

Performances de radars d'auscultation des chaussées sur des sites tests

Xavier DÉROBERT

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Section Reconnaissance et géophysique

Cyril FAUCHARD

Doctorant
Section Reconnaissance et géophysique

Philippe CÔTE

Directeur de recherche
Chef de la section Reconnaissance et géophysique
Division Reconnaissance et mécanique des sols
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Erwan GUILLANTON

Docteur
Laboratoire d'Électronique, antennes et télécommunications (LEAT)
Université de Nice-Sophia Antipolis

RÉSUMÉ

Ces dernières années, la technique d'auscultation radar est devenue une méthode à grand rendement, couramment employée dans le domaine des chaussées pour la mesure des épaisseurs de couches traitées et non traitées. Dans ce contexte, le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) travaille à l'amélioration des performances de cette technique d'auscultation non destructive. L'existence de plusieurs sites tests routiers au LCPC, parfaitement adaptés à des méthodes d'évaluation non destructives (END), permet de valider la mise au point de celles-ci.

La première étude a porté sur le développement d'une méthode d'étalonnage radar non destructive pouvant se substituer à l'utilisation de sondages carottés, de façon à connaître les vitesses de propagation des ondes électromagnétiques (EM) dans les couches de matériaux. Les premières mesures expérimentales d'épaisseurs sur sites tests montrent des précisions suffisantes sur les deux couches supérieures de chaussée.

La seconde étude s'est intéressée à la mesure des épaisseurs de couches de roulement très minces (inférieures à 3 centimètres) par technique radar à saut de fréquences. Cette technique d'auscultation, en cours de développement en laboratoire, utilise des antennes ultra larges bandes spécialement conçues pour cette application. Les profils radars synthétiques sont comparés avec des profils radars classiques impulsionnels sur différentes structures des sites tests du LCPC et montrent la possibilité de mesurer l'épaisseur de couches de roulement très minces.

MOTS CLÉS : 22 - 61 - Couche de roulement - Épaisseur - Essai - Auscultation - Radar - Comportement - Circulation - Mesure - Non destructif - Chaussée (corps de) - Manège - Fatigue (matér.).

Introduction

La reconnaissance de l'épaisseur des couches de chaussées correspond à un besoin d'investigation auquel les gestionnaires routiers sont fréquemment confrontés. En effet, il est nécessaire de connaître la géométrie des différentes couches composant la chaussée pour évaluer son comportement mécanique à l'état de l'infrastructure ou pour définir le type de réparation approprié.

Ces dernières années, la technologie des radars pour l'inspection des routes a évolué vers des systèmes de plus en plus rapides, utilisant de plus hautes fréquences, avec le développement de logiciels de traitement des données [1, 2]. Ce type de technologie a conduit à une technique performante d'auscultation non destructive possédant quelques avantages majeurs, comme un rythme d'acquisition élevé, des mesures quasi continues et la présentation des différentes couches sous forme cartographique.

Deux limites physiques pénalisent cependant la technique. Le besoin d'avoir des informations sur l'épaisseur des couches de béton bitumineux très mince (BBTM) n'est pas résolu par les radars impulsionnels du commerce. De plus, pour traiter les données radars, il est nécessaire de réaliser périodiquement des sondages destructifs dans la structure de la chaussée afin de remonter à la connaissance des vitesses de propagation des ondes radars des couches investiguées.

Dans ce contexte, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) travaille depuis plus de quinze ans sur les techniques radars appliquées à l'auscultation des chaussées [3]. Ces dernières années, des recherches ont été menées en parallèle sur la

mise au point d'une méthode non destructive pouvant se substituer aux sondages, ainsi que sur le développement d'un système radar à saut de fréquences capable de travailler avec une impulsion synthétique de très haute fréquence, à plusieurs gigahertz.

Le LCPC possède différents sites tests disponibles pour le développement de méthodes d'évaluation non destructives (END), certains dédiés aux chaussées. Parmi ceux-ci, figurent les pistes du manège de fatigue de structures routières destiné à tester le comportement mécanique des chaussées soumises à des contraintes dynamiques simulant le passage d'essieux lourds à des vitesses pouvant dépasser 100 km/h. Ce site test est composé de trois anneaux de 6 m de large et de 120 m de long, chacun divisé généralement en trois à quatre secteurs munis de structures de chaussées distinctes (fig. 1). La mise en place des matériaux est réalisée avec des équipements de construction conventionnels et soigneusement contrôlés [4].

À la fin des essais mécaniques, des mesures non destructives et des carottages sont possibles ; c'est pourquoi ce site test à grande échelle apparaît comme un outil idéal pour des développements et essais d'évaluation non destructive.

Mesures radars classiques sur le site du manège de fatigue de structures routières du LCPC

Chaque section a été auscultée à l'aide d'un radar classique, le modèle SIR10-A+ développé par la société GSSI, associé à une antenne blindée bistatique de 1 500 MHz (soit une paire d'antennes dans un même boîtier). Deux sections successives sont présentées sur

la figure 2a, avec le profil traité correspondant sur la figure 2b, montrant une structure composée de cinq couches. Le seul traitement réalisé est un filtrage horizontal passe-haut qui, par la diminution du niveau de bruit, révèle des couches élémentaires mises en œuvre.

Le principe repose sur la transmission d'une impulsion électromagnétique dans la structure auscultée par l'intermédiaire d'une antenne. L'onde se propage, en s'atténuant, et se trouve partiellement réfléchi à chaque interface rencontrée. L'antenne réceptrice enregistre les différents échos réfléchis jusqu'à la surface. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet de construire une coupe-temps (dont l'unité de temps est la nanoseconde), souvent présentée avec une échelle de couleurs, ou de niveaux de gris, corrélée aux amplitudes des signaux et qui donne des informations géométriques sur la structure auscultée.

Les échos radars les plus importants proviennent de l'interface entre la couche de roulement et la couche supérieure de base en grave-bitume (GB) et de l'interface entre la dernière couche de base et la couche de grave non traitée (GNT). Cela est dû aux contrastes diélectriques importants entre ces matériaux. Sur la partie gauche des profils, la fréquence centrale trop basse des impulsions, correspondant à une longueur d'onde trop importante, ne permet pas de détecter la couche mince de roulement composée de 2,5 cm de BBTM.

Cet exemple renseigne sur la construction de cette section, où l'on constate que la couche de base (GB) a été déposée en plusieurs couches élémentaires de 10 à 15 cm d'épaisseur. Les échos sont principalement dus à la différence de compaction entre le fond de la couche supérieure et le haut de la couche inférieure, puisque chaque couche présente un gradient de compactage à la

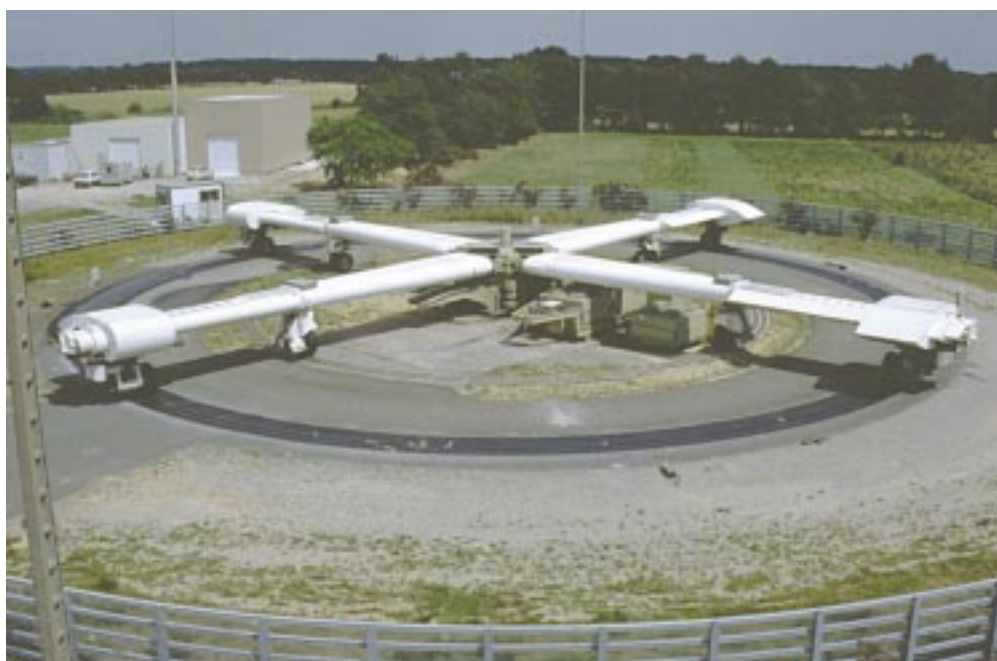
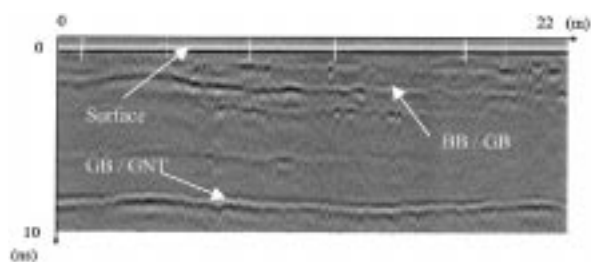


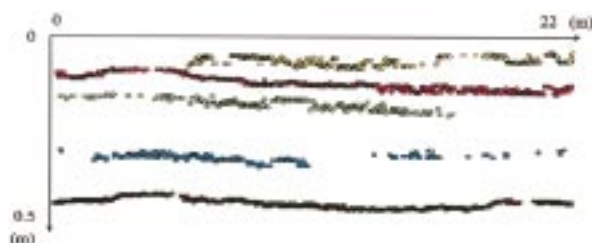
Fig. 1 - Le manège de fatigue de structures routières du LCPC.

BBTM 2,5cm	
	BB 6cm
	BB 7cm
	GB 10cm
	GB 15cm
	GB 15cm
	GNT

a. Schéma de la structure de chaussée d'une des sections du manège de fatigue.



b. Profil radar brut réalisé à 1,5 GHz.



c. Résultat du pointé des couches consécutif au traitement des données radars.

Fig. 2 - Auscultation à l'aide d'un radar classique.

mise en œuvre. Ponctuellement, des échos de plus forte amplitude indiquent des débuts de défauts de liaison, au niveau de l'interface, indiquant ainsi des signes de faiblesses mécaniques de la part de la structure après un grand nombre de chargements.

Pour pouvoir connaître l'épaisseur des différentes couches le long du profil radar, il est nécessaire de réaliser un sondage destructif (un carottage) sur la structure investiguée. L'information locale de la vitesse des ondes électromagnétiques, obtenue à partir de la mesure des épaisseurs sur la carotte, permet à un logiciel semi-automatique de pointer les échos correspondant à chacune des interfaces détectées et de présenter l'évolution de l'épaisseur des couches constituant la structure de chaussée le long de la zone auscultée (fig. 2c).

Cette méthode nécessite la réalisation ponctuelle de sondages destructifs pour étalonner les signaux radars et ne permet pas la détection de couches minces, par des antennes radars classiques de trop basses fréquences.

Technique du « point milieu commun »

L'objet principal de cette section de l'article est de décrire une méthode radar non destructive et ponctuelle pouvant donner une estimation de la permittivité et de l'épaisseur de couches traitées de chaussées et d'éviter ainsi tout sondage destructif. Plusieurs méthodes sont décrites dans la littérature utilisant le mode monostatique [5, 6], c'est-à-dire une seule antenne à la fois émettrice et réceptrice. Nous présentons ici une méthode bistatique utilisant deux antennes de 1,5 GHz de fréquence centrale (fig. 3).

On considère que les premières couches de matériaux traités sont des milieux non absorbants et que les variations de vitesse des ondes électromagnétiques, sont

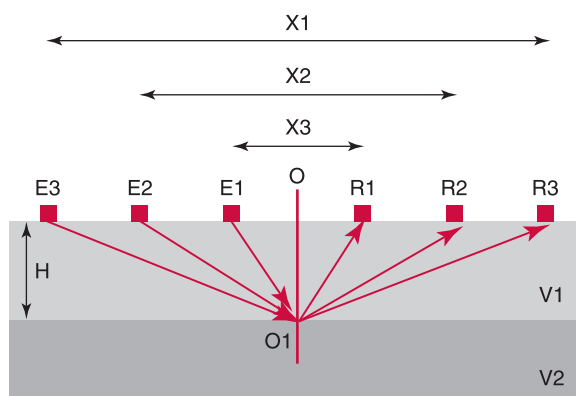
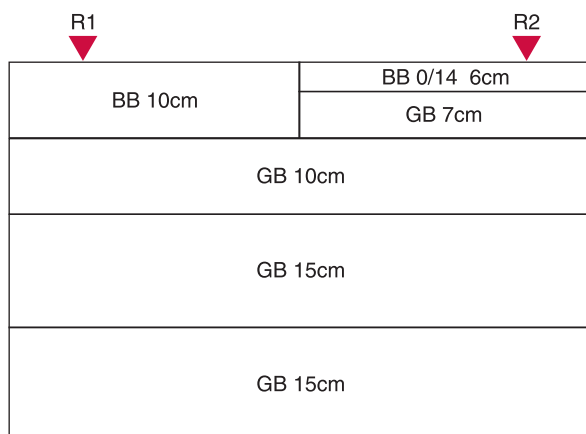


Fig. 3 - Configuration des mesures « point milieu commun ».
 E_i : position des antennes d'émission ;
 R_i : position des antennes de réception.

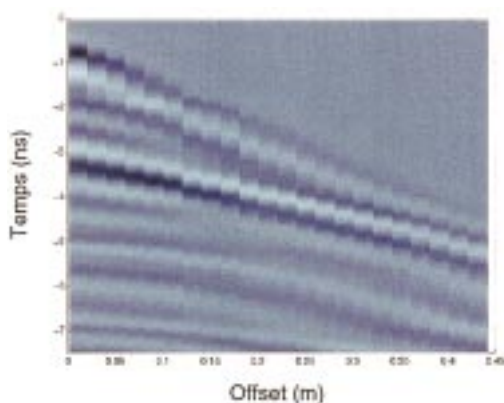
négligeables. Comme en sismique réflexion, la technique du « point milieu commun » (PMC) est employée en pointant les temps de retard des échos correspondant à chaque couche pour chaque espacement entre antennes (offset). Ces retards sont ensuite inversés selon l'équation hyperbolique de la correction de vitesse définie par Castle [7].

Les mesures PMC ont été réalisées sur deux types de structure du manège de fatigue du LCPC (fig. 4a), avec un échantillonnage d'acquisition de deux centimètres. Les enregistrements présentent les échos successifs en ordonnée en fonction de l'offset, en abscisse. Ceux-ci présentent la forme d'hyperboles dont la pente des branches est corrélée à la vitesse de propagation des ondes dans le matériau correspondant (fig. 4b).

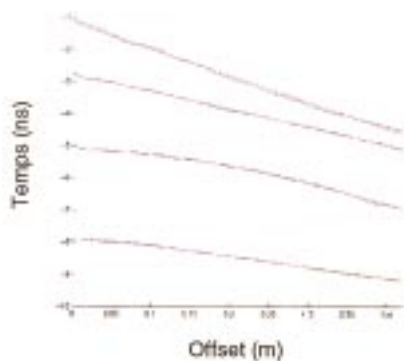
Après avoir collecté les données, les signaux radars sont sommés puis les temps d'arrivée sont pointés à l'aide du logiciel WinRad, développé par la société GSSI (fig. 4c). Les temps d'arrivée correspondant à



a. Schéma des structures de chaussées auscultées.



b. Profil PMC brut réalisé sur la structure R1.



c. Temps d'arrivée correspondant.

Fig. 4 - Auscultation par la technique « point milieu commun ».

chaque interface sont interpolés suivant la forme d'une hyperbole, puis sont inversés dans le but d'extraire la permittivité relative réelle ainsi que le temps d'arrivée des deux premières couches pour un offset nul (soit l'incidence normale).

La partie réelle de la permittivité relative et l'épaisseur de chaque couche sont calculées successivement à l'aide d'une équation classique récurrente, comme cela est décrit dans le domaine de la sismique réflexion [8].

Pour ce qui concerne l'inversion, les offsets ne devraient pas excéder le double de la profondeur inves-

tiguée, même si Castle propose une formule mathématique spécifique pour de larges offsets. En effet, lorsque les offsets dépassent cette limite, le pointé des temps d'arrivée devient beaucoup moins précis et l'inversion numérique ne converge plus.

Les résultats d'inversion sont présentés dans les tableaux I et II. L'inversion numérique converge vers un minimum de la fonction coût à minimiser correspondant à un compromis entre épaisseur et vitesse de propagation. À partir des quelques essais expérimentaux, réalisés sur les divers sites tests du LCPC, on peut considérer que les précisions obtenues sont de l'ordre de ± 3 mm pour la première couche et $\pm 8-10$ mm pour la seconde couche, les erreurs de calcul étant cumulatives en fonction des couches successives.

TABLEAU I
Inversion PMC de la section R1

Matériaux	Épaisseur (cm)		
Sect. R1	Attendue	Carotte	Inversion
BB	10	10	10,2
GB	10	9	9,8

TABLEAU II
Inversion PMC de la section R2

Matériaux	Épaisseur (cm)		
Sect. R2	Attendue	Carotte	Inversion
BB	6	6	5,8
GB	7	8	7,7

Ces expériences de faisabilité montrent l'intérêt d'une telle méthode non destructive d'étalonnage des vitesses de propagation radar. En effet, les précisions recherchées par les gestionnaires d'ouvrages se situent généralement au-dessus de 0,5 cm, suivant la taille des agrégats et le type de couche traitée.

Système radar à saut de fréquences

Indépendamment des recherches menées sur les systèmes impulsifs, la technique radar à saut de fréquences est étudiée depuis plusieurs années dans le domaine géophysique, principalement dans le but d'atteindre des niveaux de dynamique plus importants (la dynamique est le rapport entre la puissance émise et le plus petit niveau de puissance détectable dans le bruit) afin d'accroître les profondeurs d'investigation [9, 10].

Le système employé pour l'émission et la réception des ondes radars est un matériel de laboratoire appelé analyseur de réseau. Il présente l'avantage d'offrir une large bande de fréquence d'utilisation ; ainsi les auscultations profondes ou de sub-surface peuvent être réalisées suivant le choix de la bande de fréquence des

antennes et des diverses applications. Il s'est opéré un transfert de la géophysique vers l'inspection des ouvrages en béton armé, à travers l'étude d'antennes ultra large bande centrées autour de 3-5 GHz, dans le cadre d'un projet européen [11].

Une impulsion synthétique est reconstruite à partir d'un signal à saut de fréquences, correspondant à un balayage en fréquences, qui est transmis à l'antenne d'émission. L'intérêt majeur de cette technique vient de la possibilité de contrôler une bande de fréquence ultra large autour de la fréquence centrale choisie et d'obtenir une dynamique supérieure que celle d'un radar impulsif équivalent.

Un analyseur de réseau Hewlett Packard (HP), modèle HP8753C, a été utilisé pour différents tests. Le signal synthétique vient d'un signal continu à saut de fréquences, avec une puissance de sortie maximale de 20 dBmW, un nombre de fréquences variable (201, 401, 801 ou 1 601) et une bande de fréquence de 300 kHz-6 GHz. La bande passante des filtres peut être choisie entre 10 et 3 000 Hz et contrôle le niveau de bruit électronique interne. Plus ce filtre est étroit, plus le niveau de bruit est faible ; mais ce résultat est obtenu au détriment de la vitesse d'acquisition du système.

Antennes

En collaboration avec le LCPC, une antenne ultra large bande a été développée au Laboratoire d'Électronique, Antennes et Télécommunications (LEAT) – UPRESA – CNRS 6071. Une des activités principales de ce laboratoire de l'université de Nice-Sophia Antipolis porte sur la conception d'antennes microrubans, depuis l'étude théorique, numérique puis expérimentale, et plus généralement sur des recherches en électromagnétisme. L'antenne ultra large bande, développée pour des applications du domaine des chaussées (fig. 5), fait partie de la famille des antennes Vivaldi [12]. Elle est réalisée à partir d'une technologie triplaque et possède une largeur de bande supérieure à la décade

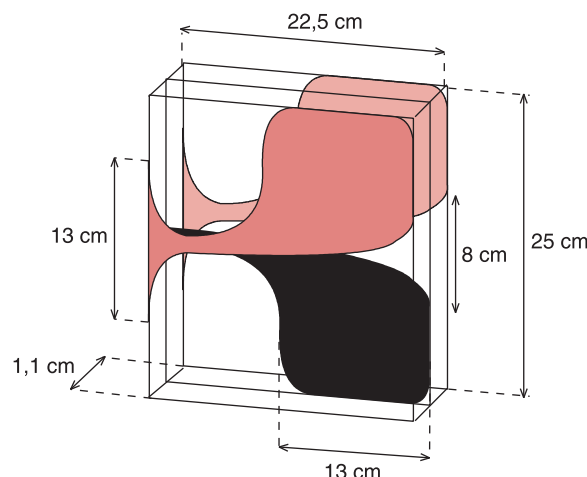


Fig. 5 - Forme et dimensions de l'antenne ultra large bande.

(une décade pour une bande de fréquence signifie que $F_{\max} = 10 \cdot F_{\min}$), soit 458 MHz-10 GHz.

L'aspect elliptique des parties métalliques accolées à deux substrats isolants, constituant ainsi la fente rayonnante, est communément employé pour ce type d'antennes. La configuration triplaque entraîne un niveau de polarisation croisée faible, qui est dû à la symétrie du champ électrique au sein du substrat. L'antenne a été réalisée avec un substrat de faible permittivité ($\epsilon_r = 1,07$) proche des caractéristiques électromagnétiques de l'air [13].

La forme de ce type d'antenne présente le grand avantage d'être optimisée pour des applications dans le domaine des chaussées. En effet, elle est adaptée à l'air (cela signifie que le niveau de réflexion des ondes électromagnétiques dans l'antenne elle-même a été minimisé) et peut être employée en mode bistatique, avec un écartement entre antennes très faible, sans dommage vis-à-vis du couplage entre antennes, permettant l'acquisition de mesures précises.

Mesures dans le domaine temporel

Dans une première étape, ces antennes ont été testées en laboratoire en mode bistatique sur plusieurs échantillons de bétons bitumineux avec un analyseur de réseau. Différents paramètres ont été étudiés comme la largeur de bande, l'offset entre antennes, la hauteur des antennes ou la forme de l'impulsion synthétique. Ces tests en laboratoire avaient pour objectif d'obtenir un compromis entre la forme d'une impulsion courte idéale, sans bruit électronique interne, et une vitesse d'acquisition rapide.

Ces tests, réalisés sur une plaque métallique, ne montrent aucune incidence de la largeur de bande des filtres sur la forme des impulsions électromagnétiques. L'explication provient du faible niveau de dynamique requis pour une telle détection.

Une seconde série de tests a été réalisée avec des antennes GSSI de 2 GHz, qui présentent l'avantage de séparer l'électronique hyperfréquence des antennes métalliques. La figure 6 montre les signaux temporels obtenus sur un échantillon de béton bitumineux de 7 cm, pour des réglages de l'analyseur de réseau identiques. Ces signaux sont directement corrélés avec la largeur de bande des antennes correspondantes et montrent les limites de performances des antennes GSSI à très hautes fréquences (celles-ci ayant été conçues pour avoir une fréquence centrale autour de 2 GHz seulement). En effet, on constate que celle-ci laisse rayonner une impulsion dont la longueur d'onde est plus grande que celle de l'antenne Vivaldi.

Comparaison avec un radar impulsif

La deuxième étape de cette recherche porte sur des mesures radars dynamiques. L'acquisition des données est effectuée à l'aide d'un logiciel développé au LCPC à partir d'un micro-ordinateur portable. Les antennes

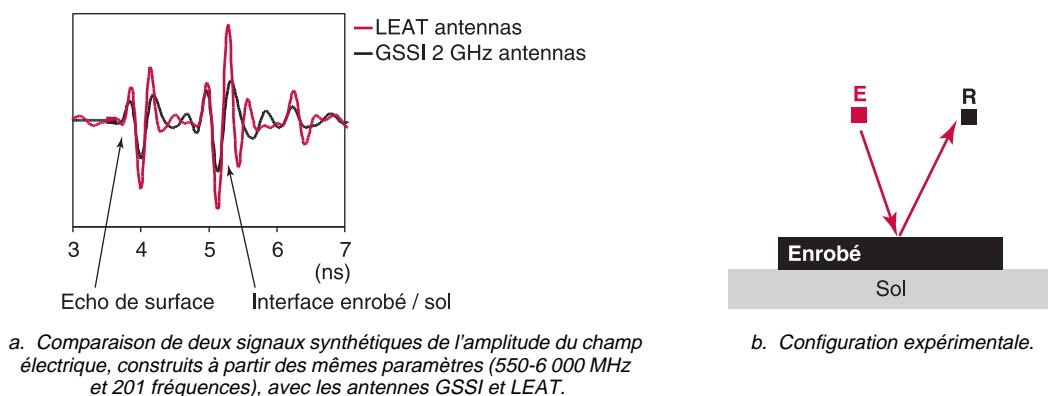


Fig. 6 - Signaux temporels obtenus sur un échantillon de béton bitumineux de 7 cm.

sont fixées à un écartement constant et tirées sur les différents sites tests routiers. Ainsi, de nombreux profils radars ont été réalisés sur le Manège de Fatigue comme sur le corps d'épreuve dédié aux performances radars pour des applications des chaussées. Les résultats sont comparés à des profils radars classiques (matériel GSSI avec des antennes de 1,5 GHz).

Site test du LCPC dédié aux mesures radars

Un site test a été conçu dans le but de pouvoir qualifier les divers matériels radars pouvant exister dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) et dédiés à la mesure des épaisseurs des couches de chaussées. Quatre structures différentes sont proposées, avec l'insertion de cinq plaques métalliques au sein du corps d'épreuve de façon à confirmer électromagnétiquement des interfaces particulières (fig. 7).

Le profil synthétique a été enregistré avec un temps d'écoute de 8 ns et approximativement deux signaux par seconde. Une comparaison est proposée avec un profil impulsionnel à 1,5 GHz (fig. 8).

L'objectif principal de cette étude est focalisé sur la résolution des impulsions radars. On note, pour le profil à 1,5 GHz, avec des longueurs d'onde de 8 cm, l'impossibilité de pointer les temps d'arrivée des échos

correspondant à la couche de 6 cm de BB, localisée par le réflecteur A, sur la structure de gauche du corps d'épreuve. À l'inverse, avec une longueur d'onde deux fois plus faible, le profil synthétique dissocie parfaitement l'interface BB/GC de l'écho de surface et montre ainsi la potentialité de détection de couches minces. Cet avantage est limité par une plus faible pénétration des ondes électromagnétiques dans ce type de matériaux : en effet la plaque métallique B située entre la GC et la GNT n'est pas détectée à 33 cm de profondeur (fig. 8a), bien que la coupe-temps ait été traitée de façon à amplifier les échos.

Tests sur les pistes du manège de fatigue de structures routières

La figure 9 présente la comparaison de profils radars réalisés sur la limite de deux sections successives d'un des anneaux du manège de fatigue de structures routières, zone identique à celle déjà présentée sur la figure 2. La couche de roulement de la section de droite est composée de 6 cm de BB reposant sur 7 cm de GB. La seconde section propose une couche de BBTM sur 10,5 cm de GB. Les paramètres radars sont inchangés (550-6 000 MHz et 201 fréquences pour le radar à saut de fréquences).

La couche de BBTM, sur la section de gauche, est parfaitement détectée par les impulsions centrées sur 3 GHz, dont les temps d'arrivée pourraient être pointés pour des mesures d'épaisseur (fig. 9a). Toutefois, l'utilisation de très hautes fréquences pour la détection de couches très minces induit des artefacts dans le profil radar sous forme d'échos multiples pouvant fausser l'interprétation des mesures.

On note, de plus, que la profondeur de pénétration à 3 GHz est plus faible puisqu'elle ne peut pas détecter l'interface des deux couches supérieures de GB, pourtant visible vers 4 ns sur le profil de droite à 1,5 GHz (fig. 9b).

Le profil radar impulsionnel a été traité sur un temps d'écoute de 5 ns, identique au profil synthétique, pour une meilleure compréhension. À cause de sa fréquence centrale plus basse, il présente un niveau de bruit supé-

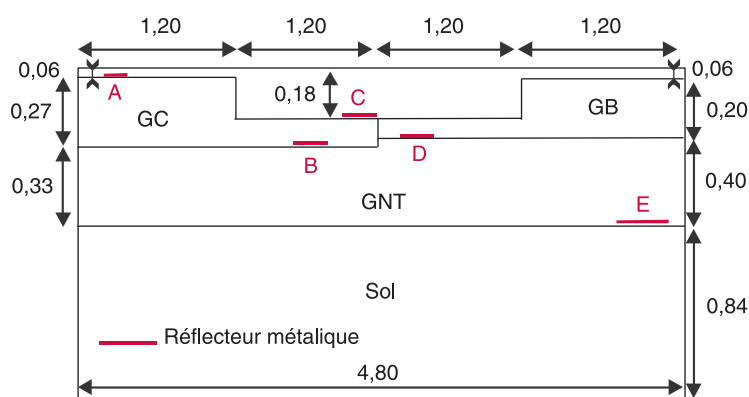


Fig. 7 - Schéma du site test radar du LCPC pour la mesure des épaisseurs de couches de chaussées. Les réflecteurs métalliques sont dénommés de A à E.

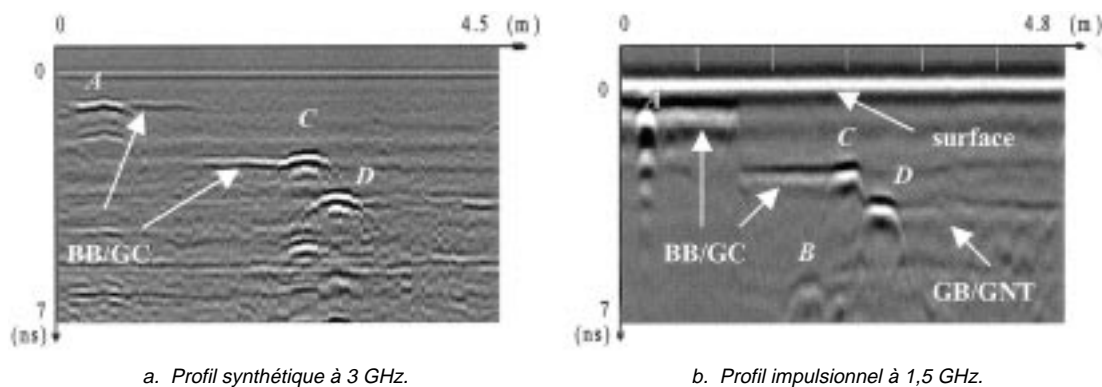


Fig. 8 - Profils réalisés sur le site test radar du LCPC.

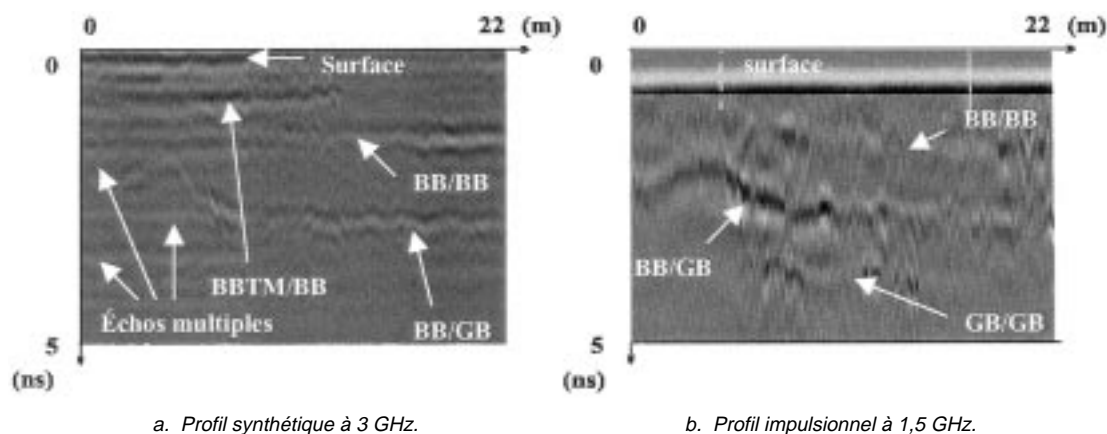


Fig. 9 - Profils réalisés sur le manège de fatigue de structures routières.

rieur et des impulsions plus longues, ce qui explique que la couche de BBTM ne peut pas être détectée dans l'écho de surface.

Conclusion

Des expérimentations radars ont été réalisées sur différents sites tests du LCPC présentant de nombreuses structures de chaussées connues.

■ Une première étude concerne une méthode d'étalement radar non destructive, basée sur une technique d'inversion numérique de mesures radars de type « point milieu commun », permettant d'éviter des sondages par carottage. Les premiers résultats sont encourageants et répondent aux critères de précision demandés par les gestionnaires de réseaux routiers. Ils demandent à être confirmés en laboratoire avant d'expérimenter cette technique sur chaussée réelle.

■ Une seconde étude s'est intéressée à la conception d'un système radar à saut de fréquences pour la mesure

d'épaisseur de couches de roulement très minces. Pour cela, un analyseur de réseau, travaillant dans la bande de fréquence de 500 à 6 000 MHz, est associé avec des antennes ultra larges bandes de plus d'une décade (450 MHz-10 GHz). Ces antennes ont été spécialement développées pour des applications routières. Toutefois, les résultats obtenus en laboratoire montrent la possibilité pour de tels types d'antennes de travailler dans d'autres domaines d'application du génie civil.

Des mesures expérimentales ont été comparées à celles obtenues avec un radar impulsionnel classique et montrent la possibilité de détecter les couches de BBTM et de mesurer leur épaisseur en montant en fréquence.

Il est donc possible d'ausculter la totalité d'une structure de chaussée depuis la couche de roulement jusqu'à la couche de forme en changeant de fréquence centrale (depuis 400 MHz jusqu'à plus de 3 GHz), tout en gardant à l'esprit que l'interprétation de données de radars reste délicate et doit être réalisée par un spécialiste radar.

Remerciements. Les auteurs souhaitent remercier toute l'équipe du LEAT, dirigée par Ch. Pichot, pour leur collaboration portant sur la conception et les essais fréquentiels des antennes ultra larges bandes, ainsi que les sections du LCPC, du domaine Chaussées, qui ont mis à notre disposition le manège de fatigue de structures routières et réalisé de nombreux sondages carotés pour nos mesures d'étalement.

- [1] MESHER D.E., DAWLEY C.B., PULLES B.C. (1996), A comprehensive radar hardware, interpretation software and survey methodology paradigm for bridges deck assessment, *Proceedings on Ground Penetration Radar Conference*, october, Sendai, Japan, pp. 353-358.
- [2] ROBERTS R.L., PETROY D. (1996), Semi-automatic processing of GPR data collected over pavement, *Proceedings on Ground Penetration Radar Conference*, october, Sendai, Japan, pp. 347-352.
- [3] CARIOU J., COLOMBEL J.-H., DELAMARRE E., CHEVASSU G., LE MOAL J.-Y. (1997), Measurement of road surface layer thickness using radar methods, *Proceedings of International COFREND Conference on NDT*, september, Nantes, France, pp. 709-714.
- [4] CORTÉ J.-F. (1996), Quelques exemples d'essais sur le manège de fatigue depuis dix ans, *Revue générale des routes et aérodromes*, **746**, décembre.
- [5] SPAGNOLINI U. (1999), Multitarget detection /tracking for monostatic ground penetrating radar : application to pavement profiling, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, **1**, pp. 383-394.
- [6] MASER K.R., SCULLION T. (1992), Automated pavement subsurface profiling using radar : case studies of four experimental field sites, *Transport Research Record*, **1344**, pp. 148-154.
- [7] CASTLE R.J. (1994), A theory of normal moveout, *Geophysics*, vol. **59**, pp. 983-999.
- [8] AL-CHALABI M. (1973), Series approximation in velocity and travelttime computations, *Geophysical Prospecting*, vol. **21**, pp. 783-795.
- [9] HAMRAN S.-E., GJESSING D.T., HJELMSTAD J., AARHOLT E. (1995), Ground penetrating synthetic pulse radar : dynamic range and modes of operation, *Journal of Applied Geophysics*, vol. **33**, pp. 7-14.
- [10] KONG F.-N., BY T.L. (1995), Performance of a GPR system which uses step frequency signals, *Journal of Applied Geophysics*, vol. **33**, pp. 15-26.
- [11] KONG F.-N., WESTERDAHL H., GELIUS L. (1998), A very wide bandwidth step frequency GPR for testing concrete re-bars, *Proceedings on Ground Penetration Radar Conference*, may, Lawrence, Kansas, USA.
- [12] LANGLEY J.D.S., HALL P.S., NEWHAM P. (1996), Balanced antipodal Vivaldi antenna for wide bandwidth phased arrays, *IEE Proceedings on Microwave Antennas Propagation*, vol. 143, **2**.
- [13] GUILLANTON E., DAUVIGNAC J.-Y., PICHOT Ch., CASHMAN J. (1998), A new design tapered slot antenna for ultrawide-band applications, *Microwave and Optical Technical Letter*, vol. 19, **4**, pp. 286-289.

ABSTRACT

The performance of pavement testing radars at test sites

X. DÉROBERT, C. FAUCHARD, Ph. CÔTE, E. GUILLANTON

In recent years, radar testing has become a widely used high-performance technique for testing the thickness of bound and unbound pavement layers. The network of Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) is engaged in work to improve the performance of this technique. The LCPC possesses a number of road test sites which are well suited to the validation of such non-destructive testing methods.

The first study involved the development of a non-destructive radar calibration technique, which avoided the use of core samples, in order to discover the speed of propagation of electromagnetic waves in layers of materials. The first experimental thickness measurements on test sites demonstrated that the two top pavement layers were measured with sufficient accuracy for the purposes of road managers.

The second study involved measurement of very thin wearing courses (less than 3 centimetres) using the frequency hopping radar technique. This testing technique, which is currently being developed in the laboratory, uses ultra wide-band antennae which have been specially designed for this application. The synthetic radar profiles have been compared to conventional pulse radar profiles for a variety of road structures on the LCPC test sites and the possibility of measuring the thickness of very thin wearing courses has been demonstrated.