

Évaluation de systèmes radar pour contrôler l'épaisseur des couches de chaussées

Jean-Michel SIMONIN

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

L'épaisseur des différentes couches d'une chaussée est un paramètre important pour l'auscultation des routes. L'utilisation des techniques radar permet la mesure de ce paramètre de façon quasi continue. En 2000, le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées a évalué les performances métrologiques des systèmes radar dont il dispose pour mieux définir leurs domaines d'application. Pour cela, les différents paramètres pouvant influencer la mesure, dans le cadre de l'auscultation des chaussées, ont été répertoriés. Diverses expériences ont été conduites afin d'évaluer l'incertitude liée à chacune de ces composantes. Ces expériences ont permis de constater que, si l'incertitude de mesure est sensiblement identique pour les différents systèmes, leurs profondeurs d'investigation, et donc leurs domaines d'utilisation, diffèrent.

En définitive, les différents systèmes radar ont été qualifiés dans leur domaine d'utilisation en s'appuyant sur la méthode d'essai LPC « Utilisation des techniques radar sur chaussées ».

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

EVALUATION OF RADAR SYSTEMS USED FOR MONITORING PAVEMENT LAYER THICKNESS

The thickness of a pavement's component layers represents a key parameter in the investigation and monitoring of roads. Use of radar techniques allows measuring this parameter under near-continuous conditions. In 2000, the network of Ponts et Chaussées regional laboratories (LPC) evaluated the metrological performance of its radar systems in order to better specify their fields of application. This effort required conducting an inventory of the various parameters capable of influencing measurement, within the scope of pavement monitoring campaigns. A number of experiments were carried out in the aim of determining the uncertainty related to each of these components; these experiments have enabled concluding that although the level of measurement uncertainty remains basically identical from one system to the next, their respective depths of investigation, and hence potential uses, do differ.

This work has also served to qualify the various radar systems by field of application through employing the LPC test method entitled "Use of pavement-based radar techniques".

FIELD: Engineering sciences.

Introduction

L'évaluation des caractéristiques structurelles résiduelles d'une chaussée nécessite la connaissance d'informations tant sur la géométrie de la chaussée que sur l'état des différentes couches qui la constituent. La mesure de l'épaisseur des différentes couches est traditionnellement réalisée par des essais destructifs et localisés de type carottage. Depuis quelques années, les systèmes radar permettent d'estimer ces épaisseurs de façon quasi continue, avec une précision suffisante pour les gestionnaires d'ouvrages. La méthode LPC [1], publiée en 1996, précise notamment les performances métrologiques que doit respecter un matériel pour délivrer des mesures de la profondeur d'une interface. En 2000, l'incertitude de différents matériels a été évaluée pour déterminer leurs domaines d'application respectifs.

Principe de l'évaluation

Le principe de mesure de la profondeur d'une interface de chaussée consiste à :

- émettre une onde électromagnétique vers la structure à étudier,
- recueillir et enregistrer l'onde électromagnétique réfléchie aux différentes interfaces,
- identifier, dans les signaux recueillis, les échos relatifs aux différentes interfaces, et particulièrement l'écho de surface de la chaussée,
- calculer le temps de propagation de l'onde entre deux échos identifiés,
- convertir ces durées en distance parcourue par l'onde électromagnétique à partir de la vitesse des ondes, pour en déduire la profondeur des interfaces.

Dans un premier temps, un groupe de travail a répertorié les paramètres pouvant influencer la mesure. La figure 1 résume les paramètres identifiés. Ceux situés au-dessus de l'axe sont relatifs à l'incertitude d'étalonnage, ceux situés en dessous sont liés à l'incertitude d'essai.

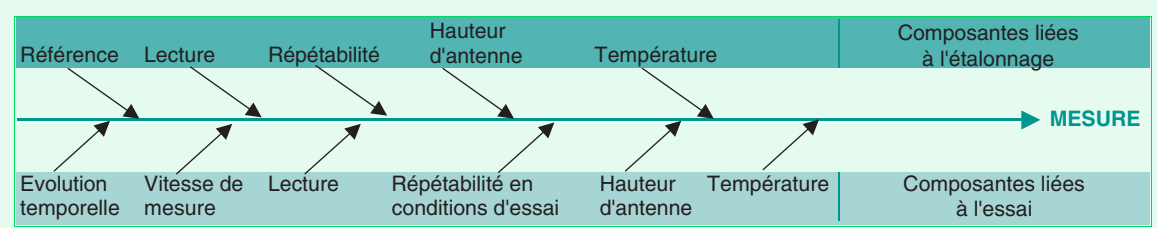


Fig. 1 - Composantes de l'incertitude de mesure d'un système radar.

Actuellement, la célérité des ondes dans chaque matériau composant la structure de la chaussée est déduite, pour chaque zone homogène de chaussée, d'une procédure de calibrage des mesures radar, réalisées en un point, corrélées aux résultats de mesures de profondeurs des interfaces d'un carottage réalisé au même point. De plus, les mesures radar sont réalisées sur une courte période, au cours de laquelle il est admissible de considérer qu'il n'y a pas de variations significatives de la température (tant du matériel que des matériaux, y compris de l'air), ni d'évolution temporelle du matériel. Dans ces conditions, les composantes liées aux températures et à l'évolution temporelle du matériel sont considérées comme négligeables.

Suite à ces réflexions, un plan d'expériences a été construit permettant d'évaluer les différentes composantes de l'incertitude de mesure : *référence*, *lecture*, *répétabilité*, *hauteur d'antenne*, *vitesse de mesure* et *répétabilité en conditions d'essai*.

L'incertitude liée à un carottage, qui constitue l'essai de *référence* en matière de mesure d'épaisseur, a été évaluée à partir d'un panel d'opérateurs qui ont estimé la profondeur des interfaces pour différentes carottes. L'incertitude de mesure d'une profondeur d'interface a été estimée à 0,5 cm, quelle que soit la profondeur de l'interface considérée.

Pour estimer les autres composantes de l'incertitude, les systèmes radar ont été testés :

- sur des plaques de différentes épaisseurs pour déterminer la résolution (*lecture*),
- sur un corps d'épreuves pour évaluer l'incertitude d'étalonnage (*répétabilité* et *hauteur d'antenne*),
- sur des sections tests sous circulation pour quantifier l'incertitude d'essai (*vitesse de mesure* et *répétabilité en conditions d'essai*).

Matériels évalués

Trois Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) sont équipés d'un véhicule comportant un système radar embarqué. Dans le domaine des chaussées, chaque laboratoire utilise deux systèmes d'antennes de fréquences centrales différentes qu'il connecte au système radar embarqué. Ainsi, six systèmes radar ont été évalués. Leurs principales caractéristiques sont décrites dans le tableau I.

TABLEAU I
Présentation des systèmes radar évalués

Libellé	Antenne	Système d'acquisition	LRPC
Rouen 1 ns	Penetradar 1 ns	Radar LPC (CECP)	Rouen
Rouen 0,75 ns	Penetradar 0,75 ns	Radar LPC (CECP)	Rouen
Autun 2 G	GSSI 2 GHz	Radar Sir10-H (GSSI)	Autun
Autun 400 M	GSSI 400 MHz	Radar Sir10-H (GSSI)	Autun
Saint-Brieuc 900 M	GSSI 900 MHz	Radar Sir2 (GSSI)	Saint-Brieuc
Saint-Brieuc 2 G	GSSI 2 GHz	Radar Sir2 (GSSI)	Saint-Brieuc

Les antennes GSSI de 400 et 900 MHz sont des antennes de contact placées à quelques centimètres au-dessus de la chaussée dans une remorque. Les autres antennes, couplées à l'air, sont portées à l'arrière du véhicule à une hauteur de quelques dizaines de centimètres. Seules les antennes Penetradar (Rouen) sont mono-statiques (l'antenne d'émission est utilisée pour la réception). Les autres systèmes proposent des antennes bi-statiques (une antenne d'émission et une antenne de réception). Celles-ci peuvent être placées dans un même boîtier (antennes de contacts), soit dans deux boîtiers distincts (antennes aériennes, cf. fig. 2). Les antennes sont caractérisées soit par la durée de l'impulsion (penetradar 1 ns), soit par la fréquence centrale de la bande d'émission (GSSI 900 MHz). Chaque système radar a effectué les trois séries de tests précités pour estimer les composantes de l'incertitude.

Essais sur des plaques de différentes épaisseurs



Fig. 2 - Essai sur une plaque test de granite avec l'antenne 2 GHz du LRPC d'Autun.

L'objectif de ces essais est d'estimer quelle différence d'épaisseur est capable de percevoir un système radar. Pour cela, six plaques d'épaisseurs différentes ont été réalisées dans un même marbre. Les différences d'épaisseur étaient comprises entre 0,1 et 0,4 cm avec des épaisseurs de plaques de l'ordre de 5 cm compatibles avec les performances attendues des systèmes radar.

Chaque système radar a recueilli en position statique une série de dix mesures sur chaque plaque. La figure 2 présente le système 2GHz du LRPC d'Autun qui recueille une série de mesures sur l'une des plaques.

Les signaux d'un même radar ont été ensuite superposés et synchronisés. La figure 3 présente les signaux recueillis par le système 2 GHz du LRPC d'Autun, sur deux plaques d'épaisseurs légèrement différentes. Chaque courbe représente dix signaux recueillis sur une même plaque.

Sur la figure 4 (zoom de la figure 3), on observe le décalage systématique (d'environ quatre échantillons ou digits) au niveau du deuxième pic correspondant à l'écho de l'onde radar réfléchi après avoir traversé la plaque de marbre.

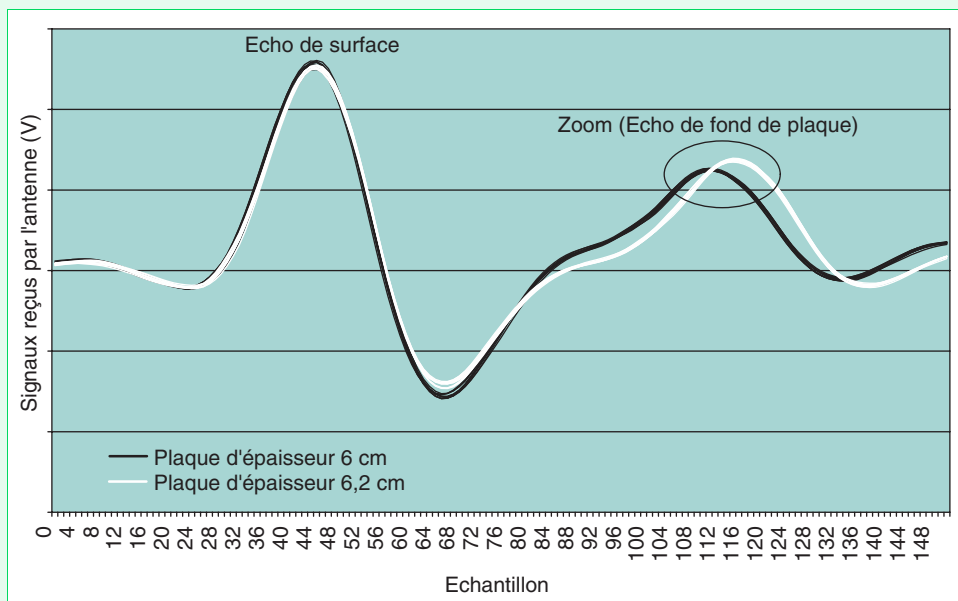


Fig. 3 - Résultats des dix mesures sur deux plaques de granite d'épaisseur différente.

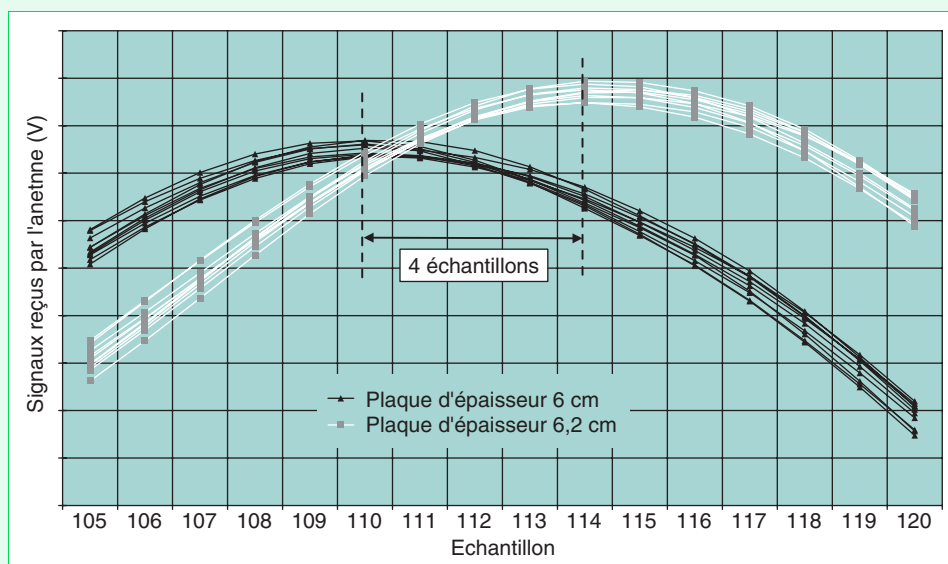


Fig. 4 - Zoom sur l'écho de fond de plaques des résultats des dix mesures sur deux plaques de granite d'épaisseur différente.

Ces expériences ont montré que des différences d'épaisseur inférieure à 0,1 cm étaient perceptibles par les systèmes radar à hautes fréquences. Pour les systèmes radar plus à basses fréquences, la différence perceptible est légèrement supérieure au millimètre.

Essais sur le corps d'épreuves radar

Une seconde série de tests a été conduite sur le corps d'épreuves radar du LCPC conçu pour tester les performances des systèmes radar. Il est constitué de quatre structures usuelles des chaussées françaises (fig. 5).

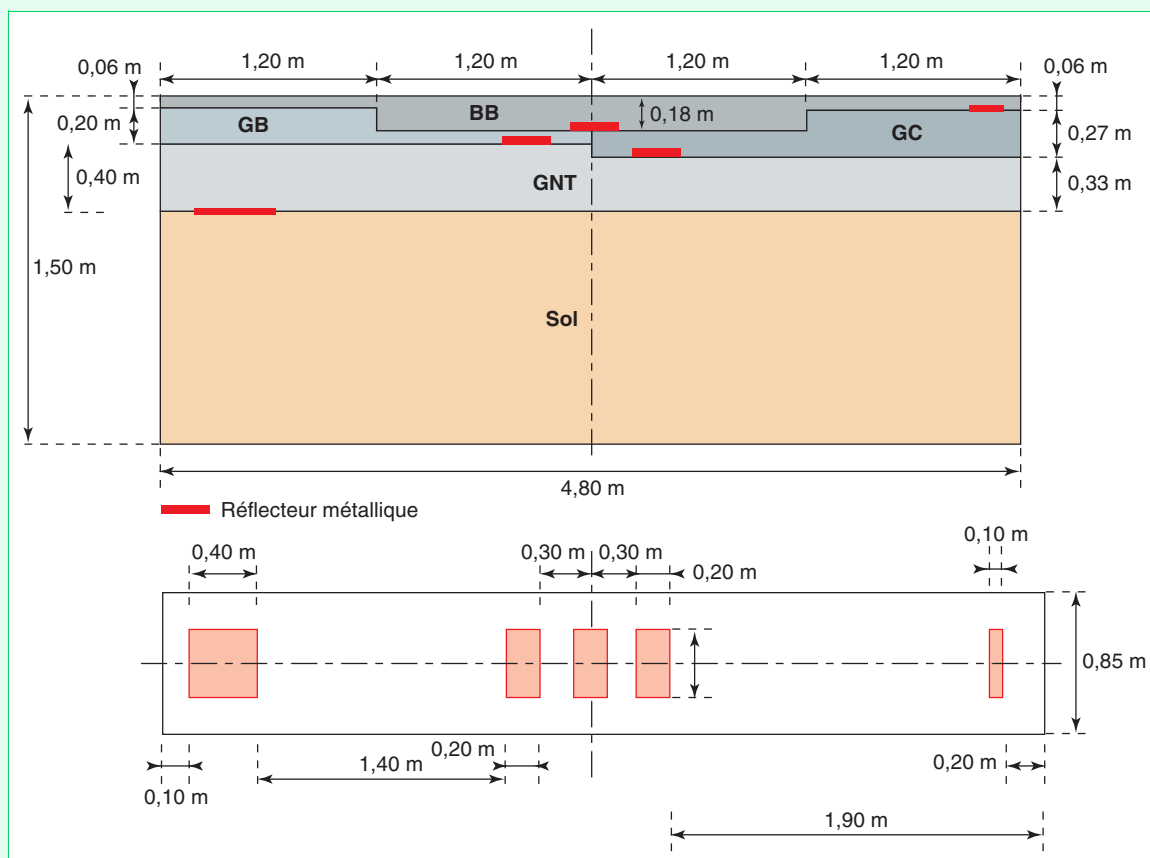


Fig. 5 - Plan du corps d'épreuves radar.

Chaque système radar a parcouru le corps d'épreuves en s'arrêtant tous les 5 cm. En chaque point, il a réalisé une série de dix mesures. Ainsi, la répétabilité de chaque système radar a été évaluée.

Pour les systèmes à antennes portées, les essais ont été renouvelés pour trois hauteurs d'antenne représentatives des variations extrêmes rencontrées lors de l'utilisation de ces antennes sur route. Il a ainsi été démontré que la hauteur des antennes n'affectait pas le résultat de mesure de la profondeur.

Les figures 6 et 7 présentent les profils radar obtenus par deux types d'antenne de fréquence centrale différente (2 GHz et 400 MHz). On observe :

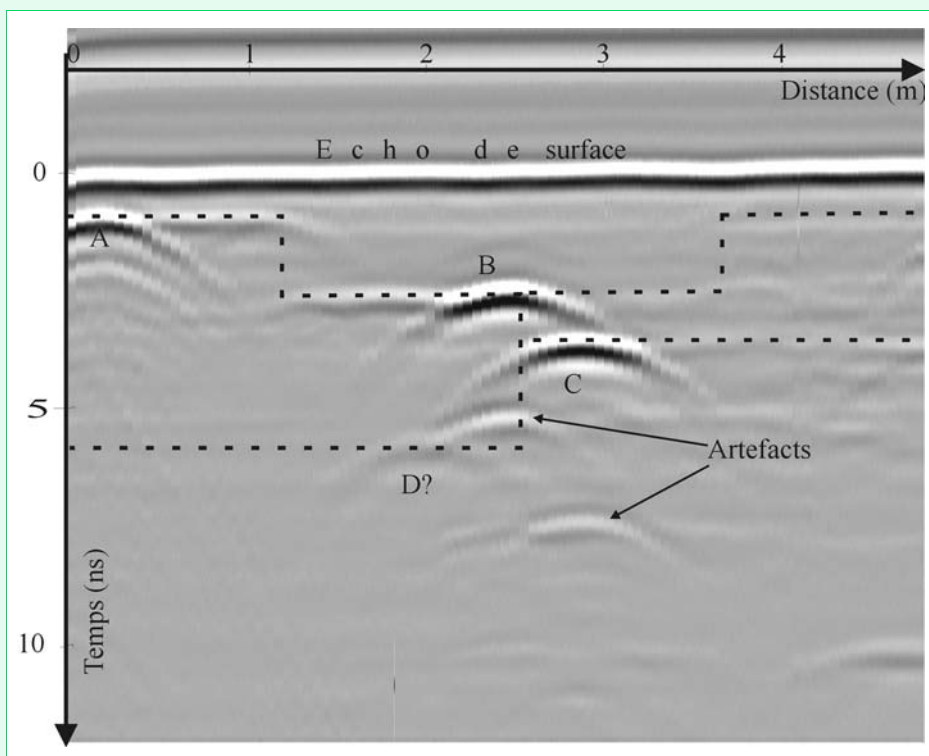


Fig. 6 - Résultats de l'antenne 2 GHz-antenna sur le corps d'épreuves radar.

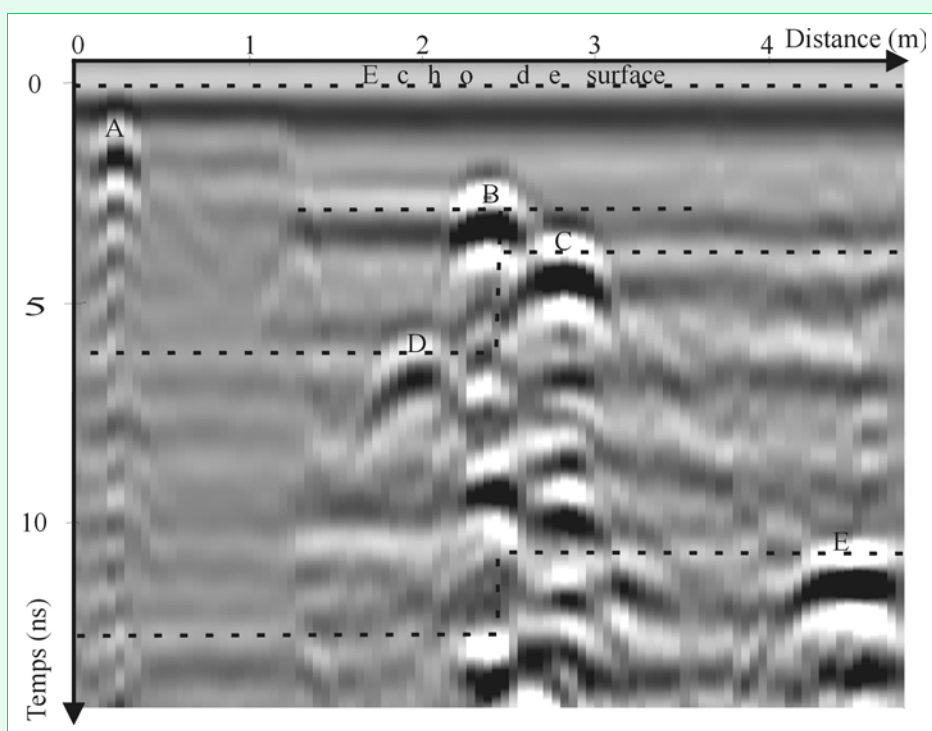


Fig. 7 - Résultats de l'antenne 400 MHz sur le corps d'épreuves radar.

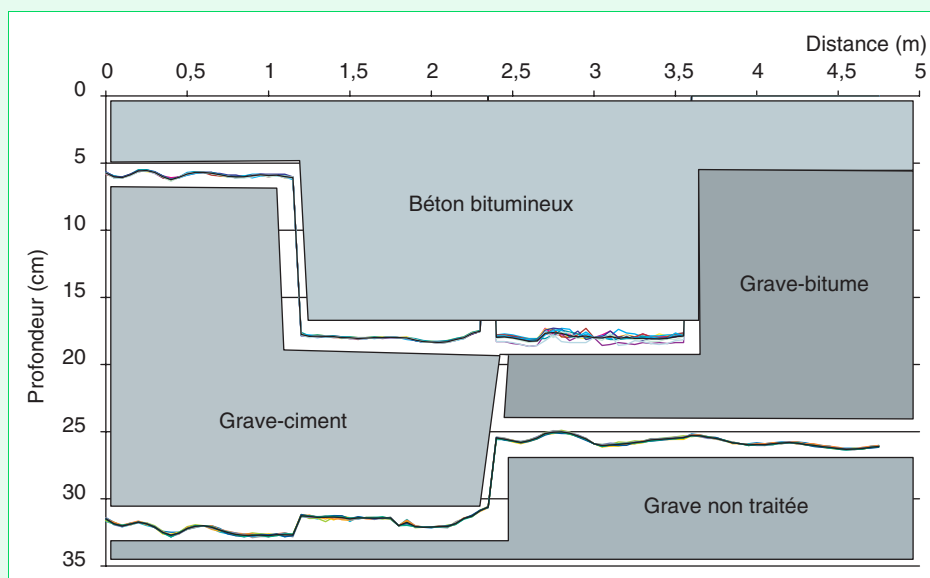


Fig. 8 - Exemple de résultats de mesure d'un système radar sur le corps d'épreuves.

- des lignes horizontales correspondant aux différentes interfaces de la chaussée et, en particulier, à la surface,
- des hyperboles (A, B, C, D et E) dues à la présence de plaques métalliques insérées dans la structure au niveau des interfaces.

Quatre structures de chaussées peuvent être identifiées. Cependant, les interfaces entre deux matériaux similaires (BB sur GB) sont généralement moins perceptibles que celles entre deux matériaux différents par nature (BB sur GC). Dans ce dernier cas, le contraste électromagnétique plus important entre ces deux matériaux explique la meilleure perception de l'interface.

La différence apparente entre les deux profils radar s'explique par la différence de fréquence centrale d'antenne. En effet, pour les antennes de 2 GHz, la largeur de l'impulsion électromagnétique est faible. Ainsi, les échos relatifs à la surface et à la plaque A sont bien distincts l'un de l'autre. En revanche, pour l'antenne de 400 MHz, dont l'impulsion électromagnétique est plus large, l'écho relatif à la plaque A se mélange à l'écho de surface, ne permettant pas la mesure de cette profondeur d'interface. Cependant, cette antenne basse fréquence distingue la plaque E située à 66 cm de profondeur qui n'est pas visible sur le profil radar de l'antenne de 2 GHz. En effet, les ondes de basses fréquences s'atténuent moins vite que celles de hautes fréquences dans les différents matériaux rencontrés (non ou faiblement conducteurs).

À partir des données de construction et de carottages, les profils radar ont permis d'estimer la profondeur des différentes interfaces en calibrant la vitesse des ondes radar par zones homogènes. La figure 8 présente les résultats du système LPC 0,75 ns du LRPC de Rouen. On observe :

- l'interface située à environ 6 cm de profondeur est visible entre les abscisses 0 et 1,2 m, mais ne l'est pas entre les abscisses 3,6 et 4,8 m. Dans cette seconde partie, l'interface est constituée par deux matériaux bitumineux (BB/GB) de caractéristiques électromagnétiques voisines, renvoyant un écho radar de faible amplitude. Ceci n'a pas permis d'exploiter les signaux pour en déduire une profondeur ;
- la dispersion des mesures reste faible. En effet, pour chaque point de mesure, il y a dix points de mesure à trois hauteurs d'antenne différentes ;
- pour les mesures à 18 cm de profondeur, on note une dispersion légèrement plus importante sur la partie comprise entre les abscisses 2,4 et 3,6 m que sur la partie précédente (entre 1,2 et 2,4 m). Cette dispersion plus importante provient, comme précédemment, du contraste électromagnétique au niveau de l'interface. En effet, dans la première partie, l'interface sépare deux matériaux (béton bitumineux/grave ciment) ayant un bon contraste diélectrique. Dans la seconde partie, l'interface sépare deux matériaux bitumineux de constante diélectrique voisine. Dans ces conditions, la localisation de la limite de transition entre couches est plus difficile, les échos radar étant de faible amplitude (rapport signal sur bruit médiocre).

Outre les performances de répétabilité des différents systèmes radar, cette expérience a montré qu'il était nécessaire de tenir compte dans l'évaluation des systèmes radar du type et de la profondeur de l'interface.

Essais sur sites réels

Enfin, les systèmes ont été évalués sur neuf sections de 100 m de longueur de chaussées réelles représentant différents types de structures de chaussées (tableau II). Sur chaque section, les systèmes radar ont effectué dix passages en réalisant une mesure tous les 5 m. Une attention particulière a été portée au positionnement des systèmes de mesure afin de comparer effectivement des mesures réalisées en un même point. De plus, sur certaines sections, les systèmes radar ont effectué des passages complémentaires à différentes vitesses.

TABLEAU II

Description des sections tests sur lesquelles ont été évalués les systèmes radar

Section	Route	Début (PR + abscisse)	Structure
1	VC de la Pintinière		6 BB + 25 GNT
2	RD 178Nor –Déviation		6 BB + 10 GB + 11 GB + 11 GB
3	44N0137	43 + 100	8 BB + 25 GC + 22 GC
4	44N0137	43 + 200	2 BBtm + 3 BBm + 8 BB + 25 GC
5	44N0137	43 + 300	4 BBm + 10 GB + 50 GNT
6	A 11	342 + 500	4 BBm + 7 BB + 19 GB + 40 GC
7	22N0012	15 + 0	2 BBtm + 28 GC + 15 GNT
8	22N0012	15 + 100	4 BBm + 12 GB + 6 BB + 20 GC
9	22N0012	15 + 200	4 BBm + 12 GB + 6 BB + 20 GB

Pour chaque section homogène, les résultats de carottages ont permis d'ajuster les constantes (vitesses des ondes ou permittivités) nécessaires au calcul de la profondeur des interfaces. Chaque équipe radar a dépouillé ses propres mesures en pointant les temps d'arrivée aux différentes interfaces lorsque c'était possible. Les traitements appliqués [2, 3] aux mesures (filtrages, pointés) ont pu être différents, mais sont représentatifs de la diversité des pratiques.

La figure 9 montre les profondeurs estimées par le radar LPC pour une interface située à environ 12 cm de profondeur. La différence maximale entre deux mesures au même point reste inférieure à un centimètre.

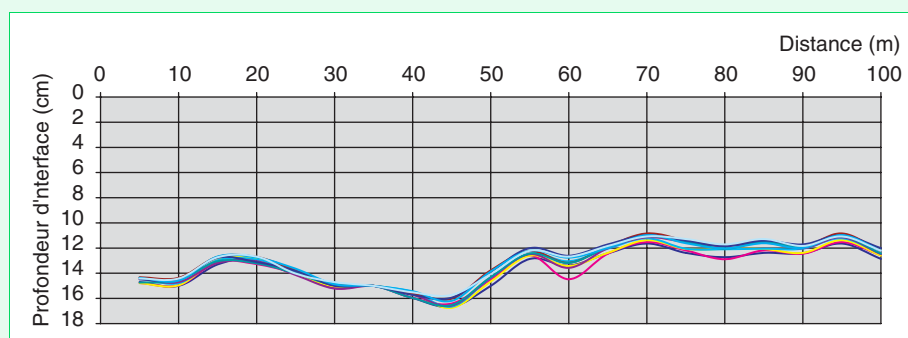


Fig. 9 - Résultats du radar LPC sur une section.

La reproductibilité a ainsi pu être estimée pour chaque système radar et pour chaque interface identifiée. Les six systèmes radar n'ont logiquement pas identifié les trente et une interfaces à détecter. En effet, les systèmes basses fréquences ne détectent pas les couches minces. En revanche, leur profondeur de pénétration leur permet de détecter et de pointer des interfaces situées à près d'un mètre (parfois inconnues des bases de données). De plus, la nature des matériaux situés de part et d'autre de l'interface rend plus ou moins facile la détection de celle-ci. À partir de l'ensemble des résultats, la reproductibilité des systèmes radar a été estimée, d'une part, pour les interfaces entre deux couches dont une seule est bitumineuse et, d'autre part, pour les autres types d'interfaces.

En complément à l'évaluation des systèmes radar, la figure 10 superpose les moyennes des valeurs obtenues par chaque système radar pour l'ensemble des interfaces. Comme indiqué précédemment, les systèmes ne perçoivent pas toutes les interfaces. Il est donc nécessaire de trouver des complémentarités entre les systèmes pour détecter les interfaces de façon exhaustive. En revanche, lorsqu'une interface est perçue par plusieurs systèmes radar, les résultats des différents systèmes sont équivalents.

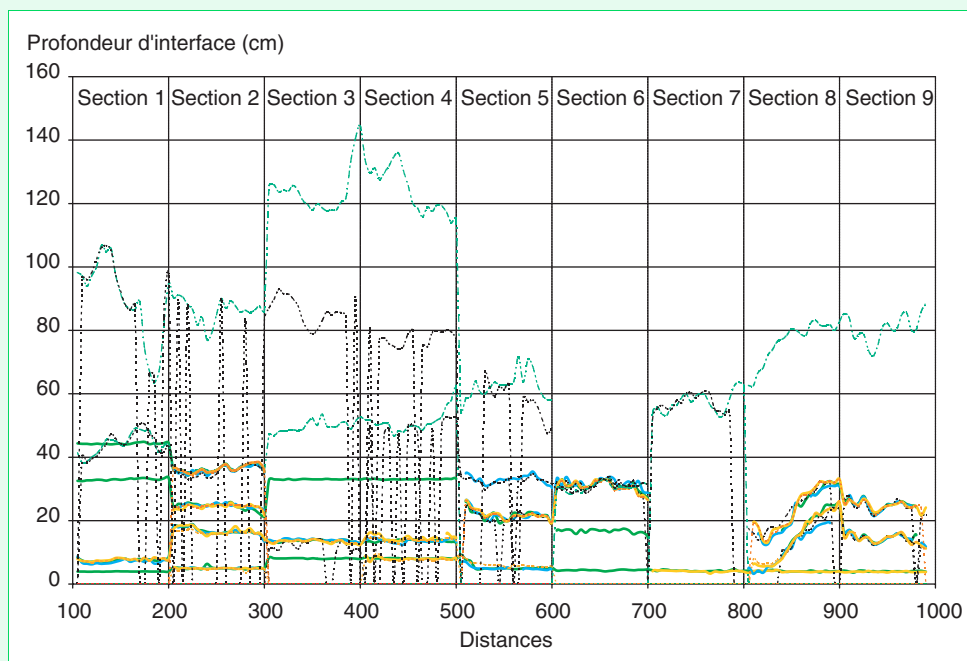


Fig. 10 - Moyenne des résultats des différents systèmes radar pour l'ensemble des sections.

Performance et domaine d'application des systèmes radar

À partir de l'ensemble des résultats, l'incertitude de mesure a été calculée pour chaque système radar en distinguant, d'une part, les interfaces entre deux matériaux dont un seul est bitumineux et, d'autre part, les autres interfaces. Dans les deux cas, les performances des différents systèmes radar sont proches. L'incertitude élargie ($k = 2$) de mesure $U(e)$ est voisine de :

- Pour les interfaces ne comprenant qu'une couche bitumineuse,

$$U(e) = (4 \times 10^{-2} e + 0,4) \text{ cm} \quad k = 2$$

- Pour les autres interfaces,

$$U(e) = (5 \times 10^{-2} e + 0,7) \text{ cm} \quad k = 2$$

En considérant les interfaces détectées et pointées par les différents systèmes radar lors de ces essais, l'incertitude de mesure de ces systèmes radar dans les différents contextes et les spécifications de la méthode LPC radar [1], un domaine de qualification selon le type d'interface a été défini pour chaque système (fig. 11).

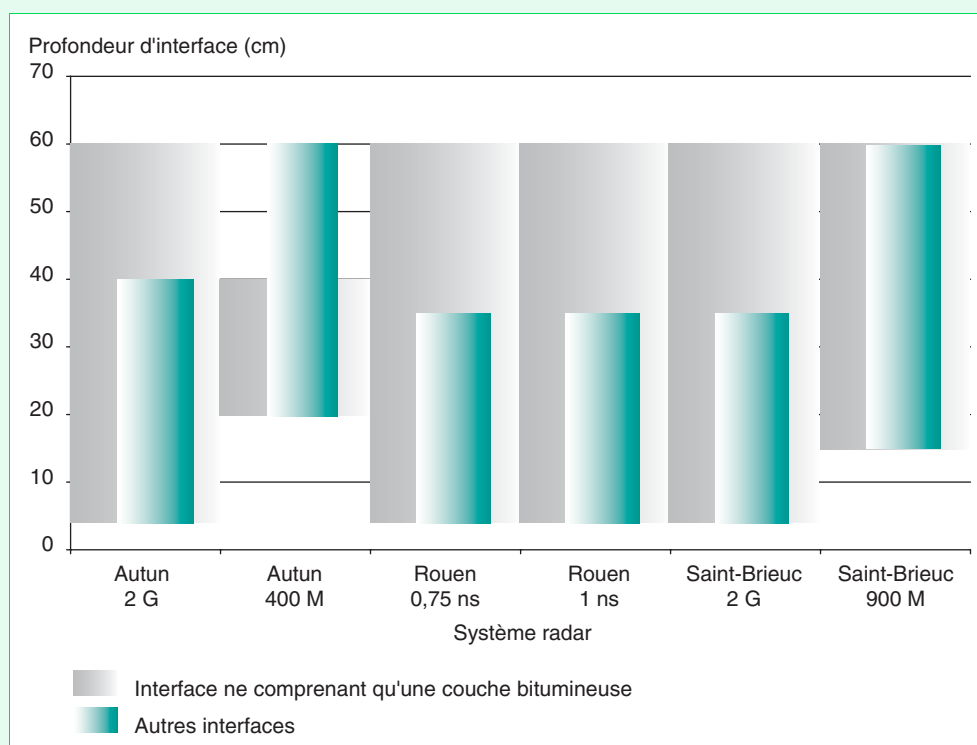


Fig. 11 - Domaine de qualification des différents systèmes radar selon le type d'interface.

Conclusion

L'évaluation des différents systèmes radar a permis de montrer l'homogénéité de ces systèmes tant sur le plan de la détection des interfaces que sur les performances métrologiques. Elle a aussi montré que le système radar, y compris l'antenne, doit être choisi en fonction de la profondeur de l'interface à observer. Enfin, elle a permis de définir un domaine de qualification de chaque système radar vis-à-vis des spécifications requises par la méthode LPC.

Cette expérience a montré également l'importance du technicien lors de l'ensemble du processus de mesure, tant dans la phase d'acquisition des signaux (choix du matériel, paramètres de réglage) que lors du dépouillement des signaux (détection des interfaces, choix des traitements appropriés, validation des résultats obtenus). Par des discussions entre spécialistes, cette étude a permis d'améliorer la qualité des mesures en imposant une méthodologie commune pour l'auscultation des chaussées.

Les échanges se sont poursuivis au delà du thème de l'auscultation des chaussées. Ainsi, l'utilisation de cet outil dans les autres domaines du génie civil (ouvrages d'art, géophysique, etc.) a été l'objet de nombreuses discussions qui ont permis à chacun de progresser. Enfin, de nouvelles orientations de recherche pour l'auscultation des chaussées ont été ainsi définies, comme la détection de défauts d'interface, la mesure de faibles épaisseurs ou la caractérisation des matériaux du génie civil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Application des techniques radar à l'auscultation des chaussées*, Méthode d'essai LPC, **42** ; Version 1.0, juin **1996**, et Version 2.0 (à paraître), collection Méthode, LCPC éditeur.
- [2] ROBERTS R.L., PETROY D., Semi-automatic processing of GPR data collected over pavement. *Proceedings 6th International Conference Ground Penetration Radar*, Sendai, **1996**, pp. 347-352.
- [3] SANDMEIER, REFLEX Program for processing and interpretation of reflection and transmission data, Karlsruhe, **2002**.