

# DÉLINÉATION DES INTERFACES DE GEL ET DE DÉGEL SOUS UNE CHAUSSÉE ASPHALTÉE ET UN CHEMIN DE GRAVIER PAR GÉORADAR AU QUÉBEC MÉRIDIONAL

Alain TREMBLAY<sup>1</sup>, Jean A. PILON<sup>2</sup>, James T. GRAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Montréal, Département de Géographie. C.P. 6128, Succ. A, Montréal (QC) H3C 3J7

<sup>2</sup> Commission géologique du Canada, Science des Terrains. 601, rue Booth. Ottawa (ONT) K1A 0E8

## Résumé

Deux levés géoradar ont été réalisés à la fin de l'hiver 88-89 sur une route asphaltée et un chemin de gravier, près de la localité de Sainte-Agathe-des-Monts au Québec méridional. L'objectif primordial était de délimiter les interfaces du front de dégel et de gel sous ces deux types de routes, afin de déterminer ainsi l'épaisseur du matériel en état de dégel et de gel. Les levés effectués sur chemin de gravier se sont avérés très efficaces, alors que sur route asphaltée certains problèmes de pénétration du signal radar ont empêché de délimiter aussi efficacement les deux interfaces recherchées. Un deuxième levé en matériel dégelé, effectué un mois plus tard, a permis de circonscrire le milieu stratigraphique des deux sites en question, ce qui a permis une meilleure compréhension des résultats obtenus au moment du premier relevé.

## Abstract

Two ground probing radar surveys were done towards the end of winter 1988-89 on an asphalt road and a gravel road near Sainte-Agathe-des-Monts, in the southern part of Québec. The basic objective of this experiment was to delineate the frostline and «thawline» under these two types of roads, in order to determine the respective thickness of frozen and thawed materials. The survey on the gravel road was very successful; however, on the asphalt road the radar signal could not penetrate as easily, which prevented a clear delineation of the frostline and «thawline» interfaces. A second survey done a month later, after the thaw, allowed to delineate the stratigraphical structure of both sites, thus providing for a better understanding of the results of the first survey.

## Introduction

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ), depuis l'hiver 79-80, cherchant à court terme à diminuer les coûts de rapiéçage et d'entretien du couvert bitumineux occasionnés par le stress printanier du trafic routier de poids lourds, et à long terme, à prolonger la durée de vie de l'infrastructure routière provinciale, a mis sur pied un système de surveillance visant à circonscrire le plus adéquatement possible le début et la fin du dégel saisonnier. (De Montigny et Légaré, 1983; Guimont, 1983).

Ce système est composé d'un réseau de « gèlmètres » enfouis dans le corps de route, répartis ponctuellement et plus ou moins arbitrairement à travers l'une ou l'autre des deux zones du circuit routier québécois (De Montigny et Légaré, 1983; Guimont, 1983). Le « gèlmètre » étant un tube de plastique transparent, rempli d'une solution de bleu de méthylène, celui-ci permet d'abord l'évaluation et le suivi graduel de la profondeur atteinte du gel hivernal, et ensuite celle du dégel printanier sous la chaussée asphaltée.

L'information obtenue permet au MTQ d'appréhender l'arrivée du seuil critique de 30 cm de dégel (une moyenne de zone), ce qui permet de fixer la date du début de la période de restrictions de charges pour la zone concernée,

période de restrictions que l'on tiendra encore en vigueur de quatre à six semaines, une fois franchi la moyenne de 90 cm de dégel. Le MTQ est conscient de la généralisation qu'implique l'estimation des profondeurs de dégel atteintes sous une chaussée pour un même territoire, compte tenu non seulement de l'énorme étendue géographique couverte par chaque zone, mais aussi des nombreuses variantes physiques propres à chacun des sites à « gèlmètres ». Par conséquent, celui-ci s'avère intéressé par d'autres méthodes d'évaluation de la profondeur du dégel, qui pourraient, conjointement au système déjà en place, appuyer ou mieux circonscrire l'analyse du dégel printanier. À ce titre, cet article vise à rendre compte des travaux effectués à l'aide de deux géoradars à la fin de l'hiver 88-89, sur le site à « gèlmètre » de Sainte-Agathe-des-Monts, au niveau du km 89,7 de la route 117, situé à l'extrémité nord de la fin de l'Autoroute des Laurentides (15) (fig. 1).

Pour fin d'exemples, les levés du 4 avril et du 4 mai 1989, sur route asphaltée et chemin de gravier, seront présentés. L'objectif de ce travail étant d'évaluer la capacité du géoradar pour délimiter la profondeur de dégel sous la surface routière (asphalte et gravier).

Des résultats positifs permettraient d'envisager une utilisation possible de cet instrument de géophysique, sur le circuit routier québécois.

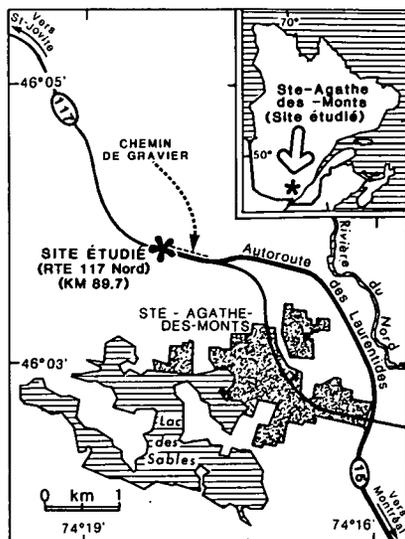


Figure 1. Localisation du site de Sainte-Agathe-des-Monts au Québec méridional.

## Théorie et méthodes

Semblable, en terme d'apparence du signal, à la technique de sismique réflexion, l'émetteur du géoradar propage dans le sous-sol une onde électromagnétique à haute fréquence, dont la fourchette d'opération peut se situer entre 10 et 1000 MHz. Ce signal radar, au contact d'une première interface, par exemple de nature lithologique (interface dépôts morainiques/socle) ou hydrogéologique (interface du niveau piézométrique) ou encore conséquence d'un état physique du soubassement (interface sol dégelé/sol gelé), est réfléchi en partie vers le récepteur, alors que la fraction restante continue sa progression à travers le matériel sous-jacent. La fraction ainsi transmise sera à nouveau en partie réfléchi au contact du prochain interface, et une fraction de cette fraction continuera à progresser, et ainsi de suite, jusqu'à l'affaiblissement total du signal émis ou perte du signal de retour.

Ce qui est mesuré, de façon successive, ce sont les temps de parcours de ces différentes fractions du signal de l'aller au retour (émetteur-interface-récepteur), au contact des différentes interfaces rencontrées. Ces temps de parcours vont être fonction de la vitesse de propagation de l'onde ( $m \cdot ns^{-1}$ ) à travers chaque couche. Celle-ci dépend spécifiquement des propriétés électriques du sol ambiant, c'est-à-dire, contrôlée par la constante diélectrique ou permittivité relative du matériau rencontré, de même que par la conductivité ( $mS \cdot m^{-1}$ ) de celui-ci, soit l'inverse de sa résistivité, et dans une très faible mesure par sa perméabilité magnétique (Davis et Annan, 1989; LaFlèche *et al.*, 1988; Windish, 1981).

Ce qui modifie ou agit principalement sur les propriétés électriques des matériaux géologiques, c'est la teneur en eau volumétrique de ceux-ci. La présence d'eau interstitielle va influencer directement sur la vitesse du signal radar à cause du contraste majeur existant entre la constante diélectrique de

l'eau et celles des autres matériaux géologiques (Davis et Annan, 1989; Ulriksen, 1982; Windish 1981; Morey, 1974). De façon simple, l'ajout d'eau contribue à faire ralentir les vitesses de propagation à l'intérieur d'un même matériel. Ainsi, un matériel à faible conductivité électrique (ex: matériel grossier sec, pergélisol) se caractérise par une haute vélocité de signal et une faible atténuation, donc favorise une forte pénétration; alors qu'un matériel à forte conductivité (ex: matériel hydraté, argile) ralentit et absorbe le signal, donc atténue la pénétration.

À ce titre, plusieurs travaux géotechniques ont été réalisés avec le géoradar en exploitant ces différents paramètres géophysiques. Que ce soit en matière d'investigation du pergélisol (Pilon *et al.*, 1988; Annan et Davis, 1978; Annan et Davis, 1976; Davis *et al.*, 1976), de sondage bathymétrique (Annan et Davis, 1977), de localisation et détermination de la profondeur de la nappe phréatique (Pilon *et al.*, 1988), ou à titre d'aide technique aux fouilles archéologiques (Fenner *et al.*, 1988; Vaughan, 1986; Berg et Bruch, 1982; Viereck, 1982; Dolphin *et al.*, 1978), ou encore de complément aux travaux d'entretien en génie civil (Bomar *et al.*, 1988; Carter *et al.*, 1988; Carter *et al.*, 1986; Ulriksen, 1982) ou à ceux reliés à l'identification des difficultés de construction créées par l'existence du pergélisol en milieu nordique (LaFlèche *et al.*, 1988; Parry, 1988; EBA Eng. Cons. Ltd, 1987; LaFlèche *et al.*, 1987), ceux-ci constituent des exemples types d'application.

En ce qui concerne le présent travail, nous misons sur le contraste majeur existant entre la constante diélectrique de l'eau ( $K = 80$ ) et celle de la glace ( $K = 3-4$ ) (Davis et Annan, 1989) semblable à celle du pergélisol ( $K = 4-8$ ) (Morey, 1974) pour délimiter les interfaces de dégel et de gel sous la surface routière. Se référant aux travaux de LaFlèche *et al.* (1988), Parry (1988) et EBA Engineering Consultants Ltd (1987) concernant l'application d'un géoradar à une meilleure connaissance des problèmes de dégradation du sous-sol routier, reliés à l'existence de la couche active en milieu de pergélisol, il a été décidé d'investiguer d'abord sur un chemin de gravier et ensuite sur celui d'asphalte, compte tenu de la similitude de notre objectif avec ces différents travaux. L'idée sous-jacente étant de confirmer la possibilité de délimitation des deux interfaces avec un même genre de sous-sol routier, mais cette fois, en dehors d'un contexte de pergélisol, et fournir des éléments visuels de comparaison pour le levé sur asphalte.

De plus, pour faciliter l'interprétation de ces levés radar, des travaux préliminaires de forage ont permis l'installation d'un premier puits d'accès dans lequel était inséré en permanence un câble à thermistors pour des relevés souterrains de température, de même qu'un second permettant l'accès d'une sonde à neutrons, pour obtenir le profil d'humidité sous-jacent, et ceci pour les tronçons d'asphalte et de gravier (fig. 2).

L'histoire récente du site asphalté, en matière de suivi du cycle gel-dégel depuis l'hiver 79-80 jusqu'en 87-88, indique une moyenne de profondeur du front de gel de 150 cm sous la chaussée, avec un maximum atteint de 172 cm en 1982 et un minimum de 131 cm en 1983, selon les données du MTQ.

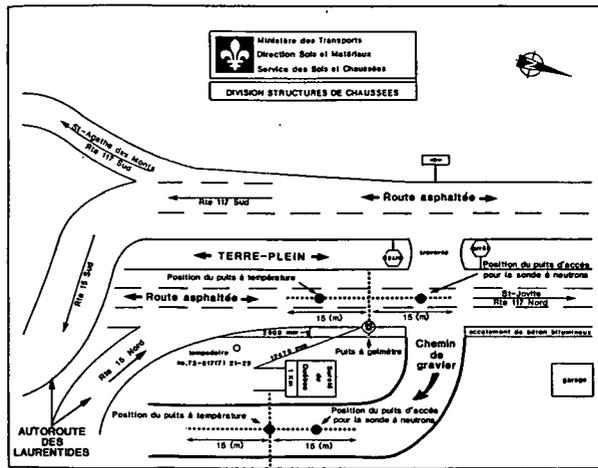


Figure 2. Schéma technique de l'infrastructure en place sur route asphaltée et chemin de gravier. (Source : MTQ).

Cette connaissance *a priori* de la profondeur moyenne atteinte par le gel, en plus de savoir que le socle rocheux se situe aux environs de 250 cm, a servi d'étalon pour fixer la profondeur des puits à thermistors et à sonde à neutrons, soit 250 cm sous la chaussée, question de s'assurer de bien capter le front de gel et d'atteindre la roche en place.

De plus, l'estimation de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique se fera suivant la méthode dite de *CMP* (*Common Mid Point*) (Davis et Annan, 1989) ou par *WARR* (*Wide Angle Reflection and Refraction*) (Annan et Davis, 1975), ces deux procédures étant équivalentes à celle trouvée en sismique réfraction.

Dans l'air, l'onde électromagnétique voyage à la vitesse de la lumière ( $0,3 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ) sans aucune atténuation, alors que dans le sol, elle voyage à une vitesse inférieure à celle-ci, dépendante des propriétés électriques du matériau traversé. Le temps de parcours (émetteur-interface-récepteur) étant mesuré par le géoradar, et la vitesse estimée par *CMP* ou *WARR*, on peut donc dresser une échelle de profondeur approximative pour l'ensemble du profil en question. Notons toutefois que cette échelle de profondeur est légèrement biaisée, puisque l'estimation de la vitesse se fait en fonction de la première couche traversée seulement, c'est-à-dire, jusqu'à la première interface comportant un changement significatif de constante diélectrique permettant une première réflexion.

Ajoutons à ceci que la délinéation des interfaces de dégel et de gel, phénomène de faible profondeur, soit toujours en deçà de 2-3 m au Québec méridional, nécessite une fréquence d'opération qui représente un compromis entre la nécessité d'obtenir une résolution acceptable (cm) et une portée suffisante (m). À ce titre, les disponibilités contextuelles du moment, nous ont permis d'utiliser pour le levé du 4 avril 89, le géoradar *SIR System-8* fabriqué par *Geophysical Survey Systems Inc (GSSI)*, radar analogique avec levé en mode continu, câblé à une antenne (émettrice-réceptrice) ayant une fréquence centrée à 500 MHz.

Par la suite, pour le levé du 4 mai 89, nous avons utilisé le système *Pulse EKKO III* fabriqué par la compagnie *A-Cubed Ltd*, radar numérique avec levé en mode ponctuel, greffé à un couple d'antennes dont la fréquence est centrée à 200 MHz.

Chaque tronçon fait l'objet de deux levés, l'un dit «profil longitudinal», d'une longueur de 30 m, et l'autre «profil perpendiculaire», à angle droit avec le premier, d'une longueur moindre mais variable suivant le cas, tels que schématisés à la figure 2. Finalement, la période de restrictions de charges en Zone (1), à laquelle appartient Sainte-Agathe-des-Monts, a débuté officiellement le 20 mars 89 et a pris fin le 13 mai 89, ce qui situe nos levés du 4 avril et du 4 mai dans la période favorable pour la réalisation de notre objectif de départ.

#### DESCRIPTION DU SITE DE SAINTE-AGATHE-DES-MONTS (KM 89,7)

Le transect asphalté à l'étude, de même que celui du chemin de gravier, sont situés à 1,5 km au nord de la ville de Sainte-Agathe-des-Monts, à la jonction de la fin de l'Auto-route 15 et de la continuité de la route 117 (fig. 1 et 2).

Les deux sites à l'étude sont parallèles l'un à l'autre, et séparés par un simple terrain en friche d'une largeur approximative de 25 à 30 mètres (fig. 2).

La superficie que recouvre l'ensemble du terrain à l'étude, soit du terre-plein au centre de l'autoroute jusqu'à bien au-delà de l'extrémité nord-est du chemin de gravier, s'inscrit sur une surface horizontale, en dehors donc de toute influence topographique. Sur le tronçon asphalté, on retrouve le puits à «gelmètre» en bordure du couvert asphalté, le puits à thermistors au centre et celui permettant l'accès pour une sonde à neutrons également au centre.

Le profil granulométrique du puits à «gelmètre» (fig. 3) (source MTQ) correspond d'assez près au profil du puits à thermistors sur asphalté (fig. 4), obtenu par forage au moment de son installation. Le fait à retenir demeure la présence du socle rocheux aux environs de 230 cm de la surface asphaltée, recouvert d'une couche de sable silteux, complété par un sable compacté, bref un matériel largement homogène.

Le profil granulométrique du puits à thermistors en chemin de gravier (fig. 4), révèle un matériel plus hétérogène dans le premier mètre, mélange de sable et de gravier, suivi par un sable abondant avec traces de silt dans le dernier mètre et demi. Le socle rocheux n'a pas été atteint.

Il est à noter que l'échantillonnage des deux sites s'est fait par tranche de 50 cm, au fur et à mesure du forage pour obtenir les profils respectifs. Notons de plus, qu'il n'y a pas de «gelmètre» dans le chemin de gravier.

Enfin, le «gelmètre» en bordure de la route asphaltée, a toujours été situé au même endroit depuis son installation initiale en 79-80, et n'a fait l'objet que d'une seule réparation majeure en août 87.

 <b>Ministère des Transports</b> <b>Direction Sols et Matériaux</b> <b>Service des Sols et Chaussées</b>			
<b>DIVISION STRUCTURES DE CHAUSSÉES</b>			
<b>GELMETRE</b>			
Région		District	
6   4		6   3	
Route		Tronçon	
0   1   1   7			
Municipalité <u>Saint-Agathe des Monts</u>			
Comté <u>Terrebonne</u>			
Longueur du tube (mm)			
Intérieur <u>2260</u>		extérieur _____	
Profondeur (mm)		Matériaux	
0_130		<u>béton bitumineux</u>	
130_320		<u>sable et gravier</u>	
320_1800		<u>sable</u>	
1800_2300		<u>silt argileux</u>	
2300_		<u>roc</u>	
nappe phréatique			
Date			
Installation <u>87-08-17</u>		réparation _____	
Zone <u>1</u>		No. <u>G-1</u>	

Figure 3. Profil granulométrique du puits à « gelmètre ».  
(Source : MTQ).

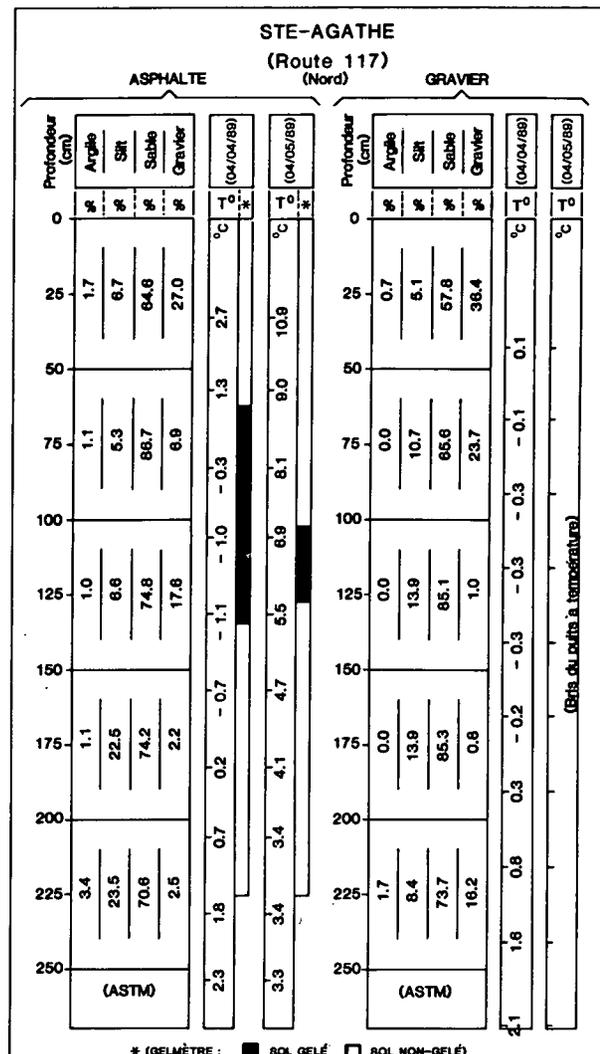


Figure 4. Profils granulométriques des puits à thermistors pour les deux tronçons de routes, associés aux températures souterraines de ces deux sites et aux lectures du « gelmètre » pour le site asphalté, au moment des levés radar. (N.B.: absence de « gelmètre » sur chemin de gravier).

#### RÉSULTATS DES LEVÉS

(04/04/89) SIR System-8 (GSSI) (500 MHz)

Le résultat du levé longitudinal central du chemin de gravier apparaît à la figure 5. Le diagramme interprétatif suit immédiatement en figure 6. La fenêtre d'opération du SIR System-8 était de 85 ns et la vitesse de propagation de l'onde de sol, évaluée le 18 avril 89 par procédure WARR avec le Pulse EKKO III, était de 0,09 m \* ns<sup>-1</sup>.

Deux réflecteurs linéaires majeurs apparaissent sur ce profil radar. Le premier situé à 20 ns, demeure intact à travers tout le profil long de 30 m. Le second réflecteur aux alentours de 50 ns demeure également visible jusqu'à la station 21,0 m où il devient plus diffus.

Comparés avec nos relevés de température à la même date (fig. 4), le câble à thermistors indiquant un matériel en

état de gel sous la surface, de 42 cm à 165 cm, nous croyons, en tenant compte du contexte géologique superficiel, qu'il s'agit respectivement des interfaces de dégel et de gel d'après la profondeur des interfaces mesurées, et que la vitesse de propagation du signal radar est d'environ 0,05 m \* ns<sup>-1</sup> dans la couche dégelée et de 0,15 m \* ns<sup>-1</sup> pour celle encore gelée.

Notons tout de suite que nos câbles à thermistors ont été construits pour repérer les températures souterraines à tous les 25 cm, si bien qu'il est difficile de situer avec grande précision l'interface de dégel ou de gel.

Il apparaît donc une différence entre les relevés du câble et l'échelle de profondeur obtenue par Warr, ce qui est normal, le tout étant de bien comprendre qu'il ne s'agit que de moyens parallèles pour mieux circonscrire le phénomène.

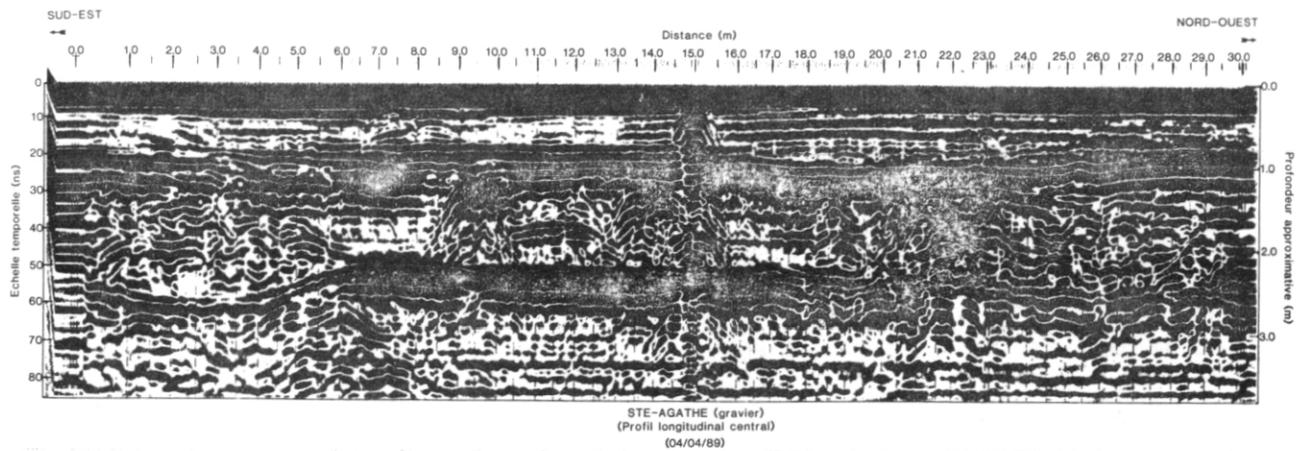


Figure 5. Levé du SIR System-8 avec antenne de 500 MHz sur chemin de gravier.

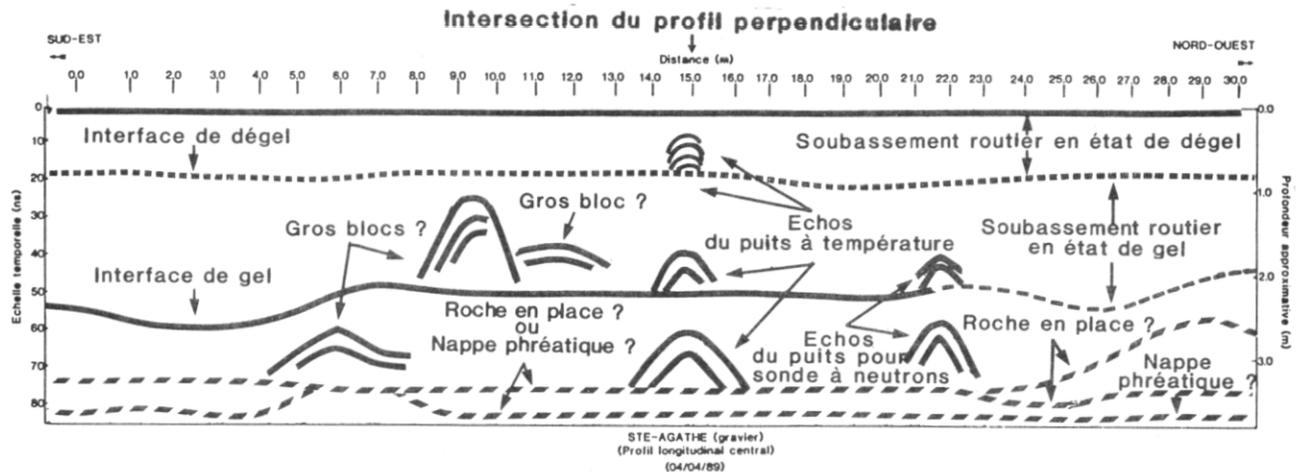


Figure 6. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 5.

Toujours à la figure 5, en plus de ces deux interfaces majeures, on constate la présence de réflecteurs multiples, caractérisant le sous-sol immédiat, où il est possible de repérer quelques gros blocs, ce qui n'est pas surprenant, à cause du contexte morainique du lieu. Entre 70 et 80 ns, on constate la présence d'une interface linéaire double, que nous associons possiblement à l'interface de la nappe phréatique ou de la roche en place.

Notons enfin, le caractère distinctif des échos produits par le puits à thermistors à la station 15,0 m, et la présence révélée de l'autre puits vers la station 22,0 m, ceux-ci ayant été enfouis avec une distance approximative de 8 m entre eux.

Le relevé perpendiculaire central en figure 7, d'une longueur de 8 m, et son diagramme d'interprétation en figure 8,

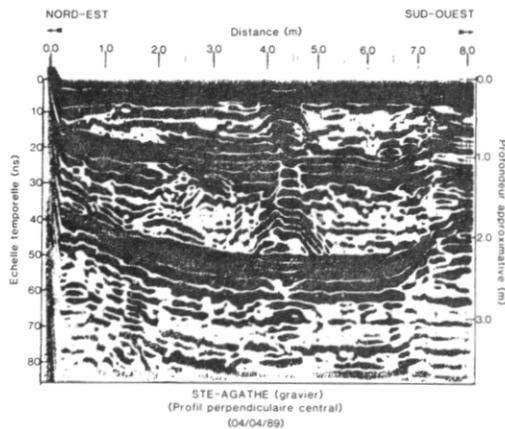


Figure 7. Levé du SIR System-8 avec antenne de 500 MHz sur chemin de gravier.

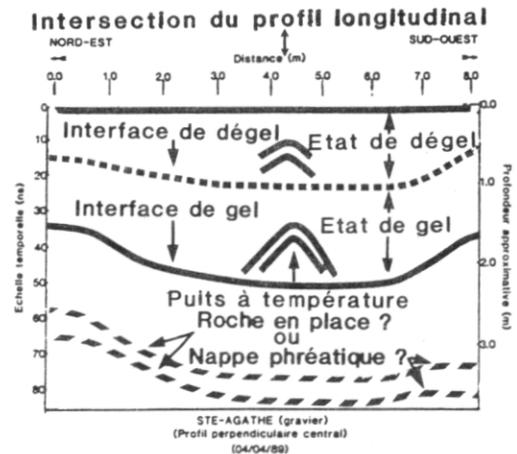


Figure 8. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 7.

règle plus d'informations sur la configuration qu'épousent les interfaces de dégel et de gel sous le chemin de gravier.

Cette allure en auge image la répartition de l'interface du gel sous une chaussée. La neige étant un isolant efficace, et bien sûr déblayée vers la bordure, ceci empêche le gel de pénétrer aussi profondément qu'au centre, là où le sol est à découvert.

Notons tout de suite, qu'un enregistrement de chantier en mode continu, comme c'est le cas avec un radar de type SIR-System-8, produit une image plus ou moins compressée latéralement et ce, à cause de la vitesse à laquelle l'on déplace l'antenne au moment du levé. Il faut donc savoir comme c'est le cas ici pour l'allure en auge, que la réalité s'avère quelque peu accentuée.

Ajoutons qu'on retrouve dans cette image la même succession d'interfaces qu'en figure 5, comme l'écho caractéristique du puits à thermistors, de même que le niveau supérieur de l'interface associée à la nappe phréatique ou à la roche en place.

Se basant donc sur les résultats positifs obtenus sur chemin de gravier, nous avons répété l'expérience sur le tronçon parallèle de route asphaltée.

Les figures 9 et 10 représentent respectivement le levé longitudinal et le levé perpendiculaire. La figure 11 représente l'interprétation de la figure 10.

La vitesse de propagation a été évalué par CMP le 4 mai 89, soit au moment de la deuxième sortie avec le Pulse EKKO III, et est de l'ordre  $0,11 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$  pour l'onde de sol sur route asphaltée.

La lecture du câble à thermistors témoigne d'un matériel sous-jacent encore gelé entre 92 cm et 166 cm. Le « gelnètre » situe quant à lui, de façon approximative, la ligne de dégel à 60 cm et le front de gel à 132 cm (fig. 4).

Il existe donc suivant le câble une épaisseur de 74 cm de matériel gelé, et suivant le « gelnètre », 72 cm.

On sait que le câble est enfoui en plein centre de la chaussée (fig. 2), alors que le « gelnètre » y est en bordure. Cette différence d'échelle peut s'expliquer par le fait qu'en bordure l'engel et le dégel y sont moins sévères qu'au centre.

La figure 9 révèle quelques échos attribuables aux puits enfouis sous la chaussée, et pour le reste, ne montre qu'une succession de réflecteurs parallèles, sans qu'il soit possible de distinguer clairement les interfaces de dégel et du front

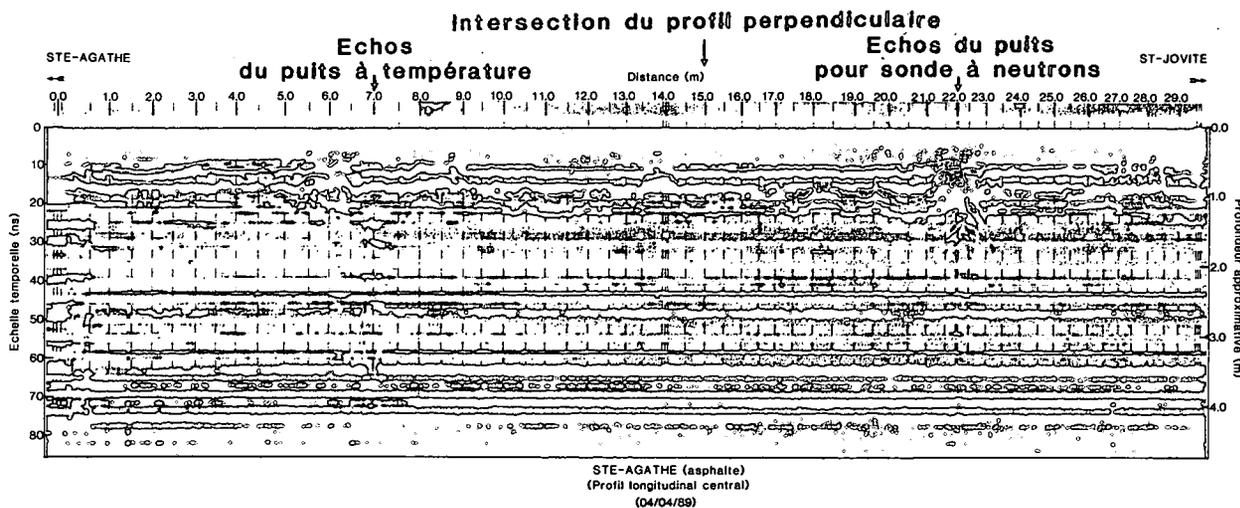


Figure 9. Levé du SIR System-8 avec antenne de 500 MHz sur route asphaltée.

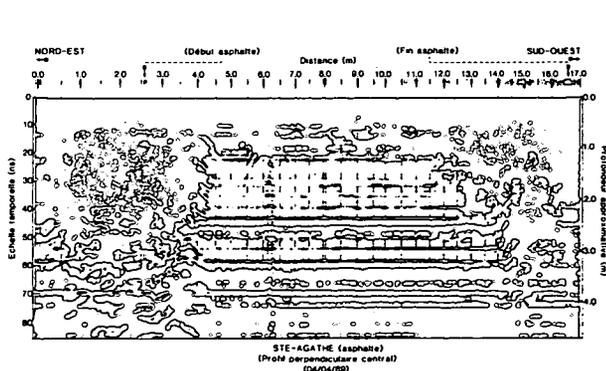


Figure 10. Levé du SIR System-8 avec antenne de 500 MHz sur route asphaltée.

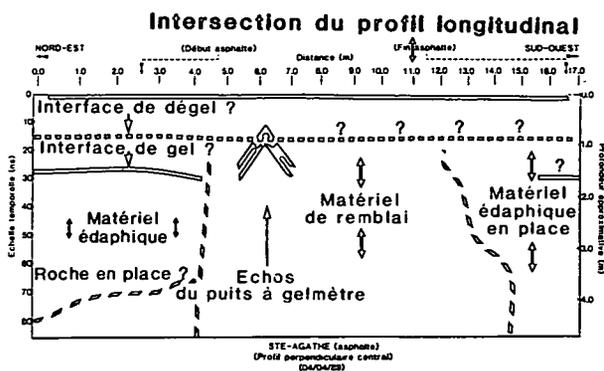


Figure 11. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la fig. 10.

de gel, comme nous l'avons vu sur la figure 5 dans le chemin de gravier.

Loin d'être une limitation de l'équipement utilisé lors de ce levé, nous croyons que le géoradar ne peut distinguer les interfaces recherchées à cause du matériel relativement sec sous la chaussée. Drainé efficacement en période estivale et automnale et bien couvert par l'asphalte, le sous-sol au moment de l'engel est déjà sec et demeure sec. Le printemps venu il n'existe pas de différence suffisante, en terme de constante diélectrique, entre la couche dégelée et celle encore gelée pour produire ou imaginer les deux interfaces en question.

Le profil perpendiculaire en figure 10 ajoute à cette explication. Commencé un peu en deçà de la bordure asphaltée et terminé au-delà de celle-ci, ce levé permet de distinguer entre les stations 0,0 et 4,0 m et 14,0 et 17,0 m, un matériel naturel très hétérogène, dont les multiples réflecteurs témoignent de la diversité de sa composition granulométrique mais surtout, d'un contenu volumétrique d'eau très supérieur à ce qui peut exister dans le matériel de remblai central entre les stations 4,0 et 14,0 m.

D'où la possibilité entre les stations 0,0 et 4,0 m, d'y distinguer l'interface de dégel à 14 ns et l'interface de gel à 27 ns, le contraste entre les constantes diélectriques y étant suffisamment accentué. Notons enfin l'écho du puits à « gelmètre » à la station 6,0 m, très distinct à travers le matériel homogène.

Bref, une incapacité d'imager les deux interfaces sous l'asphalte, malgré les preuves thermiques d'un matériel en état de gel de 60 cm jusqu'à 160 cm, provoquée fort probablement par un contenu volumétrique d'eau relativement faible au moment du levé.

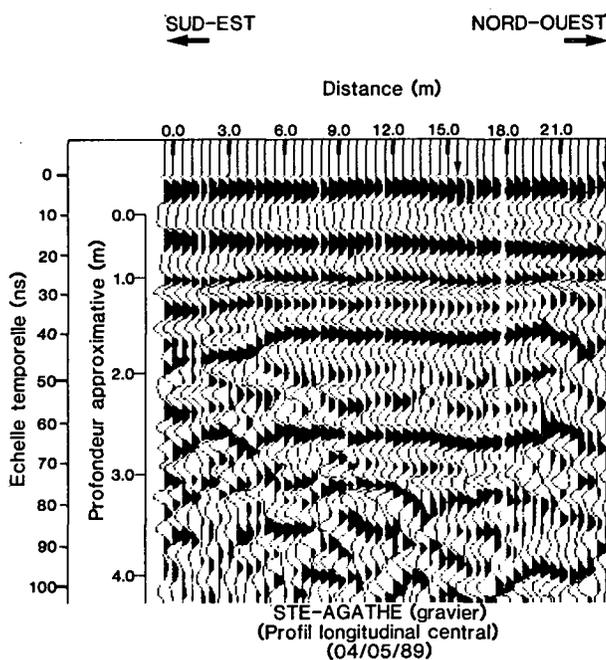


Figure 12. Levé du radar pulse EKKO III avec antennes de 200 MHz.

(04/05/89) Pulse EKKO III (A-Cubed) (200 MHz)

Au moment du levé radar sur chemin de gravier, il a été impossible de vérifier la température souterraine compte tenu d'un bris majeur du puits à thermistors. Pour contrer cet incident nous nous sommes référés aux températures souterraines sur asphalte (fig. 4). À cette date, il n'existait plus de trace de gel, tout le matériel du soubassement était dégelé.

Le levé a été effectué avec des antennes de 200 MHz, suivant une séparation d'antennes de 1,0 m, et sauts ponctuels de 0,5 m le long de chaque profil. La vitesse de propagation évaluée par méthode CMP, s'établit à  $0,08 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$  sur chemin de gravier.

Les schémas interprétatifs du « profil longitudinal » (fig. 12) et du « profil perpendiculaire » (fig. 14) se retrouvent respectivement en figures 13 et 15. Le levé longitudinal permet de dégager un profil à interfaces multiples, mais linéaires. De 10 à 40 ns, la régularité des interfaces permet de supposer qu'il s'agit des différentes couches de matériel de remblai. Sous cette frontière temporelle, les interfaces deviennent plus irrégulières, ce qui indique probablement les dépôts meubles sous-jacents.

Au delà de 65 ns, il devient difficile de fixer une interprétation précise, sauf supposer qu'il s'agit d'un amalgame de matériel morainique et dont l'interface avec la roche en place est difficile à identifier puisque le contraste diélectrique y est faible.

Tout comme le levé du 4 avril 89, le levé perpendiculaire du chemin de gravier est plus facile à interpréter en terme d'information spatiale que le profil longitudinal.

On note la réapparition de la forme en auge, clairement associée à l'infrastructure interne du chemin. De plus,

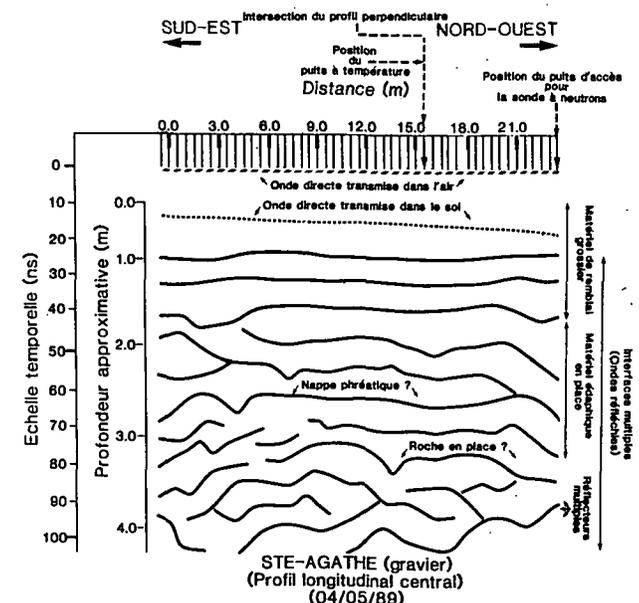


Figure 13. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 12.

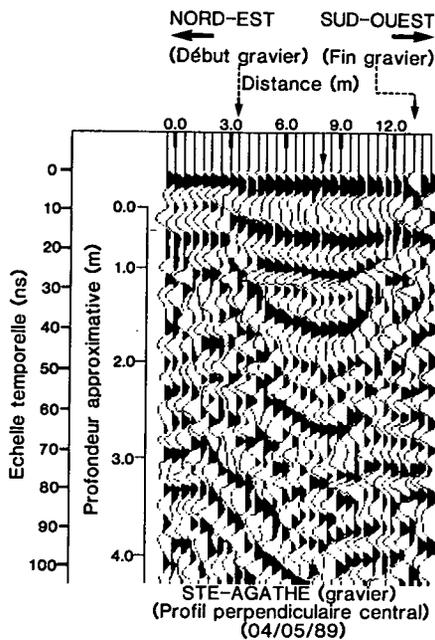


Figure 14. Levé du radar pulse EKKO III avec antennes de 200 MHz.

comme il est possible de le visualiser aux environs de 70 ns en figure 16, on détecte une nette déclinaison du sous-bassement rocheux et morainique vers le sud-ouest. Ici le socle rocheux semble contrôler la topographie souterraine du matériel de dépôt.

Notons enfin qu'à la différence du levé du 4 avril 89, il est ici plus difficile de repérer l'écho du puits à thermistors ou celui du puits pour la sonde à neutrons parce que l'intensité du contraste s'est affaiblie avec la disparition du gel.

Pour les levés sur asphalté, la procédure s'est faite suivant une séparation d'antennes de 1,0 m avec sauts ponctuels de 0,5 m, et dont la vitesse calculée par CMP nous donne 0,11 m \* ns<sup>-1</sup>.

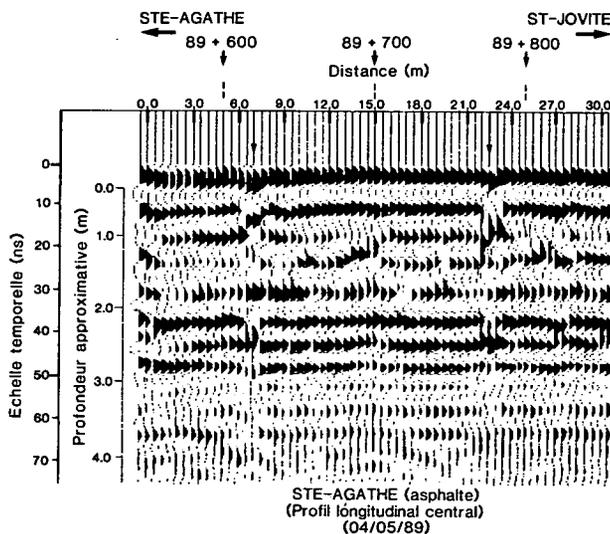


Figure 16. Levé du radar pulse EKKO III avec antennes de 200 MHz.

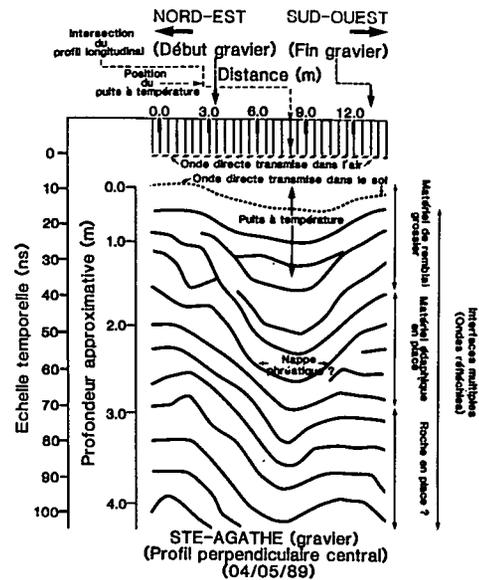


Figure 15. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 14.

Le levé longitudinal en figure 16 dévoile une succession de réflecteurs très précis, très clairs, parallèles les uns aux autres, et pour lesquels a été dressé en figure 17 le diagramme interprétatif. Il s'agit d'une route construite, ce qui n'est pas étranger à la régularité de ces interfaces, et aux épaisseurs quasi identiques que le géoradar réussit à imaginer.

À noter cette fois, l'effet perturbateur dans le levé de la présence des deux puits et des plaques d'acier qui y sont associées en surface, sans compter l'écho parabolique très typique vers 70 ns, à la station 15,0 m, du panneau latéral extérieur.

Complément à la compréhension du profil longitudinal, le levé perpendiculaire (fig. 18) permet encore une fois, de saisir la répartition tridimensionnelle des interfaces sous-jacentes (fig. 19).

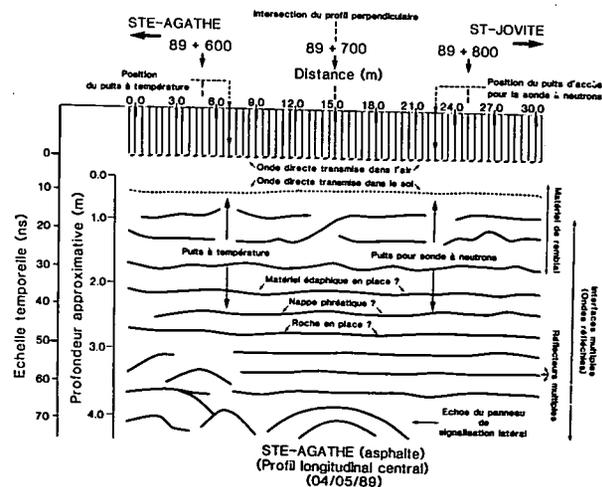


Figure 17. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 16.

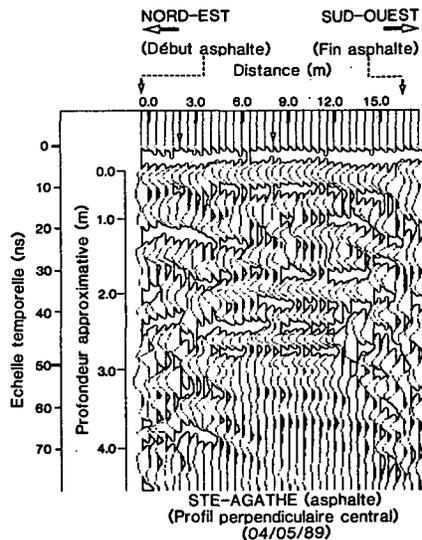


Figure 18. Levé du radar pulse EKKO III avec antennes de 200 MHz.

À titre d'exemple, la différence marquée entre la structure interne de la route asphaltée et celle du chemin de gravier.

Brièvement, à la différence des levés du 4 avril 89, la puissance d'opération à 200 MHz permet d'atteindre une profondeur supérieure à celle atteinte avec 500 MHz, ce qui n'est pas négligeable lorsque les objectifs sont surtout d'intérêts géologiques.

### Conclusion

Les résultats des levés radar ont permis d'en arriver aux constatations suivantes. Ceux du 4 avril 89 ont à l'évidence permis de détecter les interfaces de gel et de dégel sous le chemin de gravier, mais non sous la route asphaltée. Pour le chemin de gravier, ceci confirme et ajoute aux résultats imagés déjà obtenus par LaFlèche *et al.* (1988) et EBA Engineering Consultants Ltd (1987) pour un soubassement routier sus-jacent au pergélisol, respectivement dans un contexte de dégel partiel et de gel total. Sur route asphaltée, l'impossibilité de détecter les deux interfaces tient sans doute à la faible teneur en eau volumétrique du site investigué, ce qui nous apparaît comme le facteur d'atténuation le plus probable. Contrairement à l'infiltration plus facile dans un chemin de gravier, la couverture asphaltée associée aux exigences de construction du tronçon routier, c'est-à-dire, homogénéité du matériel de remblai et drainage efficace en prévision d'une stabilité optimum du revêtement bitumineux, font en sorte que le matériel est relativement sec sous l'asphalte. La faible teneur en eau dans la couche dégelée sous l'asphalte a pour effet de réduire le contraste diélectrique entre le matériel dégelé et celui encore gelé. Le géoradar ne voit l'interface de dégel ou de gel que si le matériel, au moment de l'engel est suffisamment saturé pour qu'il y ait formation de glace interstitielle, alors que si le matériel est sec et reste sec, on ne peut rien distinguer. Ceci semble également corroboré par une augmentation très rapide de la température souterraine entre le levé du 4 avril et

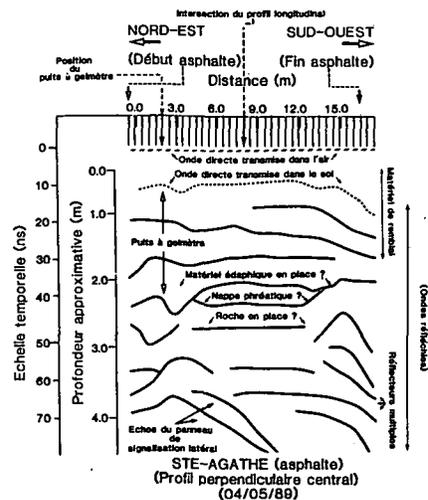


Figure 19. Diagramme d'interprétation du profil obtenu à la Fig. 18.

celui du 4 mai (fig.4), ce qui ajoute à l'hypothèse d'une sécheresse relative sous la chaussée.

D'autres facteurs d'atténuation comme la concentration du sel d'épandage ou encore l'influence de la constante diélectrique de l'asphalte peuvent être soulevés, mais ne sont probablement pas ou peu significatifs comme facteurs responsables de la perte du signal. Tout comme le choix d'une fréquence d'opération de 500 MHz pourrait l'être, par manque de capacité de pénétration. Ce qui n'est pas le cas, puisque celle-ci s'est avérée tout à fait efficace pour couvrir la profondeur voulue, comme le démontre à titre d'exemple, les abords du profil perpendiculaire central (fig.10). Face à ces résultats, l'évidence nous indique qu'à défaut d'efficacité marquante en milieu asphalté, le géoradar, par contre, peut s'avérer très utile sur chemin de gravier pour déterminer l'épaisseur du dégel. L'absence de système de surveillance sur chemin de gravier au Québec, comme c'est le cas avec les « gelmètres » en milieu asphalté, permet cette suggestion, d'autant que les chemins de gravier nécessitent aussi un entretien de la part du MTQ.

Les résultats du 4 mai 89 (après dégel), tant ceux sur asphalte que sur gravier, démontrent l'efficacité du géoradar à détecter les interfaces des couches de remblai de même que la stratigraphie souterraine. Les différences d'épaisseur de matériel, de même que les perturbations de ces interfaces, reliées à la nature même du matériel et aux différences de contraste diélectrique, y sont clairement délinées. Le choix d'une fréquence de 200 MHz assure une pénétration efficace, qui permet de mettre à jour plusieurs interfaces. À noter, dans ce contexte, l'utilité d'obtenir un « profil perpendiculaire » pour faciliter l'interprétation subséquente du « profil longitudinal ». En définitive, malgré l'aspect spéculatif que comporte la lecture et l'interprétation d'un levé radar, comme le démontre les résultats de ces deux séances de levés (gravier et asphalte), sur des sites différents et à deux moments différents de la saison (dégel et après-dégel), le géoradar constitue un outil géotechnique d'investigation non-négligeable pour l'exploration du soubassement routier.

## Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier la direction de la Division de la Science des Terrains (Énergie, Mines et Ressources Canada) à Ottawa pour l'appui logistique consenti, c'est-à-dire l'usage du *Pulse EKKO III (A-Cubed)* de la division. De plus, M. Raymond Fortin, pour l'utilisation du *SIR System-8 (GSSI)* et ses conseils techniques.

Également à Québec, la Section des « Sols et Chaussées » du MTQ, tout particulièrement, la collaboration directe de MM. Pierre De Montigny et Georges O. Légaré, qui ont

d'abord permis la réalisation des travaux préliminaires de forage sur les deux tronçons de route à l'automne 88, et qui ensuite ont fourni l'expertise sur la question des « gelmètres ». Ensuite, la direction et les employés du MTQ de Saint-Jérôme (District 63) pour leur soutien technique à chaque « sortie-terrain » durant l'hiver 88-89.

Enfin, nous remercions le fonds MTQ-FCAR pour son appui financier dans le cadre de son programme triennal de relance de la Recherche-Développement (1987-90) (volet « Actions concertées » sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier du Québec), qui a permis ainsi la réalisation du projet.

## Références

- ANNAN, A.P. & J.L. DAVIS, 1976. Impulse Radar Sounding in Permafrost, — *Radio Science*, vol. 11, 4: 383-394.
- ANNAN, A.P. & J.L. DAVIS, 1977. Impulse Radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry — *Current Research, Part B, Geological Survey of Canada, Paper 77-1B: 63-65.*
- ANNAN, A.P. & J.L. DAVIS, 1978. High frequency electrical methods for the detection of freeze-thaw interfaces, *Proceedings — Third International Conferences on Permafrost, 1: 495-500.*
- ANNAN, A.P., J.L. DAVIS & W.J. SCOTT, 1975. Impulse Radar Wide Angle Reflection and Refraction Sounding in Permafrost — *Geological Surveys of Canada, Paper 75-1C: 335-341.*
- BERG, F. & H. BRUCH, 1982. Georadar: Archeological interpretation of soil Radar Data — *Second Nordic Conference on the application of scientific methods in archeology; PACT, 7 Part II: 285-294.*
- BOMAR, L.C., W.F. HORNE, D.R. BROWN & J.L. SMART, 1988. — Determining deteriorated areas in portland cement concrete pavements using Radar and Video Imaging; *National Cooperative Highway Research Program, (NCHRP), Report 304, Washington, D.C., 107 p.*
- CARTER, CHUNG, T., FB. HOLT & D.G. MANNING, 1986. An automated signal processing system for the signature analysis of radar waveforms from bridge decks — *Can. Elec. Eng. Journal, Vol. 11, 3: 128-137.*
- CARTER, C.R., T. CHUNG, A. MASLEWEC & D.G. MANNING, 1988. Analysis of radar reflections from asphalt covered bridge deck structures — *Workshop on Ground Penetrating Radar, 24-26 mai, Ottawa (Publication à venir: Geological Survey of Canada, Paper 90-4).*
- DAVIS, J.L. & A.P. ANNAN, 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy — *Geophysical prospecting, vol. 37, 5: 531-551.*
- DAVIS, J.L., W.J. SCOTT, R.M. MOREY & A.P. ANNAN, 1976. Impulse Radar experiments on permafrost near Tuktoyaktuk, Northwest Territories — *Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 13, 11: 1584-1590.*
- DE MONTIGNY, P. & G.O. LÉGARÉ, 1983. Effets du dégel sur le réseau routier — *Routes et Transports., nov.: 21-26.*
- DOLPHIN, L.T., W.B. BEATTY & J.P. TANZI, 1978. Radar Probing of Victoria Peak, New Mexico — *Geophysics, vol. 43, 7: 1441-1448.*
- EBA ENGINEERING CONSULTANTS LTD., 1987. — Ground penetrating radar sources, Dempster Highway, Km 0 to 85. Internal report to Department of Public works and Highways Government of Northwest Territories, Yellowknife, N.W.T., EBA File: 0101-4657, Edmonton, Alberta.
- FENNER, T., M. BLACKKEY & V.J. MURPHY, 1988. Application of GPR at the Solar Boat Chamber, Pyramid of Cheops, Giza, Egypt — *Workshop on Ground Penetrating Radar, 24-26 mai, Ottawa. (Publication à venir: Geological Survey of Canada, Paper 90-4).*
- GUIMONT, M., 1983. Le réseau routier québécois au dégel — *Routes et Transports, mars: 29-31.*
- LAFLECHE, P.T., A.S. JUDGE, B.J. MOORMAN, B. CASSIDY & R. BÉDARD, 1988. Ground probing radar investigations of gravel roaded failures, RAE Access road, N.W.T. — *Current Research, Part D, Geological Survey of Canada, Paper 88-1D: 129-135.*
- LAFLECHE, P.T., A.S. JUDGE & J.A. PILON, 1987. Ground probing radar in the investigation of the competency of frozen tailings pond dams: — *Current Research, Part A, Geological Survey of Canada, Paper 87-1A: 191-197.*
- MOREY, R.M., 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar — *Proceedings of Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. American Society of Civil Engineers (ASCE), Henniker, N.H. (USA): 213-232.*
- PARRY, N.S., 1988. Delineation of thaw-zones in discontinuous permafrost using Impulse Radar — *Workshop on Ground Penetrating Radar, 24-26 mai, Ottawa. (Publication à venir: Geological Survey of Canada, Paper 90-4).*
- PILON, J.A., M. ALLARD, & M.K. SÉGUIN, 1988. Investigation of permafrost and subsurface internal characteristics of surficial deposits near Kangiqsualujuaq with probing radar — *Workshop on Ground Penetrating Radar, 24-26 mai, Ottawa. (Publication à venir: Geological Survey of Canada, Paper 90-4).*
- PILON, J.A., R.A.F. GRIEVE, V.L. SHARPTON, J. KENNEDY & J.M. CODERRE, 1988. Ground penetration radar survey of the interior of the Barringer Crater, Impact structure, Arizona — *Workshop on Ground Penetrating Radar, 24-26 mai, Ottawa. (Publication à venir: Geological Survey of Canada, Paper 90-4).*
- ULRIKSEN, C.P.F., 1982. — Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Ph.D. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund University of Technology, Sweden. Published by GSSI, Hudson, N.H. (USA), 179 p.
- VAUGHAN, C.J., 1986. Ground-penetrating radar surveys used in archeological investigations — *Geophysics, vol. 51, 3: 595-604.*
- VIERECK, P., 1982. A high-resolution radar for detection of shallowly buried objects — *Second Nordic Conference on the application of scientific methods in archeology. PACT, 7 Part II: 295-302.*
- WINDISH, E.J., 1981. Le géoradar — *Routes et Transports, sept.: 5-10.*