

Un site test « radar » pour le génie civil urbain : quelques exemples d'utilisation

J.-L. CHAZELAS
P. CÔTE
X. DÉROBERT

Laboratoire central
des ponts et chaussées
Centre de Nantes
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Résumé

Le site test géophysique du LCPC est en service depuis cinq ans. Il a été conçu pour reproduire, dans un environnement totalement contrôlé, des objets ou obstacles divers susceptibles d'être rencontrés dans les sous-sols urbains. Dès sa conception, le site a été adapté principalement au contexte des techniques radars. Le besoin essentiel du génie civil urbain dans lequel est inscrit ce site concerne en effet la détection, la localisation et la caractérisation d'obstacles et d'objets enfouis et non pas la caractérisation des matériaux du sous-sol. En tant qu'outil pour la profession, il a été logiquement utilisé, depuis, pour des besoins de tests ou comparaisons d'appareils, de validation de méthodes de mesures ou de modélisations. Après une description du site lui-même et de sa construction, des exemples d'utilisations expérimentales, pédagogiques ou numériques sont présentés.

Mots-clés : site test, radar, génie civil urbain.

Numerical modelling AGPR test site for urban civil engineering : some use

Abstract

The geophysical test site of the LCPC has been in service for 5 years. It was conceived to reproduce the objects or likely various obstacles met in urban grounds, in a completely controlled environment. From its design, the site was especially adapted to the context of radar-based techniques. The main needs for the urban civil engineering in which this site intends to provide an experimental field relates to the detection, localization and characterization of hidden obstacles and not the soil characterization. As a tool opened to the profession, it has been logically used for needs such as tests or comparisons of devices, validation of measurement techniques or modelling. After a description of the site and its building process, experimental and numerical examples are reported.

Key words : test site, GPR, urban civil engineering.

Introduction

La réalisation de travaux de génie civil en zone urbaine nécessite, plus qu'en rase campagne, une reconnaissance préalable du sous-sol. Les caractéristiques mécaniques doivent bien sûr être évaluées tant pour le dimensionnement des ouvrages que pour celui des moyens de terrassement ou de foration. Cependant, compte tenu de l'encombrement du sous-sol, la reconnaissance, l'identification et la localisation des obstacles sont trois nécessités aussi impératives : leur présence conditionne l'implantation, le tracé, voire la technologie de réalisation. La démarche normale consiste d'abord en des recherches d'archives suivies de campagnes géophysiques puis, selon les besoins, des sondages et des prélèvements. Dans la phase de construction, certaines méthodes géophysiques peuvent encore contribuer au bon déroulement des travaux : par exemple pour le suivi de la tête d'un forage dirigé depuis la surface.

Les méthodes géophysiques ne répondent encore que partiellement aux trois exigences : certains types de sols sont encore difficiles à pénétrer et l'identification des objets n'est que très rarement possible. Lorsque le sol s'y prête, la localisation est souvent possible mais les précisions actuelles ne sont pas toujours compatibles avec les exigences de chantiers. Dans le cadre du Projet national microtunnel (PNM) ce souci s'est donc traduit par une réflexion sur les voies d'amélioration des méthodes géophysiques pour le génie urbain.

Faire des progrès dans les méthodes géophysiques peut prendre divers chemins : application de nouveaux principes physiques, création de nouveaux équipements plus puissants, plus rapides, plus adaptés, création de nouvelles méthodes de traitement des données. L'expérimentation est indispensable dans tous ces cas et comprend des essais en laboratoire en phase très préliminaire pour vérifier qu'un principe physique envisagé est pertinent, des mesures sur modèle bien contrôlé pour aider à la modélisation numérique ou pour évaluer les performances d'un matériel, des validations sur site réel enfin pour évaluer certains paramètres d'influence ou valider l'efficacité d'un développement dans les conditions opérationnelles. Les membres du PNM ont donc souhaité la création d'un site test en conditions contrôlées qui permette de réaliser des mesures reproductibles, avec des sols encaissants bien identifiés et une connaissance parfaite des objets à détecter. La réalisation en a été confiée au Laboratoire central des ponts et chaussées. Après quatre ans de fonctionnement, il a paru intéressant de présenter quelques études types qui ont pu y être réalisées. Au préalable nous en rappellerons la conception.

Conception et consistance du site test

La conception du site test a tenté de répondre à l'un des besoins essentiels des travaux souterrains de génie urbain : le repérage des accidents risquant d'être rencontrés tant dans le domaine géologique qu'anthropique.

Il convenait donc que le site comporte différents types de sols, des interfaces entre les sols ainsi que des obstacles divers tels que tuyaux ou blocs rocheux. Puisque le site devait être « connu et bien contrôlé » seuls des sols très bien définis ont été retenus : les sols dits « anthropiques », mélange de sols divers et de déchets minéraux ou organiques n'ont pas été retenus. En effet ils sont très difficilement caractérisables, non reproductibles et surtout évolutifs, ce qui aurait rendu le site non pérenne.

Une seconde famille d'objectifs a dirigé la création de ce site. Elle concerne les possibilités d'usage :

- offrir un site pour des conditions connues et bien contrôlées, donc simples ;
- permettre la comparaison de la réponse des méthodes selon les encaissants ;
- comparer des méthodes et des procédés entre eux ;
- étalonner des procédés par rapport à une référence fiable donc durable dans le temps.

Il convient enfin de préciser qu'après les premières études, une contrainte de coût avait été fixée : environ 650 000 F de 1996 (100 000 €).

Il n'existe pas de méthode de reconnaissance en mesure de répondre globalement à l'ensemble des besoins posés par les travaux de génie urbain. Tout l'Art de la reconnaissance consiste donc à relier un ensemble de techniques à un ensemble de besoins. Dans la famille des besoins qui visent à déterminer les caractéristiques géotechniques des matériaux, la géophysique intervient de manière indirecte en délimitant le zonage d'une caractéristique physique.

La panoplie des techniques géophysiques aptes à fournir des renseignements géométriques sur la composition du sous-sol, avec une résolution compatible avec les objets du génie civil est assez restreinte. Les techniques basées sur la propagation d'ondes électromagnétiques hautes fréquences y occupent une place prépondérante. C'est pourquoi la conception même du site test ainsi que son utilisation depuis ont été majoritairement guidées par les techniques radar.

Le site test a été construit sur le centre de Nantes du LCPC. La figure 1 en présente les vues schématiques en plan et en coupe verticale. Une fosse de 35 m de long a été creusée perpendiculairement à une déclivité, la pente de fond étant parallèle à la pente du terrain naturel de manière à faciliter l'évacuation des eaux. Sur le profil en travers, le fond de fouille est de 5 m de large et la pente des flancs est à 2 pour 1. La profondeur est comprise entre 3,80 et 4,80 m. De ce fait, la largeur en surface est comprise entre 19 et 21 m. Le sol naturel est un micaschiste très altéré, certainement très absorbant pour les ondes électromagnétiques.

Un grand soin a été apporté à la protection contre les eaux, eau du sol comme eaux de pluie. Le fond de fouille est en pente longitudinale de 5 %. En fond de fouille, une couche de gravier 14/20 de 10 cm d'épaisseur posé sur un premier géotextile habillant toute la fosse forme drain de fond. Dans ce drain ont été implantés latéralement deux tubes PVC de drainage longitudinal de Ø 10 cm, qui permettent d'ailleurs des travaux avec des antennes radars de forage. Enfin l'ensemble, flancs et fond, a été recouvert d'une grille plastique et d'un second géotextile destinés à ramener les eaux vers le drain de fond.

Quatre sols ont été retenus pour le remblaiement :
- un limon très peu argileux (valeur au bleu compris entre 0,72 et 2) ;

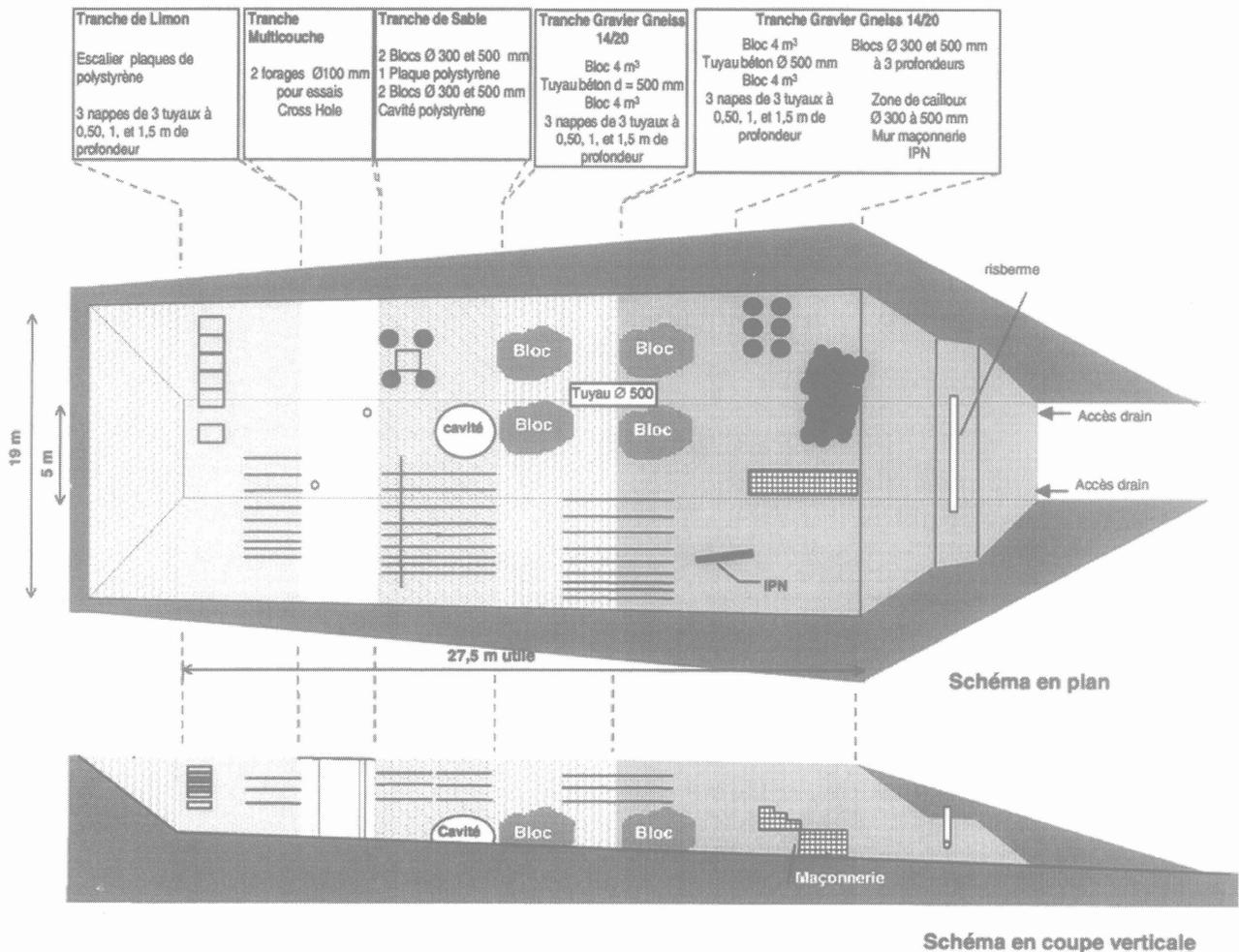


FIG. 1 Présentation schématique du site test.

- un sable calcaire 0/2 dont on a éliminé les indurations gréseuses ;
- un gravier gneiss concassé 14/20 ;
- une grave reconstituée gneiss 0/20 de la même carrière.

Les sols ont été organisés en quatre tranches verticales sur la base d'une trame de 5 m (voir Fig. 1) : en amont du site, la tranche de limon de 5 m de large, puis la tranche de sable, et la tranche de gravier, également de 5 m chacune, enfin la tranche de grave de deux trames de 5 m soit 10 m. Entre la tranche de limon et la tranche de sable, a été réalisée une tranche multicouche constituée de l'empilement de couches de 0,60 à 1,20 m des différents sols - limon, sable, gravier, grave - afin d'obtenir une petite zone de sols stratifiés.

La mise en place des sols a été réalisée par couches successives de 20 cm : pour chaque sol, un casier était défini à l'aide de planches et rempli en reculant depuis le fond de la fouille. Une fois tous les casiers remplis, les planches étaient enlevées pour permettre le compactage de l'ensemble de la couche : cette technique a permis d'assurer des frontières presque verticales entre les différentes tranches, la zone de perturbation étant limitée à 30 cm de part et d'autre. La bonne conduite de ce compactage a été surveillée de manière absolument continue et vérifiée à l'aide d'essais à la Dynaplaque par le laboratoire de la DDE de la Loire-Atlantique.

Les objets ont été enfouis au fur et à mesure du montage de ces couches successives. La répartition de ces objets offre le plus souvent possible les mêmes situations dans des encaissements différents : par exemple un tuyau béton Ø 500 mm dans la grave et dans le sable calcaire. Certaines dispositions permettent de tester les performances optimales des matériels. Par exemple, dans la tranche de limon, on a constitué un escalier de dalles de 1 m² et de 20 cm d'épaisseur, simulant des vides pour le radar géophysique : on peut ainsi comparer les matériels testés par la profondeur de la dalle la plus basse perçue et comparer la qualité des images dans ces conditions limites. Enfin chaque tranche de 5 m de large a été divisée en 4 quadrants de manière à ménager un quadrant sans objet enfoui : ainsi les expérimentateurs peuvent étalonner la réponse de leur matériel ou de leur méthode sur le sol seul et, lorsque cela intervient, isoler dans l'image ou leurs mesures l'interface avec le fond du site. La figure 1 montre la répartition et la variété de ces objets.

Le site est protégé des venues d'eau de pluie par une couche d'étanchéité bitumineuse armée constituée en place (bitume pur, géotextile, bitume pur, gravillonnage).

Lorsqu'on crée un site test de ce type, on peut avoir deux attitudes par rapport à la disponibilité des informations : soit on tient le secret de manière à réellement contrôler les performances des matériels et méthodes

testées comme par exemple sur le site créé par GDF pour des usages plus comparatifs (Fournier, 2001), soit, au contraire, on met le maximum d'informations à disposition de tous. C'est la seconde attitude qui a été adoptée : au cours du chantier, toutes les caractéristiques géométriques du site ainsi que toutes les coordonnées des points remarquables des objets enfouis ont été relevées par rapport à un repère géodésique local toujours disponible sur le site. Il est donc possible de se positionner à la verticale de n'importe quel objet et d'en connaître la profondeur d'enfouissement à quelques centimètres près. Toutes ces données ainsi que des échantillons du sol et les photographies en cours de chantier sont à la disposition des expérimentateurs. Enfin, les enregistrements vidéo ont été montés pour constituer une introduction aux utilisateurs. Cela leur permet de bien comprendre la teneur du site et donc d'optimiser leurs travaux.

3

Capacités et potentiel du site test

Ce chapitre présente quelques études types de techniques radars, dont nous rappelons le principe.

Une investigation radar consiste à émettre depuis une antenne un bref signal temporel (de l'ordre de la nanoseconde). Ce signal se propage dans le terrain. Quand l'impulsion électromagnétique rencontre une discontinuité, une partie de l'énergie est rétrodiffusée et un signal se propage alors vers l'antenne réceptrice. L'enregistrement temporel des signaux rétrodiffusés constitue une *trace radar* (Fig. 2). Cette trace radar correspond à une position du couple antenne émettrice-antenne réceptrice. Le déplacement sur la surface du sol de ce couple d'antennes permet de générer un ensemble de *traces radars* qui, juxtaposées, constituent alors la *coupe temps* (image 2D avec en abscisses le déplacement et en ordonnées le temps d'écoute). Cette coupe temps est donc une image déformée des discontinuités rencontrées par l'onde : la signature d'objets ponctuels est une hyperbole, les pentes ne sont pas

justes et les formes des objets ne sont pas directement identifiables.

En dehors des techniques radars, différentes méthodes électromagnétiques basse fréquence ou électriques ont été mises en œuvre sur le site (radio magnéto-tellurique, EM 31, panneaux électriques...). Ces méthodes plus intégrantes que le radar différencient très bien les matériaux de constitution, elles peuvent donc démontrer sur ce site leur aptitude au zonage et ce dans un contexte exclusif de matériaux alluvionnaires.

3.1

Formation pédagogique

Le site est devenu un outil pédagogique incontournable pour le réseau technique des LPC dans le cadre de formations radars. La connaissance exacte des géométries et des matériaux permet de comprendre les phénomènes de propagation mis en œuvre à travers la théorie électromagnétique, et aide à la prise en main de matériels, puis à l'apprentissage du traitement des données.

La figure 3 montre un exemple de coupe temps – ou profil radar – réalisé à l'aide d'une antenne GSSI, de fréquence centrale 400 MHz, dans la tranche de sable calcaire. La connaissance du milieu permet de faire correspondre les hyperboles successives aux différentes canalisations présentes dans la fosse. On note sur le profil que la nature des canalisations (trois séries de trois canalisations, une en métal, une en PVC remplie d'eau et une en PVC vide, à trois profondeurs différentes) influe notablement sur la forme et l'amplitude des réflexions.

Cette image met en évidence une erreur que l'on peut commettre lors d'investigations dédiées à la localisation de canalisations en site urbain. Il est surprenant de constater que la réflexion principale provenant de la canalisation en PVC remplie d'eau, en position centrale pour chaque profondeur apparaît décalée par rapport

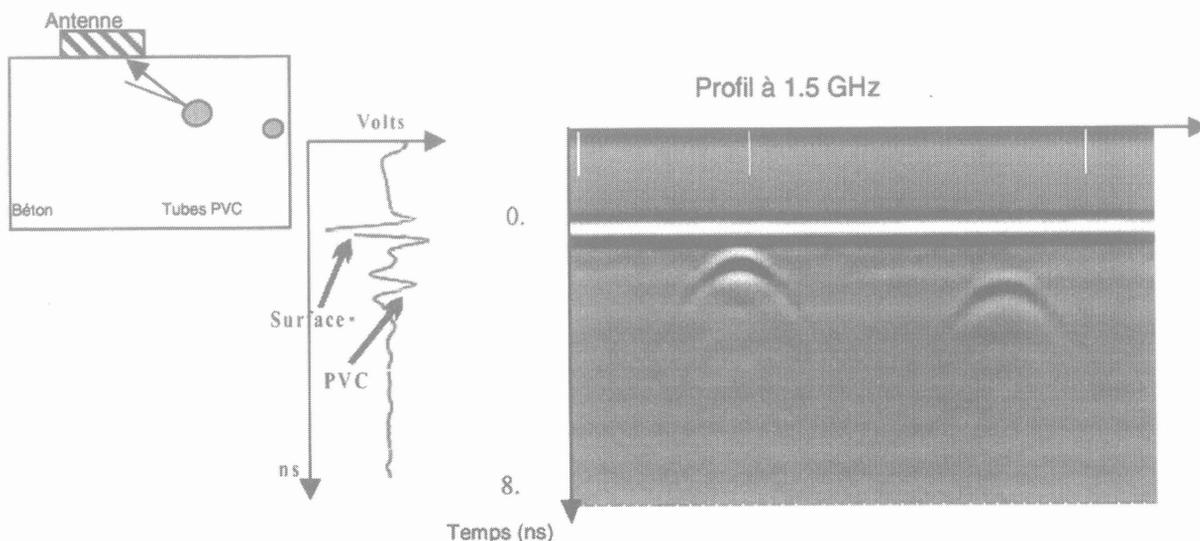


FIG. 2 Schéma de principe de la génération d'un signal radar. De gauche à droite : position de l'antenne à un instant donné sur un bloc test en béton ; signal enregistré pour cette position ; la juxtaposition des signaux obtenus lors du déplacement de l'antenne construit le profil radar.

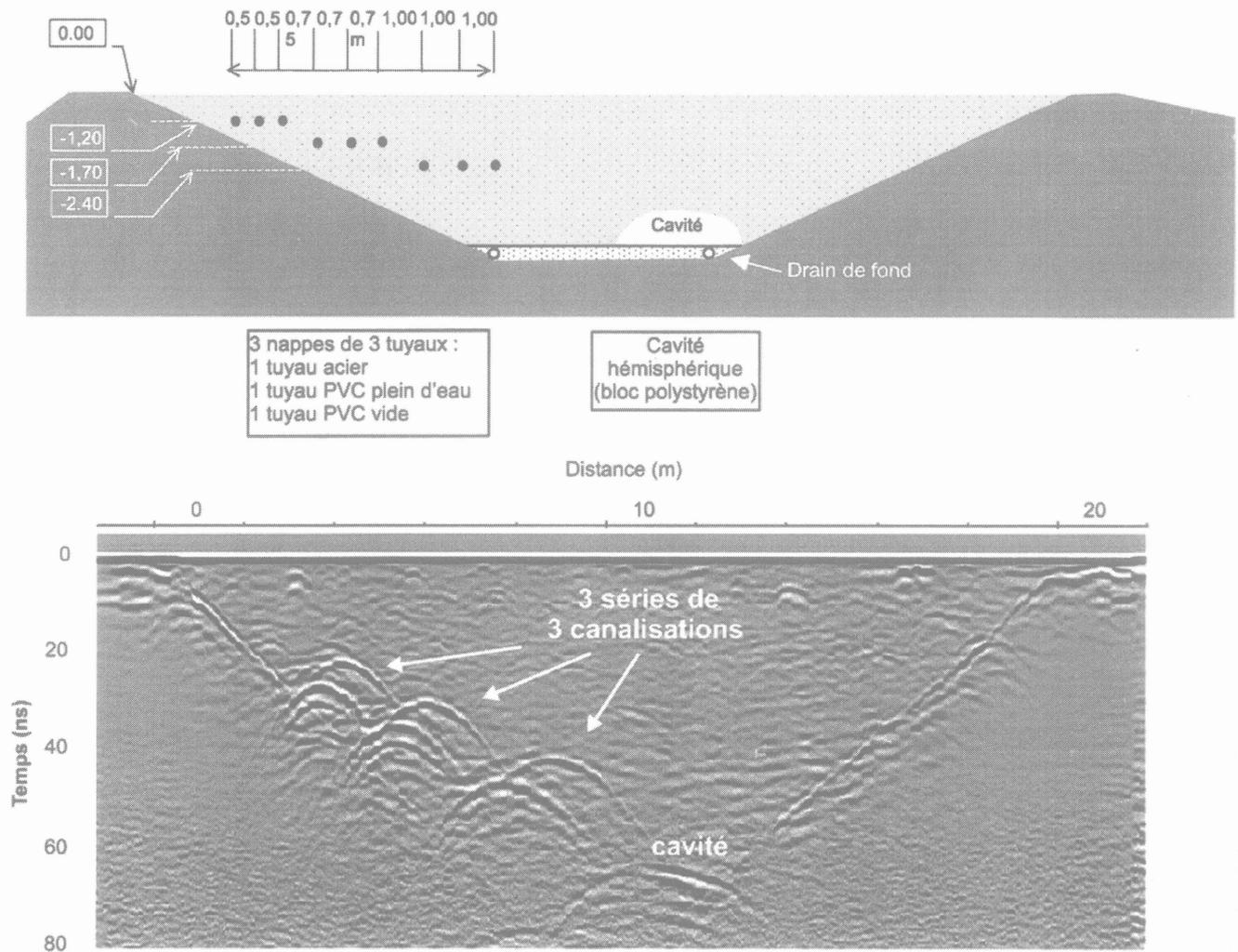


FIG. 3 Profil radar réalisé dans la tranche de sable calcaire (2 quadrants aval) à 400 MHz (source : LRPC d'Autun).

aux autres tuyaux et ne correspond pas à la surface supérieure du tuyau mais à sa surface inférieure. Suivant les réglages employés, il est alors facile de se tromper en détectant la canalisation à une profondeur plus importante. Physiquement, ce phénomène s'interprète par la forme cylindrique de la canalisation et par son contenu. La face supérieure de la canalisation qui est exposée aux rayonnements électromagnétiques et qui diffracte l'énergie vers l'antenne réceptrice présente une « surface équivalente radar » beaucoup plus faible que celle de la face inférieure. La forme de cette dernière a pour effet de focaliser l'énergie rétrodiffusée. De plus, la présence d'eau retarde suffisamment l'écho réfléchi en fond de canalisation pour pouvoir le dissocier de l'écho réfléchi sur la face supérieure de la canalisation. On constate donc, pour chaque série de canalisations, deux hyperboles décalées d'un temps de 5,8 à 6 ns sur le profil radar. Ce phénomène est beaucoup moins net avec la canalisation vide car la vitesse des ondes dans l'air est trop rapide pour dissocier l'écho inférieur de l'écho supérieur (décalage de 0,65 ns).

Cet exemple illustre les possibilités d'enseignement que l'on peut tirer d'un tel outil, tant pour des chercheurs que pour des praticiens ou des gestionnaires urbains.

3.2

Test de méthodes

Le test et la validation de méthodes de reconnaissance non destructives constituent les objectifs majeurs de ce site test. Ils sont envisagés pour valider des méthodes standards ou innovantes ainsi que pour tester la complémentarité de plusieurs techniques d'auscultation.

3.2.1

Radar à saut de fréquences

Parallèlement aux recherches menées sur les systèmes impulsifs, la technique radar à saut de fréquences est étudiée depuis de nombreuses années dans le domaine géophysique principalement pour augmenter la dynamique des signaux (la dynamique est le rapport entre la puissance émise et le plus petit niveau de puissance détectable dans le bruit) et donc les profondeurs d'investigation (Kong et By, 1995 ; Stickley *et al.*, 2000).

Le principe consiste à utiliser un analyseur de réseau, comme émetteur et récepteur radar, et des antennes larges bandes. Une impulsion synthétique est

reconstruite dans le domaine temporel (à l'aide d'une transformée de Fourier inverse) à partir d'émissions successives à fréquence fixe transmises à l'antenne d'émission, en balayant la bande passante complète des antennes par sauts de fréquences. L'intérêt majeur de cette technique vient de la possibilité de contrôler une bande de fréquence ultra-large. Ceci permet d'améliorer la résolution des signaux, et d'obtenir une dynamique supérieure à celle d'un radar impulsif équivalent en augmentant le rapport signal sur bruit. Comme un analyseur de réseau offre une large bande de fréquences d'utilisation, des auscultations profondes ou de sub-surface selon les besoins peuvent être réalisées en choisissant la bande passante des antennes.

En collaboration avec le LCPC, une antenne ultra-large bande de type Vivaldi de bande supérieure à la décade (150 MHz-3 GHz) a été développée au Laboratoire d'électronique, antennes et télécommunications (LEAT) de l'université de Nice (Guillanton *et al.*, 1998). Le système à saut de fréquences a été testé avec ces antennes dans la tranche de gneiss 14/20, en mode bi-statique (les antennes d'émission et de réception sont dissociées), sur la bande de fréquence 150 MHz-3 GHz avec 401 sauts de fréquences, pour un temps d'écoute de 70 ns.

La figure 4 montre tout l'intérêt d'une telle technique : on y constate une résolution très fine (on peut distinguer en surface une couche de sable d'environ 10 cm posée sur tout le site) et une profondeur d'investigation importante (avec une fréquence centrale de l'ordre de 1,3 GHz, on détecte le fond de la tranche ainsi que le drain en pied de remblai). Enfin, on distingue parfaitement les neuf canalisations. L'effet décrit plus haut est ici très bien illustré, particulièrement sur le niveau le plus bas des groupes de canalisations.

3.2.2

Cartographie radar

Un autre type d'exploitation des coupes temps radar est de plus en plus utilisé : la cartographie horizontale des objets détectés avec rattachement à un référentiel connu. A partir de plusieurs profils radars parallèles, il est possible de reconstruire des cartographies horizontales à différentes profondeurs. Cette technique de traitement correspond au besoin réel des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage de pouvoir positionner des événements dans un repère qui leur est propre. C'est

une aide précieuse pour établir une évaluation ou un diagnostic correct de l'état de leur patrimoine.

La figure 5 montre un exemple d'un tel traitement réalisé par la société SchlumbergerSema, division Streetlog (F92-Montrouge).

Les données brutes sont positionnées dans l'espace puis traitées à l'aide de techniques de traitement des signaux 3D : filtrages verticaux et horizontaux, puis migration 3D en tenant compte des différents offsets (distances émetteur-récepteur). Le résultat peut alors être présenté sous forme de cartographies 3D, c'est-à-dire une succession de cartes horizontales à différentes profondeurs. Ces informations peuvent alors être intégrées dans un système d'information géographique.

3.2.3

Technique radar en forage

Une des applications visées est la reconnaissance à l'avancement dans les travaux souterrains. Les choix technologiques actuels s'orientent vers la réalisation d'un forage unique à l'avancement des tunneliers et la valorisation de ce forage par une série de mesures géophysiques complémentaires.

Dans ce cadre, la technique radar en forage tient une part importante et repose sur la conception d'antennes de forage directionnelles dotées d'une large bande passante. L'aspect directionnel constitue un enjeu important. La plupart des antennes de forage présentent par construction une symétrie radiale. Les hétérogénéités détectées ne peuvent alors être localisées en azimut. Le site peut aider dans le test et la mise au point de ces antennes grâce à l'existence de deux drains sub-horizontaux en fond de fosse (voir Fig. 1). Ils sont accessibles depuis la partie basse du site au-delà de la risberme. Ils constituent donc éventuellement une simulation de forages horizontaux. Les hétérogénéités à détecter depuis ces drains sont les objets noyés dans le site au cours du remblaiement. La performance des antennes peut être aussi évaluée en tentant de détecter la surface du site depuis le drain.

La figure 6 présente un exemple de profil radar réalisé à 500 MHz par l'équipe géophysique du LERM, dans le drain situé du côté des blocs et cavités, avec une antenne directionnelle orientée vers le haut. Le premier écho radar de forte amplitude correspond à l'interface sol-air au niveau de la risberme (surface du

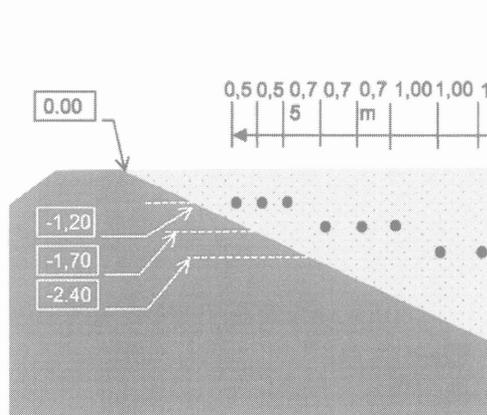
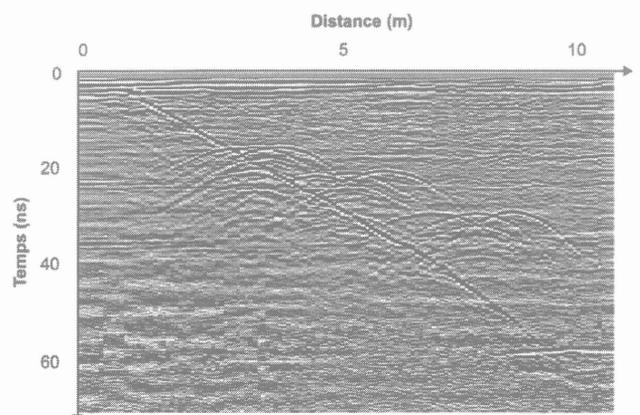


FIG. 4 Profil radar à saut de fréquence dans la tranche de gneiss 14/20 avec l'antenne ETSA A0 de fréquence centrale 1,3 GHz.



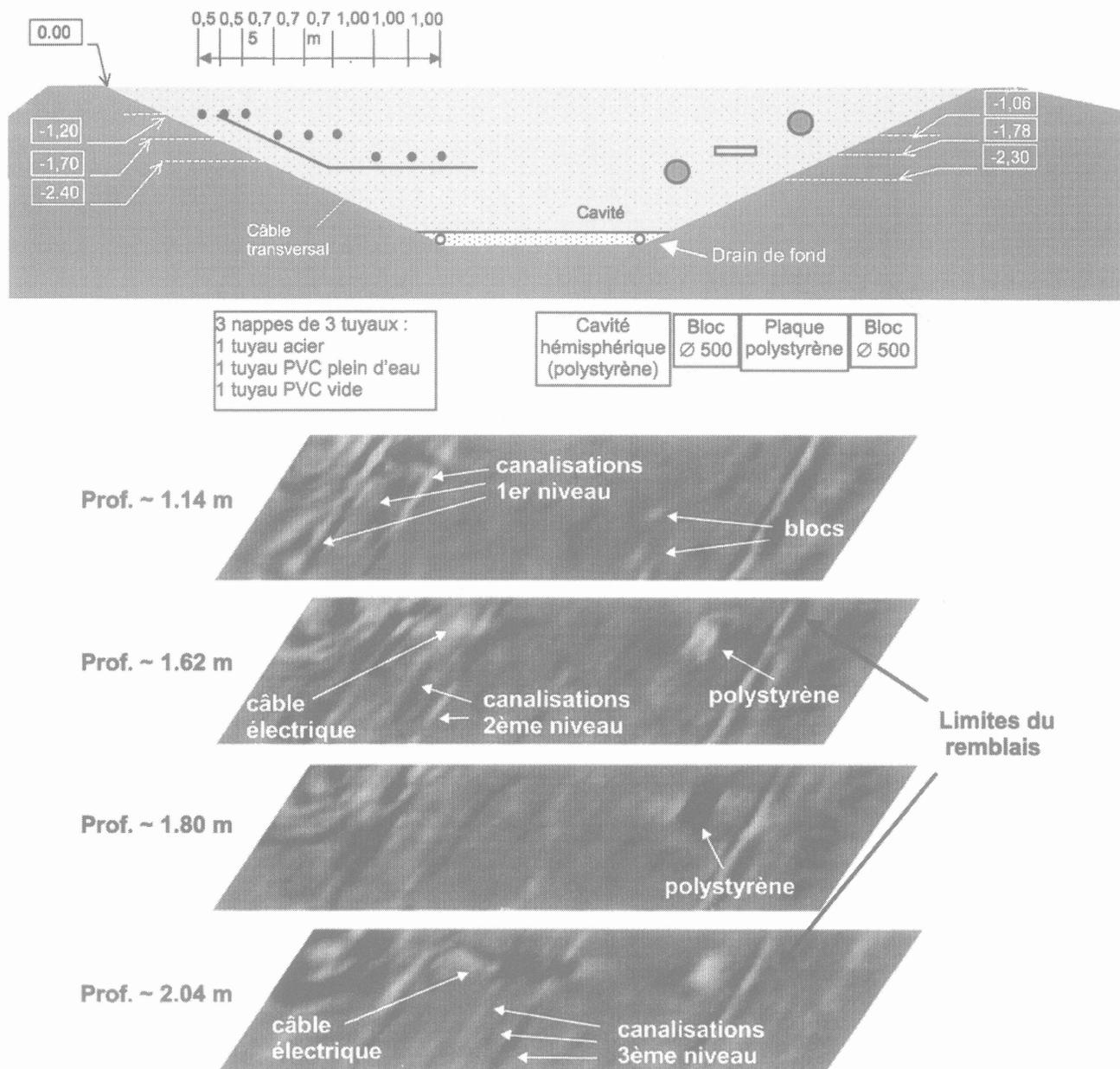


FIG. 5 Cartographies Streetlog (coupes horizontales), à 200 MHz, dans la tranche de sable calcaire (2 quadrants amont), pour différentes profondeurs.

site-test à ce niveau. Cf. Figs. 1 et 6). Cette antenne forage s'avère donc en mesure de détecter une interface sol-air à une distance ici de l'ordre de 2 mètres du forage.

3.3

Techniques de traitement et interprétations

Les techniques de traitement des données ont pour fonction d'améliorer le rapport signal sur bruit afin de mieux faire ressortir l'information. Elles sont très similaires à celles utilisées dans le domaine de la sismique réflexion : sommation durant l'acquisition, filtres passe-bandes, gain, migration et déconvolution (Yilmaz, 1987).

- La sommation est utilisée pour améliorer le rapport signal sur bruit pendant (ou après) l'acquisition.
- Les filtres passe-bande servent à éliminer des réflexions et résonances dans l'image.

- La déconvolution permet d'améliorer la résolution temporelle en compressant l'impulsion et en éliminant les échos multiples.

- La migration (dont un exemple est donné plus loin) est utilisée pour éliminer les diffractions hyperboliques et réorienter les pentes réelles des réflecteurs inclinés.

La validation des techniques de traitement des données ou la prise en main de celles-ci passe par l'utilisation de données expérimentales sur sites parfaitement connus et composés de matériaux homogènes et pérennes.

Une des techniques de traitement la plus couramment employée pour des objets enterrés ponctuels (comme les canalisations) est la migration. Son objectif est de transformer les coupes temps en coupes-profondeur et donc de visualiser l'espace réel. La particularité de la technique illustrée dans l'exemple de la figure 7 est d'inclure dans l'algorithme de migration l'existence

Schéma en coupe verticale sur la risberme

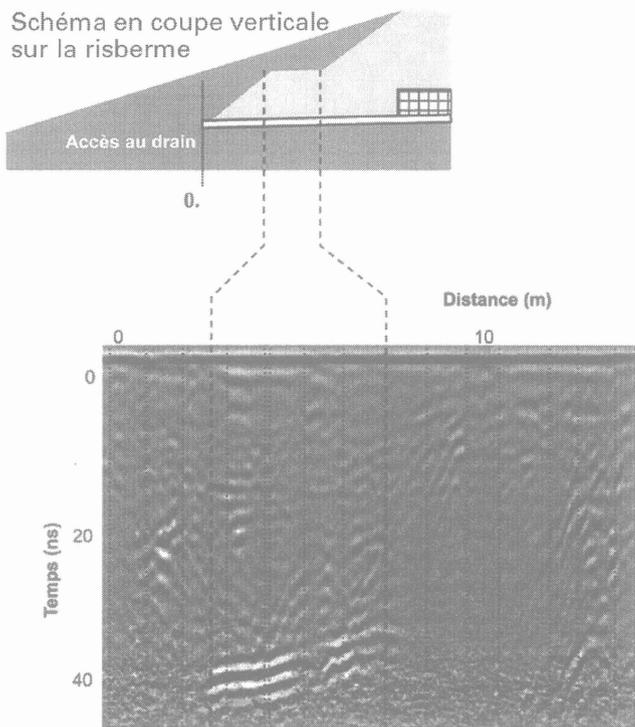


FIG. 6 Profil radar réalisé à 500 MHz en forage (source LERM) depuis un drain horizontal.

d'offsets non nuls. Plusieurs passages, avec des offsets variables, au-dessus des cibles génèrent des coupes temps différentes (à cause de l'offset) et complémentaires. Seul le passage dans l'espace réel permet de sommer les informations issues de ces différentes auscultations. Le rapport signal à bruit s'en trouve alors nettement augmenté comme cela est visible sur l'exemple de la figure 7 où les coupes temps mesurées ont été bruitées artificiellement (Leparoux *et al.*, 2001). L'image des objets enterrés n'apparaît pas sur l'exemple de coupe temps bruitée alors que la sommation des images migrées permet de visualiser clairement, dans l'espace réel, les objets enterrés.

Cet exemple illustre sommairement tout l'intérêt des techniques de traitement associées aux mesures radar. Le très grand nombre de données générées assez aisément par cet outil autorise l'application de nombreuses techniques de traitement dont bon nombre sont issues de la prospection sismique. Ces traitements permettent d'une part d'améliorer considérablement les coupes temps en fonction des cibles recherchées (diverses techniques de filtrage) et d'autre part de transférer l'imagerie dans l'espace réel de manière à interpréter plus sereinement des images parfois complexes.

Les essais de ces différentes techniques sur le site test permettent de confronter les algorithmes à des données réelles expérimentales constituant ainsi une deuxième étape de validation après des essais sur données synthétiques.

3.4

Modélisations numériques

L'intérêt des techniques de modélisation numérique est double. En premier lieu, elles permettent de proposer une technique prédictive de la réponse d'une inves-

tigation radar dans un contexte donné, à partir de la connaissance de caractéristiques électromagnétiques du milieu environnant, de la géométrie et de la position des objets à détecter. Par ailleurs, elles permettent de générer des données destinées à tester, et valider des techniques de traitement, de migration ou d'inversions numériques (dont l'objet est de reconstruire une image aussi proche que possible du modèle choisi).

Ces modèles numériques de propagation doivent faire la preuve de leur aptitude à reproduire la réalité. La modélisation numérique des milieux s'appuie toujours sur une vision très simplifiée de l'organisation réelle des matériaux. C'est pourquoi la confrontation à des données issues de chantiers réels est souvent délicate. Il s'avère donc nécessaire de comparer les résultats issus de modélisations numériques à des mesures réelles sur des sites dont la géométrie et les matériaux constitutifs peuvent être parfaitement décrits.

Différentes techniques de modélisation ont été testées sur le site test géophysique du LCPC. Bitri et Grandjean (1998 ; Grandjean *et al.*, 2000) ont été les premiers à valider leur technique de modélisation spectrale 2D sur différentes tranches de ce site (Fig. 8). Cette modélisation de la tranche « sable calcaire » (voir Fig. 3) simule une propagation incluant l'aspect absorption intrinsèque des matériaux (ici mentionné en termes de facteur de qualité).

Réjiba a développé une modélisation 3D en différences finies dans le domaine temporel permettant de prendre en compte la polarisation des antennes (Rejiba, 2002). La figure 9 montre une image issue de cette modélisation, toujours dans la tranche de sable calcaire, avec une source d'émission positionnée dans l'air, un pas de discrétisation spatiale isotrope de 4 cm, une permittivité relative sans pertes de 6 (donc sans atténuation intrinsèque), et des caractéristiques électromagnétiques différentes pour chaque type de canalisation.

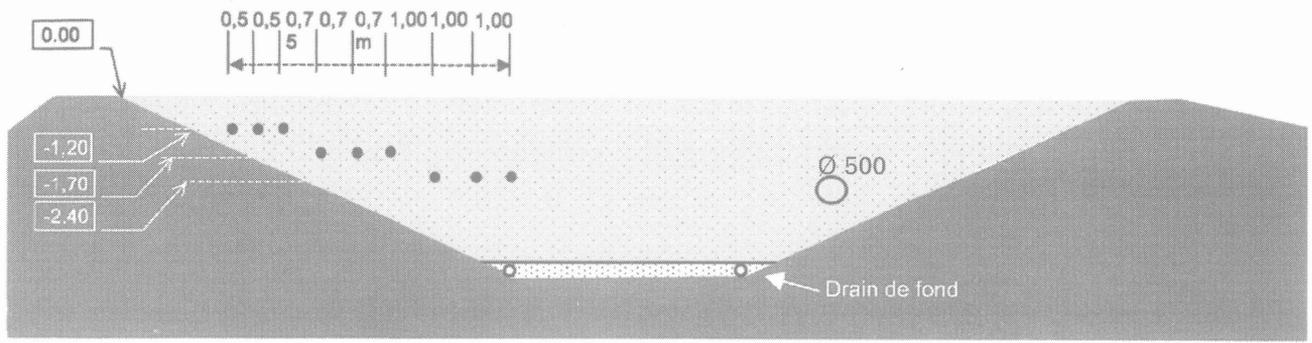
Ces deux exemples de modélisation, fondés sur des hypothèses radicalement différentes (2D ou 3D, atténuation intrinsèque ou pas...) conduisent à des représentations synthétiques des mesures réelles présentées sur la figure 3. Dans les deux cas, les données réelles sont assez fidèlement reproduites. L'écart à ces données réelles permet de mieux cerner les caractéristiques principales des différents algorithmes et donc de quelle manière ils autorisent des prédictions fiables ou des tests de traitements de données réalistes.

Pour l'instant, les principales difficultés rencontrées par les techniques de modélisation de la propagation des ondes radars dans un milieu atténuant et dispersif, portent sur la prise en compte de permittivités complexes des matériaux fonctions de la fréquence, ainsi que sur la prise en compte des lobes réels de rayonnement des antennes suivant le matériau encaissant.

4

Conclusion

Le site test géophysique, construit au LCPC-Centre de Nantes, a reçu de nombreuses applications depuis son achèvement en 1996. En tant que site au service de la profession, il a accueilli un grand nombre d'équipes françaises ou étrangères. Il a permis de tester de nouvelles techniques, de nouvelles méthodes de mesure ou



3 nappes de 3 tuyaux :
 1 tuyau acier
 1 tuyau PVC plein d'eau
 1 tuyau PVC vide

Canalisation béton
 (diam.: 500 mm)

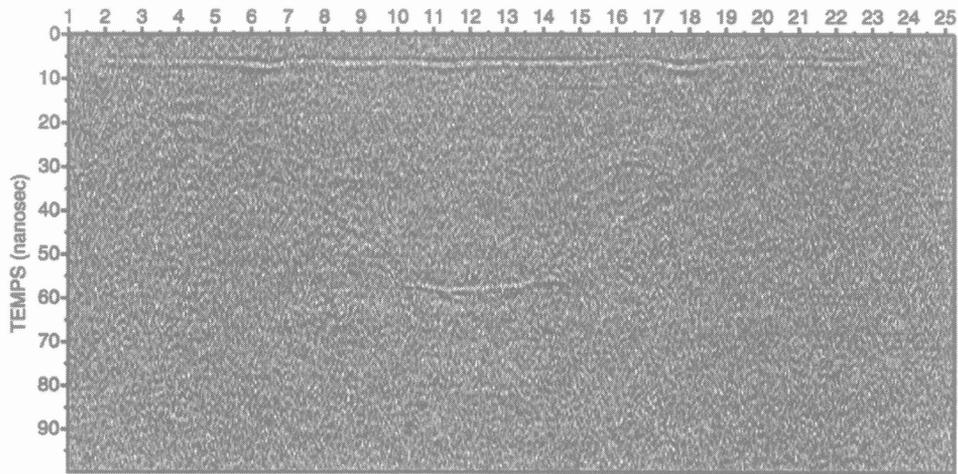
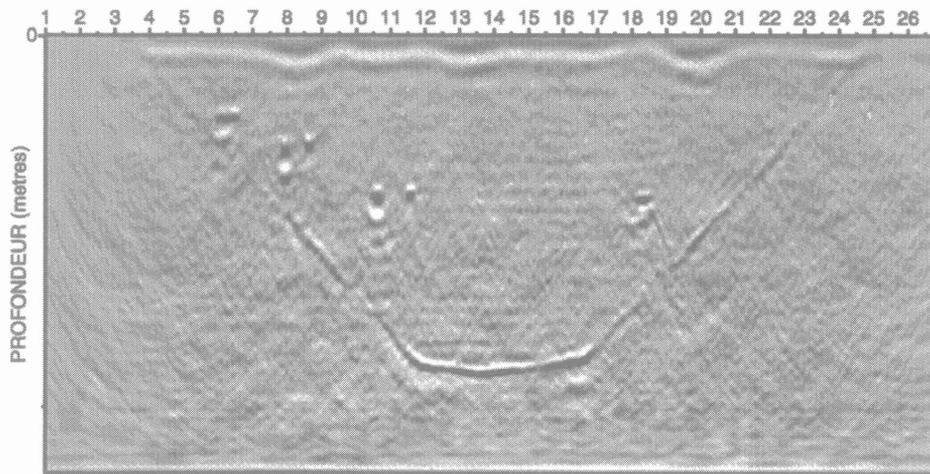


Image bruitée du Site Test - offset=0.75m - Frequence=500Mhz



Images migrees et additionnees pour 6 offsets

FIG. 7 Haut : coupe verticale schématique dans la tranche de graviers 14-20 ; milieu : exemple de coupe temps avec offset bruitée artificiellement ; bas : résultat de la sommation de 6 images migrées issues de 6 coupes temps bruitées à offset différents.

de traitement. En tant que site contrôlé et pérenne et il autorise des comparaisons inter-méthodes et la validation de modélisations. Il a enfin servi de support à des actions de formation initiale ou continue.

Il est ouvert librement à la profession pour toutes les opérations qui ne sont pas strictement commerciales. Les mondes industriels et académiques peuvent y trouver un moyen aisé d'essai, de contrôle ou de validation.

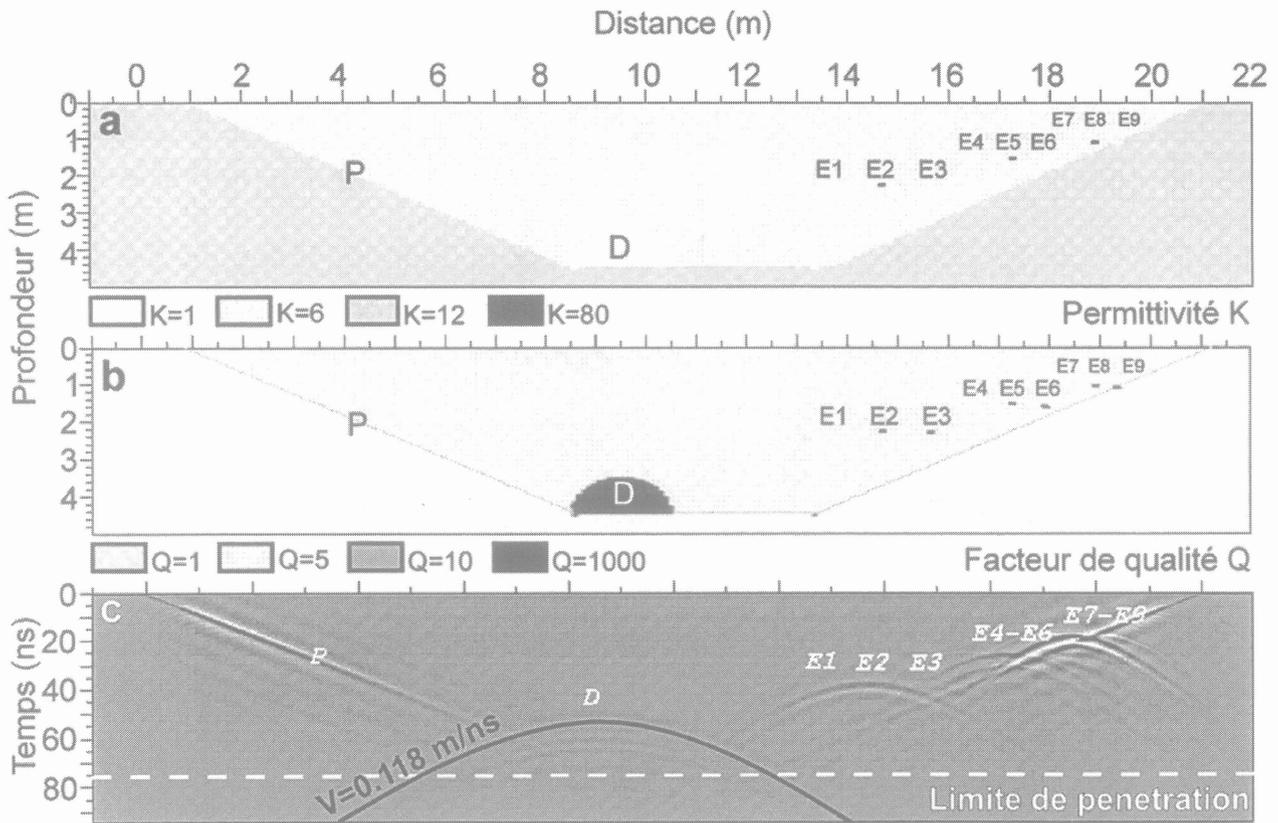


FIG. 8 Permittivités relatives (a) et facteurs de qualité (atténuation intrinsèque) (b) utilisés dans la modélisation 2D (c) réalisée à 500 MHz dans la tranche de sable calcaire (source BRGM).

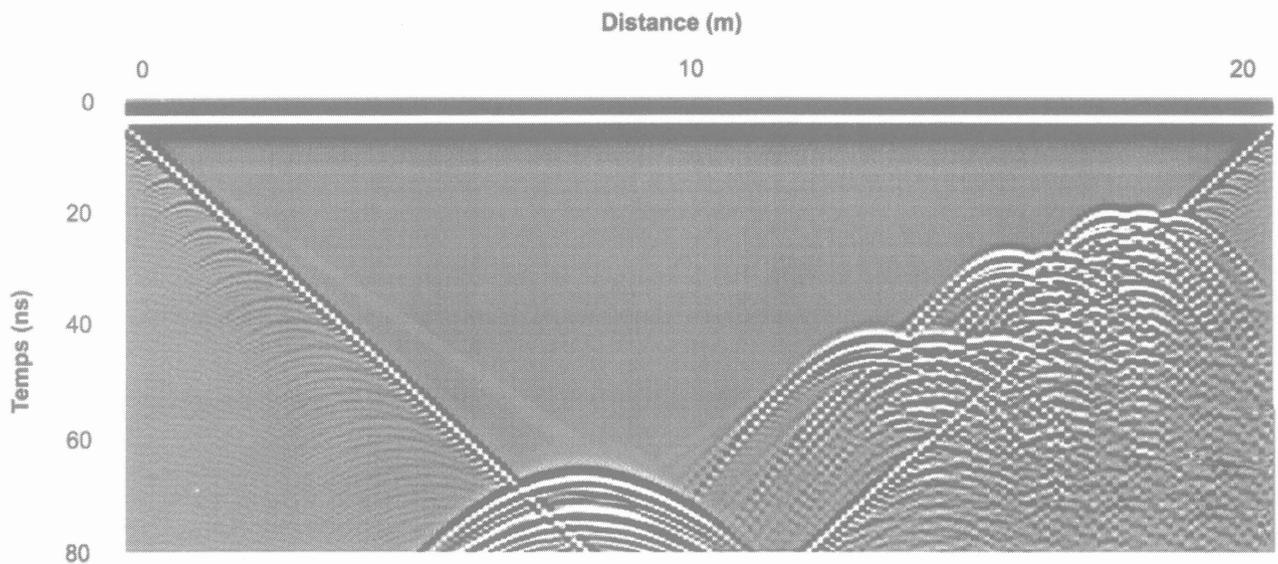


FIG. 9 Modélisation (sans atténuation intrinsèque) d'un profil radar réalisé pour la tranche de sable calcaire à une fréquence centrale de 300 MHz, avec prise en compte 3D des interactions (source : F. Réjiba).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la FSTT qui, via le Projet national micro-tunnel, a permis d'initier la réalisation de ce site, ainsi que les équipes qui ont bien voulu nous fournir certaines des données présentées dans cet article (P. Morin, LRPC d'Autun ; J.-L. Garciaz, LERM ; F. Colomina, SchlumbergerSema ; G. Grandjean, BRGM ; F. Rejiba, université Paris VI).

Enfin, ce site réserve des marges de progrès dans la détection d'hétérogénéités par méthodes radar ou autres ; certains objets enfouis dans les matériaux les plus conducteurs n'ont toujours pas été détectés depuis la surface.

Bibliographie

- Bitri A., Grandjean G. – « Frequency-wave-number modelling and migration of 2D GPR data in moderately heterogeneous dispersive media ». *Geophysical Prospecting*, vol. 46, 1998, p. 287-301.
- Fournier P. – « Localisation d'ouvrages par technique radar ». *Journées radars*, Nantes, 30-31 mai 2001.
- Grandjean G., Gourry J.-C., Bitri A. – « Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications : study on a test site ». *Journal of Applied Geophysics*, vol. 45, 2000, p. 141-156.
- Guillanton E., Dauvignac J.-Y., Pichot Ch., Cashman J. – « A new design tapered slot antenna for ultrawide-band applications ». *Microwave and Optical Technical Letter*, vol. 19, n° 4, 1998, p. 286-289.
- Kong F.N., By T.L. – « Performance of a GPR system which uses step frequency signals ». *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, 1995, p. 15-26.
- Leparoux D., Gibert D., Côte Ph. – « Adaptation of prestack migration to multi-offset GPR data ». *Geophysical Prospecting*, vol. 49, 2001, p. 374-386.
- Réjiba F. – *Modélisation de la propagation d'ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes, Application au radar sol*. Thèse de doctorat de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris VI, mars 2002.
- Stickley G.F., Noon D.A., Cherniakov M., Longstaff I.D. « Gated stepped-frequency ground penetrating radar ». *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, 2000, p. 259-269.
- Yilmaz Ö. – « Seismic data processing ». *Investigations in Geophysics n° 2*, Society of Exploration Geophysicists, 1987.