

SNCF
SGRDD-Bibliothèque
45, rue de Londres
75379 PARIS CEDEX 08
(PARIS SAINT-LAZARE)
Tel. : 01 53 42 90 11

REFERENCE

FER048260

CAHIER

177

2845

Rail international

octobre-novembre-décembre 2004, pp. 22-30, 6 fig., bibliogr. - (REVUE) -

Analyse de modèles d'estimation du module de la voie déduite de données de radar à pénétration dans le sol (GPR).

JFS

Analyse de modèles d'estimation du données de radar à pénétration dans

Prof. Dr. Ram M.
Narayanan
Department of Electrical Engineering,
Pennsylvania State University,
University Park,
Pennsylvania, USA

Raghu N.
Machavaram
Department of Electrical Engineering, University of Nebraska,
Lincoln, Nebraska, USA

Dr. Dingqing Li
Transportation Technology Center, Inc., Pueblo, Colorado, USA

Prof. Dr. Samy E. G. Elias
College of Engineering and Technology, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA

Introduction

Le module d'une voie de chemin de fer constitue un paramètre important, donnant une mesure de la rigidité verticale de l'infrastructure ferroviaire [1], et caractérisant la résistance structurelle de la voie. Il comprend les effets des fixations, des traverses et de l'infrastructure. Bien que le module de la voie soit considéré comme un facteur important pour les performances d'une voie, il est rarement mesuré, et, en général, on se contente d'estimer grossièrement ses valeurs sur quelques sections de voie d'après la connaissance de la géométrie de la voie et de son vieillissement. En général, un module de voie élevé est le signe d'une voie à bonnes performances. Des valeurs du module de voie inférieures à 13,7 MPa sont le signe de performances médiocres, entre 13,7 MPa et 27,5 MPa, les performances sont moyennes, et, au-dessus de 27,5 MPa, les performances sont bonnes [2]. Cependant, des valeurs du module de la voie très élevées, de façon caractéristique supérieures à 137 MPa, peuvent provoquer des défauts des composants, parmi lesquels une dégradation du ballast ou des fissures des traverses, à cause des fortes charges dynamiques qu'elles provoquent [3]. On peut constater de grandes variations des valeurs du module de la voie sur de courtes distances, et les mesures effectuées en un endroit peuvent être très différentes de celles d'un autre endroit pourtant considéré comme physiquement proche. Par conséquent, il existe un besoin d'effectuer les mesures du module de la voie avec précision et en continu sur les sections de voie.

On utilise plusieurs procédés pour déterminer le module de la voie sur le terrain, parmi lesquels le test de bassin de déflexion, le test de point de charge unique et le test de charge par véhicule à essieux multiples [1]. Toutes ces mesures sont effectuées en associant la flèche de la voie à la charge verticale appliquée à celle-ci. On applique la charge à chaque rail par incrément connus avec un

véhicule d'équipement de charge de la voie, et la flèche de la voie est mesurée à chaque incrément [4]. Les données sont ensuite utilisées dans un modèle mathématique pour calculer le module de la voie. Malheureusement, ces mesures sont lentes, elles demandent beaucoup de main d'œuvre, elles sont coûteuses, et elles ne donnent le module de la voie qu'en un point particulier.

Le radar à pénétration dans le sol (*ground penetrating radar* ou GPR) est apparu comme une technologie fiable, non-destructive et non-invasive pour cartographier les composants des couches en dessous de la surface et contrôler l'intégrité de l'infrastructure de la voie. Ce procédé est basé sur les principes de la réflexion et de la transmission des ondes électromagnétiques au niveau des interfaces entre des couches distinctes ayant des propriétés diélectriques différentes. Des impulsions d'énergie électromagnétique répétitives à une fréquence appropriée sont envoyées dans le sol, et les réflexions des différentes couches en dessous de la surface sont enregistrées sous la forme d'une image. Ce procédé a permis d'observer des corrélations élevées entre les propriétés diélectriques et les caractéristiques de résistance et de déformation de différents types de sols et d'agrégats [5]. Comme ces études montrent que les propriétés électriques des agrégats de base peuvent être utilisées pour déduire leurs propriétés de résistance, on estime que l'information concernant les caractéristiques des couches de l'infrastructure de la voie peut être utilisée pour en déduire indirectement le module de la voie, ce qui donne une base solide à l'établissement d'une relation éventuelle entre les données de radar à pénétration dans le sol et les données de module de la voie, les premières étant associées aux propriétés diélectriques, et les dernières étant associées aux propriétés de résistance. On a récemment développé un modèle à régression linéaire à plusieurs variables (*multivariate linear regression* ou MVR). Les

module de la voie déduite de le sol (GPR)

résultats de ce dernier ont été publiés pour décrire la façon dont on pouvait estimer le module d'une voie de chemin de fer à l'aide de données d'image de radar à pénétration dans le sol [6]. Le présent article présente des résultats obtenus à l'aide d'un modèle différent, à réseau neuronal (*neural network* ou *NNW*), et compare les deux modèles.

Présentation du radar à pénétration dans le sol (GPR)

Théorie

Le terrain sous la surface d'une voie de chemin de fer caractéristique peut être considéré comme présentant une structure à couches multiples, comprenant le ballast, le sous-ballast et l'assiette de la voie, chaque couche ayant des propriétés électriques spécifiques. Des interfaces sont formées entre les couches ayant des propriétés électriques contrastées. Celles-ci comprennent aussi bien des interfaces bien définies, telles que l'interface ballast/sous-ballast, que des interfaces mal définies, telles que des anomalies d'inclusion et des hétérogénéités à l'intérieur de chaque couche, ce qui fait qu'une partie de l'énergie de signal électromagnétique incidente sur l'interface est réfléchie et que le reste de l'énergie est transmis à travers l'interface. Les quantités d'énergie réfléchie à partir de l'interface et transmise à travers celle-ci dépendent de l'amplitude de la différence entre les propriétés diélectriques des deux couches. Elles sont caractérisées par les coefficients respectifs de réflexion et de transmission de l'interface [7].

Une nouvelle technologie qui s'impose de plus en plus pour effectuer une cartographie non-destructive des couches en dessous de la surface est le radar à pénétration dans le sol (GPR). Ce dernier a été utilisé avec succès au cours des deux dernières décennies dans diverses autres applications [8, 9]. Dans ce procédé, de courtes impulsions électromagnétiques à différentes hautes fréquences sont

envoyées dans la région des couches en dessous de la surface à l'aide d'une antenne conçue de façon appropriée pendant que l'on remorque le système sur la surface. Les signaux aux fréquences les plus élevées ne peuvent pas pénétrer profondément dans les couches en dessous de la surface, mais ils peuvent produire des images à haute définition des couches supérieures, tandis que ceux à des fréquences plus basses ont une meilleure pénétration et donnent une information utile sur les couches plus profondes, mais avec une moins bonne définition. L'antenne détecte les réflexions depuis les différentes interfaces entre les couches, ainsi que les anomalies, après quoi les données sont traitées et présentées sous la forme d'images en couleur pour l'interprétation. Du fait que les zones de ballast, de sous-ballast et d'assiette de la voie se présentent sous la forme de couches, ce qui facilite la modélisation théorique et l'interprétation des données, le radar à pénétration dans le sol est idéal pour les applications ferroviaires. Les données peuvent être collectées à des vitesses élevées, et l'on peut rapidement obtenir une image de sections importantes de l'infrastructure de la voie sans interrompre le trafic. Si l'on effectue un choix correct des fréquences utilisées, on peut réaliser simultanément une image des couches de ballast, de sous-ballast et de palier de la voie.

La vitesse v d'une onde électromagnétique dans un milieu diélectrique est calculée par la formule :

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r}$$

dans laquelle c est la vitesse de la lumière (3×10^8 mètres par seconde) et ϵ_r est la constante diélectrique du milieu [7]. La valeur de v dans le ballast dépend de sa composition, de son âge et de sa proportion d'eau. En général, elle est située à l'intérieur de la plage comprise entre $1,2$ et $2,0 \times 10^8$ mètres par seconde [10]. A titre de comparaison, v est de $3,33 \times 10^7$

mètres par seconde dans l'eau pure. Si une onde électromagnétique se déplaçant dans la zone 1 est incidente perpendiculairement à une interface avec la zone 2, une partie de l'onde est réfléchie dans la zone 1 et une partie est transmise dans la zone 2. Le coefficient de réflexion Γ est donné par la formule :

$$\Gamma = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}$$

dans laquelle v_1 est la vitesse de propagation dans la zone 1 et v_2 est la vitesse de propagation dans la zone 2.

Ainsi, si les constantes diélectriques de chaque côté de l'interface sont sensiblement différentes, les vitesses de propagation des ondes seront également sensiblement différentes. Dans ce cas, le coefficient de réflexion sera élevé, et l'image sera claire à la profondeur correspondante. Par contre, si les constantes diélectriques des deux côtés de l'interface sont proches l'une de l'autre, le coefficient de réflexion sera faible, et l'on aura une image sombre. Ceci est également vrai lorsque des inhomogénéités sont présentes à l'intérieur de couches telles que le ballast et le sous-ballast. Si les inhomogénéités sont largement réparties, l'image paraîtra granuleuse ou tachetée à l'intérieur de la couche, tandis que si la couche est relativement homogène, l'image sera principalement sombre, et moins granuleuse.

La relation entre les caractéristiques diélectriques et les propriétés de résistance et de

déformation de différents agrégats du sol a récemment été étudiée [5]. Les agrégats ayant une faible résistance à la traction et une sensibilité élevée à la déformation permanente par compactage présentent une faible constante diélectrique (inférieure à 5), ce qui implique que l'on peut s'attendre à ce que des zones à faible module de voie produisent des images de radar à pénétration dans le sol relativement sombres. Par contre, les agrégats possédant des propriétés de résistance optimales et des résistances au cisaillement plus élevées présentent des constantes diélectriques modérées comprises entre 6,5 et 9. En conséquence, on peut s'attendre à ce que des zones à module de voie élevé produisent des images de radar à pénétration dans le sol plus claires, mais, par contre, une constante diélectrique élevée, supérieure à 9, est caractéristique d'une base humide ou saturée présentant une résistance réduite et d'éventuelles déformations plastiques. C'est pourquoi les régions saturées produisent des images de radar à pénétration dans le sol très lumineuses.

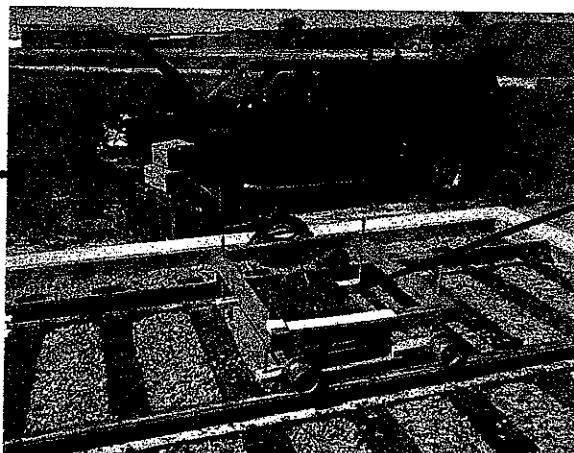
La définition de profondeur approximative ΔR pour un système de radar dans un milieu de constante diélectrique ϵ_r est donnée par la formule suivante :

$$\Delta R \cong \frac{c\tau}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{v\tau}{2}$$

dans laquelle τ est la largeur d'impulsion transmise [11]. On ne pourra pas définir individuellement des éléments de couche en dessous de la surface plus rapprochés que ΔR si l'on utilise une impulsion de largeur τ . La définition de profondeur indique la distance en profondeur sur laquelle on effectue une moyenne d'une valeur de mesure particulière, et la largeur d'impulsion, quant à elle, est la réciproque de la fréquence de fonctionnement du radar à pénétration dans le sol. Le choix d'une fréquence de fonctionnement correcte est très important, car la définition de profondeur et la profondeur de pénétration désirées sont des facteurs antagonistes. Nos mesures ont montré qu'une fréquence de 400 mégahertz était optimale pour sonder les zones de sous-ballast et d'assiette de la voie avec une définition adéquate. Pour un radar à

Figure 1 : Equipment de test caractéristique, présentant le système de radar (émetteur/récepteur/antenne) et l'unité de visualisation et de commande du radar

Visualisation et commande du radar



pénétration dans le sol de 400 mégahertz, la largeur d'impulsion est de 2,5 nanosecondes, et la définition de profondeur nominale est de 20 cm, si l'on prend pour hypothèse une vitesse de propagation moyenne de $1,6 \times 10^8$ mètres par seconde.

Mesures

On a collecté des données de radar à pénétration dans le sol sur différents types de voies contrôlées du *Transportation Technology Center, Inc.* (TTCI) de Pueblo, dans le Colorado (Etats-Unis). Cette installation est gérée par l'*American Association of Railroads* (AAR). Le système de radar à pénétration dans le sol que nous avons utilisé pour nos expériences était le système SIR-10B, fabriqué par *Geophysical Survey Systems, Inc.* Il s'agit d'un système de radar à impulsions qui peut collecter des données à un débit maximal de 50 kilo-échantillons par seconde. Des antennes dipôles avec une extension de faisceau avant-arrière de 90 degrés et une extension de faisceau de bord à bord de 60 degrés ont été utilisées pour envoyer l'onde électromagnétique dans les couches en dessous de la surface, ainsi que pour capter les réflexions. La figure 1 présente un équipement d'essai caractéristique pour le sondage des couches en dessous de la surface de la voie. Dans cet équipement, on identifie l'unité de commande de radar et les antennes, ainsi que les unités d'émetteur et de récepteur. On a conçu et construit un chariot pouvant être tracté le long de la voie derrière un véhicule rail-route. La figure 2 présente une photographie d'un équipement caractéristique d'acquisition de données de radar à pénétration dans le sol sur le terrain. L'unité de radar à pénétration dans le sol, que l'on peut voir sur le plateau du véhicule, est alimentée par la batterie de 12 volts de ce dernier. Pendant ces essais, l'unité de commande et de visualisation du radar a été posée sur le plateau du véhicule rail-route, et des câbles ont été branchés à la batterie pour alimenter ces équipements. Des marques de repérage appropriées ont été introduites dans les images du radar à pénétration dans le sol pour identifier les emplacements exacts où les images ont été acquises le long de la voie, afin



Figure 2 : Acquisition de données sur le terrain à l'aide du véhicule rail-route du *Transportation Technology Center, Inc.* (TTCI)

d'effectuer une comparaison ultérieure avec les mesures de module de la voie.

Les données ont été collectées en différentes sections de la boucle à fort tonnage (*Heavy Tonnage Loop* ou HTL) du TTCI. Les sections étudiées comprenaient les sections 29 et 40, dont les caractéristiques sont très spécifiques. En effet, la section 29 comprend une plate-forme contenant du sable limoneux natif dans l'assiette de la voie, et elle est en outre construite sous deux configurations différentes : une partie de cette section comporte une couche de sous-ballast de 10 cm et une couche de ballast de 30 cm séparées par une couche d'asphalte de 10 cm, tandis que l'autre partie de cette section contient une couche de sous-ballast de 10 cm et une couche de ballast de 20 cm séparées par une couche d'asphalte de 20 cm. La section 40 comprend également une assiette de la voie en sable limoneux natif, et est également construite sous une variété de configurations. Une petite partie de cette section comprend une couche de sous-ballast de 15 cm et une couche de ballast de 30 cm

séparées par une couche de géocellules de 20 cm. Le matériau à géocellules se compose d'une enveloppe en matière plastique en forme de nid d'abeilles remplie de sable. Ce matériau est très poreux, et il est transparent à la forme d'onde du radar. Une autre partie de cette section comprend les mêmes couches de sous-ballast et de ballast, mais la couche de séparation est constituée par 20 cm d'asphalte, tandis qu'une troisième partie comporte une couche de sous-ballast de 15 cm et une couche de ballast de 20 cm séparées par une dalle en béton de 30 cm. Enfin, une quatrième partie de la section 40 comprend une couche de sous-ballast de 15 cm supportant une couche de ballast de 50 cm.

Les valeurs de module de voie mesurées étaient situées dans une fourchette dont la limite inférieure était de 13,7 MPa, et la limite supérieure de 34,4 MPa. Après l'identification des points ayant des valeurs de module de voie élevées et basses, les images de radar à pénétration dans le sol ont été extraites exactement aux mêmes points. La figure 3 montre les images de radar à pénétration dans le sol caractéristiques pour la section 29 avec des valeurs de module de voie élevées et faibles. Cette figure permet d'observer la différence notable de luminosité des images. Conformément à la théorie, l'image pour le module plus élevé est plus lumineuse que l'image plus sombre pour le module plus bas. L'image de radar à pénétration dans le sol pour un

module de voie élevé présente de nombreuses bandes lumineuses, indiquant de fortes réflexions venant de différentes couches distinctes. L'image de radar à pénétration dans le sol pour un faible module de voie présente, elle, une intensité lumineuse beaucoup plus faible, ainsi qu'une plus grande hétérogénéité, due probablement à la migration de matériaux entre les couches.

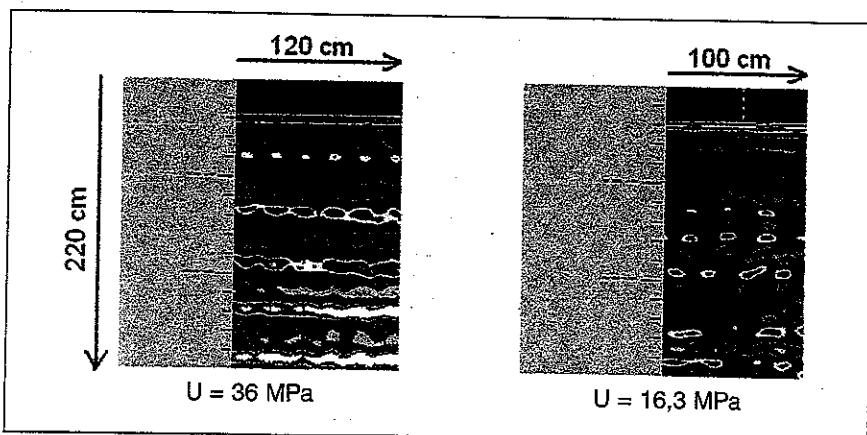
Modèles de prédiction de module de voie

Les données de radar à pénétration dans le sol acquises sont constituées par des balayages verticaux comprenant 512 échantillons de tension, chaque valeur d'échantillon étant comprise entre 0 (ce qui représente un faible facteur de réflexion) et 65,536 (ce qui représente un facteur de réflexion élevé). Par conséquent, l'image de radar à pénétration dans le sol produit des valeurs d'amplitude proportionnelles aux facteurs de réflexion à partir de différentes profondeurs en des positions latérales différentes le long de la voie. Chaque position le long de la voie présente une valeur de module de voie spécifique. Les deux modèles décrits ci-dessous ont été développés à l'aide d'un jeu d'apprentissage de 37 valeurs venant d'une base de données complète de 56 mesures réalisées sur différentes sections de voie des deux sections 29 et 40. Les modèles ont ensuite été testés sur un jeu de test comprenant les 19 emplacements restants. Les modèles ont été développés en minimisant le carré moyen des erreurs entre les valeurs de module réelles et celles dérivées des modèles.

Rendement des modèles

Pour vérifier le rendement des modèles, on a comparé les estimations du module de la voie dérivées des modèles au module de voie réel mesuré, comme on le montre en figure 4. Les points situés sur la ligne 1:1 indiquent une concordance parfaite entre les valeurs de module réelles et estimées. Les lignes de tirets à $\pm 3,4$ MPa autour de la ligne 1:1 représentent l'erreur admissible du modèle, en fonction des exigences d'utilisation réelles, et les lignes de tirets horizontale et verticale de la figure 4 montrent les différentes zones à l'intérieur du

Figure 3 : Images de radar à pénétration dans le sol de la section 29 sous des conditions de module de voie élevé (à gauche) et de faible module de voie (à droite)



graphique représentant les fausses alertes et les omissions de détection. La valeur "d'alerte" est spécifiée par l'opérateur. On considère, à partir de nombreuses observations sur le terrain, qu'une valeur inférieure à 13,7 MPa correspond à de médiocres performances [2], et qu'il faudra effectuer une étude plus attentive de la section de voie concernée. Les lignes de tirets nous permettent de déterminer la probabilité de fausses alertes P_{fa} et la probabilité d'omissions de détection P_{md} , en plus des emplacements où le modèle détecte de façon sûre une zone de voie de mauvaise qualité. Toute valeur à gauche de la ligne de tirets verticale et au-dessus de la ligne de tirets horizontale (zone A) représente une situation dans laquelle une valeur de module réelle supérieure à 13,7 MPa, indicative d'une voie de bonne qualité, est modélisée comme étant une valeur inférieure à 13,7 MPa, indicative d'une voie de mauvaise qualité. Les points se trouvant dans cette zone constituent par conséquent de fausses alertes. Par contre, une valeur en dessous de la ligne de tirets horizontale et à droite de la ligne de tirets verticale (zone B) représente une situation dans laquelle une valeur de module réelle inférieure à 13,7 MPa, indicative d'une voie de mauvaise qualité, est modélisée comme étant une valeur supérieure à 13,7 MPa, indicative d'une voie de bonne qualité. Les points se trouvant dans cette zone représentent par conséquent des omissions de détection.

Si le nombre total de points est de N , et que, parmi ceux-ci, N_A et N_B sont respectivement situés dans les zones A et B, la probabilité de fausses alertes est donnée par la formule suivante :

$$P_{fa} = \frac{N_A}{N}$$

et la probabilité d'omissions de détection est donnée par la formule suivante :

$$P_{md} = \frac{N_B}{N}$$

Le rendement η du modèle est défini par la formule suivante :

$$\eta = 1 - P_{fa} - P_{md}$$

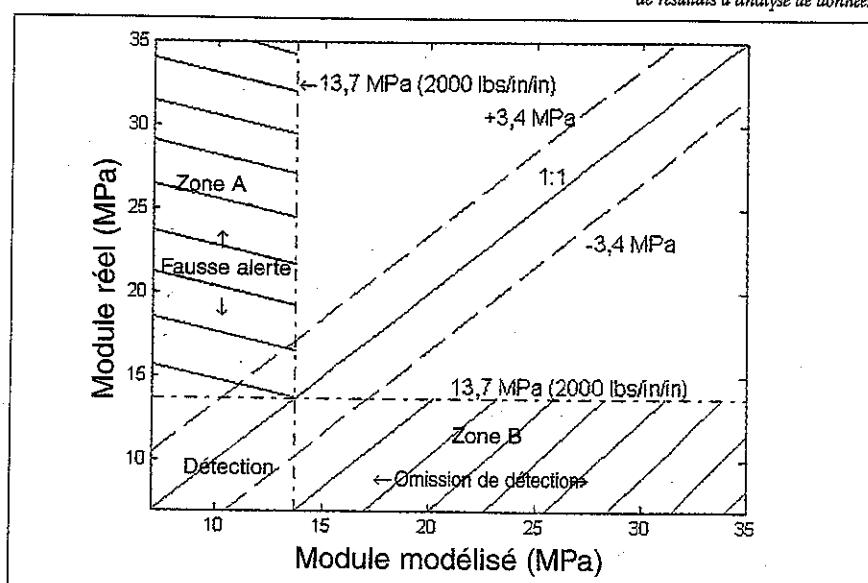
qui combine les effets des fausses alertes et des omissions de détection, les unes aussi bien que les autres étant indésirables. Une valeur de rendement de modèle de 100 % indique qu'il n'y a ni fausses alertes ni omissions de détection dans le modèle.

Choix des espacements de profondeur

Les deux modèles développés associent le module de la voie en un emplacement spécifique sur la voie aux facteurs de réflexion de radar à pénétration dans le sol à n profondeurs différentes au même emplacement. Le choix de n dépend de la définition du système et de la plus grande profondeur à laquelle des facteurs de réflexion de radar à pénétration dans le sol sont considérés comme nécessaires. A la fréquence de fonctionnement de 400 mégahertz, la définition de profondeur est d'approximativement 20 cm, ce qui signifie que chaque échantillon de facteur de réflexion à une profondeur particulière est une moyenne sur ± 10 cm. Comme c'est la région de l'assiette de la voie qui a le plus grand impact sur la rigidité de cette dernière [12], le nombre d'échantillons de profondeur n doit être suffisamment grand pour inclure la région de l'assiette de la voie. On a choisi une valeur n de 10.

On connaît de nombreuses façons de choi-

Figure 4 : Exemple de graphique de résultats d'analyse de données



sir les emplacements en profondeur de ces n facteurs de réflexion dans un balayage de radar à pénétration dans le sol particulier par variation des espacements entre les profondeurs successives. Trois types d'espacements différents ont été étudiés :

- les espacement égaux (*Equal Spacings* ou *EQ*),
- les espacements à progression arithmétique (*Arithmetic Progression* ou *AP*), et
- les espacements à progression géométrique (*Geometric Progression* ou *GP*).

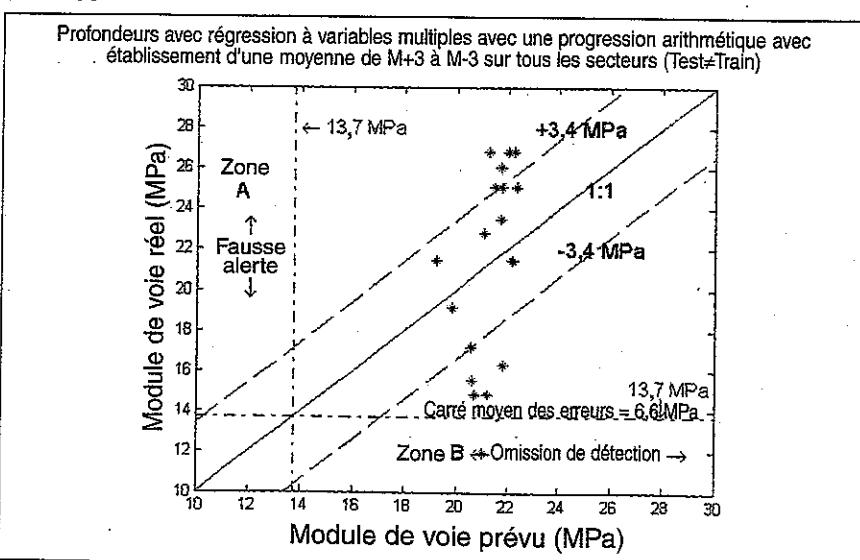
Dans le cas des espacements égaux, l'espacement de profondeur entre deux facteurs de réflexion successifs quelconques est constant. On a choisi dans ce cas un espacement de 18 cm ($\approx \Delta R$). Le nombre total de valeurs étant de 10, la profondeur totale sondée dans le cas des espacements égaux est de 180 cm (18 cm \times 10) à partir de la surface supérieure. Dans le cas de la progression arithmétique, c'est la *différence* entre deux espacements de facteurs de réflexion successifs qui est constante. On a choisi pour ce cas une différence de 2,5 cm. La profondeur totale sondée était alors de 140 cm. Cette procédure permet d'obtenir un plus grand nombre d'échantillons des couches supérieures de l'assiette de la voie que de ses couches inférieures. Avec la progression géométrique c'est le *rapport* des espacements successifs qui est constant. On a choisi un rapport de 1,4. La profondeur totale sondée est dans ce cas d'approximativement

90 cm en dessous de la surface supérieure. Ce procédé permet d'effectuer un échantillonnage encore plus dense dans les couches supérieures, avec une contribution réduite des couches inférieures. Dans l'ensemble des trois cas, la première valeur de facteur de réflexion choisie se trouvait à une profondeur de 20 cm en dessous du niveau du sol, ce qui a permis d'obtenir dans tous les cas des données allant de la couche de ballast à une profondeur située très en dessous de la couche d'assiette de la voie.

Choix du seuil d'alerte

La valeur de seuil d'alerte, ou valeur du module de voie en dessous de laquelle la voie est considérée comme étant mauvaise, est un paramètre important, et affecte les probabilités de fausses alertes et d'omissions de détection, et, en conséquence, le rendement du modèle. Comme une valeur de module inférieure à 13,7 MPa est généralement considérée comme mauvaise, on peut logiquement utiliser cette valeur comme seuil d'alerte. Nous avons toutefois étudié des valeurs plus élevées pour ce seuil, car un seuil plus élevé permettra de réduire la fréquence des opérations de réparation de la voie. Les valeurs de seuil étudiées ont été établies par incrément de 3,425 MPa entre 13,7 MPa et 27,4 MPa. Dans presque tous les cas, la valeur la plus élevée pour un bon rendement global du modèle a été obtenue avec un seuil de 13,7 MPa, que l'on a utilisé comme seuil d'alerte final.

Figure 5 : Comparaison de modules de voie prévus et mesurés pour le modèle à régression à variables multiples avec des espacements avec une moyenne sur 7 points (sur ± 3) à progression arithmétique pour le jeu de test comportant 19 points de données



Fiabilité des modèles

La fiabilité des modèles a été testée dans différentes conditions afin de s'assurer que la sortie des modèles (à savoir, le module de la voie) était relativement insensible aux variations ou aux erreurs de positions de profondeur des facteurs de réflexion d'entrée du radar à pénétration dans le sol. Ces conditions étaient les suivantes :

- Moyenne des valeurs de facteur de réflexion (sur 7 points) sur ± 3 emplacements de part et d'autre;
- Moyenne (sur 7 points) des valeurs de facteur de réflexion sur $+2/-4$ emplacements de part et d'autre;
- Moyenne (sur 7 points) des valeurs de facteur de réflexion sur $+4/-2$ emplacements

de part et d'autre;

- Valeur de facteur de réflexion décalée de ± 1 emplacement de part et d'autre;
- Valeur de facteur de réflexion décalée de ± 2 emplacements de part et d'autre;
- Valeur de facteur de réflexion décalée de ± 3 emplacements de part et d'autre.

Les deux modèles décrits ci-dessous se sont tous deux bien comportés avec les variations d'emplacement de profondeur ci-dessus. La réalisation d'une moyenne sur 7 points (sur ± 3 emplacements) a amélioré les résultats des modèles, car la réalisation d'une moyenne réduit le bruit et le scintillement d'image inhérents au système.

Modèle à régression à variables multiples (Multivariate regression ou MVR)

Le modèle à régression à variables multiples développé pour l'estimation du module est décrit par la formule suivante :

$$M = \beta_0 + \sum_1^n \beta_i x_i$$

dans laquelle M est le module de la voie, x_i ($i = 1, n$) est le facteur de réflexion de l'image de radar à pénétration dans le sol au $i^{\text{ème}}$ emplacement de profondeur, et β_i ($i = 0, n$) sont les coefficients de régression.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le cas d'espacements à progression arithmétique à moyenne établie sur 7 points. Pour ce cas, on a calculé un carré moyen des erreurs de 6,6 MPa. On a déterminé les probabilités d'erreurs à : $P_{fa} = 0$ et $P_{md} = 0,05$ (1/19). Le rendement η du modèle est donc établi à la valeur de 0,95. La figure 5 montre la comparaison entre les valeurs de module de voie réelles et dérivées par le modèle pour les 19 emplacements du jeu de test.

Modèle à réseau neuronal (Neural network ou NNW)

Pour l'estimation du module, on a utilisé un ensemble de logiciel à réseau neuronal du commerce, appelé NeuroShell® Predictor, développé par Ward Systems Group, Inc. Cet ensemble utilise pour ses prédictions un algorithme de rétropropagation. Le réseau apprend en ajustant les poids des interconnexions entre les différentes couches. NeuroShell utilise jusqu'à 150 neurones cachés.

L'ensemble ne laisse pas à l'utilisateur la liberté de choisir le nombre de couches cachées, mais, cependant, il dérive automatiquement le nombre optimal de couches cachées à partir du jeu de données d'apprentissage. Le carré moyen des erreurs peut être minimisé pendant l'apprentissage pour obtenir un jeu optimal de poids d'interconnexions. Le modèle est décrit par la formule suivante :

$$M = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

dans laquelle f est la fonction mathématique décrivant le réseau neuronal.

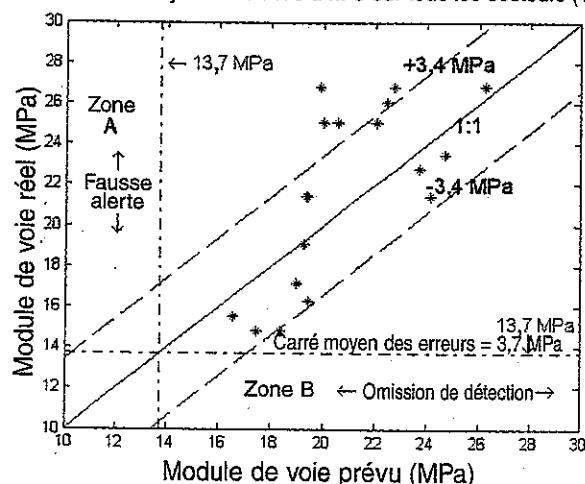
Encore une fois, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le cas de l'espacement à progression arithmétique avec une moyenne sur 7 points. Les résultats de carré moyen des erreurs pour le modèle à réseau neuronal se sont avérés meilleurs que pour le modèle à régression à variables multiples. Pour ce cas, on a calculé un carré moyen des erreurs de 3,7 MPa. On a déterminé les probabilités d'erreurs à : $P_{fa} = 0$ et $P_{md} = 0,05$ (1/19). Par conséquent, on a à nouveau trouvé un rendement η du modèle de 0,95. La figure 6 montre la comparaison entre les valeurs de module de voie réelles et dérivées par le modèle pour les 19 emplacements du jeu de test.

Conclusions et travaux futurs

On peut conclure que les données de radar à pénétration dans le sol sont très promet-

Figure 6 : Comparaison de modules de voie mesurés et prédis pour le modèle à réseau neuronal avec des espacements avec une moyenne établie sur 7 points (sur ± 3) à progression arithmétique pour le jeu de test comprenant 19 points de données

Profondeurs avec réseau neuronal avec une progression arithmétique avec établissement d'une moyenne de M+3 à M-3 sur tous les secteurs (Test=Train)



teuses pour l'estimation du module de la voie. Le modèle à réseau neuronal évalue plutôt mieux que le modèle à régression à variables multiples le module de la voie à partir des mesures de radar à pénétration dans le sol pour le cas des espacements à progression arithmétique, et il a des valeurs de carré moyen des erreurs proches des exigences d'utilisation. De plus, ce modèle présente un rendement de 95 %. Bien que, dans le cas des espacements égaux et des espacements à progression géométrique, les rendements des modèles ne soient pas aussi bons qu'avec le cas des espacements à progression arithmétique, on a également observé pour ces derniers des résultats similaires [13]. L'avantage des mesures de radar à pénétration dans le sol tient dans le fait que les données peuvent être acquises d'une façon rapide, non-invasive et synoptique, sans avoir à interrompre le trafic

de lignes productrices de recettes.

Bien que nos modèles s'avèrent prometteurs, ils ont été développés à partir d'un jeu de données très limité et qui ne peut pas être représentatif de toutes les conditions d'infrastructures de voie. Il est nécessaire d'effectuer davantage de mesures sur une plage de conditions de voie encore plus étendue pour développer un modèle plus universel pour l'estimation du module de voie à l'aide de données de radar à pénétration dans le sol.

Remerciements

Nous remercions pour son support financier la *US Federal Railroad Administration* (FRA). Nous remercions tout spécialement monsieur Mahmood Fateh de la FRA de nous avoir conseillés et guidés tout au long de cette recherche. ■

Références

- [1] F. T. Selig et D. Li, "Track modulus: its meaning and factors influencing it", *Transportation Research Record*, N° 1270, Railroad Research Issues, p. 47-452, 1994.
- [2] R. T. Aull, "M/W ratio: how the rail is affected by car weight and the track structure", *Railway Track & Structures*, Vol. 71, N° 1, p. 14-17 & 90-92, mars 1975.
- [3] J. W. P. Redden, R. T. Selig, et A. M. Zarembiak, "Stiff track modulus considerations", *Railway Track & Structures*, Vol. 70, N° 2, p. 25-30, février 2002.
- [4] D. Read, S. Chastner, W. Eberle, et F. Selig, "Track modulus measurements in the Pueblo soft subgrade site", *Transportation Research Record*, N° 1450, Railroad Research Issues, p. 55-64, 1994.
- [5] L. Saderiego et V. Sculthorpe, "Using Mechanical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates", Research Report 1-44-2, College Station, TX, Texas Transportation Institute, 1995.
- [6] R. M. Narayanam, J. W. Juhlin, D. Li, et S. E. G. Elias, "Railroad track modulus estimation using ground penetrating radar measurements", *NDT & International*, Vol. 37, N° 2, p. 147-151, mars 2004.
- [7] C. T. Almond, *Engineering Electromagnetic Fields and Waves*, New York, Wiley, 1988.
- [8] D. J. Daniels, *Surface Penetrating Radar*, Londres, Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [9] L. B. Converse et D. Goodman, *Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*, Walnut Creek, California, Altamira Press, 1997.
- [10] M. R. Clark, R. Gillespie, T. Kemp, D. M. McCann, et M. C. Borde, "Electromagnetic properties of railway ballast", *NDT & International*, Vol. 34, N° 5, p. 305-311, juillet 2001.
- [11] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York, McGraw-Hill, 1980.
- [12] F. T. Selig, "Ballast: part, its roles, and qualities", *Railway Track & Structures*, Vol. 94, N° 3, p. 21-35, mars 1998.
- [13] R. N. Machavaram, *Models for Railroad Track Modulus Estimation Using Ground Penetrating Radar (GPR) Measurements*, M.S. Thesis, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, décembre 2003.