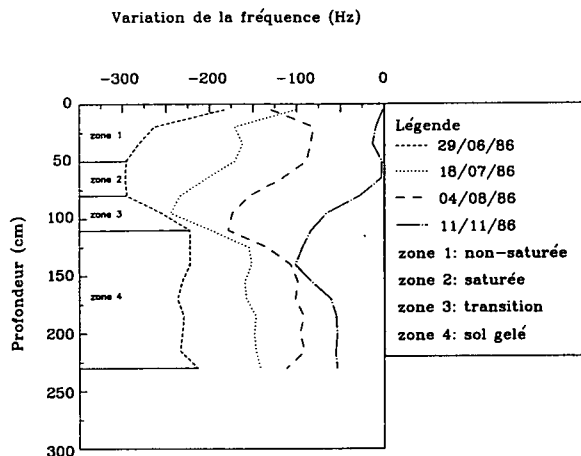


Figure 4. CFV électromagnétique, progression du front de dégel dans le sable. Variation de la fréquence en fonction de la profondeur.

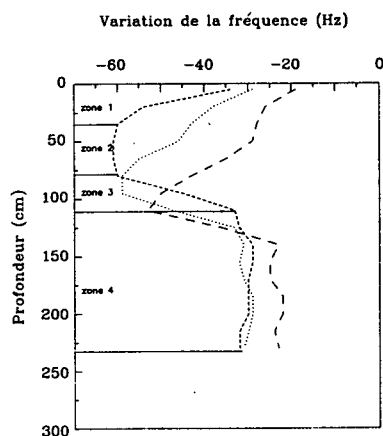


Figure 5. CFV électrique, progression du front de dégel dans le sable. Variation de la fréquence en fonction de la profondeur.

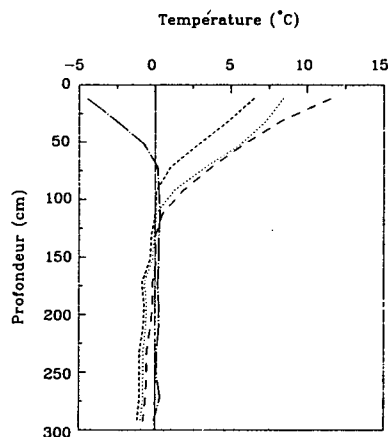


Figure 7. Sonde thermique, progression du front de dégel dans le sable. Température en fonction de la profondeur.

Pour le sable grossier, les figures 4, 5, 6, 7 et 8 présentent les résultats obtenus à partir des variations de la fréquence d'oscillation des CFV électromagnétique et électrique, de l'activité neutronique, du profil thermique et de la résistivité électrique. Les courbes de réponses obtenues des CFV électromagnétique et électrique, de la sonde à neutrons et du résistivimètre se divisent en quatre zones distinctes où la teneur en eau du sol varie différemment. Dans la zone 1, en surface, la teneur en eau dans le sol augmente graduellement avec la profondeur. La variation négative de la fréquence par rapport à l'air libre augmente aussi graduellement car la constante diélectrique du sol augmente avec sa teneur en eau. L'activité neutronique ou l'absorption des neutrons par l'hydrogène dans l'eau (rapport RO des neutrons absorbés par l'hydrogène entre l'air libre et le sol) augmente puisque le contenu en hydrogène augmente avec la teneur en eau dans le sol (Harris, 1988). La résistivité électrique du sol diminue étant donné que la conductivité

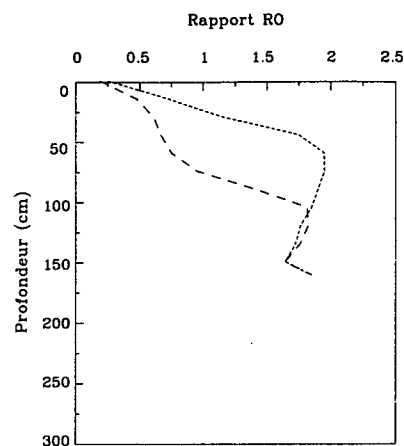


Figure 6. Sonde à neutrons, progression du front de dégel dans le sable. Rapport RO en fonction de la profondeur.

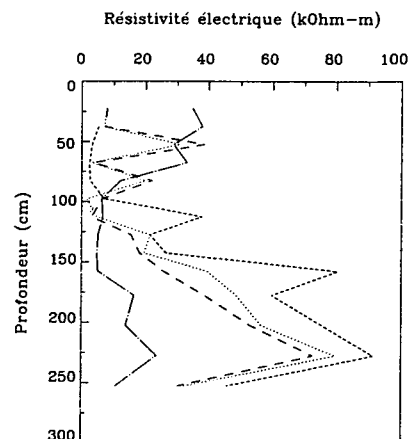


Figure 8. Sonde électrique, progression du front de dégel dans le sable. Résistivité électrique (Wenner, $a=20$ cm) en fonction de la profondeur.

électrique du sol augmente avec la teneur en eau du sol. La zone 2 représente la zone de la nappe d'eau perchée au-dessus du front de dégel où le sol est saturé en eau ou tout près de la saturation. Dans cette zone, la variation de la fréquence et l'activité neutronique ont une valeur maximale tandis que la résistivité électrique est à sa valeur minimale. La zone 3 ou zone de transition sous le front de dégel (isotherme 0°C) se caractérise par un accroissement progressif du contenu en glace et une diminution lente de la teneur en eau non-gelée. Celle-ci est associée à la température du sol, à la granulométrie du sol et à la teneur en minéraux dissous dans l'eau interstitielle. Pour cette troisième zone, la variation de la fréquence diminue puisque la constante diélectrique du sol diminue aussi. L'activité neutronique dans le sable demeure à peu près constante ou diminue légèrement puisque le sol est saturé et que la glace est intergranulaire. Dans le limon argileux, l'activité neutronique augmente puisque la glace de ségrégation produit une sursaturation en eau dans le sol. La résistivité électrique augmente car la teneur en glace, plus résistive que l'eau, augmente aussi. Dans la zone 4, zone du pergélisol ou de la partie inférieure du mollisol, ces variables demeurent constantes ou varient très peu dépendamment de la granulométrie du matériel et de sa température.

Immédiatement au-dessus du front de dégel, la nappe d'eau perchée délimite une couche de sol saturé en eau de 10 à 20 cm d'épaisseur. Cette couche génère une anomalie où la constante diélectrique du sol, le contenu en hydrogène et la conductivité électrique du sol sont maximaux. Elle sert de point de référence pour déterminer la profondeur du front de dégel. Cette anomalie se vérifie dans les deux sites étudiés, le sable grossier et le limon argileux, pour toutes les périodes où les tests ont été réalisés. Cependant, au moment où les mesures ont été faites, le CFV électromagnétique n'était pas compensé en température et le CFV électrique n'avait pas de fibre optique pour la transmission du signal au compteur de fréquence. Normalement, dans la couche gelée où la variation de la fréquence par rapport à l'air libre est constante, l'ensemble des courbes dans cette zone devrait se regrouper près d'une valeur moyenne. Pourtant du 29 juin au 11 novembre 1986, cette valeur est passée de -225 Hz à -50 Hz pour le CFV électromagnétique dans le sable grossier gelé (fig. 4). Entre ces différentes périodes, la température d'opération du détecteur n'était pas la même ce qui affecte la valeur de la fréquence à l'air libre, le référentiel de base. On remarque que la différence de variation de fréquence entre la couche saturée et la couche gelée est constante à environ -75 Hz pour le 29 juin, le 18 juillet et le 4 août 1986 (fig. 4). Ceci laisse supposer que la réponse relative de l'instrument est valable malgré l'effet thermique sur le capteur. Pour le 11 novembre 1986, cette différence se situe près de -40 Hz. Pour cette période, le front de gel de l'automne situé à 60 cm de profondeur dans le mollisol coupe toute alimentation extérieure en eau à la nappe d'eau perchée. Le sol passe donc, en été, d'une saturation en eau due à la fonte du mollisol et des apports extérieurs à une sous-saturation, à l'automne, diminuant l'anomalie créée par la présence de la nappe. Le site étudié est en pente légère, ce qui permet un drainage lent et efficace de la nappe d'eau. Pour le CFV électrique, la variation de la fréquence par rapport à l'air libre dans la zone gelée se définit mieux (fig. 5), autour de

-30 Hz, mais la plage de variation est trop importante pour une explication naturelle du phénomène. La transmission du signal par câble coaxial affecte donc la réponse de l'instrument. Il est intéressant de remarquer la bonne correspondance entre les réponses des CFV électromagnétique et électrique et de la sonde à neutrons (fig. 4, 5 et 6) pour la délimitation de la couche saturée en eau.

La détermination de la profondeur réelle du front de dégel dans le mollisol est une mesure difficile à réaliser. Le contact physique entre le sol dégelé et le sol gelé obtenu lors du forage ou du creusage d'un sol pergélisol donne parfois des résultats faussés. En effet, un sol fin très légèrement sous le point de congélation peut avoir une teneur élevée en eau non-gelée et ne pas être consolidé par l'action du gel. Il est alors difficile d'estimer la limite physique du front de dégel. La région où l'étude a été réalisée est située dans la zone du pergélisol discontinu. Ce pergélisol, qualifié de peu froid, possède des gradients thermiques de 1°C·m⁻¹ à 0.1°C·m⁻¹. La précision des thermistances utilisées est de ± 0.1°C. La précision sur la position du front de dégel est alors au mieux de ± 0.1 m. Les thermistances sont distantes l'une de l'autre de 20 cm ce qui ajoute à la difficulté de localiser avec précision le front de dégel ou l'isotherme 0°C. Une interpolation des résultats est nécessaire. Les CFV électromagnétique et électrique et, en particulier, la sonde à neutrons sont des méthodes qui intègrent de grand volume pour mesurer la teneur en eau. Les contrastes entre la zone dégelée et la zone gelée sont beaucoup plus difficiles à reconnaître car ils varient très lentement. Pour la résistivité électrique, des limites empiriques de 20 kOhm·m et de 2 kOhm·m, pour le sable grossier et le limon argileux respectivement, entre le sol dégelé et le sol gelé semblent raisonnables pour fixer le front de dégel. Ces limites sont réalistes considérant l'ensemble des données mais demandent des études plus détaillées pour les raffiner davantage. Cette méthode aussi intègre dans un volume la teneur en eau. De toutes ces méthodes, aucune n'est pleinement satisfaisante pour déterminer précisément le front de dégel. Les variations observées au tableau 2 sur la position du front de dégel s'expliquent donc par les raisons énumérées plus haut. L'ensemble des méthodes apporte une information qui se recoupe assez bien et permet de mieux définir les phénomènes associés au dégel.

Discussion

Le CFV est un instrument léger et facile à utiliser pour le suivi de la progression du front de dégel dans le mollisol et des variations relatives de la teneur en eau qui y sont associées. Il est sensible aux variations de constante diélectrique du matériel entourant le capteur. Pour l'étude du pergélisol, il permet de situer le front de dégel dans le mollisol et de suivre ses mouvements par la localisation de la nappe d'eau perchée immédiatement au-dessus du front de dégel. La profondeur du front de dégel est déterminée parce qu'il y a un bon contraste de constante diélectrique entre les couches dégelée et gelée. Les résultats obtenus à l'aide du CFV viennent préciser ceux obtenus avec le profil thermique, l'activité neutronique et la résistivité électrique. Une étude sur l'optimisation des paramètres physiques du

capteur pourrait améliorer les performances du CFV. L'ensemble de ces méthodes permet d'arriver sans aucun doute à une meilleure compréhension des phénomènes de gel et de dégel régissant le régime hydrique du mollisol et du pergélisol. En obtenant la teneur en eau totale du mollisol à l'aide de la sonde à neutrons et la teneur en eau non-gelée à l'aide du CFV, on pourrait vraisemblablement déterminer la teneur en glace; variable qui n'est pas actuellement mesurable directement.

Remerciements

Le principe de fonctionnement du CFV a été adapté du Détecteur Électromagnétique de blocs erratiques minéralisés et conducteurs fabriqué par Instrumentation GDD inc. Les auteurs tiennent à remercier Benoît Allard d'Instrumentation

GDD inc. pour son admirable travail pour la finalisation des prototypes du CFV. On remercie aussi le Centre d'études nordiques pour son support logistique, la Commission Géologique du Canada pour son support financier et Fernando Sheriff du département de Géographie de l'université Laval pour ses encouragements. La communauté inuit de Kangiqsualujjuaq et, plus particulièrement, Jean-Guy St-Aubin et son Atelier Félix ont été grandement appréciés pour leur accueil chaleureux et leur amitié. Et, enfin, on remercie le Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur (GREGI) pour le prêt de la sonde à neutrons.

Références

- ALLARD, M., SEGUIN, M. K. & PELLETIER, Y., 1988. Shoreline permafrost in Kangiqsualujjuaq Bay, Ungava, Québec.—V International Conference on Permafrost in Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 113-118.
- BAKER, T. H. W., DAVIS, J. L., HAYHOE, H. N. & TOPP, G. C., 1982. Locating the frozen/unfrozen interface in soils using time-domain reflectometry.—*Can. Geot. Jour.*, Vol. 19, No. 4, 10 p.
- DELANEY, A., SELLMANN, P. & ARNONE, S., 1988. Seasonal variations in resistivity and temperature in discontinuous permafrost.—V International Conference on Permafrost in Trondheim, Norway, Vol. 2, pp. 927-932.
- FORTIER, R. & ALLARD, M., 1988. Le développement du capacitancemètre à fréquence variable.—Rapport remis à la CGC, 70 p, dossier public 1928, liste 979, (p. 2), Asley's reproductions.
- GAHÉ, E., ALLARD, M. & SEGUIN, M. K., 1987. Géophysique et dynamique holocène de plateaux palsiques à Kangiqsualujjuaq, Québec nordique.—*Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. XLI, No. 1, pp. 33-46.
- GAHÉ, E., ALLARD, M., SEGUIN, M. K. & FORTIER, R., 1988. Measurements of active layer and permafrost parameters with electrical resistivity, self potential and induced polarization.—V International Conference on Permafrost in Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 148-153.
- HARRIS, S. A., 1988. Observations on the redistribution of moisture in the active layer and permafrost.—V International Conference on Permafrost in Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 364-369.
- KURAZ, V., KUTILEK, M. & KASPAR, I., 1970. A resonance-capacitance soil moisture meter.—*Soil Science*, Vol. 110, pp. 278-279.
- MARTYNOV, G. S., 1956. The calorimetric method of determining the quantity of unfrozen water in frozen soils.—In L. A. Meister (ed.). *Data on principles of study of frozen zones on the Earth's crust. Issue III. Academy of Sciences U.S.S.R., V. A. Obruchev Inst. of Permafrost Studies, Moscow.* (National Research Council of Canada, Ottawa, Tech. Translation no. 1088).
- PARAMESWARAN, V. R. & JOHNSTON, F. H., 1985. Electrical potentials developed during thawing of frozen ground.—*Proceedings of the Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan*, pp. 9-15.
- PARAMESWARAN, V. R. & MACKAY, J. R., 1983. Field measurement of electrical potentials in permafrost areas.—*Permafrost proceedings of the Fourth International Conference, Alaska*, pp. 962-967.
- PILON, J. A., ANNAN, A. P. & DAVIS, J. L., 1979. Comparison of thermal and radar active layer measurement technique in the Leaf Bay area, Nouveau-Québec.—*Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. 33, No. 3-4, pp. 317-326.
- RESNICK, R. & HALLIDAY, D., 1977. *Électricité et Magnétisme*.—Éditions du Renouveau Pédagogique, 368 p.
- SHERIFF, F. & FORTIER, R., 1986. Détermination calorimétrique du contenu en eau et en glace dans le pergélisol au Nouveau-Québec.—*Annales de l'ACFAS*.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. & KEYS, D. A., 1976. *Applied Geophysics*.—Cambridge University Press, 860 p.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.—*Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-582.