

Évaluation d'un radar géologique sur le site-test géophysique du LCPC à Nantes (France)

Grégory BIÈVRE
Patrice MAURIN

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Autun

RÉSUMÉ

Le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Autun a fait l'acquisition d'un radar géologique, destiné à l'auscultation des chaussées ainsi qu'aux investigations géologiques et géotechniques, qui a été évalué sur le site-test géophysique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes. Les résultats obtenus démontrent une très grande facilité de mise en œuvre, un grand rendement ainsi qu'une bonne qualité des images. Toutefois, de nombreux paramètres peuvent influencer sur la qualité des observations : nature de l'encaissant et des structures recherchées, présence d'eau, choix de l'antenne et réglages de celle-ci, opérations réalisées lors du traitement des données.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

EVALUATION OF A GEOLOGICAL RADAR AT THE LCPC GEOPHYSICAL TEST SITE IN NANTES (FRANCE)

The Laboratoire regional des Ponts et Chaussées facility located in Autun has acquired a geological radar device, intended for the diagnostic monitoring of pavements as well as for geological and geotechnical investigations. This device has been evaluated on the LCPC's geophysical test site in Nantes. The results obtained serve to demonstrate: an extreme ease of implementation, high level of output, and good image quality. Nonetheless, a number of parameters are able to influence observation quality: the nature of the target rock cutout formations and structures, the presence of water, the choice of antennae and antenna settings, and operations conducted at the time of data processing.

FIELD: Engineering sciences.

Introduction

Le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Autun effectue depuis de nombreuses années des investigations et des reconnaissances géophysiques non destructives (électrique, radio-magnétotellurique, sismique, etc.) pour le compte de Directions départementales de l'Équipement (DDE), de collectivités locales et de clients privés. Les méthodes de prospection géophysiques non destructives semblent particulièrement bien adaptées aux besoins croissants de reconnaissances en site urbain. Parmi celles-ci, le radar présente un fort potentiel et le LRPC d'Autun a fait l'acquisition, en 1998, d'un radar géologique destiné à l'auscultation des chaussées, aux investigations géologiques et géotechniques en terrain non bâti et, également, pour mieux répondre aux problèmes de localisation d'objets enfouis en site urbain.

Afin de tester les performances et les limites de cet équipement de prospection géophysique, ainsi que sa facilité de mise en œuvre, une série de mesures a été réalisée sur le site-test géophysique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), à Nantes. Les méthodes de reconnaissance posant de nombreux problèmes d'interprétation, le LCPC a créé un site-test ayant différents objectifs : évaluation des performances d'un matériel et validation sur site réel, validation en conditions opérationnelles de l'efficacité d'un développement, évaluation de certains paramètres d'influence ou, encore, validation des modélisations numériques. À cette fin, le site a été créé dans des conditions contrôlées permettant de réaliser des mesures reproductibles, avec des sols encaissants bien identifiés et une connaissance parfaite des objets à détecter.

De telles prospections ont déjà été menées (voir, par exemple, Grandjean et *al.* 2000) et peuvent servir de comparaison. Le but de ce travail est de présenter les performances d'un radar géologique utilisé de façon classique ainsi que les enseignements qu'il a été possible d'en retirer, tout en montrant l'aspect formateur du site.

Principe physique

La technique radar est employée pour obtenir une image de la sub-surface à haute-résolution. Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sous-sol, par le biais d'une antenne, à une fréquence centrale déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux ou les sols et, à chaque interface de deux matériaux différents, une partie de son énergie est réfléchie vers la surface. Les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réception (Daniels, 1996). La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radargramme, souvent représentée avec une échelle de couleur corrélée aux amplitudes des signaux et donnant des informations géométriques sur la structure auscultée (fig. 1).

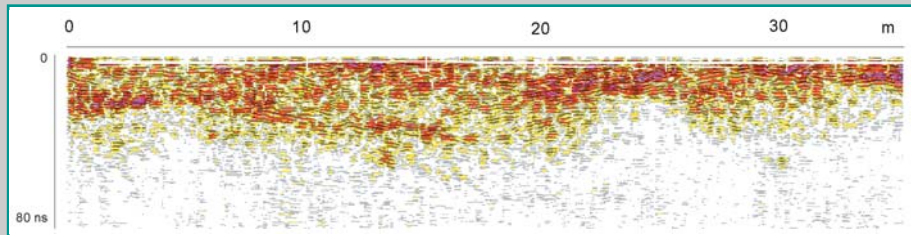


Fig. 1 - Exemple de radargramme, ou profil radar. L'axe horizontal représente une distance (en mètres) et l'axe vertical un temps-double (aller-retour, en nanosecondes). La prospection présentée ici a été réalisée dans le Bassin parisien avec une antenne de fréquence centrale 400 MHz. Les niveaux supérieurs (couleurs vives) signent des paléochenaux conglomératiques carbonatés würmiens tandis qu'au-dessous, en teinte blanc-gris, les niveaux sans contraste correspondent à de la craie d'âge Santonien.

La vitesse de propagation des ondes dépend principalement de la constante diélectrique (ou permittivité relative) du milieu environnant et peut être représentée en première approche sous la forme suivante (1) :

$$v \approx c/(\epsilon_r)^{1/2} \quad (1)$$

avec

- v = vitesse de l'onde électromagnétique (m/s),
- c = célérité de la lumière dans le vide ($= 3 \times 10^8$ m/s),
- ϵ_r = permittivité relative (sans dimension).

Plus un matériau est humide, plus la vitesse de propagation est lente (différentes valeurs sont présentées dans Cariou et *al.*, 1997 ; cela peut influencer la précision des mesures lorsqu'il existe un gradient d'humidité au sein de ce milieu (comme pour le béton, par exemple).

La profondeur d'auscultation dépend quant à elle de plusieurs facteurs :

- la conductivité du matériau encaissant, principale cause de l'atténuation des ondes ;
- le choix de la fréquence centrale : la profondeur d'investigation décroît lorsque la fréquence augmente ;
- la dynamique du système radar, qui indique le rapport signal/ bruit minimal détectable, et que l'on peut relier à une profondeur limite d'auscultation ;
- l'adaptation de l'antenne au matériau (l'aptitude à transmettre le maximum d'énergie dans le matériau) ;
- le lobe de rayonnement de l'antenne qui focalise plus ou moins l'énergie rayonnée dans une direction donnée ;
- la section équivalente radar (valeur décrivant l'énergie réfléchie dans une direction donnée suivant la forme et la taille de l'objet à détecter) ;
- le contraste électromagnétique de l'objet par rapport au matériau encaissant, en sachant que plus celui-ci est élevé et plus l'énergie rétrodiffusée est importante ;
- le niveau de bruit diffractant dû à la nature du matériau encaissant (taille et géométrie des granulats ou blocs).

Tous ces facteurs interagissent sur les ondes radar enregistrées au niveau de l'antenne réceptrice. Mais on peut retenir que, dans un même environnement, suivant la nature et la forme d'un objet enterré, la profondeur maximale à partir de laquelle il ne sera plus détecté peut être notablement différente.

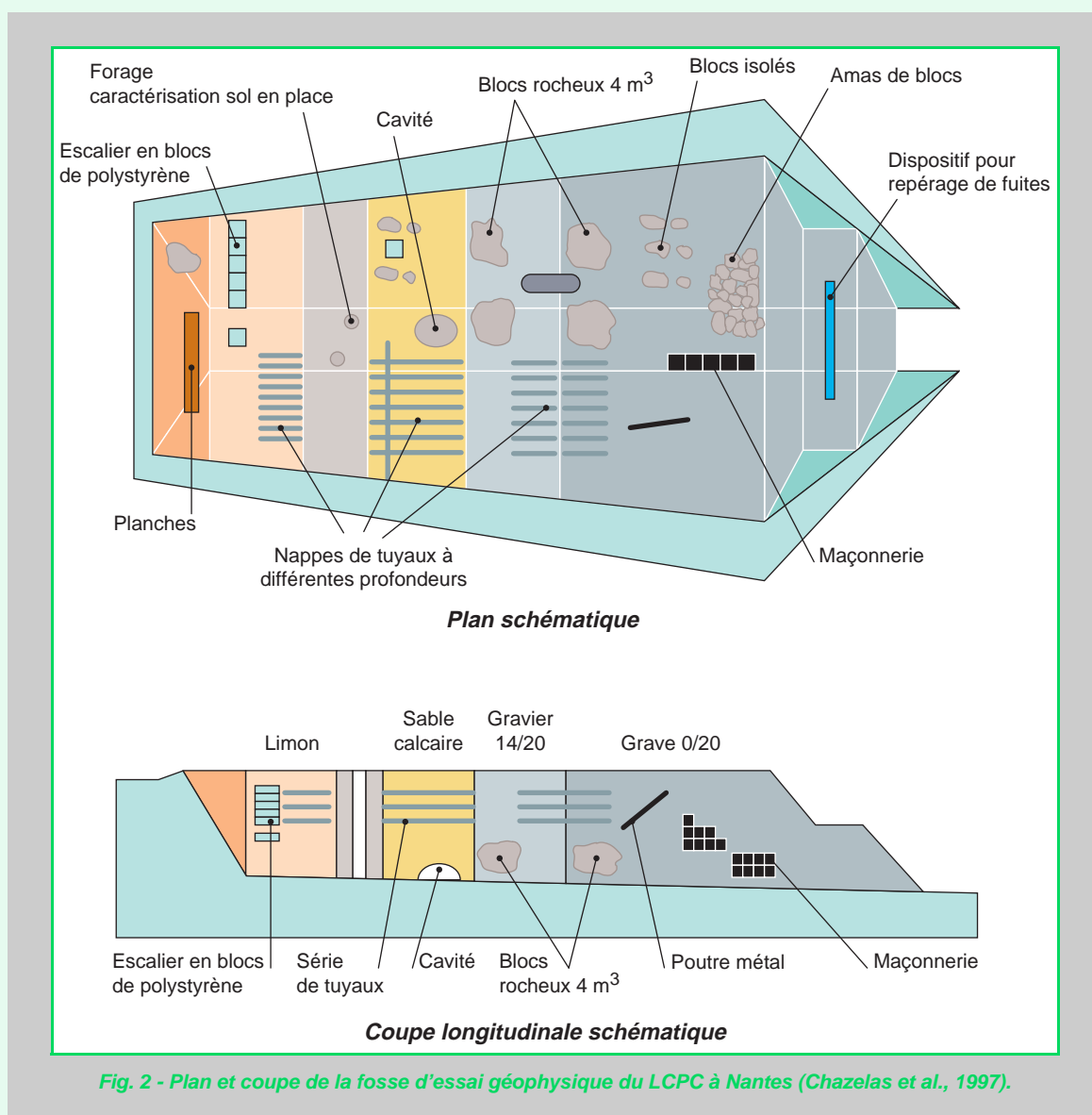
Il existe aussi une relation entre la profondeur d'investigation possible et la résolution qui sont liées à la longueur d'onde émise (Leparoux, 1997). Une grande longueur d'onde induit une faible atténuation et l'onde électromagnétique va pénétrer en profondeur. Corrélativement, la résolution est faible et l'onde n'est pas affectée par les objets de dimension réduite.

Description du site-test

Le site-test géophysique du LCPC (fig. 2) est une fosse de dimensions 20 m × 26 m × 4 m, séparée en cinq compartiments, contenant chacun des matériaux et des éléments contrôlés (Chazelas et al., 1997). Leur remplissage a été réalisé de façon à disposer d'un milieu que l'on puisse considérer comme homogène : compactage par couche élémentaire de 20 cm, prévention de l'intrusion de l'eau par des drainages latéraux et en fond de fosse, imperméabilisation de surface.

Les matériaux de remplissage sont disposés en tranches verticales de largeurs variables :

- une tranche de limons de 5 m de large ;
- une tranche dite « multicouche » de 2,50 m de large, constituée de l'empilement de couches de 0,60 à 1,30 m des autres matériaux du site ;



- une tranche de sable-calcaire de 5 m de large ;
- une tranche de grave-gneiss de 5 m de large et de granulométrie 14/20, afin d'obtenir une faible densité (environ 1,8) ;
- deux tranches de grave-gneiss de 5 m de large chacune et de granulométrie 0/20, afin d'obtenir une forte densité (environ 2,2) ;
- une risberme de 2,50 m de large en bout de site pour des essais de recherche de fuites dans les tuyaux.

Dans chacune de ces tranches, différents objets sont enfouis (fig. 2) afin de figurer des obstacles qu'il est réellement possible de rencontrer en site urbain. Ces objets sont parfaitement localisés dans l'espace depuis un repère géodésique local, toujours disponible sur le site.

Acquisition des données expérimentales

Description du matériel / Mode opératoire

Le LRPC d'Autun dispose d'un radar SIR system 10H, développé par la société GSSI. Il est associé à des antennes blindées qui fonctionnent en mode monostatique : une seule antenne sert à l'émission et à la réception de l'onde électromagnétique. Trois antennes ont été utilisées, de fréquences centrales respectives de 400, 500 et 900 MHz. Seuls les résultats obtenus avec les antennes de 400 et 900 MHz sont présentés dans ce travail.

L'acquisition des données a été effectuée selon la méthode de profilage bidimensionnel depuis la surface : un opérateur tire l'antenne de contact le long du profil implanté. Quatorze profils transversaux et longitudinaux ont été réalisés. Les profils transversaux, parallèles entre eux, ont été implantés avec un écartement de 2,50 m afin de prospecter au droit de tous les objets enfouis.

Les profils de mesures (fig. 3) ont été réalisés sans la roue codeuse, les distances étant enregistrées manuellement par l'opérateur tous les mètres. Pour chacun des profils, plusieurs passages ont été effectués avec différentes antennes et différents réglages de temps d'écoute et de courbe de gain. Le temps d'écoute correspond au temps d'enregistrement des retours d'écho et, donc, à la profondeur ; la courbe de gain, variable avec le temps d'écoute, permet de corriger les effets d'atténuation en amplifiant les échos les plus tardifs.

Les données ont été traitées avec le logiciel WinRad, développé par GSSI. Plusieurs types d'opérations sont possibles afin de faire ressortir au mieux les hétérogénéités enregistrées : choix de l'échelle de couleur, filtrage vertical, filtrage horizontal, migration (ensemble des techniques qui permettent de replacer correctement les réflecteurs sur un profil bidimensionnel) et amplification de gain.

Mesures et interprétations

Les traces des profils présentés dans ce travail sont matérialisées sur la vue en plan de la fosse (fig. 3).

Dans les couches de grave-gneiss

Grave-gneiss 14/20

La figure 4 montre le profil réalisé sur la tranche de grave-gneiss 14/20, avec une antenne de fréquence centrale 400 MHz. Le fond de la fosse, constitué de 10 cm de couche de drainage, est atteint vers 60 ns sur le radargamme et tous les éléments enfouis sont visibles. Le tuyau en béton, de diamètre 500 mm, est matérialisé par deux hyperboles qui indiquent son sommet et sa base. Les antennes utilisées, de type « papillon », émettent dans une certaine région appelée lobe de rayonnement, ou lobe d'émission, avec un angle d'environ 90°. De ce fait, les hétérogénéités sont détectées avant et après que l'antenne soit à leur verticale. Le résultat sur la coupe-temps est une hyperbole dont le sommet représente, en milieu latéralement homogène, le passage de l'antenne au droit de cette interface (le sommet représente le temps de trajet le plus bref, donc la distance la plus courte entre l'antenne et l'interface de réflexion).

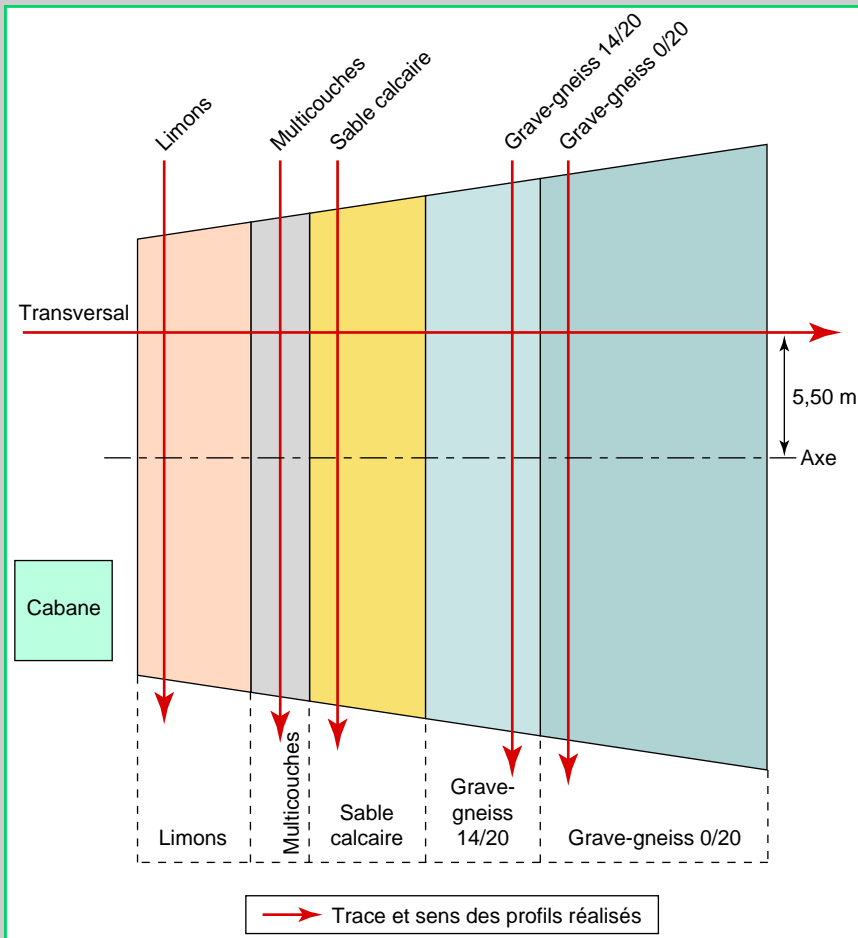


Fig. 3 - Position des profils sur une vue en plan. L'implantation des profils est matérialisée par la trace rouge. Les profils portent le nom de la tranche de remplissage qu'ils recoupent.

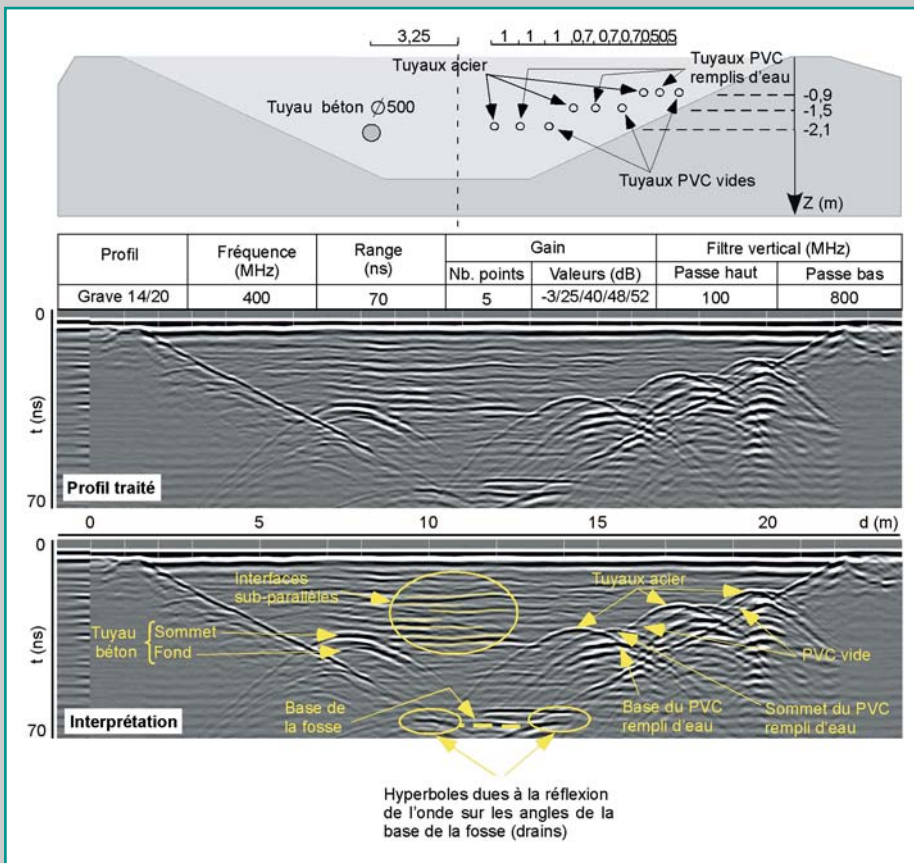


Fig. 4 - Profil dans la grave-gneiss 14/20 : coupe théorique, réglages, profil traité, interprétation (pour Range, lire temps d'écoute).

Sur la droite de la tranche sont disposées trois nappes de tuyaux (qui sont respectivement, de gauche à droite : tuyau en acier, tuyau en PVC rempli d'eau et tuyau en PVC vide) à différentes profondeurs (chaque nappe, en fonction de la tranche, se trouve aux alentours de 1 m, 1,50 m et 2 m. De plus, l'écartement entre les tuyaux de chaque nappe augmente avec la profondeur : 0,5 m, 0,7 m et 1 m). Les tuyaux en acier se réfléchissent fortement, avec une seule hyperbole qui indique leur sommet. Les tuyaux en PVC vides sont plus difficiles à distinguer. Les tuyaux en PVC remplis d'eau montrent deux réflexions. La deuxième réflexion (la plus « profonde ») indiquant la base du tuyau est, tout comme pour le tuyau béton, détectée juste après son sommet. Cela est dû au remplissage du PVC par de l'eau, qui induit une vitesse plus lente de l'onde dans ce milieu et donc un retard à la réflexion. Les deux réflexions ne sont pas marquées pour la canalisation vide, la vitesse de propagation de l'onde dans l'air étant trop élevée.

Il est aussi possible d'observer deux hyperboles générées par la réflexion de l'onde sur les angles de la base de la fosse. Celles-ci sont vraisemblablement générées par deux drains (diamètre 100 mm) localisés à ces endroits.

Au centre du profil sont aussi visibles plusieurs interfaces sub-parallèles et sub-horizontales. Le matériau étant homogène, avec un pourcentage d'eau constant et un compactage tous les 20 cm, les contrastes de constantes diélectriques devraient être nuls. Elles matérialisent vraisemblablement des surfaces de compactage. Leur détection peut être due à un gradient de compacité ou bien à une orientation différente des grains entre eux de part et d'autre de chaque interface.

Grave-gneiss 0/20

L'auscultation a été exécutée avec la même configuration matérielle que dans la grave-gneiss 14/20, mais cette tranche a une granulométrie différente (0/20), ce qui signifie qu'elle contient des particules fines de nature argileuse.

Le profil matérialisé sur la figure 5 montre que le signal est absorbé au-delà de 35 ns, à cette fréquence centrale de 400 MHz, avec un temps d'écoute de 70 ns. On peut distinguer uniquement les tuyaux en acier ainsi que le fond des tubes en PVC remplis d'eau des deux nappes de tuyaux les plus proches de la surface. Les blocs et le tuyau en béton ne sont pas visibles. Il est aussi possible de voir les interfaces sub-parallèles et sub-horizontales des couches de compactage.

La profondeur d'investigation est plus faible de par l'atténuation, qui est plus importante que dans la grave 14/20, et la valeur plus élevée de la constante diélectrique du milieu (les valeurs peuvent se retrouver chez Grandjean et al. 2000).

La nature des sols de remplissage de la fosse a un effet sur la profondeur de pénétration de l'onde. Sur la figure 4, le fond de la fosse est détecté à une fréquence centrale de 400 MHz dans la grave-gneiss 14/20, alors qu'il ne l'est pas, à la même fréquence et pour les mêmes réglages, dans la grave-gneiss 0/20 (fig. 5). On met ici en évidence la très forte influence des fractions fines qui, de par leur présence dans la grave 0/20, empêchent toute pénétration en profondeur de l'onde dans le sol.

Les matériaux enfouis ont donc un effet sur la vitesse de l'onde électromagnétique. Les géométries des objets matérialisés sur les profils des figures 4 et 5 impliquent des erreurs possibles de localisation s'il n'est pas tenu compte de la nature de ces matériaux. Les profils réalisés dans la tranche 14/20 permettent la localisation de tous les tuyaux, bien que le tuyau d'eau soit matérialisé par sa base. Des erreurs de localisation sont donc possibles quand la configuration du site n'est pas connue, par exemple lors d'une prospection en site urbain.

Par contre, tout n'est pas détecté dans la tranche 0/20, où seuls le sommet du tuyau en acier et la base du tuyau rempli d'eau le sont : à cette même profondeur, le tuyau vide n'est pas détecté, de même que le bord de la fosse. Donc, à profondeur d'enfouissement égale, la nature des matériaux influe sur l'énergie rétrodiffusée. C'est le principe de la surface équivalente radar (voir la partie principe physique), qui est directement proportionnelle à l'énergie réfléchie. Des erreurs de localisation sont alors possibles s'il n'est pas tenu compte de la nature des objets enfouis.

Enfin, ce même profil souligne la très grande sensibilité de la technique, puisque l'on détecte les couches de compactage. Cela fait ressortir la grande quantité d'informations qu'il est possible d'en

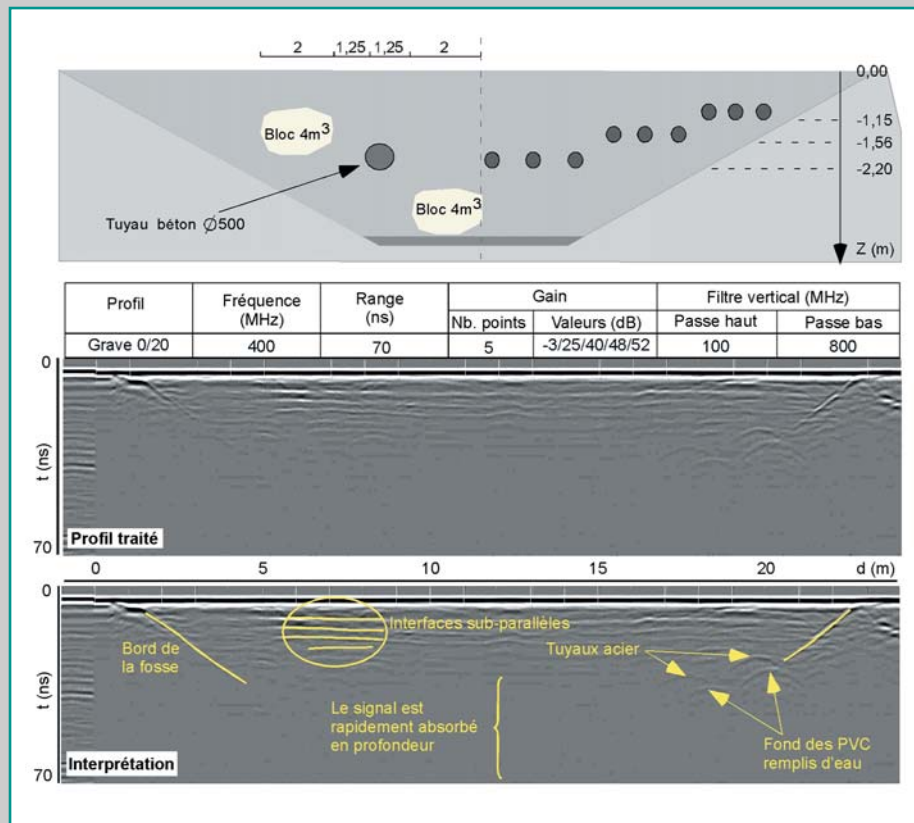


Fig. 5 - Profil dans la grave-gneiss 0/20 : coupe théorique, réglages, profil traité, interprétation (pour Range, lire temps d'écoute).

retirer ainsi que la difficulté d'interprétation des données, les mesures en site urbain pouvant être assez fortement bruitées.

Dans le multicouche

Dans cette tranche, deux profils, réalisés à la même fréquence de 400 MHz, mais avec des réglages différents, sont présentés (fig. 6).

L'objectif était d'examiner si une variation des réglages de l'antenne pouvait avoir une influence sur la qualité des enregistrements. Pour cela, deux paramètres ont été modifiés : le temps d'écoute (70 et 85 ns) ainsi que le gain (voir les réglages sur la figure 6) sur chacun des cinq points de la courbe.

Sur le profil avec un temps d'écoute de 70 ns, le signal est correct jusqu'à 30 ns et permet de distinguer les différentes couches. En dessous, il est rapidement absorbé et une interface, à peine visible en profondeur, vers 55 ns, pourrait correspondre à la limite sable calcaire-limons.

L'augmentation du temps d'écoute de 70 à 85 ns, avec réglage des valeurs de gain, permet de voir toutes les interfaces. L'interface sable calcaire-limon est ici nettement visible vers 55 ns. Au-dessous, le bruit augmente de façon très significative. Le fond de la fosse pourrait être atteint vers 80 ns, mais le signal est fortement noyé dans le bruit. Ces deux profils mettent en évidence l'importance des réglages préalables à l'auscultation.

Dans les limons

Deux profils effectués dans les limons avec deux antennes différentes sont présentés (fig. 7) : 400 MHz avec 70 ns de temps d'écoute et 900 MHz avec 60 ns.

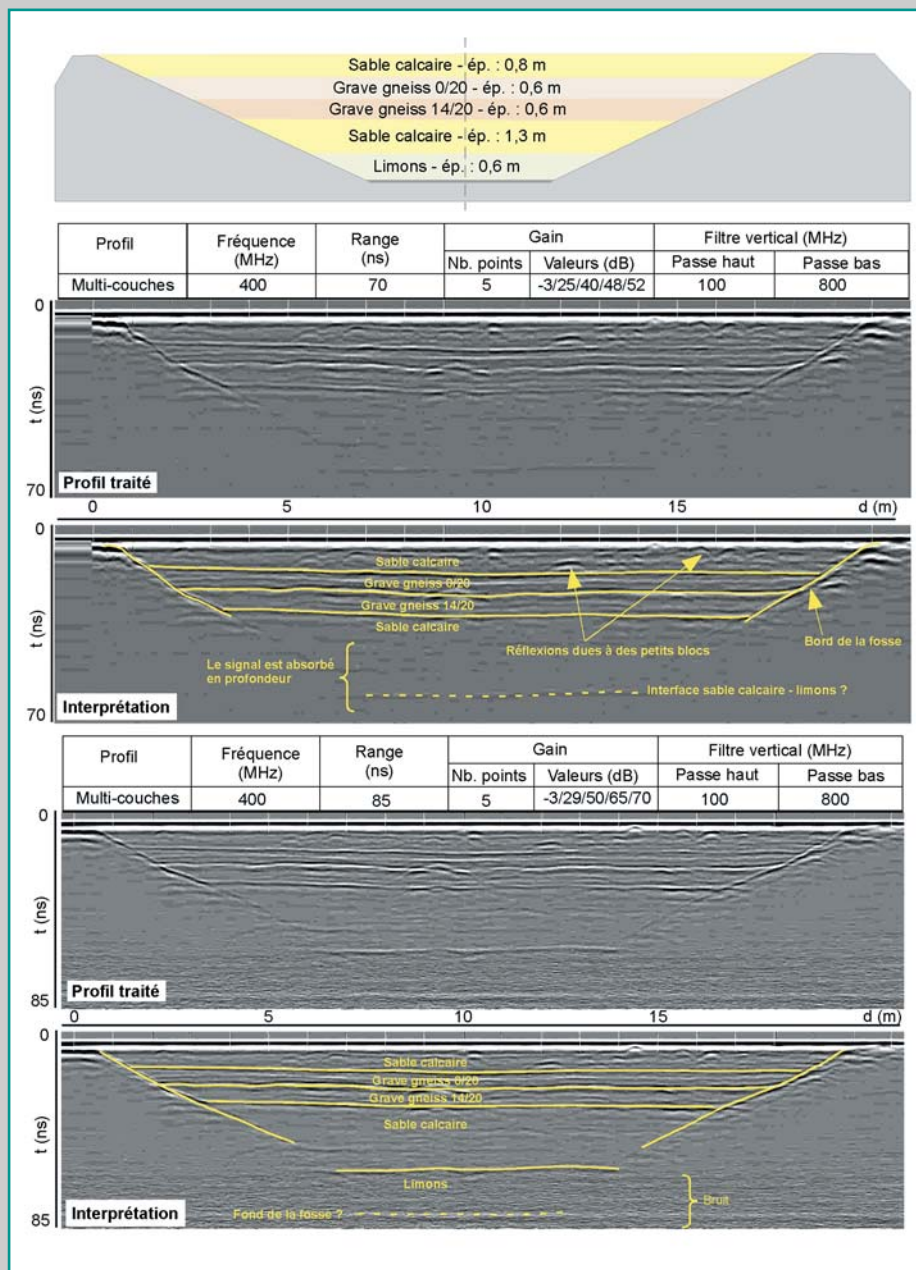


Fig. 6 - Profils dans le multicouche avec les antennes de 400 et 900 MHz : coupe théorique, réglages, profils traités, interprétations (pour Range, lire temps d'écoute).

Sur le profil à 400 MHz, les quatre premiers blocs de polystyrène se distinguent, mais de moins en moins clairement avec la profondeur d'enfouissement. Au-dessous de 30-35 ns, plus rien n'est visible.

Avec l'antenne à 900 MHz, seuls les deux premiers blocs peuvent être discernés, chacun d'eux fournissant deux réflexions qui mettent en évidence leur sommet et leur base. Le signal est absorbé intégralement au-dessous de 20 ns. On atteint alors une profondeur maximale d'investigation correspondant à un trajet double de 20 ns, à cette fréquence centrale et pour ces réglages.

Toutefois, sur les deux profils, un réflecteur proche de la surface, qui ne correspond à aucune structure de la coupe théorique, est très nettement visible. En fait, cette interface montre un changement de lithologie, le sommet de la fosse ayant été comblé avec un autre matériau (couche de sable d'une quarantaine de cm).

La fréquence de l'antenne influe fortement sur la profondeur d'auscultation. Cette dernière est plus importante avec l'antenne à 400 MHz. Plus la fréquence est élevée et plus l'onde émise est absorbée rapidement. Par ailleurs, une antenne à haute fréquence offre une meilleure résolution qu'une

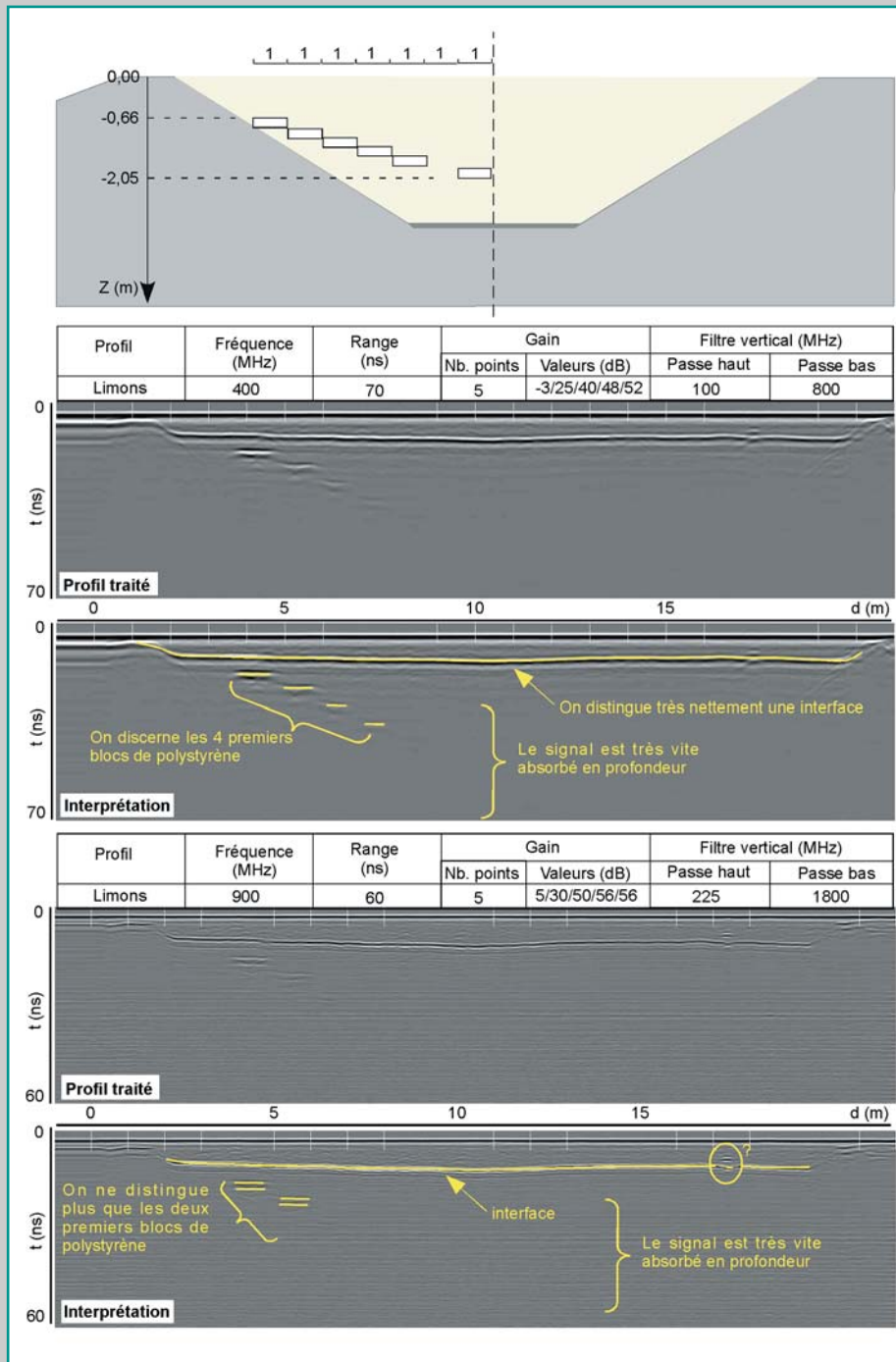


Fig. 7 - Profil dans les limons avec les antennes de 400 et 900 MHz : coupe théorique, réglages, profils traités, interprétations (pour Range, lire temps d'écoute).

antenne à basse fréquence, puisque l'on distingue le sommet et la base des deux premiers blocs de polystyrène avec l'antenne de 900 MHz.

Le choix de la fréquence d'auscultation dépend donc de l'objectif de la reconnaissance : profondeur d'investigation ou résolution, sachant qu'un compromis est nécessaire entre ces deux paramètres.

Dans le sable calcaire

La figure 8 montre le profil réalisé dans le sable calcaire, avec une antenne de 400 MHz et un temps d'écoute de 85 ns.

Le fond de la fosse est clairement visible, vers 75 ns. Sur la partie gauche du profil, deux fortes réflexions indiquent clairement le sommet et la base du bloc de polystyrène. Les blocs rocheux ne sont pas détectés de façon aussi nette : le bloc enfoui à 1 m est visible, mais il n'est pas possible d'observer celui situé à 2 m de profondeur. Sur la partie droite du profil, les trois nappes de trois tuyaux sont visibles. Le signal des tubes en PVC remplis d'eau (au milieu de chaque nappe) comporte deux hyperboles, celle du bas étant la plus marquée (c'est-à-dire celle qui renvoie le plus d'énergie), ainsi que des réflexions multiples plus en « profondeur ». Les tubes en acier sont bien marqués ; cependant, il est plus difficile de matérialiser les tubes vides en PVC, les contrastes de constantes diélectriques étant plus faibles.

Les éléments enfouis ont donc, de par leur nature, une influence sur la qualité de la réflexion. La théorie indique que la qualité et l'intensité de la réflexion des ondes sont proportionnelles aux contrastes diélectriques de part et d'autre des interfaces. Ce propos est clairement illustré sur la figure 8, dans les sables calcaires. Le contraste diélectrique entre les blocs rocheux et l'encaissant n'est pas assez important pour provoquer une réflexion d'énergie suffisante. Aussi, si le bloc le plus proche de la surface est très faiblement détecté, celui situé en profondeur est invisible sur le radargamme. Sur la même figure, le bloc de polystyrène apparaît par contre de façon très nette, avec son sommet et sa base.

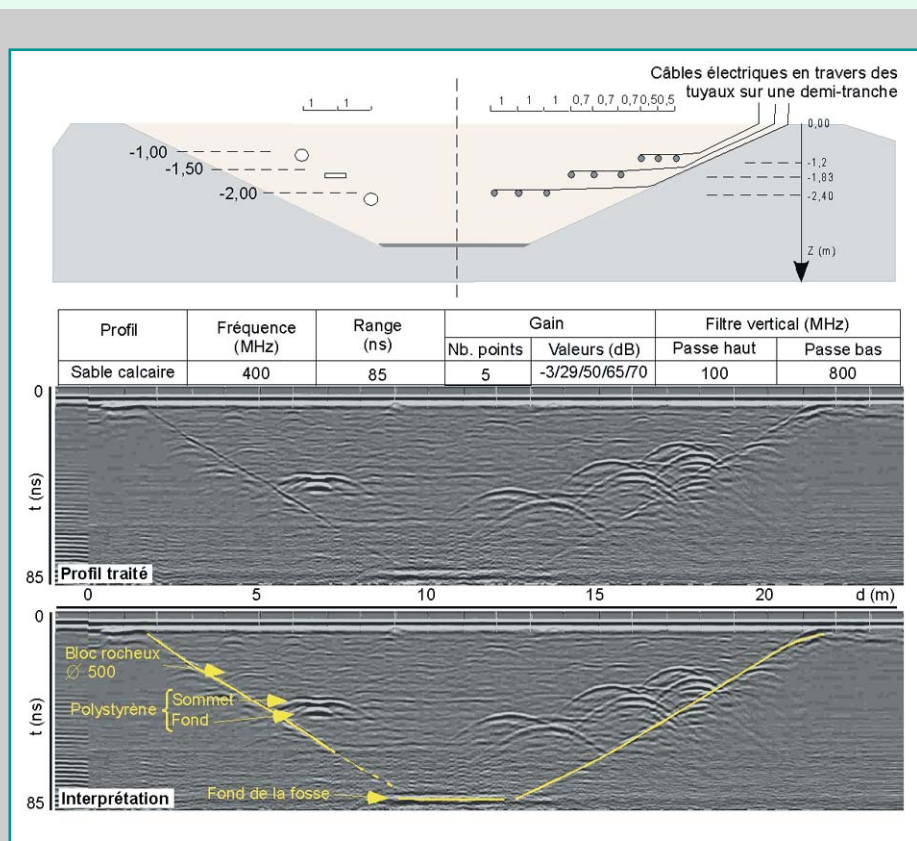


Fig. 8 - Profil dans le sable calcaire : coupe théorique, réglages, profil traité, interprétations (pour Range, lire temps d'écoute).

Profil transversal

Ce profil recoupe tous les types d'encaissant que l'on peut trouver dans la fosse d'essai.

Deux profils sont présentés (fig. 9), réalisés au même endroit, mais avec deux antennes différentes, une de 400 MHz et une de 900 MHz. Il ressort de la comparaison des deux profils une différence très nette de pénétration de l'onde. Les deux antennes sont rapidement aveugles dans les limons et la grave-gneiss 0/20. Par contre, seule l'antenne de 400 MHz détecte toutes les interfaces du multi-couche ainsi que l'interface entre le remblai et l'encaissant dans le sable calcaire. Ce profil n'est pas

central, mais latéral (voir l'implantation sur la figure 3) ; aussi, l'interface matérialisée n'est pas le fond de la fosse, mais le bord latéral.

Il faut aussi souligner l'importance des effets de bords, qui sont matérialisés par des demi-hyperboles au niveau des dièdres élémentaires frontière de tranche/couche élémentaire.

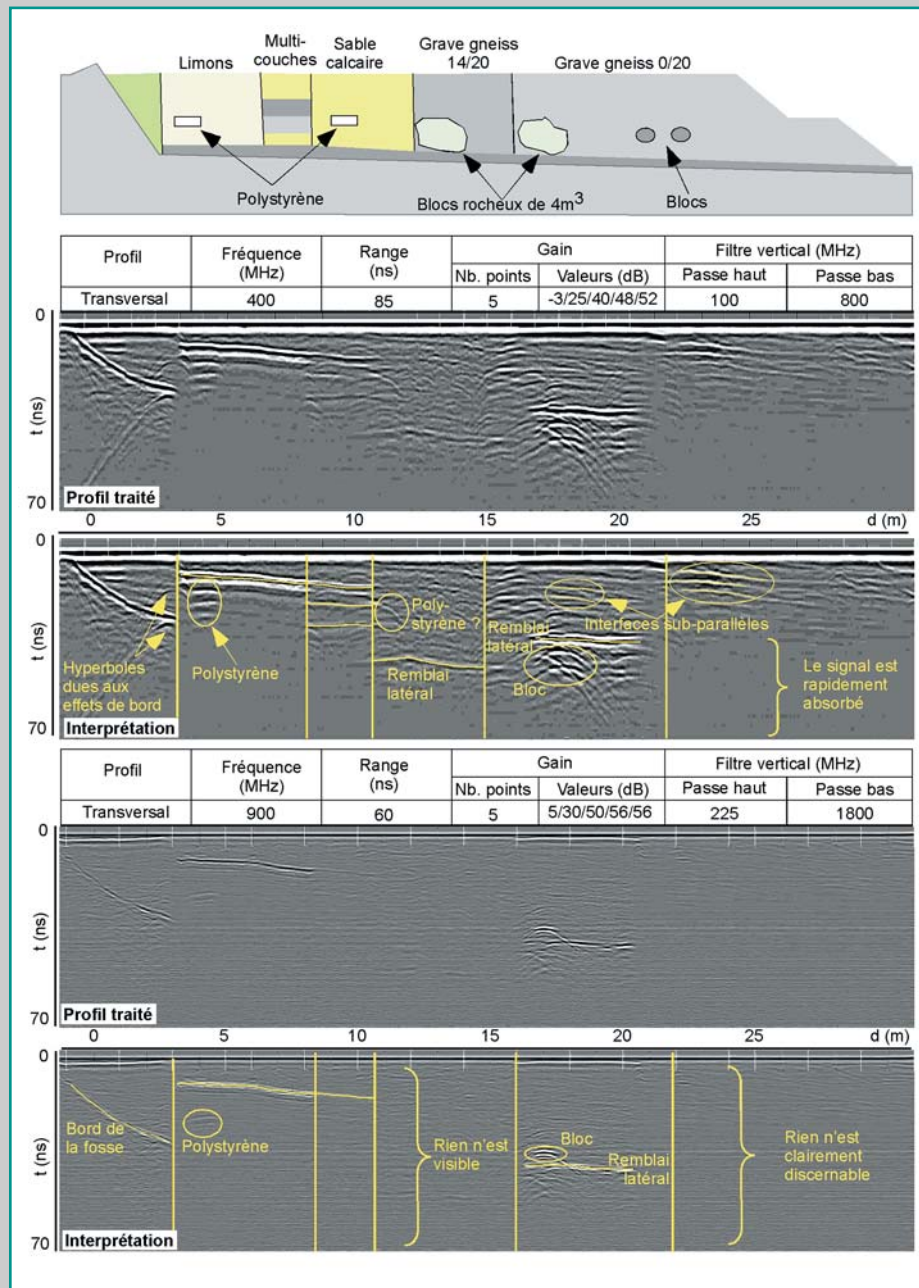


Fig. 9 - Profil transversal avec les antennes de 400 et 900 MHz et recoupant tous les types d'encaissant : coupe théorique, réglages, profils traités, interprétations (pour Range, lire temps d'écoute).

Traitement des données

Une opération de migration a été réalisée sur un profil effectué dans le sable calcaire. La migration est un traitement mathématique dont l'objet est de positionner les hétérogénéités dans une coupe profondeur à partir d'une coupe temps. Pour cela, il est nécessaire de connaître la vitesse des ondes radar dans le milieu. Il est ainsi possible d'obtenir une image plus réelle de la géométrie des objets enfouis.

La figure 10 montre un exemple de résultat de migration où les neuf canalisations sont parfaitement repositionnées ; le pendage du bord de fosse est correct. Le bloc de polystyrène est bien représenté alors que l'on aurait pu supposer l'existence de deux canalisations côte à côte à partir de l'étude du profil brut.

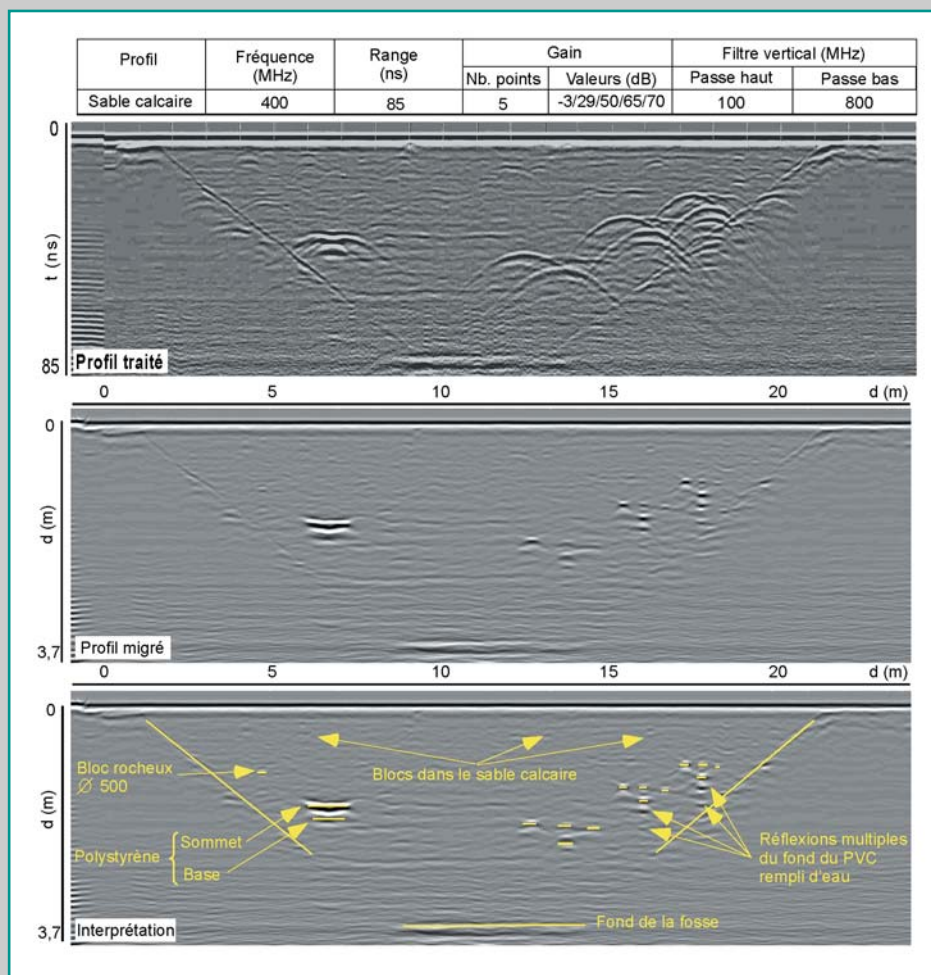


Fig. 10 - Opération de migration appliquée à un profil réalisé dans le sable calcaire (pour Range, lire temps d'écoute).

Conclusions

Les investigations menées de façon classique sur le site-test du LCPC à Nantes ont permis de se familiariser avec la méthode d'auscultation non-destructive par radar géologique en procédant à des mesures sur site contrôlé, reproduisant ce qui est couramment utilisé en site urbain. Cette technique démontre une indéniable facilité de mise en œuvre ainsi qu'un grand rendement lors de la prospection. Toutefois, plusieurs paramètres influencent de façon considérable la qualité des mesures :

- la fréquence centrale à utiliser est fonction de la profondeur d'auscultation et de la résolution souhaitées, sachant qu'un compromis est nécessaire entre profondeur et précision ;
- la nature des structures recherchées et celle de l'encaissant (sol et sous-sol) ont une influence sur la qualité des données enregistrées et sur la profondeur d'investigation. Les particules argileuses fines créent un masque où l'onde est absorbée. La qualité des réflexions est fonction du contraste diélectrique existant entre les matériaux auscultés ;
- les réglages des antennes, préalables aux investigations, peuvent améliorer de façon sensible la qualité de l'acquisition. Des profilages réalisés avec des temps d'écoute et des réglages de courbe de gain différents ont montré une amélioration significative de la qualité des mesures ;

■ enfin, le traitement des données représente une part non négligeable de la qualité des images restituées. Ce travail peut permettre un meilleur rendu (contraste et géométrie) de la structure auscultée, mais il peut aussi être source d'artefacts, comme l'amplification du bruit dans la partie inférieure des profils.

Le radar géologique possède donc un large éventail d'applications, de la reconnaissance géologique au contrôle de travaux de terrassement. Toutefois, sa mise en œuvre peut s'avérer très frustrante, par exemple dès que le sous-sol renferme des particules argileuses qui vont rendre l'appareil partiellement, voire totalement aveugle.

***Remerciements.** Les auteurs remercient M. Xavier Dérobert, du LCPC de Nantes, pour leur avoir fait partager ses connaissances théoriques et techniques et apporté une aide précieuse à la rédaction de cet article.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CARIOU J., CHEVASSU G., CÔTE Ph., DÉROBERT X., LE MOAL J.-Y., Application du radar géologique en génie civil, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **211**, **1997**, pp. 117-131.

CHAZELAS J.-L., LEPAROUX D., HOLLIER-LAROUSSE A., A test site for geophysical methods, *Proc. EEGS 3rd Meet. Environ. Eng.*, **1997**, pp. 387-390.

DANIELS D.J., *Subsurface-penetrating radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, **1996**, 300 p.

GRANDJEAN G., GOURRY J.-C., BITRI A., Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications : study on test site, *J. Appl. Geophys.*, **45**, **2000**, pp. 141-156.

LEPAROUX D., *Mise au point de méthodes radar pour l'auscultation structurale et texturale de milieux géologiques très hétérogènes (modélisation, migration, expérimentation)*, Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, **1997**.