

Historique de l'auscultation radar en tunnel ferroviaire

Patrick THIAUDIÈRE
SNCF

RÉSUMÉ

Le patrimoine des tunnels ferroviaires français est particulièrement important et place son propriétaire parmi les premiers possesseurs d'ouvrages souterrains des réseaux européens. La SNCF est le conseiller et la force de proposition du propriétaire RFF (Réseau ferré de France).

La SNCF, avec des prestataires industriels, procède à la reconnaissance des tunnels par radar à impulsions depuis le début des années 1980. L'évolution des prestations fournies par cette technique est décrite ainsi que les progrès attendus au cours des prochaines années.

Les objectifs de la reconnaissance sont, selon les cas, la caractérisation du type de structure étudiée, la recherche de zones homogènes et d'anomalies ponctuelles ou, dans le cas d'intervention après incident, d'une signature radar particulière.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

A HISTORICAL OVERVIEW OF RAIL TUNNEL RADAR MONITORING

France boasts an exceptionally wide array of rail tunnels and makes the national railway company one of the leading owners of underground structures throughout all European networks. The SNCF organization acts as adviser and consultant to the ownership entity (RFF).

SNCF, in conjunction with a number of industrial partners, has been conducting tunnel reconnaissance by means of impulse radar ever since the beginning of the 1980's. The evolution in utilization potential offered by this technique is described herein, along with the perspectives for progress over the upcoming years.

The objectives of these reconnaissance efforts depend on the particular case and include: characterization of the type of structure under investigation, search for homogeneous zones and point-specific anomalies, and (in the event of response to an incident) special radar signatures.

FIELD: Engineering sciences.

Définition du problème

Le patrimoine des tunnels ferroviaires français est particulièrement important et place son propriétaire parmi les premiers possesseurs d'ouvrages souterrains des réseaux européens. Sa spécificité a orienté, au fil du temps, les politiques adoptées en matière de maintenance jusqu'à aujourd'hui où la SNCF, en tant que prestataire privilégié, doit être l'initiateur, la force de proposition et le conseiller du propriétaire RFF (Réseau ferré de France).

Le patrimoine de RFF comporte actuellement plus de 1 500 souterrains pour une longueur voisine de 600 km et une valeur à neuf d'environ 10,5 milliards d'euros.

L'essentiel de l'activité de maintenance est concentrée sur 1 326 tunnels, situés sur des lignes exploitées, d'une longueur totale de 545 km. Les tunnels non exploités et non cédés à des tiers font cependant toujours l'objet d'une surveillance et d'un entretien destinés à la sauvegarde des personnes et de l'environnement.

Description

La gamme de longueur des tunnels ferroviaires est de 12 à 6 907 m (partie française du tunnel du Fréjus) pour une longueur moyenne voisine de 400 mètres.

On peut également différencier les tunnels à partir des caractéristiques du ou des itinéraires qui s'y inscrivent, du nombre de voies, du type du trafic (avec ou sans voyageurs), du nombre de circulations, du type de traction et de la vitesse.

Du point de vue géométrique, ces tunnels ont une ouverture variant d'environ 8 m pour les tunnels à gabarit double voie à 5 m pour les voies uniques, et une hauteur sous clé voisine de 6 m. Les ouvrages sur lignes nouvelles ont des ouvertures bien supérieures.

La section interne du tunnel est constituée d'une voûte à géométrie variable, plutôt circulaire pour les ouvrages à double voie et elliptique pour les voies uniques. Cette voûte repose sur des piédroits

verticaux ou incurvés. Un radier peut refermer la section en base des piédroits ; sa géométrie est presque toujours en voûte inversée mais avec un rayon variable selon les ouvrages.

Morphologie

Trois types de tunnels ont été identifiés à partir de la fonction de leur structure vis-à-vis de l'environnement :

- ① **voûte parapluie** : structure de faible épaisseur à contact incertain avec l'encaissant, établie à l'aide de matériaux de qualité médiocre dont le but est de garantir les voies de circulation des chutes de petits blocs ainsi que des égouttures et des glaciations,
- ② **voûte porteuse** : structure épaisse destinée à reprendre les efforts de l'encaissant, établie avec une bonne qualité des matériaux et une mise en œuvre soignée,
- ③ **tunnel courant** : structure intermédiaire pour laquelle il a été tenu compte d'une éventuelle évolution de l'encaissant, très couramment utilisée en zone de tête lorsque le reste de l'ouvrage est à voûte parapluie.

Construction

La construction du réseau ferroviaire français et donc des tunnels se poursuit toujours. Elle a donné lieu à une période d'intense activité entre 1850 et 1900 ; ainsi l'âge moyen est de 110 ans.

Les méthodes de construction étaient fort différentes des méthodes actuelles, mais surtout elles ne permettaient pas un confinement immédiat du terrain lors de l'excavation, favorisant ainsi la relaxation de l'encaissant et imposant un chargement des maçonneries. De plus, les blocages utilisés derrière la structure constituaient un drain favorisant la circulation des eaux et, par la suite, l'altération de l'encaissant et des maçonneries.

Le revêtement présentait de nombreuses faiblesses locales (sous-épaisseur, joints mal hourdés, défauts aux reprises en sous-œuvre, aux limites des plots, dans l'étanchéité, etc.).

La majorité des tunnels a été percée par méthode dite à section divisée. À partir d'une galerie initiale, on agrandit progressivement l'excavation pour dégager la section souhaitée et établir le revêtement. La méthode belge, très largement utilisée pour la construction des tunnels ferroviaires français, provoque un surcreusement au niveau de la galerie de faîte (fig. 1).

Au-dessus de la structure maçonnée, des hors profils d'excavation ont pu être laissés en l'état sans comblement (fig. 2). Dans d'autres cas, le comblement initial a été effectué à l'aide de fagots, de bois de blindages et d'anciens étais mêlés de pierres sèches (fig. 3) ; le pourrissement des bois engendre une nouvelle décompression progressive du terrain.



Fig. 1 - Surcreusement en clé de voûte dû à un mauvais positionnement de la galerie de faîte.

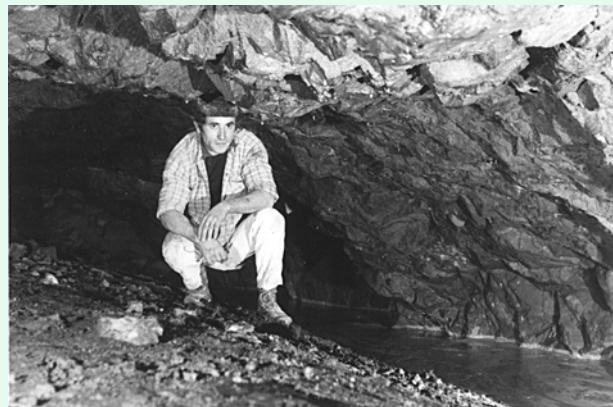


Fig. 2 - Vide de grande dimension au-dessus d'une voûte de tunnel.

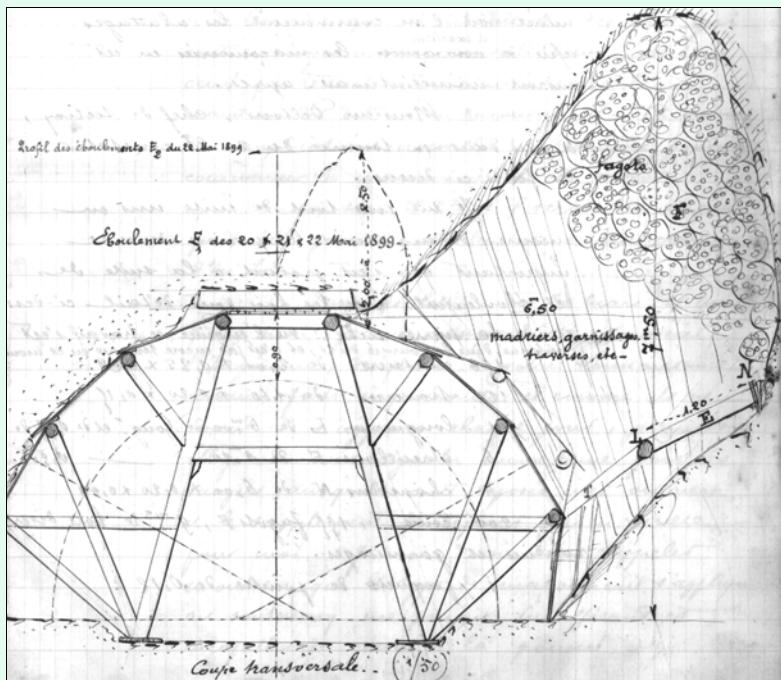


Fig. 3 - Hors profil latéral comblé par fagots et madriers.

Besoins de connaissance

Les reconnaissances doivent confirmer le type de structure supposé (voûte parapluie, voûte porteuse ou structure courante). Pour cela, une indication des épaisseurs de revêtement en continu est souhaitable. On observera particulièrement les variations longitudinales et transversales de cette épaisseur en relation avec les changements éventuels de nature d'encaissant.

Les auscultations doivent permettre la discrimination de tronçons homogènes dans un relevé complet de tunnel. Elles doivent permettre également de déterminer la présence de vide ou d'anomalie du contact ainsi que les changements de mode de contact pour qualifier le type de structure. Enfin, une appréciation de l'état de cette dernière et du proche encaissant doit être indiquée, même de manière relative.

En plate-forme, la recherche porte sur la connaissance en continu des épaisseurs de ballast et du niveau du radier sous la traverse, dans le but de préciser les possibilités de modification d'altitude du plan de roulement. De plus, dans d'autres cas, une recherche de cavités ou de zones décomprimées peut constituer l'objectif de la campagne d'investigation.

Dès 1973, les conclusions de la commission d'enquête nommée, suite à l'accident du tunnel de Vierzy orientaient vers des méthodes non destructives innovantes en l'absence de résultats fiables avec les méthodes disponibles à l'époque (sismique, gravimétrie, etc.).

L'auscultation par procédé radar géologique peut améliorer la connaissance de l'ouvrage mais avec des domaines d'application privilégiés.

Mise en œuvre

Pour les auscultations radar, la SNCF fait toujours appel à des sociétés ou bureaux d'études spécialisés pour procéder aux relevés et fournir des résultats qui feront l'objet d'interprétations spécifiques en interne.

Les opérations de surveillance doivent respecter la disponibilité de l'ouvrage. Le travail sur site s'effectue donc pendant les périodes sans circulation (intervalles naturels). Des restrictions relatives à la sécurité du personnel existent sur les lignes électrifiées (pas de travail à moins de 3 m d'un élément sous tension).

Le passage d'une antenne radar le long des parois est réalisé par déplacement du convoi à une vitesse d'environ 3 à 5 km/h (fig. 4). L'acquisition des données est immédiate et un contrôle de qualité est

assuré *in situ*. Le repérage longitudinal se fait par roue codeuse ; des tops manuels sont également ajoutés.

Cette antenne est appliquée contre le parement au moyen d'un bras pantographe mis en tension par câbles élastiques, plus ou moins nombreux suivant la position sur le profil. Plusieurs passages sont nécessaires, avec cinq à sept génératrices selon les tunnels, pour couvrir l'ensemble de la voûte.

Le même type de procédé peut être employé en plate-forme. La mise en œuvre est simple ; l'antenne est tirée par un opérateur ou accrochée à un lorry de chantier.

Deux gammes de fréquences sont utilisées :

- l'une affectée à la reconnaissance de la structure, 900 MHz pour une bonne résolution,
- l'autre attribuée à la reconnaissance du proche encaissant, 400 MHz pour une meilleure pénétration.

Pour limiter le temps d'intervention dans les tunnels, certains prestataires proposent des antennes bifréquence.

On peut également utiliser une antenne totalement décollée du parement ; la vitesse d'acquisition est alors plus élevée (pas de frottement) et les informations recueillies sont très superficielles. Avec ce procédé, on peut également suivre les irrégularités géométriques et éditer un profil longitudinal. Cependant, cette information doit être regardée plus comme qualitative que quantitative car des problèmes métrologiques, comme les oscillations de la nacelle sur laquelle est fixée l'antenne, peuvent créer des artefacts de mesures.



Fig. 4 - Enregistrement en piédroit sur la voie opposée à l'engin pendant la période d'arrêt des circulations.

Résultats

Rappelons que la propagation d'un signal électromagnétique fourni par l'émetteur sous forme d'impulsions est conditionnée par la constante diélectrique du matériau traversé et sa conductibilité. La différence de constante diélectrique entre différentes couches ou matériaux crée un contraste et une réflexion captée par le récepteur avec un décalage temporel. L'enregistrement initial est donc une coupe temps. Il y a donc lieu de la caler soit par un sondage, soit par connaissance des constantes si on veut pouvoir en tirer une information quantitative de la profondeur d'investigation.

Une grande évolution des prestations est constatée depuis les premiers essais d'utilisation du radar à impulsions, dont les étapes majeures sont décrites ci-après.

- Au début des années 1980, lors de la première expérience de reconnaissance d'un tunnel par procédé radar, une anomalie caractéristique a été observée à l'extrados du revêtement sous forme d'une hyperbole. Un sondage carotté de contrôle a ensuite confirmé la présence d'un vide (fig. 5).

C'était la première fois que nous pouvions « voir » un vide à l'arrière d'un revêtement par méthode non destructive. Il en a résulté un excès d'enthousiasme pour cette technique, parfois vue à l'époque comme une alternative aux sondages plus coûteux, de mise en œuvre plus lourde et, par nature, ponctuels.

Lors des campagnes suivantes, les prestations reposaient sur la fourniture des radargrammes bruts avec un rapport de synthèse récapitulant les points singuliers rencontrés. Les contrôles par sondages effectués *a posteriori* ont mis en évidence une distorsion entre les deux modes d'investigations (discontinuités au radar non trouvées au sondage, ou vides aux sondages non décelés au radar, anomalies d'épaisseur de structure non détectées, etc.). Les conclusions à l'époque indiquaient cependant que le radar donnait une image assez correcte de l'épaisseur de la structure mais que les données fournies par nos prestataires étaient difficilement exploitable par le non-initié et que, de plus, certains enregistrements étaient à la limite du lisible comme sur l'extrait de la figure 6.

Il s'en est suivi une période de latence d'utilisation de la méthode avec seuls quelques rares essais ponctuels.

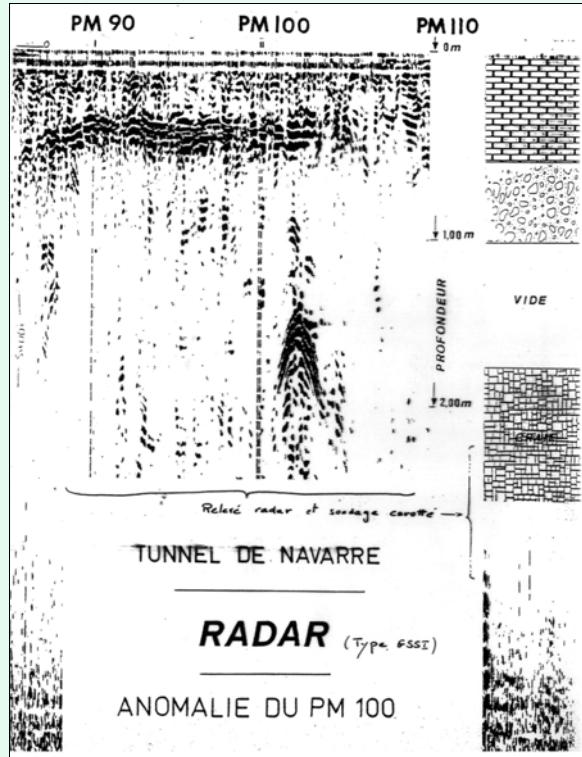


Fig. 5 - Échos en forme d'hyperbole et résultat du sondage de contrôle.

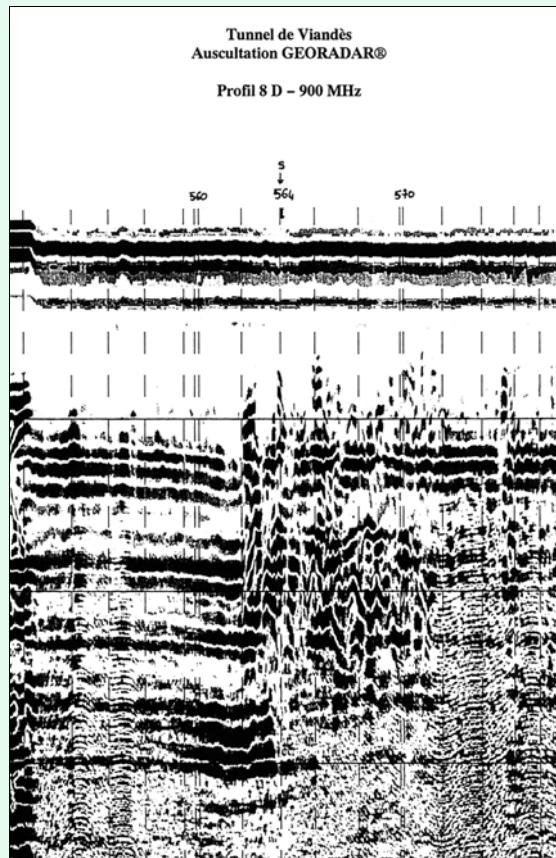


Fig. 6 - Extrait de radargramme brut difficilement exploitable.

■ À l'occasion de ces essais, plusieurs améliorations ont été proposées par les prestataires dont la plus spectaculaire, en dehors de celles qui consistaient à améliorer la qualité des antennes, concernait la présentation des résultats.

La première amélioration était le traitement des signaux en fausses couleurs qui apporte une focalisation sur les niveaux d'énergie les plus forts, plus facilement lisibles que sur le radargramme brut. Dans l'extrait de la figure 7, on observe, dans les parties de droite et de gauche, une maçonnerie mince avec de forts échos à l'extrados, ce qui correspond typiquement à une structure de voûte parapluie. La partie centrale correspond à une zone de rocher non revêtu dans laquelle on suit le trajet d'une faille ou diaclase non connue car masquée par le revêtement dans sa partie interceptée par le tunnel.

Un autre type de traitement proposé a été une démodulation d'amplitude qui fait également ressortir les anomalies. On remarque, sur l'extrait de la figure 8, que l'enregistrement a été habillé par un pointé d'épaisseur de structure, ce qui permet de suivre les variations longitudinales mais également transversales par comparaison entre profils.

SNCF - Région de CLERMONT-FERRAND

LIGNE FIGEAC-ARVANT - Tunnel de PLANZOL

Auscultation GEORADAR

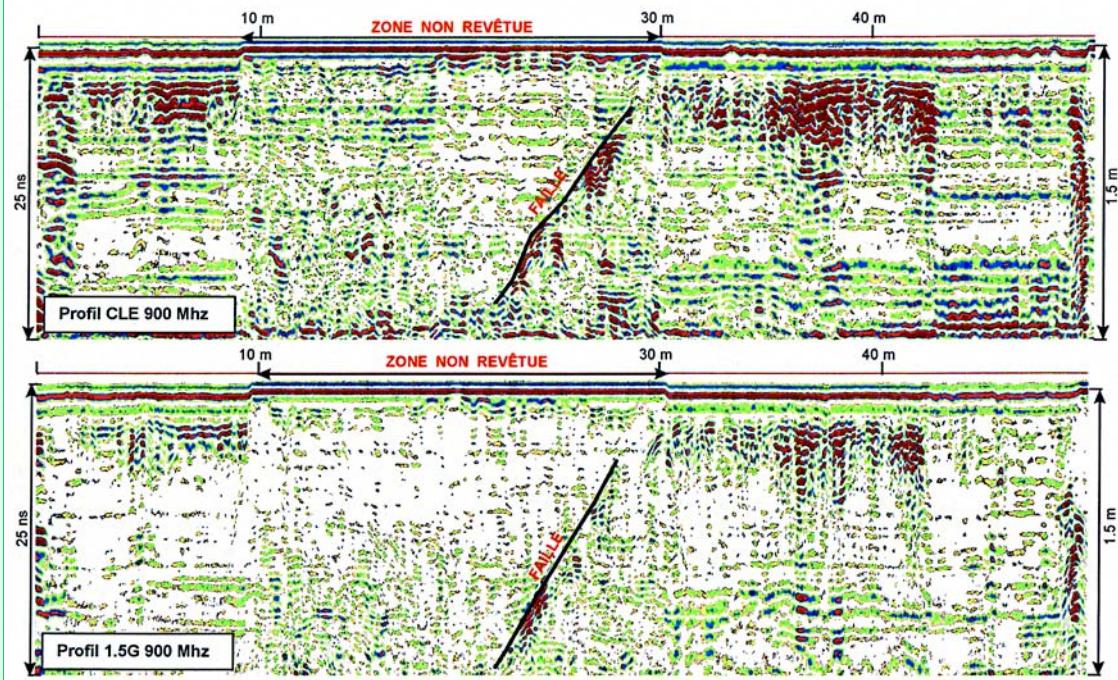


Fig. 7 - Radargramme traité en fausses couleurs.

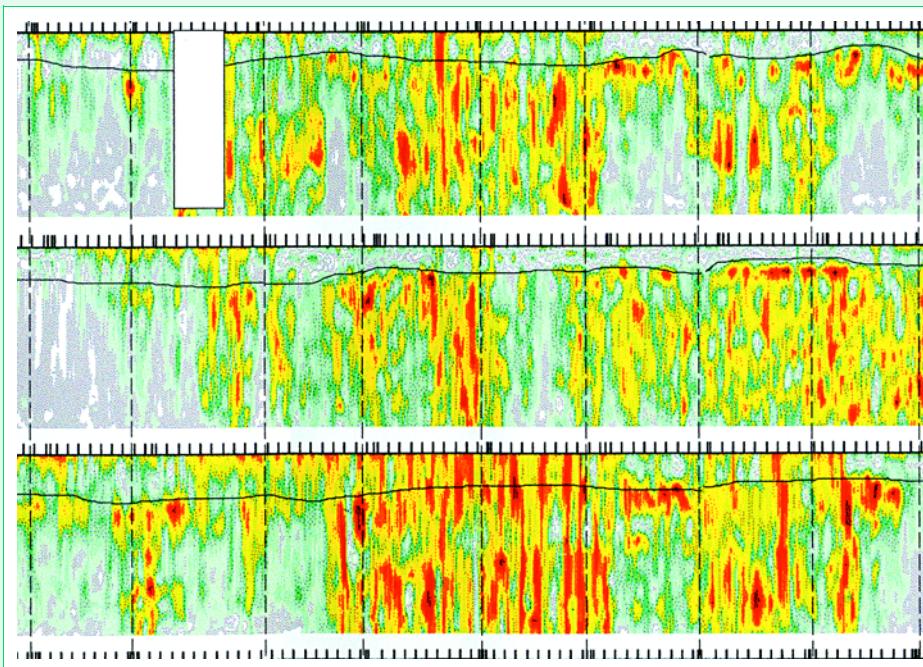


Fig. 8 - Signal traité en démodulation d'amplitude et représentation en fausses couleurs.

■ Une autre phase d'évolution a été la création et la fourniture d'indices radar affectés aux trois domaines d'examen, le revêtement, le contact entre ce revêtement et l'encaissant et enfin le proche encaissant, avec un exemple donné sur la figure 9.

Ces indices représentent le niveau d'énergie par tranche de 1 ou 2 m de tunnel. Ils sont présentés en utilisant une échelle colorimétrique et permettent donc, sur chaque génératrice, la différentiation de points de tunnels avec échos multiples donc, théoriquement, de moindre compacité ou très hétérogènes (forts contrastes de constantes diélectriques).

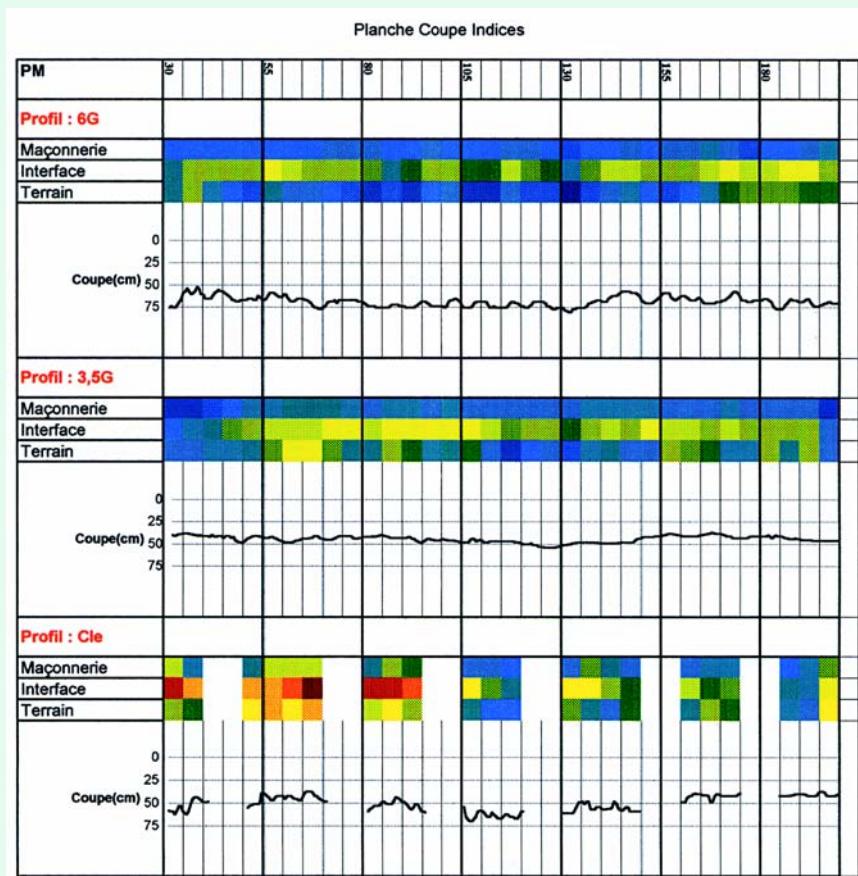


Fig. 9 - Indices radar calculés sur les trois domaines d'auscultation et épaisseur de revêtement.

- Par juxtaposition des lignes d'auscultation, on obtient plusieurs développés du tunnel (fig. 10 et 11) correspondant aux trois domaines de calculs des indices. Cette représentation est similaire à celles des relevés d'avaries produits lors des inspections détaillées et permet donc d'associer les anomalies radar aux avaries de structure.

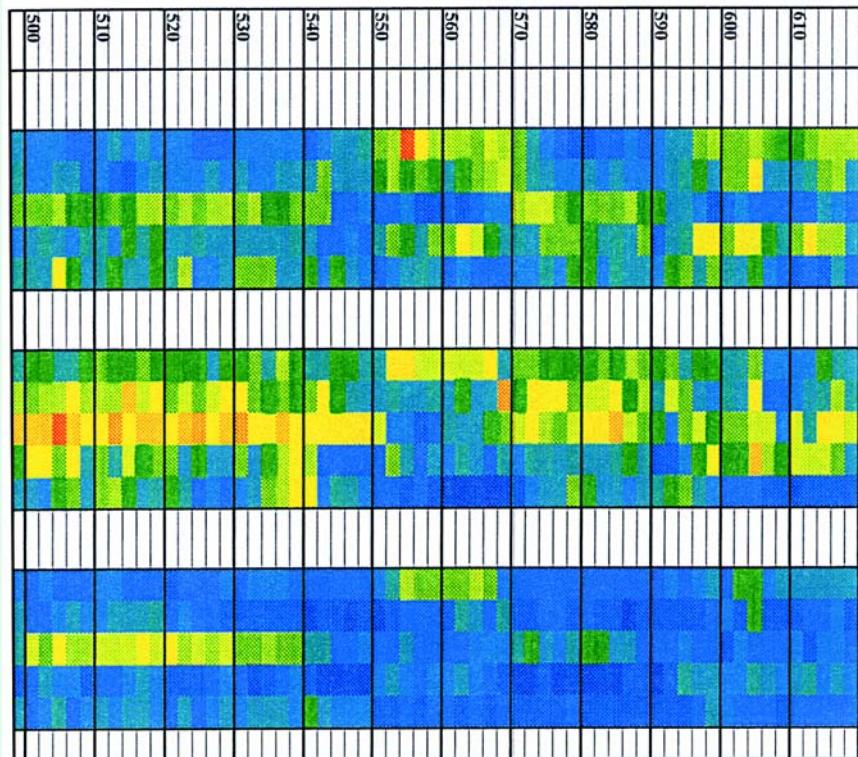


Fig. 10 - Représentation des données comme un développé de tunnel avec trois plans correspondant à la structure, au contact structure-encaissant et au proche encaissant.

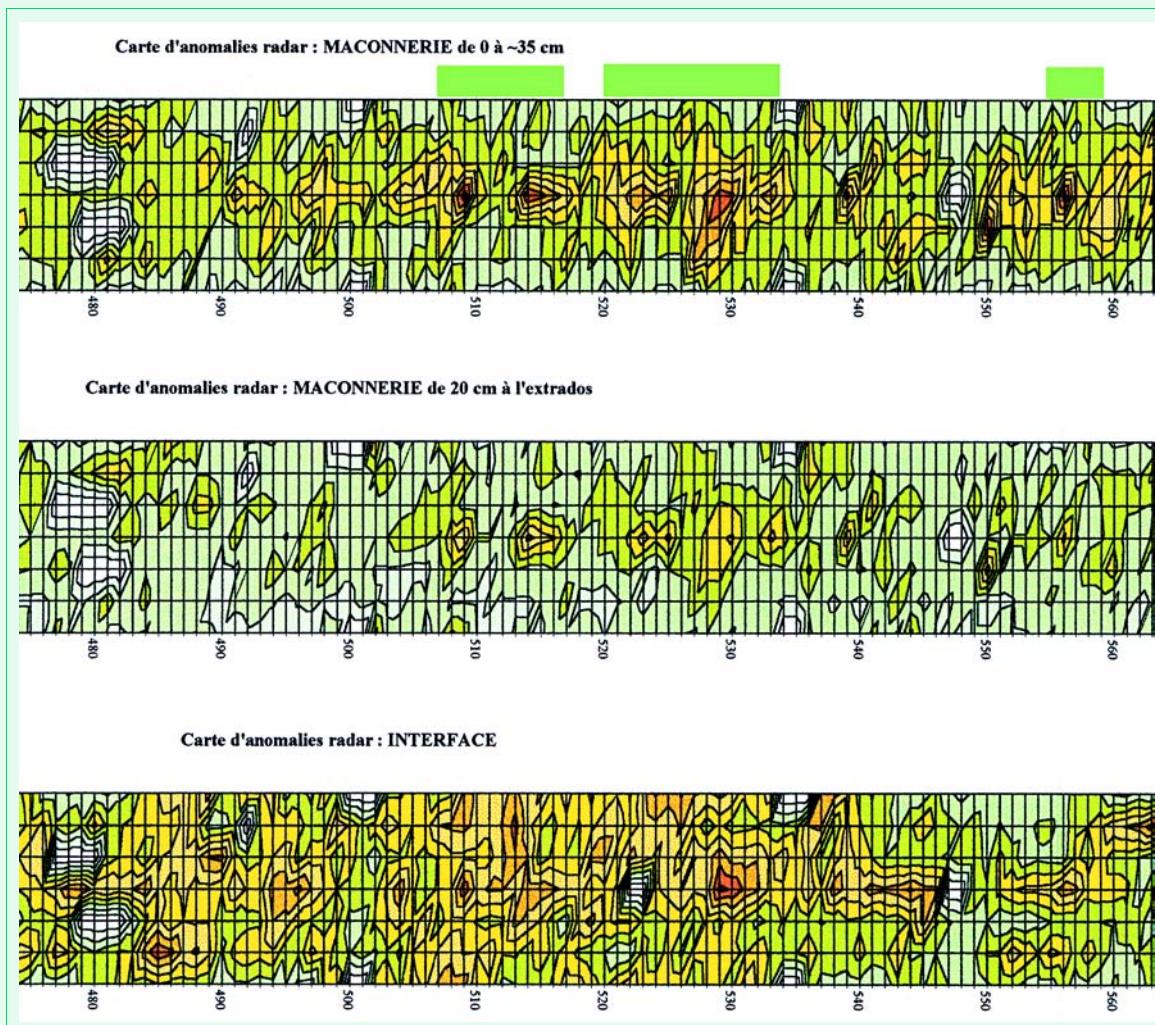


Fig. 11 - Développés des indices présentés en courbe de niveau.

Cette représentation permet de définir visuellement les zones homogènes de tunnel, et d'augmenter la validité des sondages carottés de contrôle. D'autres présentations des données sont possibles, comme la vue en perspective (fig. 12) à partir des données de la figure 14. Cet essai préfigure certainement les futures représentations en trois dimensions à venir.

- La SNCF, avec l'appui d'un stagiaire de l'école centrale de Paris, a cherché à trouver une relation entre les indices radar, correspondant à une densité de réflexion, et les constats des visites d'ouvrages portés sur les relevés d'avaries. Cette relation n'a pas pu être identifiée dans tous les cas car certains paramètres, comme la présence d'eau, viennent perturber la propagation des ondes et donc influent sur les indices. Cette étude a cependant permis de développer une application informatique pour regrouper en un seul indice l'ensemble des données fournies par nos prestataires.

Ce type de courbe, dont on trouve un exemple sur la figure 13, globalise l'ensemble des relevés radar et n'a de réel intérêt que pour des ouvrages de longueur importante. Elle a pu être comparée à une courbe d'état établie avec les données des relevés d'inspection. Le croisement de ces deux informations permet de définir les zones sensibles de l'ouvrage ausculté. Ce type d'analyse a notamment été utilisé pour la définition des zones à traiter et la détermination de l'ordre de priorité de ces traitements, portant sur quatorze tunnels de la région de Toulouse.

- On vient de voir que le radar permettait de caractériser des zones homogènes dans un ouvrage et qu'il a pu également être utilisé pour caractériser des anomalies connues. Ainsi, sur la figure 14, on a recherché, à partir de la signature radar obtenue dans un point particulier avec incident, si d'autres points du tunnel présentaient les mêmes caractéristiques, et ainsi définir toutes les parties à risques devant bénéficier de renforcements d'urgence.

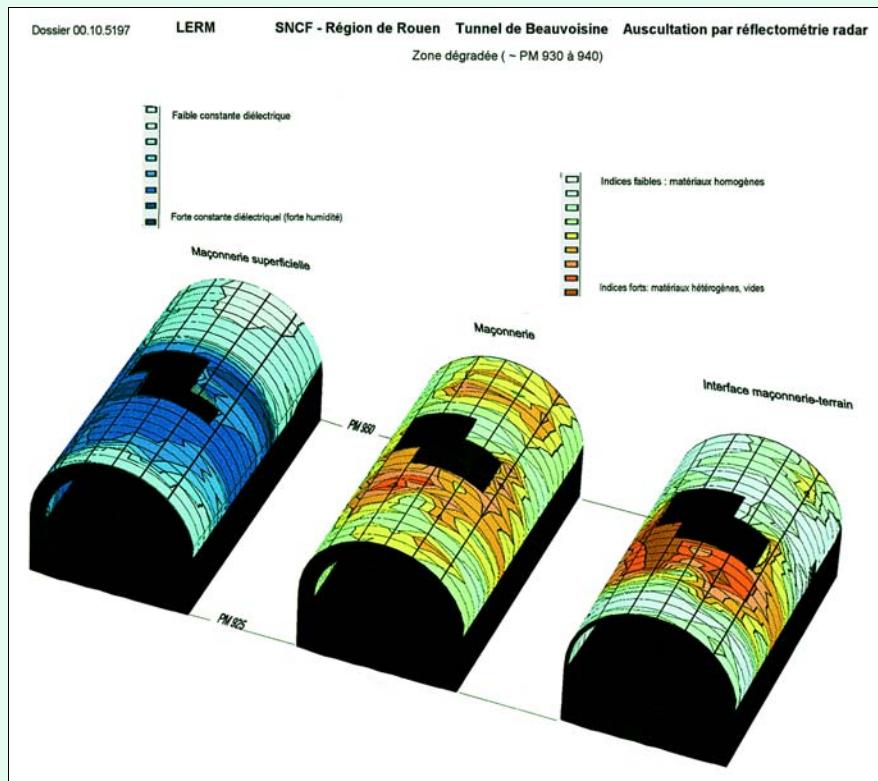


Fig. 12 - Représentation des développés en perspective.



Fig. 13 - Courbe d'agrégation des indices radar.

- En plate-forme, une recherche particulière avait pour objectif de relever l'épaisseur de ballast sous la traverse pour localiser de façon indirecte les zones d'affaissement du radier (fig. 15 et 16). Le croisement des données radar avec celles d'une autre méthode a permis de localiser les parties fissurées actives, les fissures non actives et les tronçons sans avaries.
- Dans quelques cas, des sections transversales de tunnel ont été relevées pour caractériser des points particuliers d'ouvrage. Sur la figure 17, on trouve un radargramme au niveau d'un grand hors profil de construction. La déformation du radargramme en forme de tunnel, comme sur l'exemple de la figure 18, facilite l'interprétation.

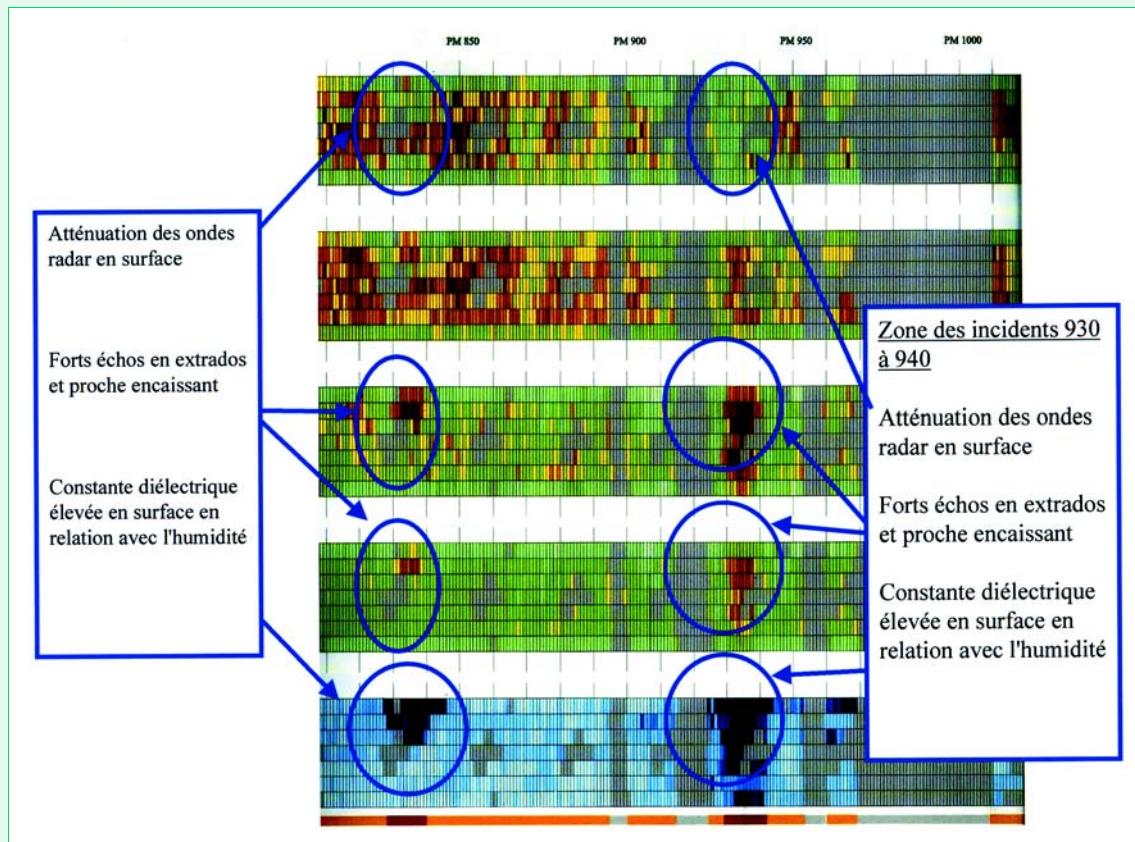


Fig. 14 - Recherche de points à caractéristiques identiques à celles relevées dans une zone d'incident.

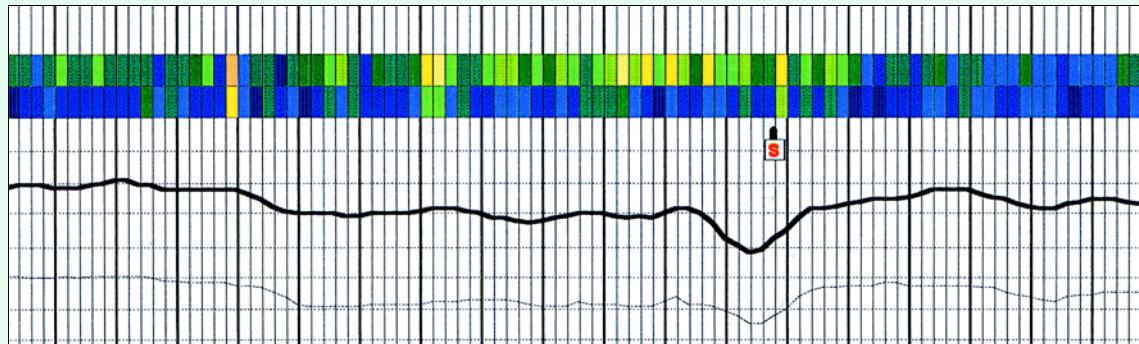


Fig. 15 - Exploitation des relevés en plate-forme avec forte variation d'épaisseur de ballast.



Fig. 16 - Rupture et tassement du radier par fissuration longitudinale.

Tunnel de Granejous

(Tarn)

Auscultation par GEORADAR

Extrait de radargramme
Profil transversal (auréole)

PM 660

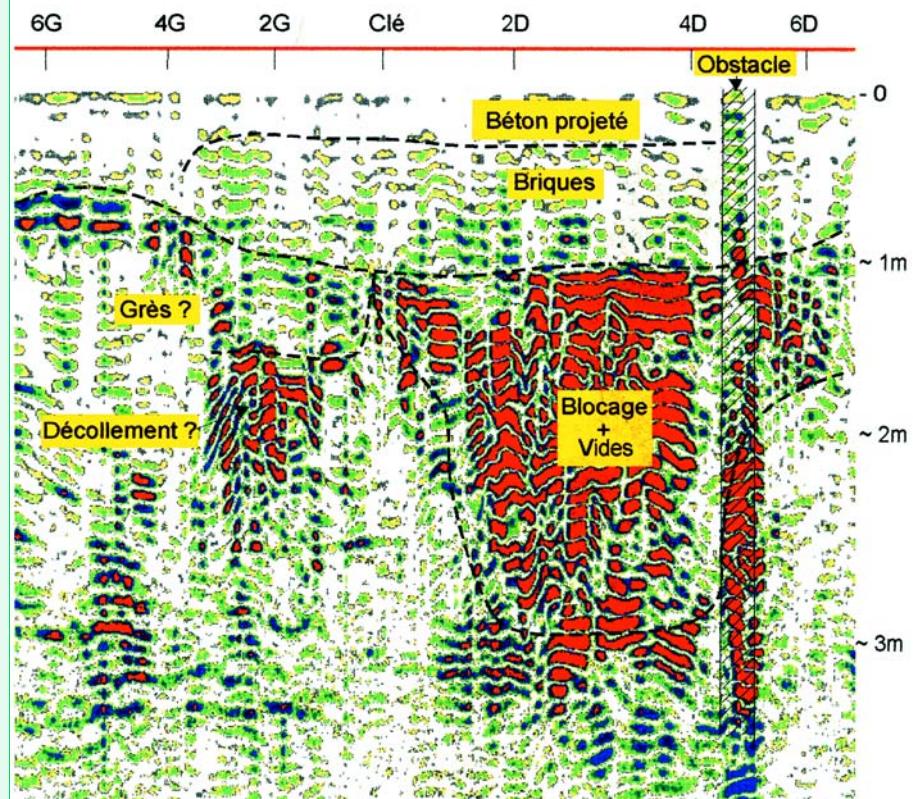


Fig. 17 - Section transversale de tunnel interprétée au niveau d'un vide de grande dimension.

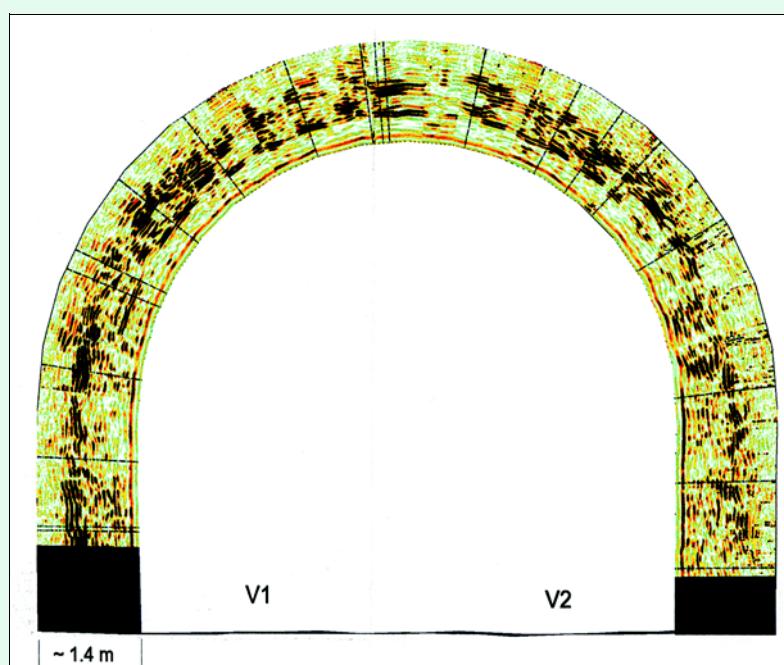


Fig. 18 - Section transversale avec radargramme déformé.

Conclusions

■ L'auscultation par radar est intégrée dans la chaîne d'analyse du diagnostic des tunnels gérés par la SNCF. Les sondages de contrôle ont permis, au fil du temps, de définir des domaines d'intervention privilégiés pour cette technique non destructive. Ainsi, les résultats les plus pertinents paraissent être obtenus sur les tunnels en briques et, d'une façon plus générale, sur les structures minces et courantes.

On a pu constater des difficultés d'observation de l'extrados dans les structures épaisse et des résultats perturbés en présence d'eau.

■ Une nouvelle phase d'amélioration des prestations se dessine actuellement par l'application aux données de traitements numériques supplémentaires. Aussi la SNCF a-t-elle missionné une étude de représentation des résultats en trois dimensions avec recherche de l'optimisation du nombre de lignes nécessaires à une bonne interpolation des données. La conclusion de cette étude est que ce type de prestations est possible sous réserve d'une forte augmentation du nombre de lignes d'auscultation, ce qui pose le problème de la disponibilité de l'ouvrage en raison de la forte augmentation des temps d'acquisition sur site.

D'autres pistes de recherche sont en cours d'exploitation au sein du groupe de travail « Maintenance de tunnels » de l'UIC (Union internationale des chemins de fer) comme, par exemple, l'adaptation des antennes à l'augmentation des densités de mesures et les enregistrements en couverture multiple.