

L'apport de la géophysique à la géotechnique – L'expérience de la station d'essais géophysiques sur la LGV Nord

S. NEBIERIDZE

SNCF

6, avenue

François-Mitterrand

93574 La Plaine Saint-Denis

serge.nebieridze@sncf.fr

Résumé

Afin d'améliorer la détection des cavités (essentiellement liées aux sapes et ouvrages de la guerre de 1914-1918) sous la ligne à grande vitesse Nord, la SNCF a réalisé pour le compte de RFF une station d'essais géophysiques en vraie grandeur, à proximité d'une voie de service de cette LGV. Sur cette station ont été testées les différentes méthodes géophysiques susceptibles de détecter ces cavités pouvant être à l'origine d'effondrements (fontis). Les essais comportaient un volet reconnaissance et un volet axé sur la surveillance de la ligne. Le premier a permis d'évaluer précisément la capacité de chaque méthode testée, de connaître les limites d'utilisation, d'obtenir des signatures étalonnées et enfin d'étudier les complémentarités éventuelles entre méthodes. Le second volet avait pour objectif de rechercher quelle méthode permettrait un balayage rapide de la ligne pour s'assurer de l'absence d'évolution et de création de vides à proximité immédiate de la plate-forme et plus précisément dans un premier temps juste sous les structures d'assises. A l'issue de ce projet, la SNCF a pu développer, améliorer son savoir-faire dans l'élaboration et la réalisation de campagnes de reconnaissance géophysique.

Mots-clés : ferroviaire, géophysique, cavité, aléa militaire, maintenance.

The use of geophysics for geotechnics – a geophysical test bench on the northern high speed line

Abstract

In order to improve detection of the cavities (primarily related to the trenches and structures built during the 1914-1918 World War) under the Northern high speed line, the SNCF carried out for the account of RFF a full-scale test bench, near a shunt track of this LGV. Geophysical methods were used to detect these cavities which could cause earth to cave in (dugouts). The tests included a prospection stage and a monitoring stage of the line. The first stage permitted to precisely evaluate the capacity of each method used, to identify the operational limits, to obtain calibrated results and to find out any complementarities between different methods. The second stage aimed to seek which method would allow a fast monitoring on the line to define whether there was some void or whether there was some evolution nearby the platform and more precisely directly under track bed structures. With this project, the SNCF has developed and improved its knowledge in defining, executing the geophysical prospection campaign.

Key words: railway, geophysics, cavity, military hazard, maintenance.

Introduction

La LGV (ligne à grande vitesse) Nord est soumise à un important aléa cavités (70 % des fontis recensés ayant une origine anthropique liée à la présence d'ouvrages militaires de 1914-1918). Lors des premières campagnes d'investigations des sols en 1994 puis en 2001-2004, la microgravimétrie a été retenue (avis d'expert) comme la méthode géophysique la plus appropriée. Cependant, la microgravimétrie comporte une part d'incertitude résultant à la fois des interprétations et des corrections des mesures. Les profondeurs d'investigation sont limitées et il est difficile de détecter de petites cavités d'ordre métrique. En outre, cette méthode ne permet pas un rendement très important et il est nécessaire d'implanter plusieurs forages pour caractériser correctement une anomalie. Enfin parmi les nombreuses anomalies découvertes lors des campagnes, beaucoup ne correspondent pas à des cavités. C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de tester l'ensemble des méthodes géophysiques pour la mise en évidence de vides de la taille des sapes ou de terrains décomprimés sous la plate-forme ferroviaire, dans le contexte géologique spécifique limons sur craie de la LGV Nord. La station d'essais, proposée par la SNCF (Société nationale des chemins de fer) à RFF (Réseau ferré de France), s'inscrit dans le cadre d'un plan d'actions (continuité et renforcement du précédent) engagé pour mieux comprendre l'aléa fontis. Ce plan fait suite à la recrudescence des fontis constatés en 2001 sur la ligne (1 500 fontis ont été recensés sur les 73 communes riveraines de la LGV). Outre ce volet « fontis », une étude a été consacrée à la caractérisation et à l'évolution des limons sous sollicitations dynamiques ferroviaires et en fonction de leur état hydrique. D'autres études portaient sur une expertise sur la localisation, les origines des fontis (aléa civil, aléa naturel, recensement, photo-interprétation) et sur la connaissance des phénomènes aggravants dans l'apparition des fontis (pluviométrie, mouvement de nappe, piézomètres, etc.).

La campagne d'essais a été bâtie afin d'une part d'évaluer précisément la capacité de chaque méthode testée et, d'autre part de connaître les limites d'utilisation et d'obtenir des signatures étalonnées. Enfin les complémentarités éventuelles entre méthodes ont été étudiées. Outre ce volet reconnaissance (définition des méthodes les plus performantes et les plus adaptées à la découverte de cavités) il a été ajouté un volet surveillance en recherchant quelle méthode (plus rapide et moins contraignante que la micro-gravimétrie) permettrait un balayage périodique et à grand rendement de certains secteurs de la ligne pour s'assurer de l'absence de cavités à proximité immédiate de la plate-forme et plus précisément, dans un premier temps, juste sous les structures d'assises. Le projet s'est déroulé de juillet 2002 à juin 2004, il a été financé par RFF le maître d'ouvrage. La maîtrise d'œuvre (MOE) générale du projet a été prise en charge par le département Études de lignes (IGLG) de la direction de l'ingénierie de la SNCF. Une mission d'expertise et de contrôle externe sur les travaux géophysiques a été confiée à M. Lagabrielle, directeur technique au LCPC, pour la mise au point du programme des reconnaissances (type de méthode, méthodologie...), pour s'assurer de la bonne réalisation des travaux géophysiques et pour donner son avis à chaque fin d'étape quant aux différents résultats obtenus. M. Derobert, LCPC, a également été

associé au projet pour une expertise sur le radar. La SNCF, grâce à ce projet, a pu, par la suite, concevoir des campagnes de reconnaissances plus pertinentes et plus adaptées aux différents problèmes rencontrés.

Présentation de la station d'essais

La station d'essais a été implantée aux abords de la gare TGV Haute-Picardie, au niveau de la voie 7 (voie de garage). Ce site se trouve entre les Pk (point kilométrique) 111 500 et 112 000 de la LGV Nord sur la commune d'Estrées-Déniécourt (Fig. 1).



FIG. 1 Vue aérienne du site.
Site view.

Deux galeries, de section 2 m x 2 m, ont été creusées afin de simuler des cavités représentatives des sapes de la guerre 14/18 qui représentent l'aléa principal identifié. Ces galeries, perpendiculaires à la voie de garage, ont été réalisées à partir de puits d'accès verticaux en bord de plate-forme. Les galeries ne vont pas au-delà de l'axe de la voie de garage, et ce de manière à ne pas perturber la stabilité des voies circulées contiguës et notamment de la voie 1, la plus proche. La première galerie, nommée A, se trouve à 1,5 m de profondeur (soit directement sous l'arase et les structures d'assise), mesure 12,8 m de long avec une pente de 6 %. La seconde galerie, nommée B, se trouve à 3,5 m de profondeur sous la voie de garage, donc au sein de la couche de limon, mesure 12,8 m de long avec une pente de 1 %. Les profondeurs sont données à partir du rail. Le creusement et le soutènement ont été établis de façon traditionnelle. Les soutènements sont totalement en bois permettant ainsi de simuler les galeries de la guerre 14/18 et de ne pas perturber les mesures géophysiques par la présence de béton ou de métal (Figs. 2 et 3).

Le projet s'est déroulé de 2002 à 2004. Les méthodes géophysiques (voir paragraphe suivant) ont été testées dans différentes phases et validées ou non pour les étapes suivantes.

Le projet a comporté 5 étapes numérotées de 0 à 4.

- Étape 0. Des mesures géophysiques ont été réalisées sur le site avant le creusement des galeries afin, d'une part, d'avoir un état de référence pour pouvoir comparer les différents résultats des autres étapes et, d'autre part, d'affiner les méthodologies d'acquisition.

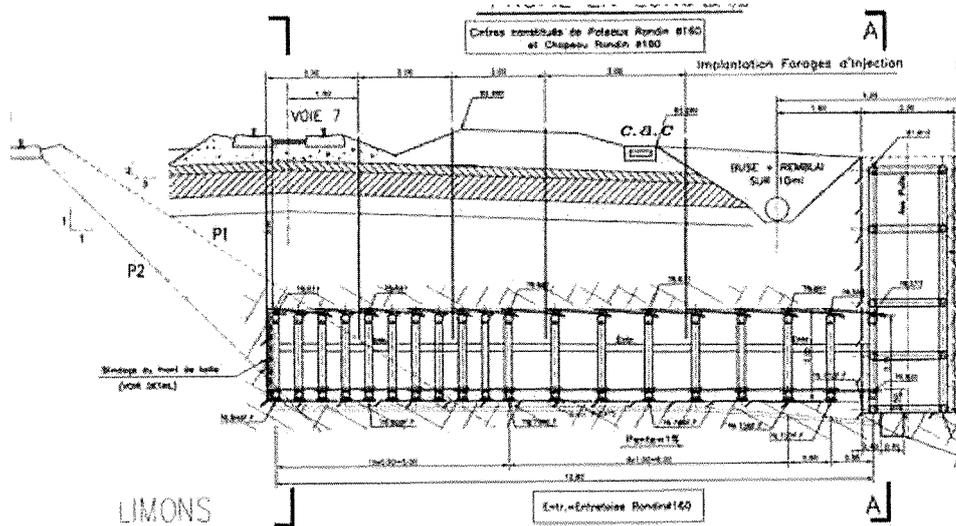


FIG. 2 Coupe de la galerie.
Gallery layout.



FIG. 3 Vue intérieure de la galerie.
Inside view of gallery.

- Étape 1. Les galeries ont été creusées, puis des mesures ont été réalisées avec les galeries vides afin de tester les méthodes pour la détection et la surveillance de cavités sous la plate-forme.
- Étape 2. Les galeries ont été remblayées à 50 % (avec les matériaux prélevés pendant le creusement) et cela sans compactage afin de simuler des remblaiements partiels des tranchées militaires.
- Étape 3. Les galeries ont alors été totalement remblayées, toujours sans compactage afin de simuler la présence d'un horizon de matériaux décomprimés. Il s'agissait ici d'étudier les signatures de ce matériau décomprimé.
- Étape 4. Les galeries ont été injectées. L'objectif était d'étudier les capacités des méthodes pour le contrôle des terrains après injection (extension du coulis d'injection, pollution éventuelle des structures d'assise...).

Les nombreuses méthodes géophysiques doivent être sélectionnées et mises en œuvre en fonction de différents critères dont :

- le problème technique à résoudre (recherche de cavités ? détermination de la géologie ? etc.) ;

- le type de terrain (nature, présence de différentes couches, présence d'eau...) ;
- le type de contraste entre la cible et l'encaissant ;
- la profondeur et la taille supposées de la cible ;
- l'environnement (accessibilité au site, nature même de l'environnement).

Le contexte ferroviaire n'est d'ailleurs pas le plus simple et ce notamment du fait de la présence de rails, traverses, ballast, caténaires, courants induits... Deux types de méthodes géophysiques ont été utilisés : les méthodes de surface et les méthodes en forages.

Les méthodes de surface étudiées sont la microgravimétrie, le panneau électrique, l'imagerie électrique 3D, la sismique réflexion très haute résolution, les ondes de surface (engendrées par des tirs à la masse ou par les trains), le radar géophysique de surface.

Les méthodes en forages testées sont la diagraphie de radioactivité naturelle (RAN), la diagraphie neutron-neutron (teneur en eau), la diagraphie gamma-gamma (masse volumique), la tomographie sismique, la tomographie radar, la réflectométrie radar en forage, le radar en surface-forage. Ces méthodes ont été utilisées uniquement sur la cavité profonde.

3

Les résultats

3.1

La microgravimétrie

Cette méthode utilise un gravimètre (Lacoste et Romberg, modèle D) et mesure l'anomalie du champ de pesanteur le long de profils longitudinaux en plate-forme (Fig. 4). Une cavité, associée à un déficit de masse, génère une anomalie gravimétrique négative. Les points de mesures peuvent être réalisés sur ou en dehors des voies. Quatre profils de mesures ont été réalisés, avec un maillage de 3 m par 3 m en quinconce.

On précise ici qu'une anomalie est significative en dehors du niveau de bruit qui est considéré de l'ordre

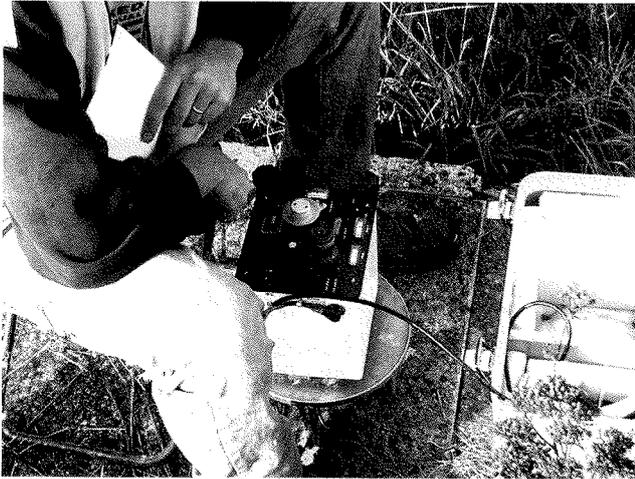


FIG. 4 Microgravimètre.
Microgravimeter.

de $-15 \mu\text{Gals}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$). Cette valeur a été définie avec M. Lagabrielle, en se basant notamment sur les nombreuses mesures déjà réalisées sur le TGV Nord.

Un maillage resserré de 1,5 m entre les points de mesures sur un même profil a été utilisé au niveau des galeries. Cette densification n'apporte pas de plus-value du point de vue des résultats par rapport à ceux obtenus avec un maillage de 3 m. On peut donc conclure que pour rechercher des cavités sous et à proximité de la plate-forme un espacement de 3 m entre les points de mesures est suffisant. À l'inverse, un maillage plus lâche ne serait pas adéquat compte tenu des anomalies à rechercher.

S'il existe de telles cavités sous plate-forme, on est sûr qu'elles donneront des anomalies microgravimétriques identifiables. À l'inverse toute anomalie microgravimétrique (semblable à celles observées) ne correspond pas forcément à une cavité ; il peut en effet s'agir de terrains décomprimés ou d'hétérogénéités par exemple.

Il a été constaté de plus que les extrema des anomalies ne sont pas rigoureusement situés à l'aplomb de l'axe des galeries. Indépendamment des galeries, le sous-sol n'est pas homogène, et les hétérogénéités de masse volumique se traduisent par un « bruit géologique » dont l'effet se superpose à l'effet des galeries. Ce bruit est représenté par l'anomalie résiduelle observée en phase 0. À l'aplomb de la galerie B, l'anomalie est négative entre -5 et $-10 \mu\text{Gals}$, légèrement décalée par rapport à l'axe de la galerie. Ceci explique à la fois l'anomalie un peu forte de la phase 1 et le décentrage du sommet de l'anomalie dans cette même phase 1.

L'implantation des sondages doit donc être faite avec minutie : on utilise à la fois les cartes d'anomalies résiduelles et les cartes d'anomalies de Bouguer (étudier le gradient des anomalies, variation des valeurs de Bouguer). Une simple modélisation a été faite pour vérifier que les valeurs mesurées correspondaient bien aux valeurs que l'on pouvait attendre.

Ces observations impliquent la nécessité de réaliser plusieurs forages pour définir une anomalie reconnue par cette méthode (ainsi il est arrivé de passer à 10 cm d'une cavité en se fondant uniquement sur la position de la valeur maximale d'une anomalie microgravimétrique). D'où l'importance de l'implantation et du nombre suffisant de forages de contrôles (avec un maillage adé-

quat), avec la possibilité de valoriser ceux-ci avec des techniques géophysiques en forage permettant d'augmenter le rayon des investigations des reconnaissances par forages (voir les résultats sur les méthodes en forage). On n'oubliera pas de faire réaliser un sondage de contrôle sur une anomalie positive afin de servir de référence pour l'étude comparative des autres forages. Il ne faut pas oublier également l'influence de la teneur en eau dans les mesures. Les conditions climatiques précédant la prise des mesures doivent être connues. Il est conseillé de réaliser des reconnaissances complémentaires concernant l'état hydrique des sols (teneur en eau par exemple). Des terrains saturés peuvent atténuer les réponses microgravimétriques. Enfin, nous rappellerons que la prise de mesures proprement dite est essentielle en microgravimétrie et qu'il faut s'assurer d'un strict respect des bonnes pratiques (un contrôle terrain n'est pas inutile) tant sur la qualité de la mesure que sur la méthodologie d'acquisition.

Vide, la cavité la moins profonde génère une anomalie résiduelle de $-35 \mu\text{Gals}$. La plus profonde génère une anomalie résiduelle de $-25 \mu\text{Gals}$ confirmant ainsi que la microgravimétrie est une méthode pertinente dans le cas présent. À moitié vides, seule la galerie la moins profonde est détectée (de l'ordre de $-20 \mu\text{Gals}$), la plus profonde étant à la limite de la détection. Les deux cavités remblayées ne sont pas détectées (les valeurs étant bien inférieures au seuil de détectabilité). En effet, elles sont de l'ordre de -10 à $-5 \mu\text{Gals}$ pour la galerie profonde et de -5 à $5 \mu\text{Gals}$ pour l'autre galerie (Fig. 5).

La microgravimétrie ne montre aucune anomalie significative au niveau des galeries lors des mesures réalisées après injections. Au niveau de la galerie peu profonde, l'anomalie de $-10 \mu\text{Gals}$ présente lors de la première étape n'apparaît plus, on a une valeur de $+5 \mu\text{Gals}$. La disparition de l'anomalie s'explique par la diffusion du coulis aux abords de la galerie, confirmant ainsi la sensibilité de la méthode à l'évolution de la répartition des masses dans les sols en regard de leur densité.

3.2

La sismique réflexion très haute résolution (THR)

La sismique réflexion est utilisée dans le domaine pétrolier avec des profondeurs d'investigation très importantes (de l'ordre de plusieurs kilomètres). La sismique très haute résolution utilise les mêmes principes mais pour le domaine de la subsurface. Cette méthode utilise des géophones placés le long d'un profil pour enregistrer des ondes sismiques (ici des ondes de volume) engendrées par l'impact d'une masse sur le sol (Fig. 6). Des géophones de 10 Hz et un laboratoire sismique numérique de 48 canaux, OYO DAS-1 ont été utilisés. Une sommation de 3 à 5 tirs a été effectuée pour garantir un niveau suffisant de signal. Différents traitements ont été appliqués aux données sources avec notamment : filtrage FK (à différentes vitesses), filtre passe bande ou passe haut, correction NMO, déconvolution, DMO...

Le profil de mesure est implanté en piste. On ne peut en effet réaliser le profil sur le ballast en raison du défaut de couplage géophones-ballast. Le signal n'est pas assez énergétique dans cette configuration.

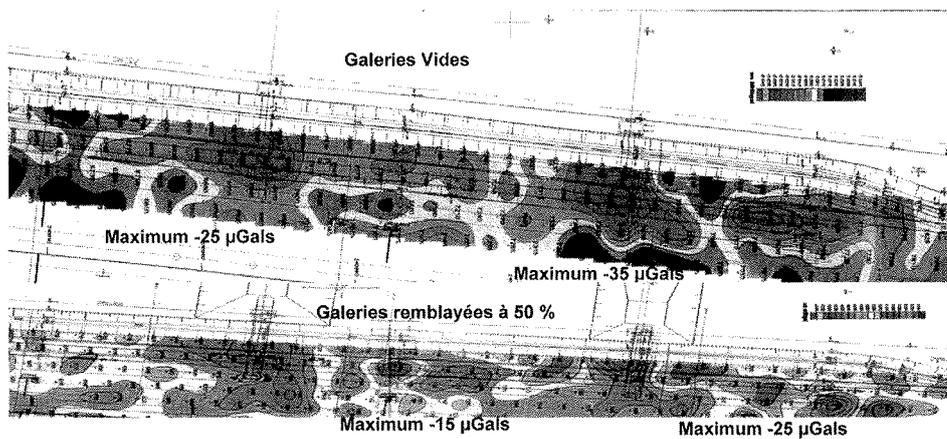


FIG. 5 Microgravimétrie cartes d'anomalies résiduelles : galeries vides (au-dessus) et galeries à moitié remblayées.
Microgravimetry residual anomaly : empty galleries (above) and half full galleries.

Les deux cavités ont été détectées lors des étapes 1 et 2. On précisera tout de même ici qu'à la différence de la microgravimétrie cette méthode permet de détecter des hétérogénéités à des profondeurs importantes (plusieurs dizaines de mètres, ce qui n'a pas été fait dans le cadre du projet). Elle donne également une information sur la profondeur de l'anomalie ainsi que sur sa localisation en plan (Figs. 7 et 8). Par ailleurs, cette méthode permet de connaître les fluctuations du toit de la craie.

Il est apparu opportun d'étudier également le cas où un profil n'était pas placé directement au-dessus des cavités. Des essais ont été alors réalisés lorsque les galeries étaient remblayées à 100 %, les puits étant vides. Un profil d'acquisition a été fait latéralement au puits d'accès de la galerie profonde (à 3 mètres de celui-ci pour simuler la distance piste-voie). Le vide a été détecté.

Il est donc possible avec la méthode de la THR de détecter des vides (ou des anomalies) situées latéralement et à proximité du profil d'acquisition. Cela implique également qu'il faille un certain nombre de sondages (à définir en fonction de l'anomalie) d'une part au niveau du profil mais également latéralement de chaque côté pour être sûr de circonscrire l'anomalie.



FIG. 6 Acquisition sismique.
Seismic acquisition.

La réalisation de plusieurs profils peut permettre de diminuer le nombre de forages en comparant les résultats par profil.

3.3

Les ondes de surface

De même que la méthode précédente, on utilise des géophones disposés en profils pour enregistrer des ondes sismiques (ici ondes de surface). Différents types d'acquisition ont été réalisés en utilisant comme source sismique :

- l'impact d'une masse sur une plaque métallique posée sur le sol (poids entre 10 et 20 kg) ;
- le signal généré par une circulation ferroviaire ;
- les vibrations générées par les circulations autoroutières de l'autoroute A1.

Dans le cas de l'impact d'une masse sur le sol comme source sismique, les cavités ont été détectées vides. Avec cette source, seuls des profils hors ballast ont été réalisés, au niveau du ballast le signal n'étant pas assez important pour pouvoir être étudié dans cette configuration. Les études réalisées avec les ondes générées par le train ont permis de détecter les galeries vides. Toutefois, la méthode n'est pas pertinente d'un point de vue économique (du fait notamment de la nécessité d'avoir une forte densité de géophones et du nombre important de données à traiter).

La méthode utilisant les vibrations autoroutières a permis de détecter les cavités remblayées à moitié (cette méthode a été mise en œuvre en cours de projet). Elle permet d'identifier les deux cavités (tant en plan qu'en profondeur). La profondeur d'investigation est de l'ordre de 15 m (non testée dans le cadre du projet), le rendement de l'ordre de 100 m/h et les mesures en voies sont possibles (Fig. 9).

3.4

Le radar de surface

La technique du radar de surface ayant fait des progrès technologiques depuis les prospections 1994, notamment pour le diagnostic des assises de voies, a

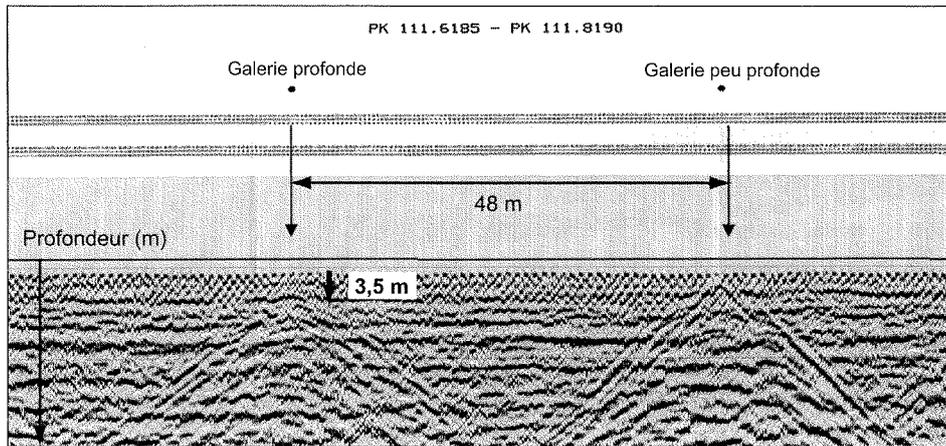


FIG. 7 Profil sismique réflexion THR.
Reflection seismic THR profile.

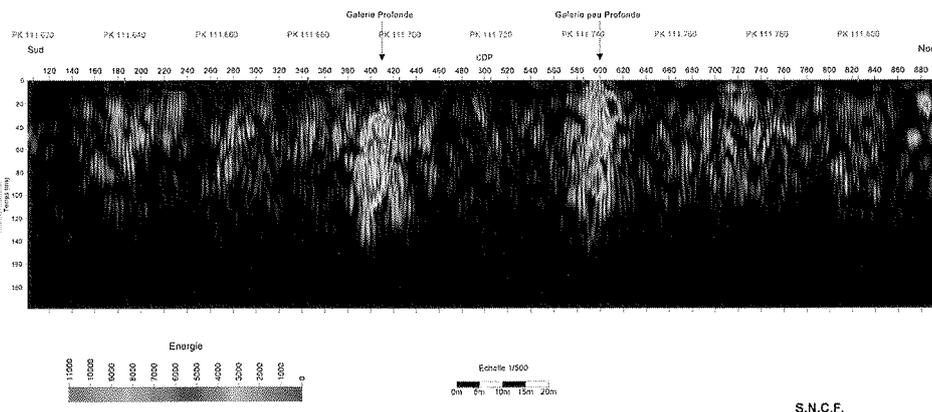


FIG. 8 Profil sismique, énergie du signal.
Seismic profile, signal energy.

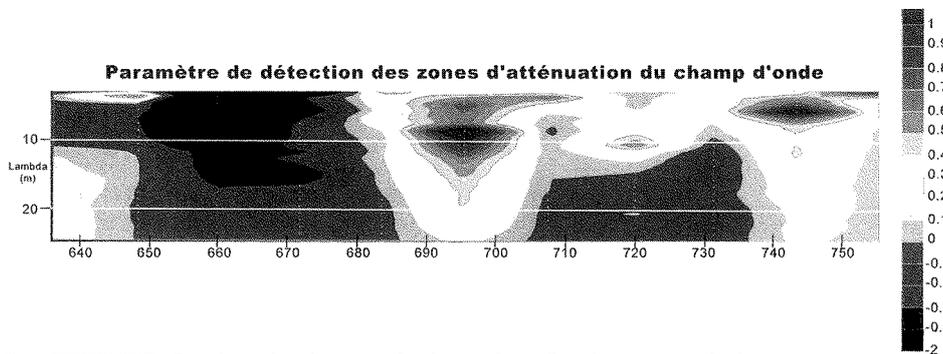
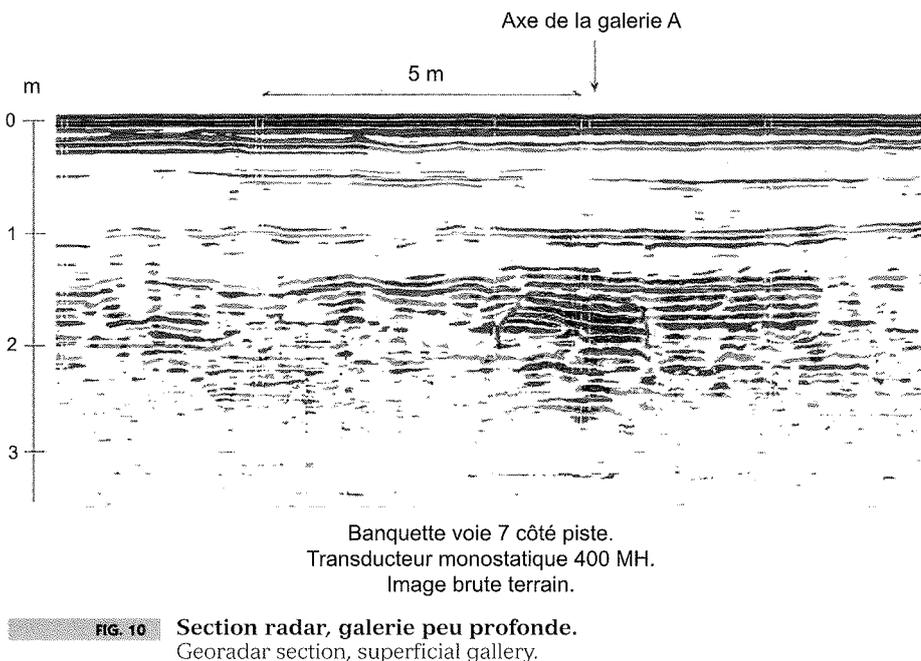


FIG. 9 Section sismique onde de surface (bruit autoroutier).
Seismic section surface waves.

été retenue pour faire de nouveaux tests. L'acquisition se fait à l'aide d'antennes, émettant des ondes électromagnétiques, que l'on déplace le long de profils. Pour une acquisition en voies, le radar peut être placé sur un lorry afin de rendre optimum l'acquisition (faciliter le déplacement, garder une vitesse régulière...). On sait que les limites de la méthode sont liées au pouvoir de pénétration des ondes électromagnétiques dans le sol, pouvoir qui est inversement proportionnel à la nature argileuse des terrains et à la présence d'eau. Dans le

contexte de la LGV Nord se pose donc le problème de la traversée de l'arasé terrassement en limons traités à la chaux (épaisseur de 30 à 40 cm) puis des limons argileux sous jacents.

Des essais en grandeur réelle sur plate-forme LGV ont été réalisés avec trois sociétés différentes au cours de la campagne d'investigation 2001. Bien que ces premiers essais aient été décevants, il a été jugé utile de poursuivre les tests avec cette méthode dans le cadre de la station d'essais, en particulier pour valider



au moins la capacité de cette technique à détecter un vide se trouvant directement sous les structures. Cet objectif était lié également au volet « amélioration de la surveillance », en recherchant un système d'auscultation rapide de la plate-forme permettant d'envisager des campagnes périodiques de reconnaissances (suivi d'évolution). Il a donc été décidé, lors de l'étape 1, de faire un appel très large aux professionnels reconnus dans le domaine du radar de surface (national et international), de manière à pouvoir conclure sans ambiguïté sur la capacité ou non de cette méthode pour détecter des cavités directement sous les structures d'assise dans le contexte spécifique du TGV Nord.

Pour la plupart des entreprises les résultats obtenus ne permettent pas de détecter la présence des galeries, ou donnent des signaux à la limite de « l'interprétabilité », non véritablement significatifs, et qui ne pourraient être pris en considération sans ambiguïté dans le cadre d'un grand linéaire d'acquisition. Toutefois, à l'issue de la campagne de mesures une entreprise a mis au point une méthodologie permettant d'identifier la galerie la moins profonde (Fig. 10). Cette dernière a d'ailleurs été identifiée lors des différentes étapes de mesures (la diffusion du coulis d'injection a été imagé lors de la dernière étape). Les antennes utilisées dans ce cas sont des antennes de fréquence de fréquence centrale 200 MHz de GSSI associées à un SIR 20.

L'un des objectifs du projet était aussi de pouvoir définir une méthode de surveillance à haut rendement de la ligne. Pour cela la méthode devait répondre aux critères suivants : la pertinence (ne pas générer de « fausses » détections), un coût « limité », être opérationnelle en voie, répétitive, continue, non destructive et à haut rendement. Seule la méthode du radar de surface répondait à ces critères. Un système à rendement important (5 km/h) a alors été développé (en se basant sur les résultats positifs) pour réaliser de longs linéaires (système robuste) et ce afin d'identifier la présence de cavités de tailles militaires bloquées juste sous les structures d'assise (Fig. 11). Les antennes se situent à l'intérieur du lorry avant, le laboratoire d'acquisition dans le lorry arrière.

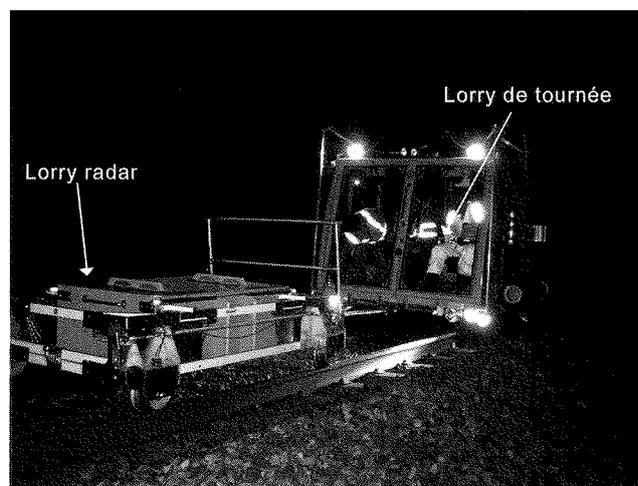


FIG. 11 Acquisition radar à haut rendement pour la détection de cavités bloquées sous les structures ferroviaires.

Radar acquisition for high linear and high output to detect military cavity just below structures.

3.5

La tomographie radar

Cette méthode utilise des ondes électromagnétiques se propageant entre deux forages (l'un contient une antenne émettrice et l'autre une antenne réceptrice) (Fig. 12). Des antennes de fréquence centrale 100 MHz de Radarteam ont été utilisées, associées à SIR 2000 de GSSI.

Les tomographies ont permis de distinguer trois horizons (les structures, les limons puis la craie). Dans le contexte géologique de la station d'essais, la tomographie radar permet de visualiser un vide franc entre deux forages distants de 4 mètres. Les vides sont très bien identifiés lors des différentes étapes. La méthode donne une idée de la dimension de la section de la galerie entre les deux forages (les vides résiduels sont



FIG. 12 Acquisition tomographie radar en forage (antennes dans les forages).
Radar tomography in borehole (antenna in boreholes).

mêmes identifiés lors de l'étape 3). Lors de l'étape 4 (suite aux injections), le coulis, milieu conducteur, ne permet pas aux ondes électromagnétiques de passer (on a une absence de données sur le panneau) (Fig. 13). Des essais ont été menés entre des forages espacés de 4 m, 7 m et 9 m. Le contexte géologique en présence ne permet d'avoir de bons résultats que pour le panneau de 4 m. En effet, les limons de nature très conductrices atténuent très rapidement les ondes émises.

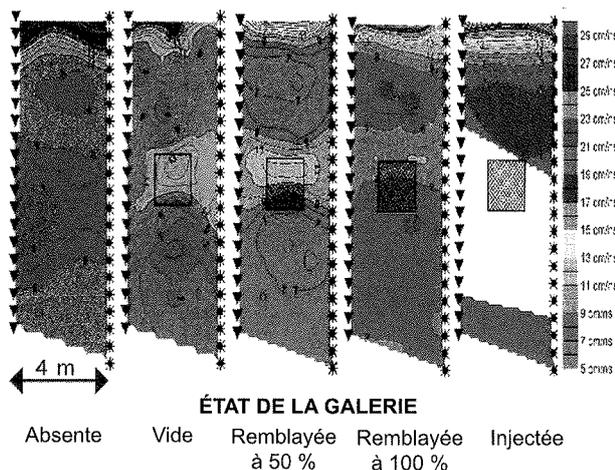


FIG. 13 Résultats de la tomographie radar à chaque étape.
Radar tomography results for each step.

3.6

Autres méthodes

Les méthodes suivantes, le panneau électrique, la réflectométrie radar en forage et en surface-forage, les tomographies sismiques, la diagraphie RAN, ont été testées sans pour autant mettre en évidence la présence des cavités (la diagraphie RAN avait été mise en œuvre pour la connaissance du sol, notamment la distinction limon et craie).

Les résultats concernant l'imagerie électrique auraient été peut-être plus concluants avec des cavités ennoyées quoique l'on ait eu un bon contraste entre le vide (résistant) et les limons (conducteurs). Les mesures

réalisées en piste ne semblent pas avoir été perturbées par les infrastructures. Nous n'avons pas d'explication d'autant que les mesures ont été de qualité, elle n'en reste pas moins très intéressante dans le cadre d'une reconnaissance géologique.

3.7

Conclusions sur les résultats

La station d'essais réalisée sous la V7 de Chaulnes a permis d'obtenir des résultats particulièrement intéressants non seulement en ce qui concerne le volet reconnaissance de cavités (de petites dimensions et à faibles profondeurs) mais également pour le volet surveillance de la ligne. On rappellera toutefois que les résultats obtenus sont spécifiques au contexte géologique, limons sur craie, du TGV Nord et que certaines méthodes peuvent s'avérer beaucoup plus adaptées et performantes dans d'autres types de terrain (par exemple, le radar de surface peut pénétrer jusqu'à 8 mètres de profondeur dans des terrains calcaires).

3.7.1

Volet reconnaissance

Il a été confirmé sans ambiguïté que la méthode microgravimétrique, utilisée dès le début pour les reconnaissances sur la LGV Nord, permet d'obtenir des signatures parfaitement significatives pour des cavités de la taille des galeries militaires de la guerre de 1914-1918, situées dans un horizon à faible profondeur sous la plate-forme (tranche de 0 à 6 m environ). A ce titre l'objectif sécuritaire majeur des reconnaissances menées jusqu'à présent est atteint. Depuis 1994, 103 km de plate-forme ont été reconnus en microgravimétrie et plus de 8 000 forages ont été réalisés.

Parallèlement les limites de la microgravimétrie ont été bien mises en évidence, notamment pour la détection de cavités profondes. De même cette méthode montre de nombreuses anomalies qui ne sont pas en relation directe avec des vides mais plutôt liées à la teneur en eau des terrains (des terrains gorgés d'eau ou secs ne donnent pas les mêmes réponses) et à des hétérogénéités du sol (en rappelant ici l'importance de la qualité de la mesure : des mesures de mauvaise qualité peuvent en effet conduire à des résultats tout à fait erronés).

La cavité la moins profonde a été détectée par les méthodes suivantes : la microgravimétrie, le radar de surface, la sismique réflexion très haute résolution (THR), les ondes de surface, la tomographie radar. Les mêmes méthodes ont permis de détecter la cavité la plus profonde excepté le radar de surface. A la différence des autres méthodes la microgravimétrie n'a pas été pertinente lorsque les galeries étaient remblayées. La galerie profonde à moitié remblayée étant en limite de détection. La réflectométrie radar, le radar en surface-forage, la tomographie sismique et le panneau électrique ne sont pas des méthodes permettant de détecter des cavités dans ces conditions géologiques.

Les essais réalisés ont permis d'enrichir la panoplie des méthodes disponibles pour les reconnaissances à mener, notamment pour la détection de cavités à plus grande profondeur et pour la valorisation des investigations en forage. En fonction des performances des différentes méthodes, de leurs contraintes de

mise en œuvre et des types d'aléas (exemple : cavités situées dans les horizons supérieurs ou marnières à plus grande profondeur dans la craie), il est aussi possible d'optimiser un programme des reconnaissances à mener en jouant sur la complémentarité des différentes méthodes géophysiques.

3.7.2

Volet surveillance

Compte tenu de la nécessité d'une surveillance périodique de certains tronçons de la ligne pour contrôler l'absence d'évolution sous la plate-forme, il était fondamental de pouvoir disposer de méthodes d'auscultation à grand rendement, plus rapides et moins contraignantes que la microgravimétrie, et dont la fiabilité serait démontrée. Là encore l'objectif a été atteint. La capacité du radar a été montrée et ce pour identifier une cavité qui serait bloquée immédiatement sous les structures d'assise, celles-ci ayant un « effet dalle » retardateur.

La galerie située à 1,5 m de profondeur a en effet été identifiée avec une vitesse d'acquisition de 3 km/h environ. Des développements ont été depuis réalisés afin de pouvoir réaliser des mesures à haut rendement (5 km/h) et ce sur des linéaires importants (des dizaines de km). Un état de référence sur l'ensemble de la ligne est en cours de réalisation. De plus, les méthodes par mesures des ondes de surface (mesure par bruit ambiant...) offrent des perspectives intéressantes et très prometteuses. Des recherches exploratoires complémentaires ont été lancées dans ce domaine.

4

Applications des résultats

4.1

Savoir-faire

Le projet de la station d'essais géophysiques nous a permis de définir, pour la recherche de cavités, un catalogue de méthodes applicables en environnement ferroviaire avec leurs aspects positifs et négatifs. Certaines de ces méthodes peuvent être utilisées pour d'autres objectifs. De même, certaines autres méthodes non testées ici, comme par exemple les méthodes électromagnétiques basses fréquences, peuvent être utilisées dans le domaine ferroviaire dans certains cas.

Ce projet nous a permis de compléter et développer notre savoir-faire dans la réalisation de campagne de reconnaissances. On peut diviser une campagne de reconnaissances en quatre points, à savoir :

- la définition de la campagne proprement dite (à travers la rédaction du cahier des charges) ;
- le choix des prestataires (en jugeant les moyens humains et matériels lors du dépouillement des appels d'offre) ;
- le contrôle terrain en suivant la réalisation des mesures ;
- le contrôle critique des résultats et des interprétations.

Ces deux derniers points conditionnent notamment les suites données aux problèmes rencontrés ; ils doi-

vent donc tout particulièrement être contrôlés (impact technico-économique). De plus, ils sont directement liés à la fiabilité du diagnostic ce qui se traduit sur la sécurité. La SNCF, à partir des campagnes géophysiques, met en place les mesures adéquates pour garantir la sécurité des circulations.

4.2

Exemples

Différents exemples sont pris par la suite montrant de quelle façon les résultats de la station d'essais ont été appliqués dans le cadre de la maintenance ferroviaire et plus particulièrement dans la reconnaissance de désordres observés en surface et pour lesquelles l'origine devait être trouvée (nature, extension, risque...).

4.2.1

Le viaduc du Mée

• Les faits et le contexte

Un fontis a été observé en 2004 dans l'entrevoie V1/V1bis à la limite du remblai du Mée et de la culée du viaduc du même nom sur la ligne Paris-Marseille (Fig. 14). Ses caractéristiques étaient les suivantes : longueur 2,20 m, largeur 1,00 m, profondeur 0,90 m, soit un volume de 1,5 à 2 m³ environ. Le viaduc est fondé sur les calcaires de Champigny (affleurant sur cette rive). Le remblai repose certainement sur cette formation. Au niveau du fontis, il est composé des marnes et argiles vertes extraites du déblai contigu du Mée.



FIG. 14 Fontis au niveau du viaduc.
Disorder on the viaduct.

Aucun désordre ou incident n'avait été recensé jusque-là et aucun désordre structurel proprement dit apparent et affectant l'ouvrage n'a été observé. L'apparition du fontis est certainement liée aux circulations d'eau constatées à l'arrière de la culée (goutte à goutte, traces de ravinement, sable fraîchement déposé sur le talus). A l'origine de ces venues d'eau on trouve une déficience du système de captage de l'évacuation des eaux ramenées par l'étanchéité du tablier. Des circulations auraient ainsi provoqué un lessivage progressif des sols du remblai, avec entraînement de fines, formation d'une cloche de décompression jusqu'à effondrement et apparition du fontis.

• Les mesures

Les mesures géophysiques devaient permettre de définir l'extension des désordres (tant en plan qu'en profondeur) au niveau du fontis mais également de définir la présence éventuelle de réseaux, canalisations ayant pu faciliter des circulations d'eau. Étant donné le contexte, le radar de surface avait été préconisé.

• Les résultats

Les résultats des mesures radar n'ont pas été « polués » par la détection de nombreuses anomalies. Aucune canalisation n'a été retrouvée. Les mesures ont permis de définir la présence de deux zones d'anomalies significatives. L'une a été définie comme vide probable et l'autre comme vide possible. Le vide probable a été confirmé par sondage. Il a été injecté (3 m³ et à très faibles profondeurs, moins d'un mètre). Aucun vide n'a été rencontré sur les sondages de contrôle de la deuxième anomalie, traduisant en cela une éventuelle fausse détection.

4.2.2

La gare de Cambrai

• Les faits et le contexte

La gare de Cambrai est partiellement construite sur d'anciennes exploitations de craie. Le toit de ces exploitations est situé à environ 20 m de profondeur alors que le toit de la craie est environ à 2 ou 3 m sous la plate-forme. Il s'agit de carrières type chambres/piliers et dont la hauteur exploitée est de l'ordre de 3 m. D'après des plans d'archives SNCF datant de 1905, les carrières situées sous les emprises sont remblayées. Plusieurs fontis sont apparus dans la zone de la gare (le premier de l'époque « moderne » a été recensé en 1981). Le SDIC (Service départemental de l'inspection des carrières) a informé la SNCF en 1990 de la probabilité de la présence de carrières non répertoriées sous les emprises. Des sondages de contrôle avaient été réalisés lors de l'apparition des derniers fontis sans pour autant mettre en évidence la présence de vides ou de terrains décomprimés. Le dernier fontis date de 2004 avec les caractéristiques suivantes : profondeur 2,2 m, diamètre 30 cm en surface et 1,5 m au fond (Figs. 15 et 16).

• Les mesures

Étant donné les profondeurs des cibles recherchées, il a été décidé de réaliser des mesures géophysiques non destructives par sismique réflexion THR. Seule cette méthode permettait d'avoir des données en continue et d'atteindre les profondeurs concernées.



FIG. 15 Gare de Cambrai, fontis à côté de la voie.
Cambrai Station, hole near the railway.



FIG. 16 Le même fontis en profondeur.
The same hole in depth.

• Les résultats

Des sondages de contrôle ont alors été réalisés sur des zones caractérisées par la géophysique comme pouvant être en relation avec la présence de vides. Deux niveaux de vides ont été mis en évidence et confirmés par la vidéo. Le premier correspond à une descenderie pour accéder aux carrières situées plus en profondeur et rencontrées sur le deuxième niveau de vide vers 22 m de profondeur (Fig. 17). Un comblement a été réalisé par coulis autocompactant.

4.2.3

La gare de l'Est

• Les faits

Depuis 1931 (agrandissement de la gare), plusieurs fontis ont été recensés (au niveau des quais, des voies) en gare de l'Est et ont nécessité des traitements des sols par injection. En septembre 2 000 un fontis (2 m de haut, 1 m de large) est apparu affectant le quai 9 et les voies adjacentes (à 20 m des heurtoirs), entraînant la rupture d'un ovoïde. Suite à l'apparition de ces désordres en gare de l'Est, RFF et la SNCF ont décidé de procéder à des investigations au niveau de la plate-forme ferroviaire.



FIG. 17 Carrière en profondeur.
Quarry in depth.

• *Le contexte géologique*

La gare de l'Est est située dans le périmètre de risques dus aux phénomènes de dissolution de gypse antéludien. Ce dernier a été exploité à ciel ouvert puis les carrières ont été remblayées. Les formations rencontrées, avec des puissances variables, sont des remblais puis les sables de Monceau (de faible puissance au niveau de la gare), les marno-calcaires de Saint-Ouen, les sables de Beauchamp, les marnes et caillasses et, enfin, le calcaire grossier.

Deux types d'anomalies ont été mis en évidence suite aux différentes campagnes de reconnaissances (microgravimétrie, sondages de contrôle, injections) réalisées avant 2006 :

- type 1 : des anomalies situées à 11-14 m de profondeur (dans les formations des marno-calcaires de Saint-Ouen) ;
- type 2 : des anomalies situées à 29-41 m de profondeur (dans les marnes et caillasses). Il s'agit tout d'abord de traiter le premier type d'anomalies, celles-ci étant susceptibles d'entraîner plus facilement des remontées de fontis en surface. Elles correspondent à des vides francs, à des niveaux très fortement décomprimés en relation avec des phénomènes de dissolution du gypse.

• *La méthode utilisée*

La méthode à utiliser devait permettre à la fois de s'adapter au contexte de la gare (nombreuses voies, circulation importante tant des trains que des voyageurs, présence d'autres travaux, présence d'appareils de voies), à la profondeur des anomalies recherchées (jusqu'à environ 15-20 m), à la présence de ballast (les quais ne sont présents que sur les 400 premiers mètres). La méthode devait également permettre un rendement assez important (afin de ne pas trop affecter les autres chantiers sur le site). L'objectif des mesures était de reconnaître les terrains et plus particulièrement les niveaux décomprimés voire les vides puis de les traiter afin de prévenir les futurs désordres potentiels.

Un des résultats positifs de la station d'essais géophysiques a été l'utilisation de la méthode sismique des ondes de surface par l'entreprise Sismocean. La source sismique était dans ce cas les vibrations engendrées par les circulations autoroutières situées à proximité du site de mesures. Un brevet a été déposé par l'Entreprise sur la méthodologie mise en œuvre appe-

lée DCOS (détection de cavités par ondes de surface). Après différentes opérations menées dans le cadre de la recherche, Sismocean a été missionné pour réaliser les investigations en gare de l'Est.

Avant de la mettre en œuvre en vraie grandeur sur le site de la gare, il restait à vérifier que le bruit anthropique présent était suffisant (mesures réalisées de nuit afin d'être peu perturbé par les circulations ferroviaires) et d'étalonner les anomalies géophysiques importantes. Deux phases préliminaires ont été réalisées donnant entière satisfaction :

- une phase de pré faisabilité a permis, en analysant les différents bruits, mesurables sur le site de la gare de l'Est, de statuer positivement sur la pré faisabilité de la mise en œuvre de la méthode DCOS afin de répondre aux objectifs fixés (Figs. 18 et 19) ;
- une phase de faisabilité dont l'objectif était de mettre en œuvre la méthode en vraie grandeur, de contrôler par sondages les anomalies détectées et ainsi vérifier la pertinence de la méthode.

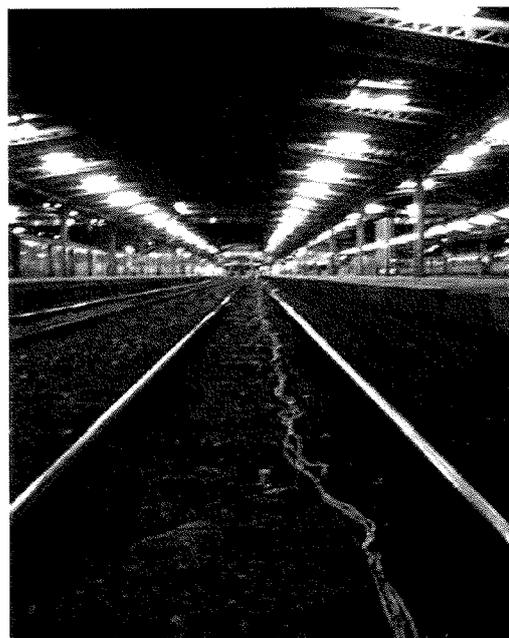


FIG. 18 Acquisition sismique.
Seismic acquisition.



FIG. 19 Géophone posé sur le ballast.
Geophone on ballast.

• Les résultats

Les mesures ont été réalisées de nuit au cours du second semestre 2006 sur 15 semaines environ en atteignant des rendements de 100 m/h et ce malgré le contexte délicat que représente la gare de l'Est. Le linéaire total mesuré est d'un peu plus de 8 200 m. Le rendement de la méthode a été amélioré au cours de la campagne en passant le nombre de géophones de la flûte de 72 à 96. La figure 20 montre les résultats d'un profil sur 200 m environ en voie. Les variations d'énergie sont représentées par des couleurs. En ordonnée on retrouve la longueur d'onde qui permet d'avoir une idée de la profondeur à laquelle se situe l'anomalie. Les rectangles verts hachurés représentent la position des terrains décomprimés rencontrés lors de la réalisation des sondages de contrôle (sondages de type destructif avec enregistrement de paramètres). La corrélation entre la géophysique et les sondages est bonne à quelques exceptions près.

Une vingtaine de zones d'anomalies considérées comme significatives ont été définies. L'ensemble de la campagne depuis sa définition jusqu'aux résultats a été validé par l'expert du LCPC missionné sur le projet (M. Lagabrielle). Les sondages de contrôle ont été réalisés en 2007. Il s'agissait de sondages destructifs en mode rotoperçusion avec enregistrement de paramètres (vitesse d'avancement, couple de rotation, débit, percussion réfléchi, pressions de poussée, d'injection et de retenue). Quarante-cinq sondages ont été exé-

cutés. Les contraintes ferroviaires (nombre de voies important, interception des voies retardées en raison de circulations...) n'ont permis qu'un rendement de 1 à 2 sondages par nuit. La corrélation entre les anomalies géophysiques et les sondages de contrôle est assez bonne sur la première partie du secteur reconnu (jusqu'à l'hectomètre 430). Dans la seconde partie, la corrélation n'a pas pu être mise en évidence. Bien que la géophysique indique la présence d'anomalies importantes l'ensemble des sondages montre des terrains très résistants mécaniquement (à quelques exceptions près). Les anomalies détectées pourraient être dues à l'influence latérale d'anomalies situées de part et d'autre de la tranchée (caves d'immeubles jouxtant les voies à cet endroit...).

5

Conclusion

La LGV Nord est soumise à un important aléa de cavités. Dans le cadre d'un plan d'actions une station d'essais géophysiques a été réalisée afin d'évaluer les capacités de chaque méthode et d'en apprécier les limites d'utilisation dans le cadre de la détection de cavités. Suite à ces essais, la SNCF a été plus à même de concevoir des campagnes de reconnaissances plus pertinentes et plus adaptées à différents problèmes rencontrés et notamment au regard de l'aléa cavité.

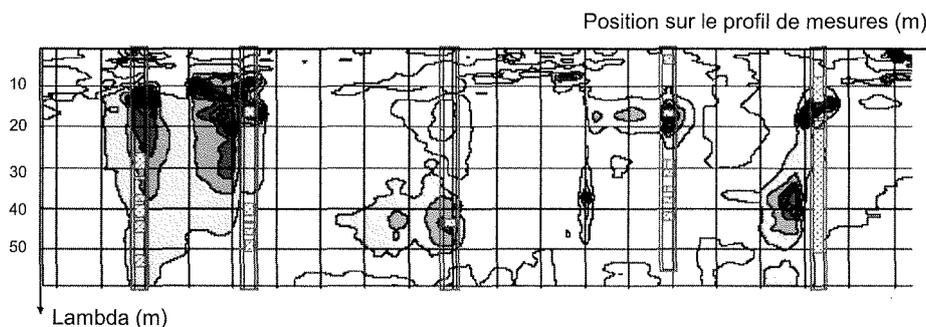


FIG. 20 Corrélation géophysique et sondages de contrôle.
Comparison between geophysics and borehole investigation.

Bibliographie

- Cosenza P., Marmet E., Rejiba F., Cui Y.-J., Tabbagh A., Charlery Y. – Correlations between geotechnical and electrical data : a case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 60, n° 3-4, 2006, p. 165-178.
- Fauchart C., Pothérat P. – *Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques*. IST-Diffusion des éditions, 2004.
- Grandsert P. – LGV Nord : station d'essais des méthodes géophysiques de détection de cavités sous voies. *Revue générale des chemins de fer*, 2005.
- Maquaire O., Flageollet J.-C., Malet J.-P., Schmutz M., Weber D., Klotz S., Guérin R., Descloîtres M., Schott J.-J., Albouy Y., Dietrich M. – Une approche multidisciplinaire (géomorphologie, photogrammétrie numérique, géotechnique, géophysique) pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue française de géotechnique*, n° 95-96, p. 15-31.
- Mari J.-L., Arens G., Chapelleir D., Gaudiani P. – *Géophysique de gisement et de génie civil*. Éditions Technip, 1998.
- Tabbagh A., Panissod C., Benech C., Dabas M., Jolivet A., Guérin R. – Un outil de reconnaissance géophysique en milieu urbain : la prospection électrostatique. *Revue française de géotechnique*, n° 101, 2002, p. 3-10.