

Application du radar géologique en génie civil

Jacques CARIOU

Assistant
Équipe de Recherche associée Physique
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen

Georges CHEVASSU

Assistant
Chef du groupe Géotechnique
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

Philippe CÔTE

Directeur de recherche
Chef de la section Reconnaissance et géophysique
Laboratoire central des Ponts et Chaussées de Nantes

Xavier DÉROBERT

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Section Reconnaissance et géophysique
Laboratoire central des Ponts et Chaussées de Nantes

Jean-Yves LE MOAL

Technicien supérieur
Groupe Géotechnique
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

RÉSUMÉ

Cet article présente une méthode d'auscultation électromagnétique associée à un type de matériel : le radar géologique.

Après avoir développé le principe physique utilisé, les modes de représentation et de traitement des données ainsi que les types de matériels présents sur le marché, nous présentons quelques exemples illustrant les possibilités d'applications qu'offre cette technique : détection de cavités et de canalisations, caractérisation des épaisseurs de couches de chaussées, reconnaissance géologique.

Enfin, sont évoqués les développements en cours et l'orientation des études menées au sein du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

MOTS CLÉS : 41 - Méthode - Génie-civil - Auscultation - Radar - Géologie - Magnétisme - Électricité - Matériel - Développement.

Introduction

On appelle Radar, l'ensemble des procédés qui permettent de déceler l'existence, la forme, la position ou la nature d'un objet grâce à l'étude de la réflexion des ondes électromagnétiques sur celui-ci (voir, par exemple : Doolittle, 1987 ; Daniels, 1989). Basé sur ce principe, le radar géologique est une technique d'auscultation non destructive permettant d'obtenir des indications sur la structure du sous-sol (position et nature des couches) ou sur les hétérogénéités présentes (cavités, conduites...). Les ondes utilisées pour les auscultations géologiques ou géotechniques s'étendent sur un spectre allant de 20 MHz à 5 GHz. La méthode dispose ainsi d'une certaine souplesse pour s'adapter à différents problèmes d'auscultation. L'utilisation des radars géologiques a connu une forte croissance. À l'heure actuelle, on dénombre environ une vingtaine de systèmes radar en service en France et plus de 350 en Europe. Ce parc provient majoritairement de la société américaine GSSI. D'autres compagnies telles que Sensors and Software (Canada) ou ABEM (Suède) connaissent une diffusion plus limitée. Une part importante du chiffre d'affaires réalisé par les entreprises qui mettent en œuvre ces radars concerne la détection de canalisations (ou obstacles) avant tranchées en site urbain (Tillard, 1994 ; Goodman, 1994). Cependant, des applications en nombre croissant sont consacrées à la géologie, à la géotechnique routière ainsi qu'aux chaussées elles-mêmes.

Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) s'est d'ailleurs révélé précurseur dans le domaine puisqu'un radar pour chaussées y est opérationnel depuis une dizaine d'années (Bertrand et al., 1996).

Les radars en usage sont généralement du type impulsif. Cet article aborde toutefois quelques résultats obtenus en onde monochromatique. Après avoir rappelé les grands principes de la propagation des ondes électro-magnétiques, nous présentons ici d'une part, les familles d'applications courantes et d'autre part, quelques développements en cours.

Principes de la mesure radar

Une impulsion électromagnétique est transmise à la structure auscultée par l'intermédiaire d'une antenne. Dans le cas d'un milieu géologiquement stratifié, par exemple, cette onde se propage en s'atténuant et se trouve réfléchiée par les interfaces des couches présentant un contraste de caractéristiques électromagnétiques (annexe). Lorsque l'atténuation par le matériau n'est pas trop forte, l'onde réfléchiée peut être détectée à la surface par la même antenne (fonctionnement en mode monostatique), ou par une seconde antenne (fonctionnement en mode bistatique). L'observation du signal temporel résultant permet de visualiser la succession des échos correspondant aux différentes interfaces géologiques. Les profondeurs auscultées par ces méthodes varient de un à plusieurs mètres. Elles dépendent de trois facteurs :

- > la conductivité du matériau, qui est la principale cause de l'absorption de l'onde électromagnétique. Ainsi, les argiles et certains limons limitent très fortement la profondeur d'investigation de la méthode (tableau I) ;
- > la fréquence de l'onde électromagnétique utilisée. Plus la fréquence émise est basse, plus la profondeur d'investigation est importante ;

> la dynamique du radar. Cette dynamique est le rapport entre la puissance du signal émis et la puissance du plus petit signal détecté.

La dynamique des radars impulsifs est très liée à leur mode de fonctionnement (monostatique ou bistatique). Elle est également liée aux opérations de filtrage et de traitement du signal, qui peuvent améliorer notablement le rapport signal/bruit.

Les mesures en réflexion représentent la quasi totalité des investigations opérationnelles par radar. Toutefois, des activités de recherche nécessitent parfois d'opérer en transmission. Le matériau est alors placé entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice. Le résultat est, dans ce cas, un temps de parcours, ou une vitesse de propagation puisque l'on connaît généralement l'épaisseur traversée. Ce type de mesure donne une information globale sur le matériau traversé et permet de le caractériser par l'intermédiaire de sa constante diélectrique. Un examen de l'amplitude du signal permet également de décrire l'absorption de l'onde électromagnétique par le matériau. Dans ce domaine, nous avons constaté une amélioration de la dynamique en utilisant une onde monochromatique de préférence à une impulsion électromagnétique. Il est en effet plus facile d'amplifier et de filtrer une onde à fréquence fixe qu'une impulsion comportant un spectre de fréquences relativement large. La plus grande dynamique résultant de ce mode de fonctionnement fait que cette technique peut être utilisée facilement pour des mesures en transparence, sur un mur par exemple, ou entre forages.

Représentation des résultats

Pour chaque position du radar impulsif, la mesure est un signal constitué d'une succession d'échos d'amplitudes variables en fonction du temps (fig. 1). La juxtaposition de signaux successifs enregistrés lors du déplacement du radar

TABLEAU I

Matériaux	Résistivité (Ωm) (courant continu)	Permittivité relative (Constante diélectrique)	Longueur d'onde (m) Ordre de grandeur à 500 MHz	Longueur caractéristique (m) Ordre de grandeur à 500 MHz
Air	∞	1	0,6	∞
Eau douce	$10^1 - 10^3$	81	0,07	5
Eau de mer	0,3	77	0,07	0,01
Roches sèches	$10^3 - 10^4$	4 - 8	0,3	65
Argiles	$0,5 - 10^2$	8 - 10	0,2	0,15
Sable sec	$10^3 - 10^6$	4 - 6	0,3	120
Sable saturé (eau douce)	$10^1 - 10^4$	30	0,1	15

permet d'obtenir une représentation (distance, amplitude radar, temps de propagation) donnant des informations géométriques sur les interfaces entre les couches ou les hétérogénéités du matériau. Pour plus de lisibilité, une représentation fréquemment utilisée traduit chaque niveau d'amplitude par des couleurs différentes ou par des niveaux de gris différents. C'est ce que l'on appelle une « coupe temps ».

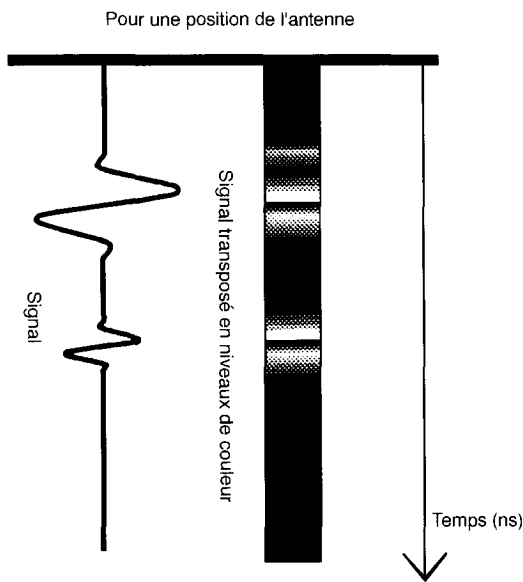


Fig. 1 - Exemple de signal radar : variation de l'amplitude de l'onde électromagnétique rétrodiffusée en fonction du temps. Pour une meilleure lecture de la juxtaposition d'un grand nombre de signaux, les amplitudes radar sont, la plupart du temps, traduites en niveaux de couleur.

Du fait de l'ouverture du lobe d'émission des antennes (90° environ), la signature, sur la coupe temps, d'hétérogénéités très localisées (cavités, conduites) est une hyperbole. En effet une partie de l'énergie émise latéralement par l'antenne est réfléchi et détectée avant et après le passage à la verticale de l'objet.

La traduction de l'échelle des temps de propagation en échelle des profondeurs exige la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le matériau. Différentes méthodes permettent d'estimer cette vitesse de propagation, à partir de mesures *in situ* ou à partir de sondages de référence. Cette vitesse de propagation est directement reliée à la constante diélectrique, qui dépend du matériau et de sa teneur en eau. (tableau I). Lorsque le matériau est très hétérogène (géologie, géotechnique), on se limite souvent à une représentation temporelle du signal. On se contente alors d'une estimation des profondeurs. Dans les cas de matériaux plus homogènes (chaussées par exemple), les mesures permettent d'obtenir une évaluation plus précise des profondeurs.

Traitement des données

Pour permettre un contrôle des opérations *in situ*, les signaux obtenus sur chantier sont déjà le résultat d'un prétraitement. Ces prétraitements sont destinés :

- À compenser la diminution de l'amplitude des signaux en fonction de la profondeur (temps). Ce résultat est obtenu en appliquant un gain croissant en fonction du temps. La définition de la courbe gain = f (temps) est donc une opération de réglage préliminaire très importante pour la qualité des signaux à venir.
- À éliminer des composantes continues du signal ou de certains bruits. Ces composantes sont liées à l'électronique et sont supprimées par l'utilisation de filtres temporels.

Ces opérations permettent d'optimiser le rapport signal/bruit avant même l'enregistrement des données.

Afin d'améliorer une nouvelle fois le rapport signal/bruit après l'enregistrement des signaux, l'opérateur a le choix entre une multiplicité de traitements provenant, pour la plupart, des méthodes sismiques plus anciennes. Il s'agit des filtres fréquentiels ou spatiaux. Des traitements plus complexes tels que la migration ou la déconvolution peuvent enfin être appliqués pour tenter de restituer plus fidèlement la géométrie de la structure auscultée. Cependant, la qualité de ces traitements est directement proportionnelle à la complexité des programmes, qui peuvent exiger une informatique lourde. Les traitements sur les ordinateurs courants n'apportent pas toujours les améliorations attendues et peuvent être parfois générateurs de bruit.

La plupart des résultats indiqués dans cet article font usage de la représentation courante (temps, amplitude, distance). Nous avons également cherché à réaliser des représentations spatiales tridimensionnelles. Pour obtenir cette représentation, un certain nombre de profils parallèles peuvent être enregistrés et exploités simultanément pour obtenir une connaissance 3D des échos de la structure, qui peut être alors représentée sous forme de coupes horizontales. De telles interprétations permettent une meilleure lisibilité de certaines hétérogénéités bien localisées.

Matériel

De nombreuses entreprises mettent sur le marché des radars à usage géologique ou géotechnique. Pour ne citer que les plus importants, signalons ceux construits par les sociétés :

- Sensors & Software Inc. (Mississauga, Ontario Canada),

➤ Geophysical Survey Systems Inc. (North Salem, New Hampshire, USA).

Ces deux matériels présentent des qualités similaires en matière de performances sur le plan électromagnétique. Cependant, en raison d'une plus grande diversité d'antennes et d'une capacité d'enregistrement plus importante, il a été décidé d'équiper le réseau des LPC avec des radars GSSI.

Le LCPC a fait l'acquisition en 1993 d'un radar GSSI modèle SIR10. Il comprend (fig. 2) :

- quatre voies d'entrées permettant de réaliser quatre mesures simultanées,
- des antennes pour la prospection de surface, couvrant la gamme 100 MHz - 1000 MHz,

➤ des antennes de forage de 120 MHz.

Afin de répondre à la demande, le laboratoire de Saint-Brieuc s'est équipé, depuis, d'un modèle SIR2 plus simple. Il ne possède qu'une seule voie d'acquisition (permettant tout de même des acquisitions en mode bistatique), tout en étant compatible avec l'ensemble des antennes du SIR10.

Les données de chantier sont numérisées et enregistrées sur bande magnétique, puis traitées au laboratoire. Nous utilisons à cette fin un logiciel de traitement (Radan) vendu par la société GSSI. Il permet de réaliser sur PC les différents traitements cités précédemment.

Fig. 2 -
Présentation
du matériel GSSI
du LCPC.

MATÉRIEL RADAR DE SURFACE

Unité vidéo couleur

Unité centrale GSSI SIR 10
386, 4 voies de mesure,
lecteur de bande

Câbles de liaison
50 m Max

ANTENNES 100 MHz

Profondeur d'investigation : 2 - 15 m

applications : géologie, hydrogéologie

ANTENNES 900 MHz

Profondeur d'investigation : 0,2 - 1,5 m

applications : structures, canalisations
décollements, cavités

ANTENNES 300 MHz

Profondeur d'investigation : 1 - 6 m

applications : géologie, hydrogéologie,
canalisations

ANTENNES 500 MHz

Profondeur d'investigation : 0,5 - 3 m

applications : structures, canalisations,
support de chaussées, cavités

ET AUSSI : Antennes de forage 120 MHz, portée maximum 10 - 15 m
applications : géologie, hydrogéologie, reconnaissance fracturation, ...

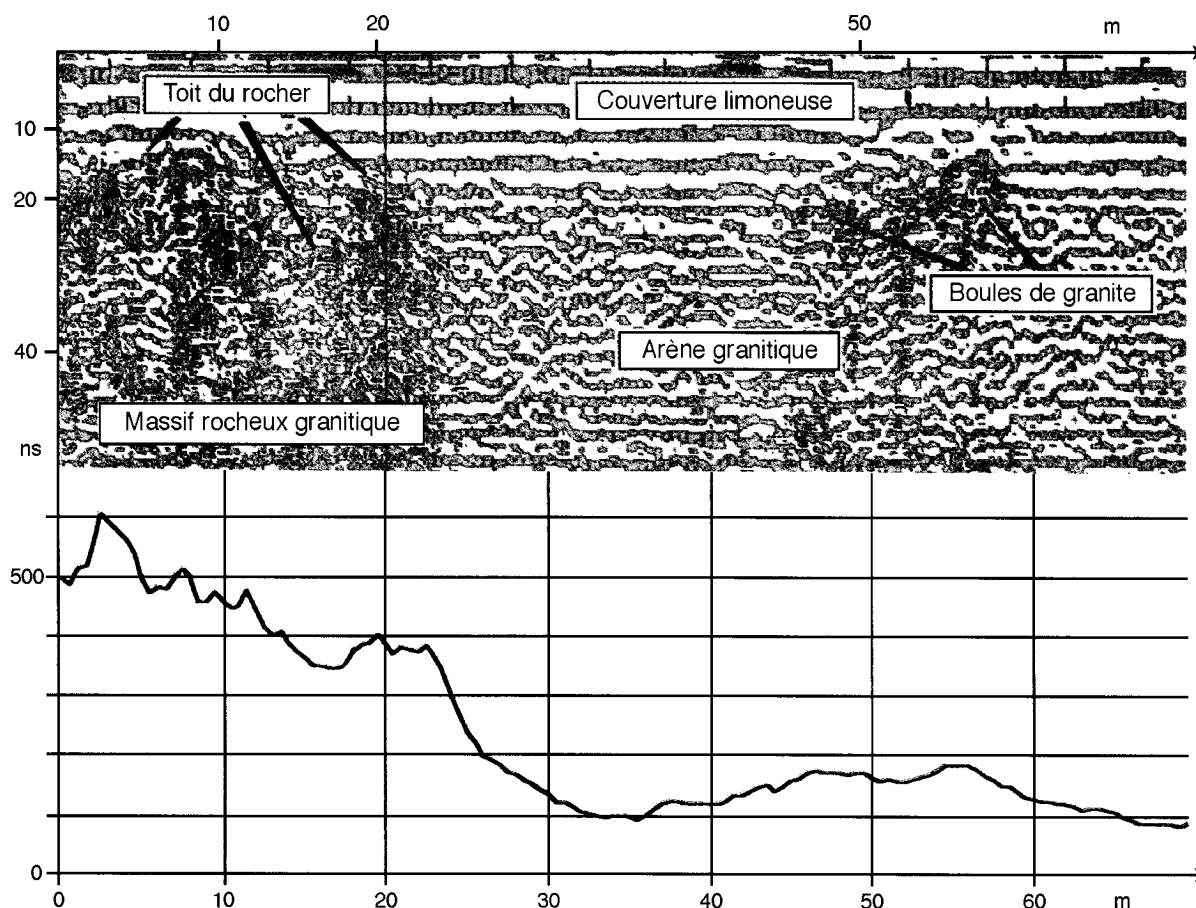


Fig. 3 - Comparaison des résultats radar et Radio-MT. Si les mesures Radio-MT permettent de détecter les zones rocheuses, seul le radar permet de comprendre précisément leur géométrie. Cet exemple simple illustre donc la grande complémentarité de ces deux méthodes.

Applications

Les études présentées ici ont été réalisées par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc. Elles sont assez représentatives des possibilités offertes par la méthode. Elles concernent principalement le domaine de la géotechnique, pour lequel a été conçu le radar géologique.

Reconnaissance géologique

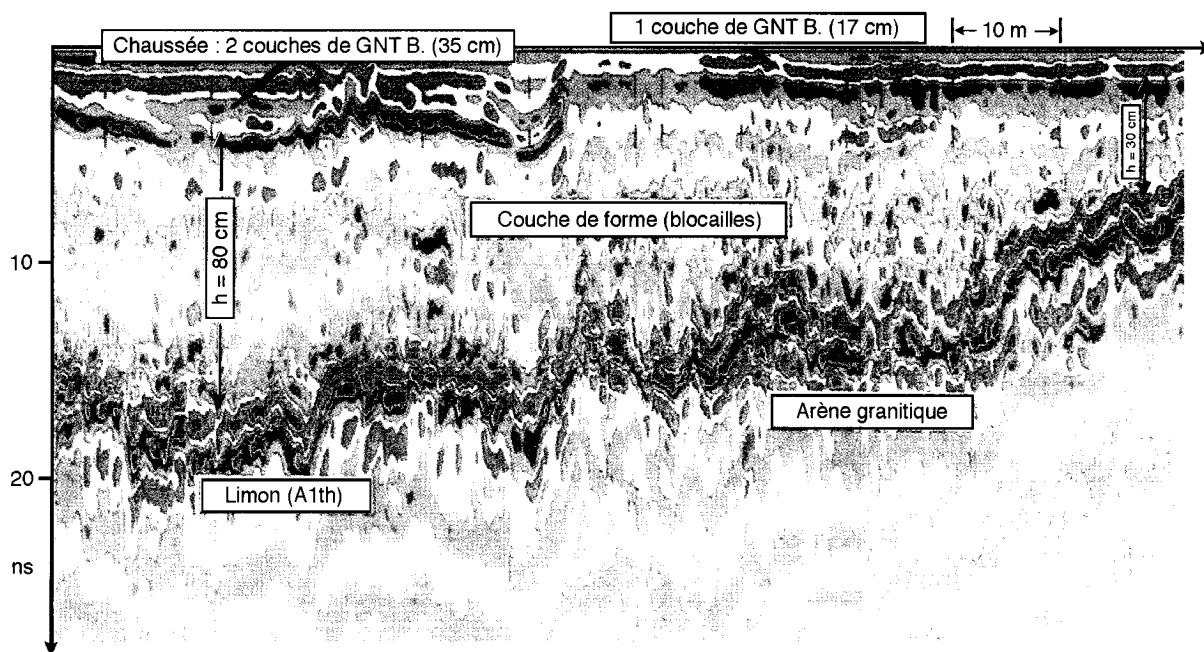
Le premier exemple (fig. 3) montre l'utilisation conjointe du radar et de la radiomagnétotellurique (Radio MT), technique couramment employée en géophysique et qui permet d'obtenir rapidement des profils de résistivité apparente du proche sous-sol. (Lagabrielle, 1986). On y remarque que les hétérogénéités géologiques masquées par une couverture de sol limoneux apparaissent très clairement sur la coupe temps du radar. Elles apparaissent, d'une part, du fait d'une réflexion forte sur le toit du substratum rocheux et d'autre part, du fait d'une « signature » différente du signal suivant la nature des entités géologiques (limon, arène granitique ou massif rocheux). Dans le cas présent, les infor-

mations données par le radar contribuent à bien expliciter les informations de la Radio MT.

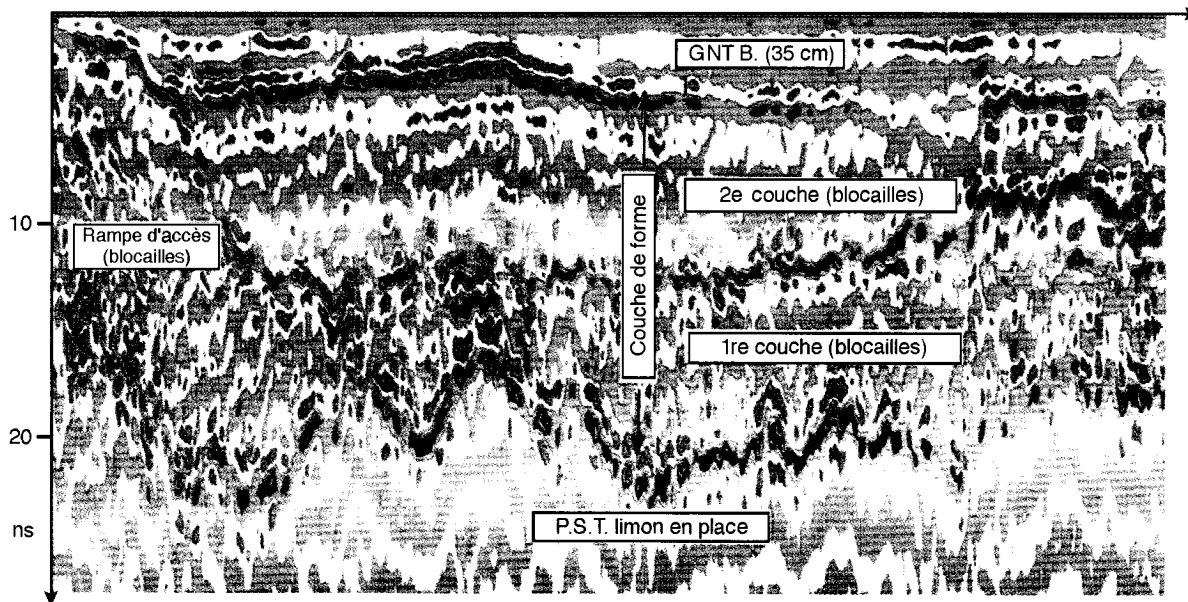
Ces méthodes mettent en évidence la présence d'une zone rocheuse à faible profondeur dans la partie gauche de la figure (forte résistivité et réflexion radar de forte amplitude) et d'une zone de sols meubles à droite (faible résistivité apparente, signal radar de faible amplitude). Le radar permet de préciser l'interprétation géologique en différenciant les dépôts limoneux du substrat rocheux ou arénisé (signature différente) et en montrant la présence de poches altérées dans le massif rocheux ou de boules rocheuses dans les arènes.

Ces deux techniques se révèlent complémentaires : l'une, plus simple d'utilisation (la Radio MT), donne une information globale ; l'autre plus complexe (le radar) apporte des informations géologiques relativement complètes. En particulier, on notera que des sondages réalisés au vu des anomalies Radio MT donnaient des profondeurs identiques pour des comportements Radio MT très différents. Le profil radar vient complètement expliciter ce phénomène en identifiant à droite des boules de granite (anomalie Radio MT de faible niveau) et à gauche le massif granitique (anomalie Radio MT plus importante).

Fig. 4 - Auscultation de couches de forme à 500 MHz, en mode bistatique. Ces mesures permettent d'obtenir des informations sur les conditions de mise en œuvre (nombre de couches élémentaires ainsi que sur la variation d'épaisseur de ces couches)



a. Profil réalisé pendant la construction d'une chaussées (deux couches de GRH à gauche, une seule à droite). La couche de forme, en bocailles, a été mise en œuvre en une seule couche. Son épaisseur diminue de gauche à droite suivant la qualité de la partie supérieure des terrassements. On notera de plus, la signature différente obtenue dans les terrains sous-jacents (limon et arènes).



b. Dans cette zone, la mise en œuvre de la couche de forme en deux couches élémentaires est mise en évidence par une réflexion nette sur l'interface entre ces deux couches (différence de compacité probable).

Couches de chaussées

Le réseau LPC a développé, voici une dizaine d'années, un outil (Radar LPC) permettant le contrôle en continu des épaisseurs des enrobés. Cet outil utilise une antenne cornet centrée sur 1 GHz et permet la mesure d'épaisseurs comprises entre 5 et 50 cm. Du fait de la distance entre l'antenne et le sol (30 cm), ce type de système autorise une auscultation rapide des chaussées jusqu'à une vitesse de l'ordre de 60 km/h. En-deçà de 5 cm, ce radar est actuellement limité par son pouvoir de résolution et au-delà de 50 cm par sa profondeur maximale d'investigation (Bertrand et al., 1996).

Une amélioration de la résolution est à présent envisageable grâce à la mise récente sur le marché d'antennes GSSI cornets centrées sur 2,5 GHz, qui permettraient de mesurer des épaisseurs de 2,5 cm.

L'utilisation d'un radar classique, associé à des antennes au contact du sol avec des fréquences de 900 ou de 500 MHz, permet d'ausculter plus profondément les couches de

forme ou les couches de chaussées (fig. 4). Cependant, les antennes étant en quasi contact avec le sol, à la différence du radar LPC, les vitesses maximales d'auscultation ne vont que de 5 à 10 km/h suivant l'état de surface. Comme le montre la figure 4, il n'est pas question dans ce cas de mesurer les couches d'enrobés, mais plutôt de réaliser un relevé aussi complet que possible de la structure de la chaussée jusqu'à la partie supérieure des terrassements. On en retire des informations sur les conditions de mise en œuvre et, notamment, sur le nombre de couches élémentaires ainsi que sur leurs épaisseurs relatives.

La figure 5 illustre, quant à elle, la complémentarité entre différents types d'antennes (900 MHz au contact et antennes cornets de 2,5 GHz) associées pour l'auscultation d'une piste d'aérodrome. L'antenne cornet haute fréquence permet de mesurer les variations d'épaisseurs des couches supérieures (enrobés), tandis que l'antenne au contact peut, grâce à sa plus grande profondeur de pénétration, ausculter les couches plus profondes.

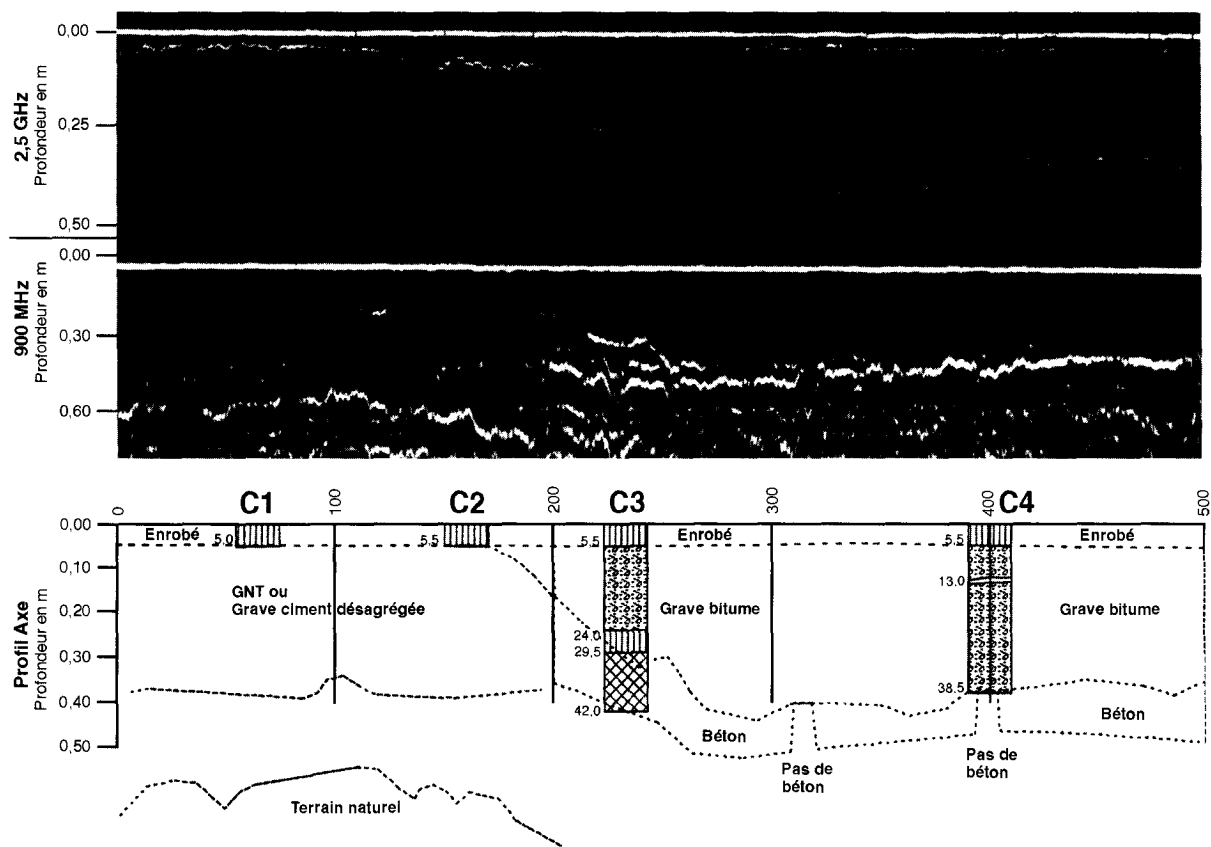


Fig. 5 - Les coupes temps obtenues à l'aide des antennes 2,5 GHz et 900 MHz sont complémentaires. Moyennant un calage adéquat sur quelques carottages, elles permettent d'obtenir une information continue sur les structures de chaussées avec une résolution satisfaisante pour les différents niveaux de profondeur.

Détection des cavités et des canalisations

Une autre application importante concerne la détection de canalisations en sites urbains avant le creusement de tranchées. Le radar se montre bien adapté à la localisation des canalisations. Comme nous l'avons explicité précédemment, les canalisations perpendiculaires ou obliques par rapport au sens de déplacement du radar sont marquées sur la coupe temps par des hyperboles. La figure 6 met en évidence, dans des terrains granitiques hétérogènes (arènes, blocailles), des hyperboles bien marquées qui indiquent l'emplacement précis de canalisations dont les caractéristiques étaient connues.

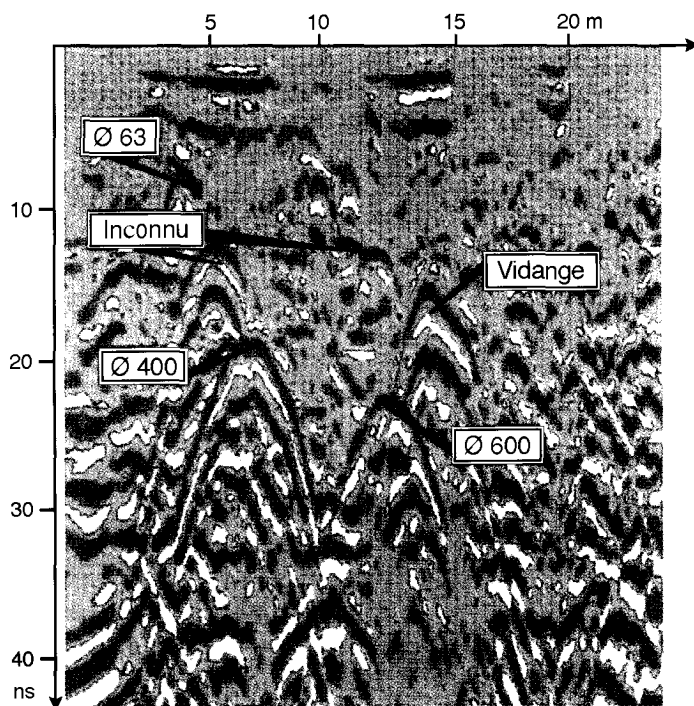


Fig. 6 - Localisation dans le travers d'une chaussée de canalisations connues (500 MHz, mode bistatique). Il convient de remarquer que ces mesures ont également permis de repérer des hétérogénéités non identifiées.

Comme le montre la figure 7, le fait que le radar suive une canalisation ne masque pas pour autant les canalisations perpendiculaires au sens de déplacement. Ceci est dû à la largeur de l'ouverture du faisceau de l'antenne. On ne peut cependant pas en faire une généralité, car tout dépend en quelque sorte de « l'ombre portée » de la canalisation dans ce faisceau.

Cette application du radar a cependant des limitations lorsque le sol est trop hétérogène ou lorsque le milieu environnant est argileux et absorbe entièrement l'énergie émise.

De manière analogue, la détection de cavités est un domaine où les techniques radar de surface présentent des avantages et des difficultés. La

détectabilité d'une cavité dépend de sa dimension, de sa profondeur et de la nature du matériau. Ainsi une couverture de limon ou d'argile limite considérablement la profondeur d'investigation du radar.

Une expérience a été réalisée, dans la région de Lille, en vue de la détection de cavités artificielles résultant d'anciennes exploitations souterraines de craie, sous une couverture limoneuse de deux mètres d'épaisseur. Ces cavités, appelées aussi « catiches » présentent généralement une forme d'ogive (leur diamètre varie de 5 à 10 m pour une hauteur totale de 7 à 15 m) fermée en haut par une voûte en moellons de craie. Le puits d'accès est généralement remblayé avec les matériaux initialement en place. Les antennes de 500 MHz s'étant avérées inefficaces, en raison d'une pénétration insuffisante, l'auscultation a été réalisée avec des antennes fonctionnant à 300 MHz. Le profil représenté sur la figure 8 a été effectué suivant une direction oblique par rapport à l'alignement des catiches. Les catiches apparaissent évidemment d'autant mieux que le radar passe à la verticale de la structure. On notera également que les puits d'accès remblayés sont repérables sur la coupe temps par des variations de l'amplitude du signal.

Il en ressort donc que même dans des conditions assez défavorables (couverture limoneuse), l'outil radar peut se révéler efficace si les tracés effectués sont suffisamment denses pour être aussi proches que possible de l'aplomb de la cavité à détecter.

Développements

Tests de dynamique

L'équipe de recherche associée du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen dispose de fosses d'essais de grandes dimensions (3 m x 3 m x 2,5 m) à l'abri des intempéries. Une première est remplie de sable, une seconde d'un mélange de sable et d'argile (10 %). Un cube de polystyrène de 0,8 m de côté, repéré en position, joue le rôle de cavité dans chaque fosse. De plus, de grandes dalles de béton d'une épaisseur de 10 à 20 cm peuvent être posées sur les fosses, de manière à simuler une investigation derrière un parement (fig. 9).

Un exemple de mesure avec l'antenne de 900 MHz est donné sur la figure 10 dans le cas d'une dalle de béton posée sur la fosse de sable. Le haut et le bas de la cavité sont détectés, mais pas le fond de la fosse.

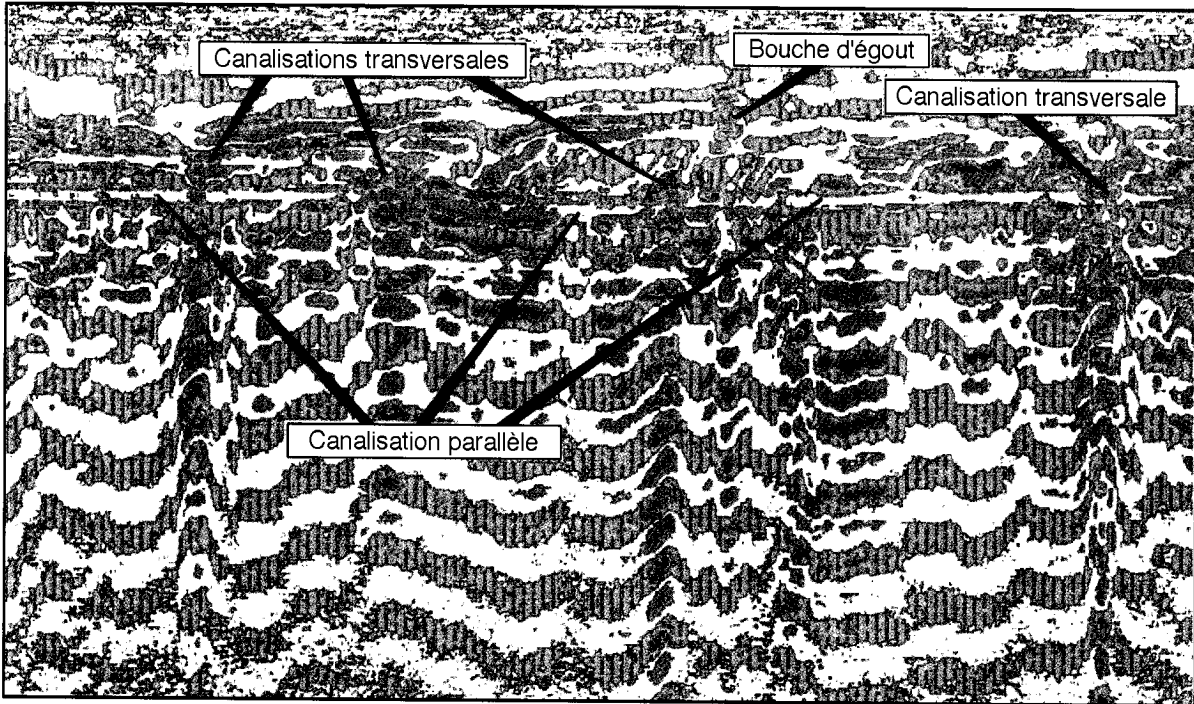


Fig. 7 - Profil longitudinal en site urbain (500 MHz, bistatique).
Suivi d'une canalisation et repérage d'hétérogénéités transverses.

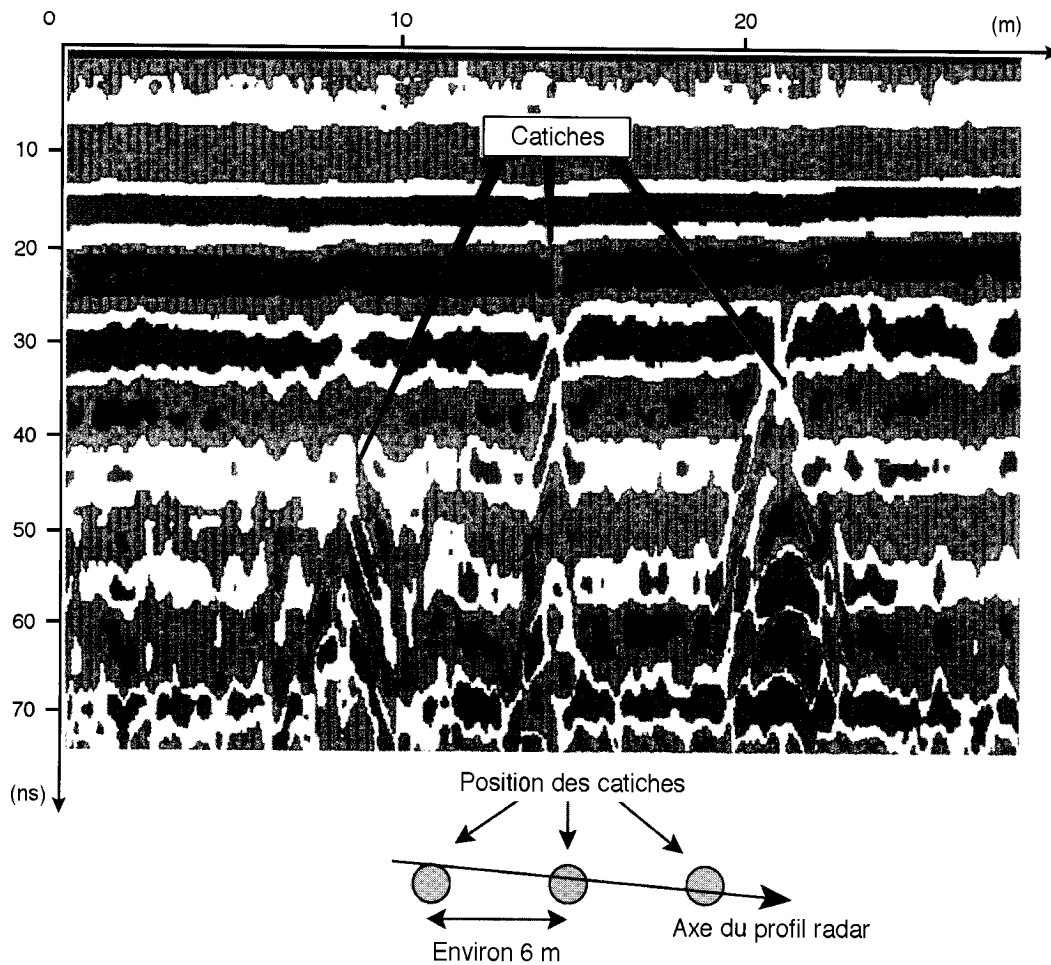


Fig. 8 - Repérage de « catiches » sous couverture limoneuse (300 MHz, mode bistatique).
Ces cavités peuvent être repérées quand le profil radar demeure très proche de leur aplomb.

Fig. 9 -
Coupe d'une des fosses d'essai
du Laboratoire régional de
Rouen (3 x 3 x 2,5 m).
Les épaisseurs de béton
($\epsilon_r = 8$, $\rho = 22 \Omega m$) peuvent
varier de 0,1 à 1 m. Une des
fosses est remplie de sable
($\epsilon_r = 3,7$, $\rho = 500 \Omega m$), l'autre
de sable mélangé à de l'ar-
gile ($\epsilon_r = 4,1$, $\rho = 60 \Omega m$).

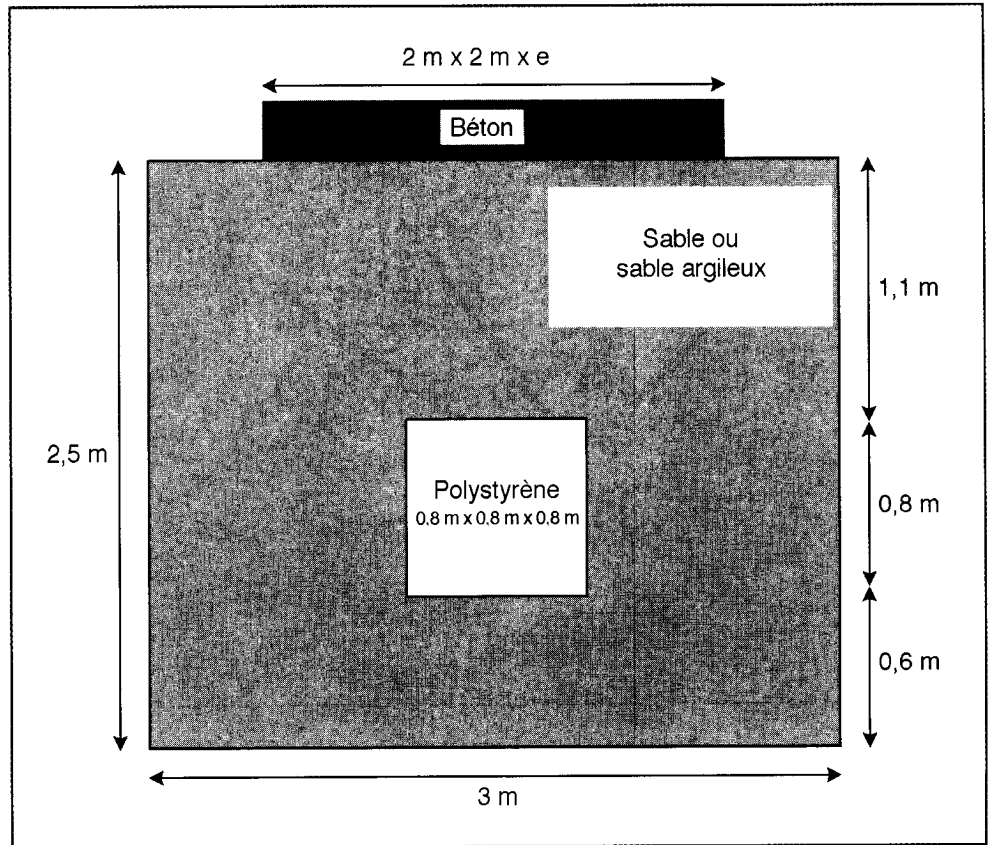
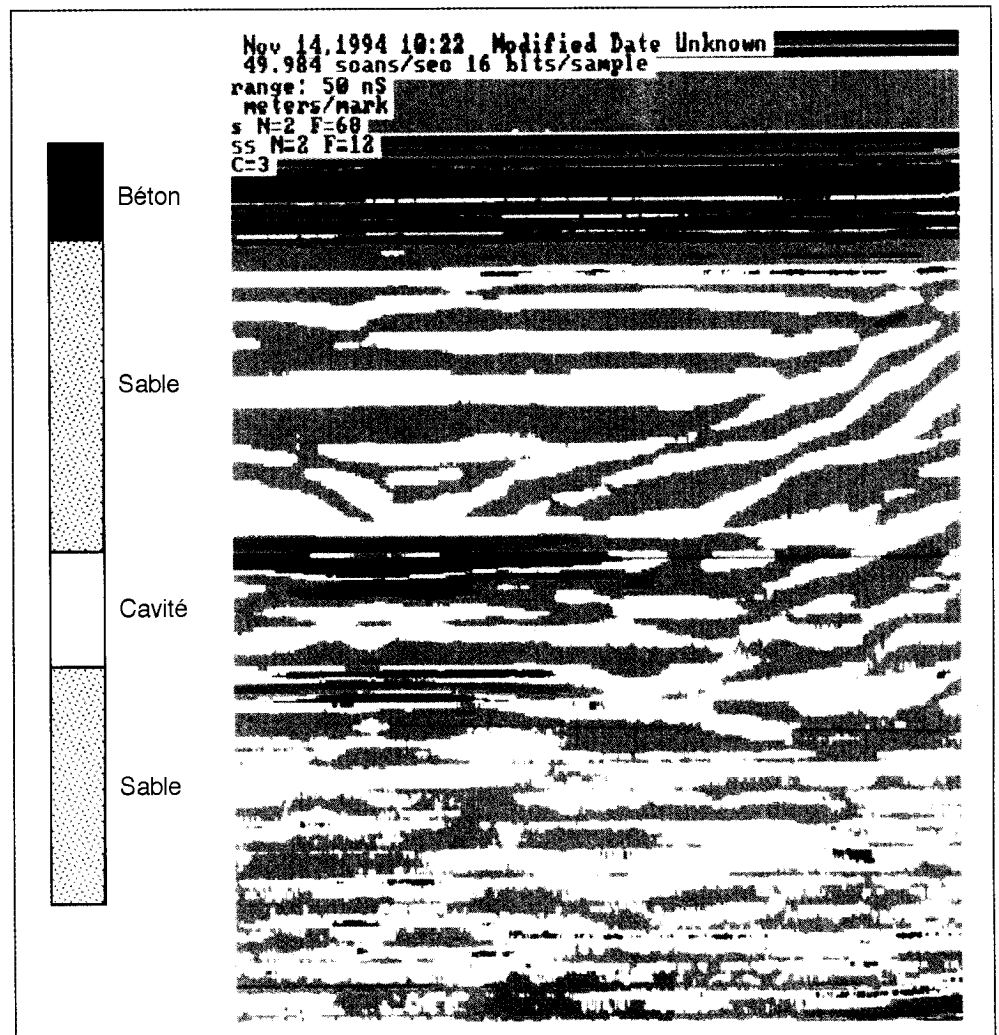


Fig. 10 -
Coupe temps réalisée sur
une des fosses du
Laboratoire régional de
Rouen sable + dalle béton
(30 cm). Le sommet et le
fond de la cavité sont bien
repérés. En revanche, il n'est
pas possible de distinguer le
fond de la fosse.



Des mesures sur ces deux fosses permettent d'évaluer et de comparer les performances des radars. En particulier, nous avons montré que l'écho de la partie supérieure de la cavité était indétectable dans le sable argileux, avec les radars impulsions disponibles sur le marché, que la mesure soit faite en statique ou en dynamique, avec ou sans traitement des données. Ces comparaisons sont à l'origine de l'intérêt porté à l'étude d'un radar doté de plus grandes profondeurs de pénétration (Cariou, 1991). Cet objectif a été atteint en 1995. Un système de laboratoire a permis de montrer qu'il était possible d'augmenter les profondeurs d'action de 30 à 40 % grâce à l'utilisation d'un radar fréquentiel.

Bien entendu, dans tous les cas, des mesures en continu, associées à des traitements du signal, permettent d'améliorer considérablement les performances de détection des radars.

Imagerie

Des travaux réalisés en collaboration avec le CNRS depuis plusieurs années ont permis de mettre au point une technique d'imagerie micro-onde des aciers dans le béton (Chommeloux et al., 1986). Une poursuite de ces travaux a été engagée en transférant la méthode vers les fréquences des radars géologiques. Ces travaux sont

toujours réalisés en collaboration avec le CNRS et font l'objet d'une thèse. Un algorithme de reconstruction d'image utilisant l'émission et la réflexion des ondes électromagnétiques (pour les cas impulsions ou synthétiques) a été développé. Il nécessite, pour une investigation de surface, de balayer ladite surface, avec un pas de mesure donné, pour toutes les positions croisées possibles des antennes d'émission et de réception. Cette méthode d'imagerie permet de reconstruire de manière qualitative tout type d'objet, homogène ou non, enfoui dans un demi milieu homogène ou stratifié. Elle est basée sur l'utilisation d'algorithmes de transformées de Fourier rapides permettant une reconstruction et une implantation sur des PC actuels (Pichot et Dourthe, 1995 ; 1996). La figure 11 illustre, sur un exemple numérique, les performances de cette méthode. Les lettres LCPC constituées de matériaux de permittivité 1 sont enterrées dans un sol homogène. Une série de mesure est effectuée depuis la surface. L'algorithme de reconstruction calcule alors l'image du sous-sol. Cette simple illustration indique tout l'intérêt des méthodes d'imagerie. Elles apportent en effet directement des informations précises sur la géométrie des objets enterrés. En dehors de la détection de cavités, ces algorithmes peuvent être appliqués également à la détection de mines non métalliques enterrées.

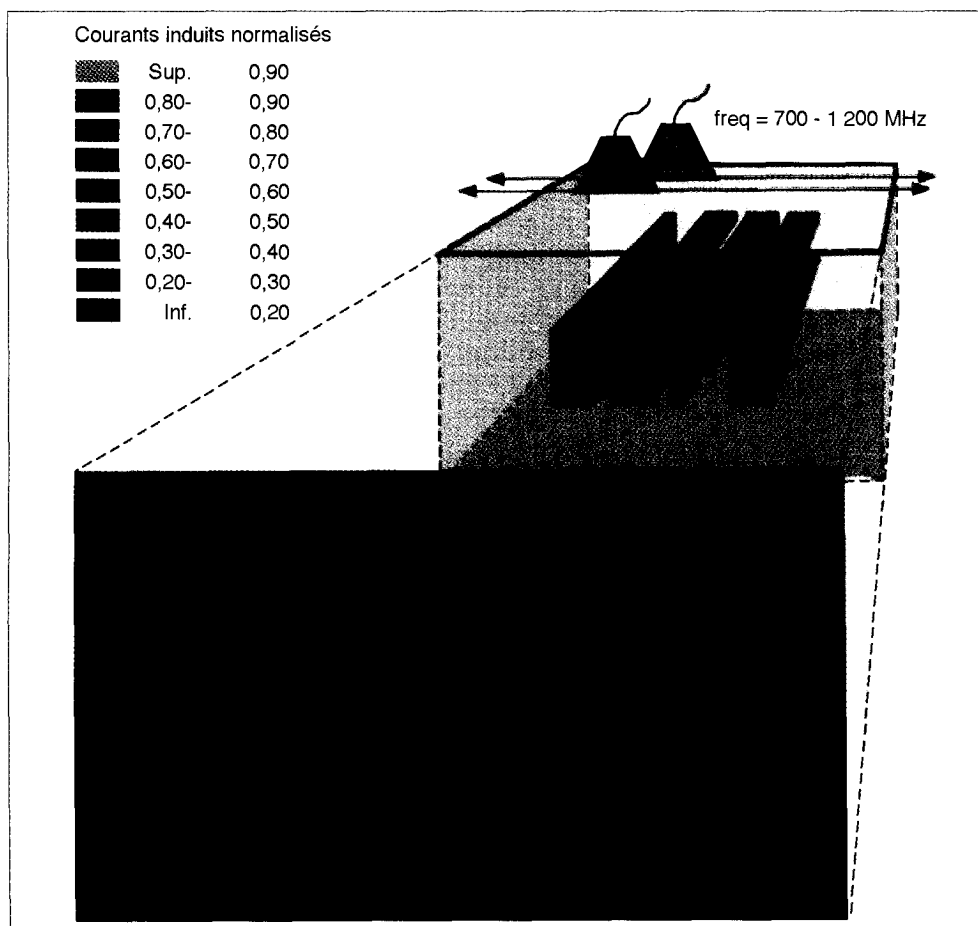


Fig. 11 - Simulation numérique de mesures d'imagerie électromagnétique et inversion. L'image produite est une carte (courants induits) et donne accès directement aux géométries des objets enterrés.

Cartographie

Pour des applications archéologiques, il est apparu souhaitable de se doter d'un moyen de représentation tridimensionnel. À partir de séries de profils radar parallèles, l'intégrale de l'énergie rétrodiffusée, dans une fenêtre temporelle donnée, peut être portée sous forme de cartes. Il est donc possible d'obtenir ainsi des cartes (x, y) illustrant les variations de réflectivité et ce pour différentes profondeurs dans le terrain. Une seule représentation peut alors permettre de localiser spatialement un type de comportement particulier du terrain vis à vis de la réflexion radar. La figure 12 illustre ce type de représentation. Elle a été calculée à partir d'une dizaine de profils parallèles longs d'une quarantaine de mètres. Ces mesures, réalisées dans des matériaux assez conducteurs (limons) n'autorisaient pas de pénétration profonde du signal radar. En revanche, bien que la surface apparaisse totalement homogène pour l'observateur, un affaiblissement important de l'énergie rétrodiffusée est clairement localisé sur l'image. Des fouilles ont montré, par la suite, que cette anomalie était due à un vestige de dallage qui avait eu pour effet de « piéger » l'humidité dans les limons le surplombant (Côte et al., 1996).

Mesures en transmission

Des mesures radar en transmission peuvent également être envisagées. Dans ce cas, l'objectif est d'obtenir un paramètre simple à interpréter, qui peut être la vitesse de l'onde électromagnétique ou bien son absorption. Ces caractéristiques peuvent alors être utilisées pour qualifier relativement un matériau. Dans les sols, les mesures en transmission se font par l'intermédiaire de forages. Les antennes impulsives de forage permettent de mesurer des temps de trajet. Des algorithmes classiques de tomographie sismique peuvent alors être directement utilisés pour illustrer les distributions des vitesses des ondes électromagnétiques dans le sous-sol. Il est également possible de mesurer des amplitudes. Dans ce cas, il est encore possible de calculer des tomographies représentant la distribu-

tion des caractéristiques d'atténuation de l'onde électromagnétique dans le sous-sol. Nous avons pu montrer à cette occasion que des technologies non impulsives autorisaient des distances d'investigation notablement plus importantes que dans le cas impulsif. (Côte et al., 1994 ; 1995). Une application de ces techniques a été tentée sur les structures ; il s'agissait, dans le cadre d'un contrat CEE, de cartographier l'importance de l'humidité contenue dans un mur d'un bâtiment historique. La figure 13 indique une comparaison entre mesures en transmission impulsive (radar) et monochromatique (MEW). Le rapport signal/bruit pour le cas monochromatique est toujours suffisant pour obtenir une mesure correcte ; en revanche, les briques composant ce mur se sont révélées trop absorbantes dans les zones les plus humides (matériaux lents et absorbants) pour autoriser un relevé précis du temps de propagation avec un radar impulsif. Ailleurs, les deux images électromagnétiques sont cohérentes et mettent en évidence l'existence d'une zone « plus sèche » confirmée par d'autres informations. (Dérobert et al., 1995 ; Nappi et al., 1996).

Site test

En collaboration avec la FSTT (Comité français pour les travaux sans tranchées) et le Projet national « Microtunnel », le LCPC a construit à Nantes un site-test destiné à évaluer et comparer les performances des méthodes géophysiques vis-à-vis de la détection d'obstacles enterrés en milieu urbain. La méthode la plus présente sur ce marché est bien entendu le radar géologique. La construction de ce site est à présent achevée et les premières investigations radar viennent d'y être réalisées. La figure 14 illustre la richesse des informations contenue dans un profil radar sur une des zones de ce site. La disposition d'un tel site de référence va nous permettre de développer à la fois des méthodes de traitement visant à fiabiliser l'interprétation des coupes temps radar et des méthodologies de mesure particulières (investigations multistatiques, offset variable, ...) permettant d'améliorer la profondeur d'investigation, la résolution, ...

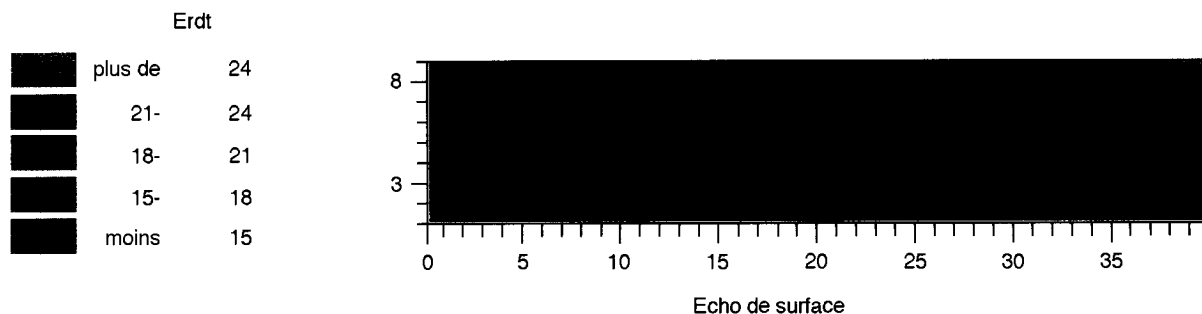


Fig. 12 - Cartographie de surface obtenue en portant sur un plan l'intégrale de l'amplitude de l'onde électromagnétique rétrodiffusée sur des signaux enregistrés sur des profils parallèles couvrant cette surface. Une anomalie de comportement est clairement identifiée et localisée.

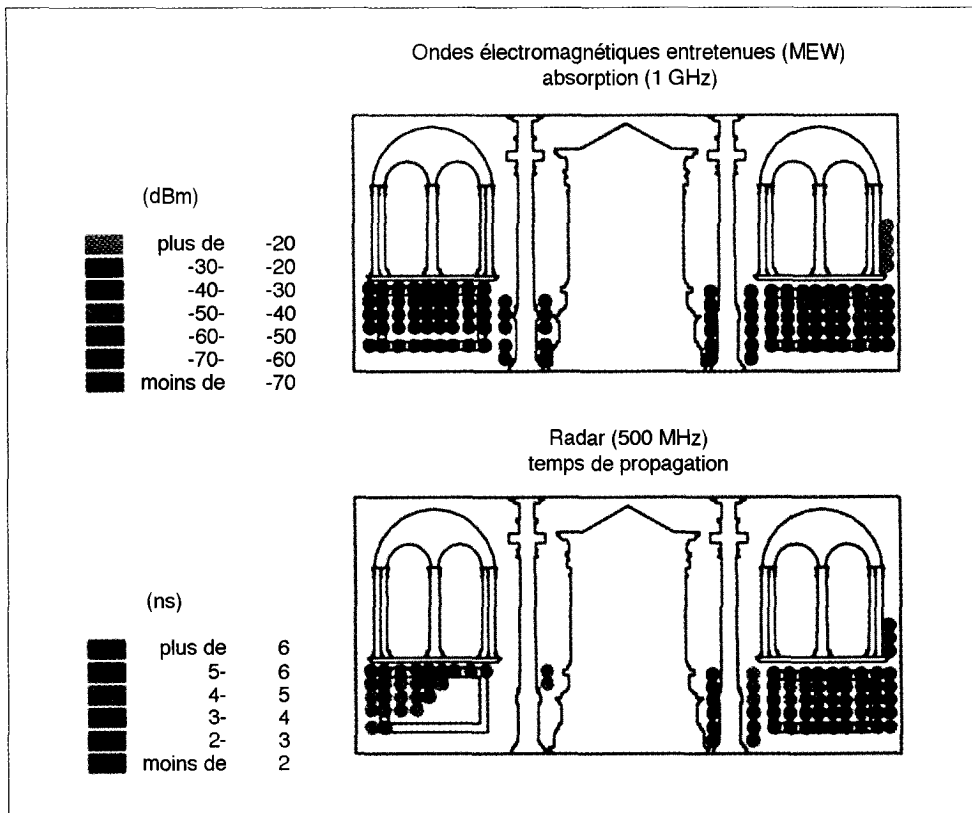


Fig. 13 - Mesures en transmission à travers un mur de briques (0,8 m). L'utilisation d'ondes électromagnétiques monochromatiques permet d'obtenir des informations même là où les très fortes absorptions rendent les mesures radar impossibles. Ailleurs, les images sont cohérentes et localisent les zones les plus saines (sèches) de cette structure (faible absorption et forte vitesse).

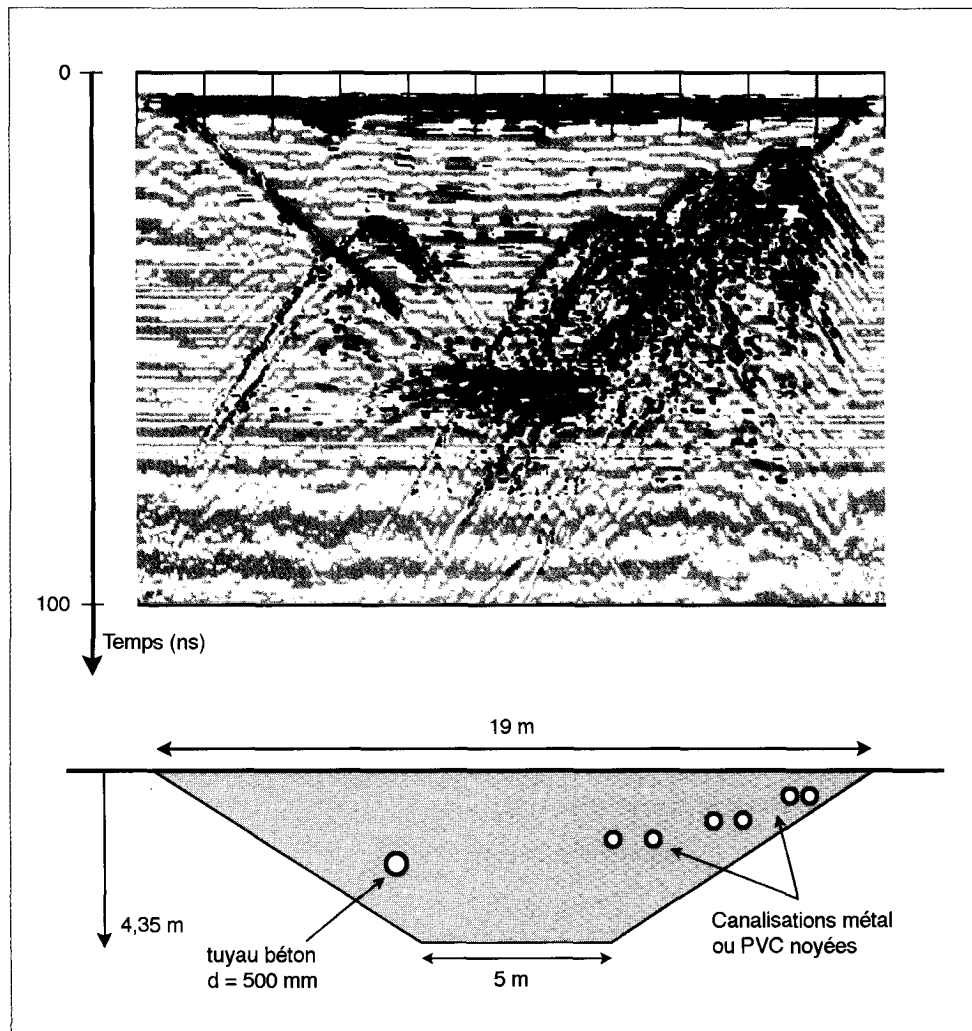


Fig. 14 - Coupe temps radar (500 MHz, bistatique) obtenue sur une des tranches du site test géophysique du LCPC Nantes. Les différents obstacles (canalisations) et la géométrie du site sont très clairement repérés. Ces mesures « école » vont permettre la mise au point d'outils de traitement d'images radar fiables.

Conclusion

Cet article a donné un aperçu des capacités et des limites des méthodes radar. Un grand nombre d'applications peuvent à présent être considérées comme des opérations courantes. Le matériel et les logiciels sont maintenant adaptés aux conditions réelles des chantiers. Il reste tou-

tefois une place importante pour des travaux de recherche, en particulier pour finaliser l'interprétation des coupes temps, qui ne sont pas toujours des représentations limpides du sous-sol. Les travaux actuellement en cours concernant l'imagerie électromagnétique ou les traitements et méthodologies multi-offset s'inscrivent totalement dans ce but.

ANNEXE

Généralités sur la propagation des ondes « radar » dans les matériaux Fréquences concernées 100 MHz - quelques GHz

Caractéristiques des matériaux

- **Constante diélectrique** (ou permittivité) ϵ (F/m)

En général, on utilise la permittivité relative $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ (ϵ_0 permittivité du vide) (tableau I). Cette grandeur peut être considérée comme constante dans la bande radar pour les matériaux de génie civil.

- **Conductivité** σ (S/m) ou **résistivité** ρ ($\Omega \cdot m$) (tableau I)

Dans la bande radar, pour les matériaux de génie civil, sa variation peut être importante. La conductivité augmente avec la fréquence, ce qui explique en partie la réduction de la profondeur d'investigation lorsque la fréquence croît. Cet effet est masqué dans les formules décrivant l'atténuation citées ci-dessous.

- **Perméabilité magnétique** μ (H/m) sera assimilée pour la plupart des matériaux à celle du vide.

Caractéristiques de l'onde dans un matériau donné

Le développement des équations de Maxwell impose que la condition $\sigma \ll \omega\epsilon$ (ω = pulsation) soit vérifiée pour que l'hypothèse de propagation soit valide dans ce domaine fréquentiel.

Dans ce cas :

- **Vitesse** : v (m/s). $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ (c = vitesse de l'onde électromagnétique dans le vide ; $c = 3,10^8$ m/s).

- **Longueur d'onde** λ (m). $\lambda = \frac{\lambda_{air}}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ($\lambda_{air} = c/freq$)

- **Atténuation** (amplitude) différents phénomènes sont cumulés :

– atténuation géométrique = variations en $\frac{1}{4\pi R}$

(approximation du dipôle, R = distance parcourue).

– atténuation intrinsèque = variations en $\exp(-R/L_c)$: L_c = longueur caractéristique (m) ;

$$L_c = \frac{\rho\sqrt{\epsilon_r}}{60\pi}$$

– effets de diffusion, diffraction ...

N.B. : Dans la littérature d'origine « hyperfréquence », on parle généralement de permittivité complexe (ϵ^*) et d'angle de perte (δ) pour quantifier l'atténuation intrinsèque :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \text{ avec } \epsilon' = \text{permittivité classique et } \epsilon'' = \sigma / \omega$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon\omega} \text{ et l'atténuation varie alors en : } \exp\left(-R \frac{\omega\sqrt{\mu\epsilon}}{2} \text{tg } \delta\right).$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTRAND L., LEPERT Ph., BENABEN J.-P., COLOMBEL J.-H., DUMESNIL-ADELÉE M. (1996), *Application d'un radar pulsé monostatique à l'auscultation des chaussées*, Techniques et Méthodes des LPC, Méthode d'essai, **42**, juin, V1.0, LCPC.
- CARIOU J. (1991), *Bilan des évolutions récentes en matière de radars : propositions d'orientations*, Rapport Int. LR Rouen, septembre.
- CHOMMELOUX L., PICHOT Ch., BOLOMEY J. (1986), *Electromagnetic modeling for microwave imaging of cylindrical buried inhomogeneities*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, Vol. MTT. 34, **10**, pp. 1064-1076.
- CÔTE Ph., DÉROBERT X., GUILLAUME A. (1996), *Auscultations radar sur le site du Ramesseum*, Memmonia VII, Le Caire, 8 pages.
- CÔTE Ph., DEGAUQUE P., LEVENT N., LAGABRIELLE R. (1995), *Detection of underground cavities with monofrequency e.m. tomography between boreholes in the frequency range 100 MHz - 1 GHz*, Geophys. Prospect, Vol. 43, **8**, pp. 1083-1107.
- CÔTE Ph., DEGAUQUE P., LEVENT N., LAGABRIELLE R. (1994), *Détection de cavités souterraines par tomographie électromagnétique entre forages dans la bande 100 MHz - 1 GHz*, Coll. CBGI, Louvain-La-Neuve, pp. 147-156.
- DANIELS J.J. (1989), *Fundamentals of ground penetrating radar*, Proceedings of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP 89, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 62-142.
- DEROBERT X., CÔTE Ph., LEVENT N., CARIOU J. (1995), *Electromagnetic testing on brick masonry*, Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil-Engineering (NDT-CE), Berlin, Septembre, Ed. by G. Schickert and H. Wiggensauser, pp. 205-210.
- DOOLITTLE J.A. (1987), *Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys*, Soil Techniques, SSA (Soil Science Society of America), Special Publication **20**, pp. 11-32.
- GOODMAN D. (1994), *Ground penetrating radar simulation in engineering and archeology*, Geophysics, Vol. 59, **2**, pp. 224-232.
- LAGABRIELLE R. (1986), *Les bases de la radiomagnétotellurique*, Industrie Minérale, octobre, pp. 373-383.
- NAPPI A., CÔTE Ph., NICCOLINI G. (1996), *Non destructive testing and system identification to evaluate diagnostics methods and reinforcement techniques applied to historical buildings*, Environment CEE Program, Project : PL91-0679, Contract : EV5V-CT92-0106, Final Report.
- PICHOT Ch., DOURTHE C. (1995), *Microwave diffraction tomography of buried objects*, Workshop Proc. Anti-personal mine detection and removal, pp. 72-74.
- PICHOT Ch., DOURTHE C. (1996), *Microwave imaging method for tomographic reconstructions of buried inhomogeneities*, 2nd EEGS meeting, 2-5 septembre, Nantes (FR), LCPC Ed., pp. 268-271.
- TILLARD S. (1994), *Radar experiments in isotropic and anisotropic geological formations (granite and schists)*, Geophys. Prospect. Vol. 42, **6**, pp. 615-636.

ABSTRACT

Civil engineering applications of geological radar

J. CARROU - G. CHEVASSU - P. CÔTE - X. DEROBERT - J.-Y. LE MOAL

This paper deals with a specific type of electromagnetic non-destructive testing - geological radar. The physical principles, data representation and processing methods and the types of equipment available on the market are described. A few examples are then given of the potential applications of this technique: detection of cavities and conduits, measurement of the thickness of pavement courses, geological surveys. Finally, current developments and the research directions pursued within the network of Laboratoires des Ponts et Chaussées are described.