

UTILISATION DU BRUIT AMBIANT COMME SOURCE SISMIQUE POUR DETECTER DES CAVITES – GARE DE L'EST.

DETECTION OF CAVITIES USING AMBIENT NOISE AS SEISMIC SOURCE – GARE DE L'EST

Vincent TALFUMIERE¹, Serge NEBIERIDZE¹
1 Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF), Paris, France

RÉSUMÉ – Suite à l'apparition de désordres en Gare de l'EST, à PARIS, dus à la dissolution du gypse, le Réseau Ferré de France (RFF) et la SNCF ont décidé d'identifier les vides et les terrains décomprimés et de les traiter afin de prévenir les futurs désordres potentiels. Il a été jugé pertinent d'utiliser la méthode sismique des ondes de surface mise en œuvre par l'Entreprise SISMOCEAN et ce dans le contexte spécifique du site.

ABSTRACT – Following the disorders appeared at Gare de l'EST, in PARIS, due to the dissolution of gypsum, RFF/SNCF decided to identify vacuum and heterogeneous grounds and to treat them in order to prevent the future potential disorders. The use of the seismic surface wave method, applied by SISMOCEAN, was judged relevant in this area.

1. Introduction

Suite à l'apparition de désordres en Gare de l'EST, dus à la dissolution du gypse, RFF/SNCF ont décidé de procéder à des investigations au niveau de la plateforme ferroviaire. Il s'agissait de reconnaître les terrains et plus particulièrement les niveaux décomprimés voire les vides puis de les traiter afin de prévenir les futurs désordres potentiels.

Entre 2002 et 2004, la SNCF a mis en œuvre (sur financement RFF) une station d'essais géophysiques (située à proximité de la gare TGV Haute-Picardie, sur la LGV Nord). Il s'agissait de tester différentes méthodes géophysiques (en surface et en forage) afin de détecter des cavités, tant sous l'angle de la reconnaissance que sous l'angle de la surveillance.

Un des résultats positifs a été l'utilisation de la méthode sismique des ondes de surface par l'Entreprise SISMOCEAN (détection des 2 cavités réalisées sur le site pour le projet). 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 appelée DCOS (Détection de Cavités par Ondes de Surface). Après différentes opérations menées dans le cadre de la recherche, SISMOCEAN a été missionnée pour réaliser les investigations en Gare de l'EST.

2. Contexte de la Gare de l'Est

2.1. Description du site

La Gare de l'EST est composée de 15 quais desservant 29 voies (de la voie 2 à la voie 30). Les quais sont présents sur les 400 premiers mètres environ.



Figure 1 : Vue aérienne de la Gare de l'EST

2.2. Historique

Depuis 1931 (agrandissement de la gare) plusieurs fontis ont été recensés (au niveau des quais, des voies) et ont nécessité des traitements des sols par injection. En septembre 2000 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 de l'ovoïde.

Une première série d'investigations, par microgravimétrie, ont concerné l'ensemble des quais et des voies sur les quarante premiers mètres linéaires (octobre/novembre 2000 et janvier/février 2003). Des campagnes de sondages ont été réalisées (décembre 2002/mars 2003 et septembre/octobre 2004) afin de contrôler les différentes anomalies détectées. Au total 60 sondages ont été effectués.

En 2004/2005 des chantiers d'injection ont été menés dans le cadre des travaux de réaménagement de la gare (Bâtiment voyageur et parking souterrain).

2.3. Contexte hydro-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.

La nappe se situe à environ 20 m sous la surface (dans les sables). Son alimentation est à la fois d'origine naturelle (eaux de pluie infiltrées dans les sols perméables) et d'origine artificielle (fuites des réseaux, tel que le canal de l'Ourcq). Les fluctuations piézométriques sont dues aux variations climatiques mais aussi aux prélèvements de la nappe ; si l'on ajoute à cela l'existence de nappes perchées (dans les sables de Beauchamp et dans les calcaires), on est en présence de conditions favorisant la dissolution de gypse.

3. Investigations réalisées en 2006/2007

3.1. Objectifs

Il a été décidé suite aux différents incidents survenus en Gare de l'Est, et en prévention d'incidents futurs de consolider les sols et ce sur les *700 premiers mètres des voies* (un incident sur ce secteur et notamment au niveau des aiguillages impacterait négativement l'exploitation ferroviaire). Ces investigations sont apparues d'autant plus nécessaires avec l'arrivée du TGV et l'augmentation du trafic.

Deux types d'anomalies ont été mis en évidence suite aux différentes campagnes de reconnaissances réalisées avant 2006 :

- Type 1 : des anomalies situées à 11-14 m de profondeur (dans les formations des marno-calcaires de St 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*.

Des opérations géophysiques préliminaires ont été programmées afin de limiter les zones d'anomalies, de définir leurs extensions (en plan et en profondeur) et d'adapter les prescriptions de traitement en fonction des caractéristiques propres des anomalies. Un traitement en grand ne permet pas de préjuger de la répartition en plan des anomalies dans le sous-sol ; de plus de nombreuses incertitudes sont liées à ce type de traitement sans reconnaissance préalable (maillage des forages, contrôle des travaux,...) sur une superficie importante.

Il s'agissait alors de mettre en œuvre une méthode permettant 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), 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 (du moins n'affectant pas trop la programmation des autres chantiers).

3.2. La méthode DCOS.

La station d'essais géophysiques réalisée en gare TGV Haute-Picardie a permis de tester différentes méthodes géophysiques (microgravimétrie, sismique réflexion THR, radar de surface,...) afin de détecter des cavités situées à 1.5 et 3.5 m de profondeur dans le contexte limon sur craie de la LGV Nord (Grandsert, 2005).

La méthode des ondes de surface de type Rayleigh (mise en œuvre par SISMOCEAN) utilisant le bruit ambiant comme source sismique a permis de détecter les deux cavités en donnant de plus des indications approximatives sur la position du toit et du plancher des cavités. La méthode DCOS (Détection de Cavité par Onde de Surface) a également été testée dans d'autres contextes géologiques comme par exemple le calcaire (LGV Méditerranée).

3.2.1. Principe de la méthode

L'acquisition se fait à l'aide de géophones reliés les uns aux autres par des câbles. Les géophones sont placés sur des supports triangulaires qu'il suffit de poser sur le sol ou sur ballast. Les dispositifs étaient constitués de 96 géophones (72 au début de la campagne). La source sismique est le bruit ambiant présent au niveau du site.

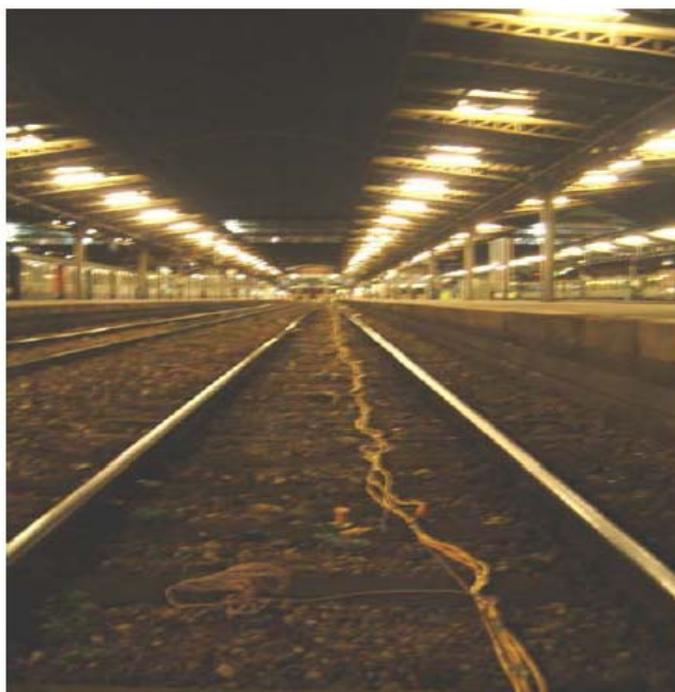


Figure 2 : Flûte posée sur la voie



Figure 3 : Un géophone posé sur ballast

Les géophones sont reliés à un enregistreur

On trouvera ci-dessous une illustration de la méthodologie pour détecter des hétérogénéités (une cavité dans l'exemple), en prenant comme exemple un dispositif de 24 géophones :

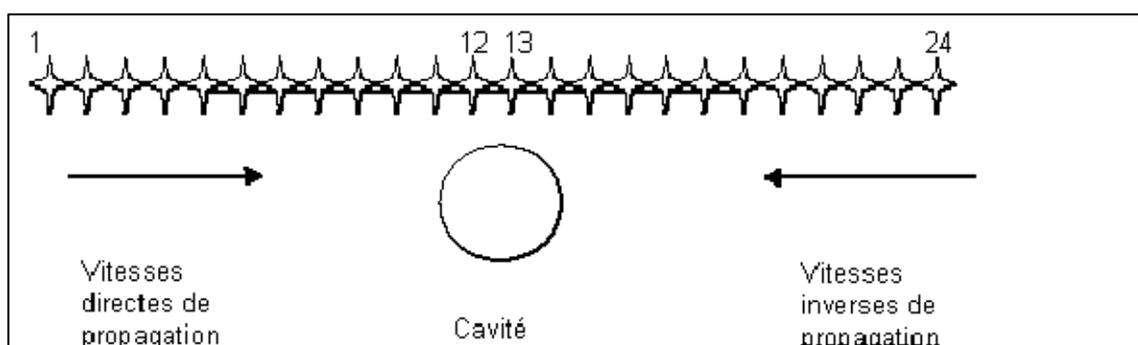


Figure 4 : Principe de détection d'une cavité

Il s'agit alors de comparer les différentes énergies des ondes de Rayleigh le long du dispositif. En comparant les répartitions par moitié de chaque dispositif, il est alors possible de détecter la présence de cavités ou d'hétérogénéités. L'absence d'anomalie ne doit pas perturber la propagation de l'énergie tant dans un sens que dans l'autre. (Pour plus de précisions sur la méthodologie se référer à la présentation de SIMMOCEAN à l'AGAP qualité (Durand et al., 2006), <http://www.sismocean.com>).

L'utilisation du bruit anthropique comme source sismique permet de s'affranchir de certains problèmes rencontrés en sismique plus classique (couplage,...). La méthode permet de réaliser des analyses par fenêtres glissantes de capteurs. Des fenêtres de 24 et de 48 capteurs sont utilisées. La taille de la fenêtre conditionne la profondeur d'investigation et influence la précision de la résolution longitudinale du positionnement des anomalies.

Plus la taille de la fenêtre de calcul est importante plus la profondeur d'investigation est grande mais la résolution longitudinale est moins précise. De même, plus la distance entre les géophones augmente plus la résolution diminue.

D'après les premiers tests réalisés la méthode DCOS permettrait d'atteindre les profondeurs de 15-20 m, de réaliser des mesures avec un rendement de 100 m/h et de positionner les profils sur le ballast.

3.2.2. Pertinence de la méthode dans le contexte de la 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 :

- *Une phase de pré faisabilité* : elle 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.
- *Une phase de faisabilité* : son 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.

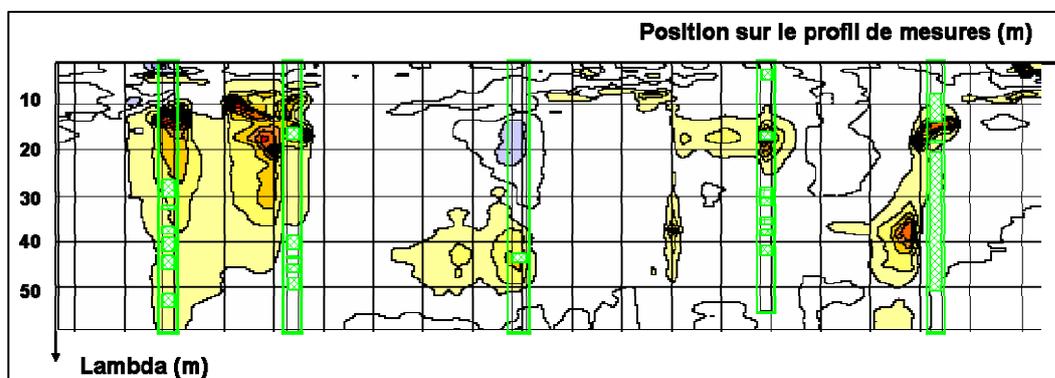


Figure 5 : Comparaison des mesures DCOS en voie et des sondages de contrôle

La figure 5 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.

3.3. Les résultats des investigations 2006/2007.

3.3.1. La géophysique

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. Les investigations ont été menées depuis les heurtoirs jusqu'à l'hectomètre 700. Le linéaire total mesuré est d'un peu plus de 8200 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.

Une vingtaine de zone d'anomalies considérées comme significatives ont été définies. Une anomalie significative est considérée comme étant présente sur une hau-

teur d'au moins 1 m, d'extension longitudinale métrique et présentant une valeur importante (ligne de niveau resserrée et de couleurs chaudes sur les sections).

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).

3.3.2. Les sondages de contrôle

Les sondages de contrôle ont été réalisés en 2007. Il s'agissait de sondages destructifs en mode rotopercussion avec enregistrement de paramètres (vitesse d'avancement, couple de rotation, débit, percussion réfléchi, pressions de poussée, d'injection et de retenue). 45 sondages ont été exécutés. Les contraintes ferroviaires (nombre de voies important, interception des voies retardées en raison de circulation,...) 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'au hm 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,...).

Des terrains très décomprimés ont été mis en évidence par les investigations (encadré en rouge sur la figure ci-dessous).

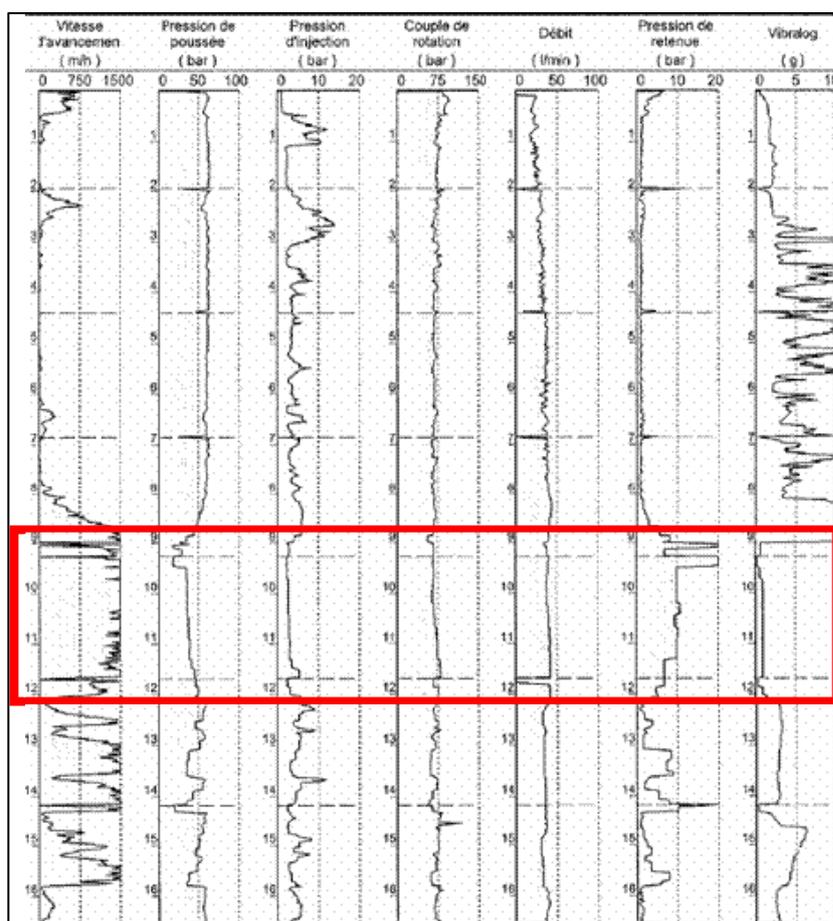


Figure 6 : Log de sondage présentant les caractéristiques du vide

Sur le sondage précédent toutes les caractéristiques d'un vide sont présentes. Une inspection par caméra vidéo a été faite montrant des horizons d'argile molle (boue) sans résistance mécanique apparente.

4. Suite à donner.

Les actions à réaliser sur les différentes zones reconnues sont fonction des résultats des investigations menées et sont de 3 natures.

Certaines zones devront être injectées (détection de terrains décomprimés à très décomprimés), certaines devront faire l'objet de sondages complémentaires en phase travaux (les premiers sondages ne présentant pas d'anomalies importantes et ne caractérisant pas entièrement l'anomalie géophysique), enfin certaines ne feront l'objet d'aucune suite (anomalie géophysique entièrement circonscrite et ne présentant pas d'anomalie particulière en sondage).

5. Conclusions

La Gare de l'EST a été construite sur des formations présentant des risques dus aux phénomènes de dissolution de gypse. Dans le cadre de la maintenance et suite à différents désordres (fontis) survenus sur le site, des investigations et des traitements ont été menés. En 2006/2007, de nouvelles investigations ont été réalisées avec pour objectif de détecter des anomalies jusqu'à 15-20 m de profondeur et ce sur les 700 premiers mètres des voies afin d'éviter, en cas de désordre, des répercussions sur l'exploitation ferroviaire notamment avec l'arrivée du TGV.

Une méthode géophysique de surface non destructive a été préalablement mise en œuvre afin de reconnaître la position des anomalies dans le sol. La méthode DCOS utilisant les ondes de surface mise au point par SIMOCEAN a été jugée comme la plus pertinente vis-à-vis des objectifs fixés et des contraintes de la gare de l'EST (exploitation, profils à mettre en œuvre sur du ballast, interception des voies restreintes,...).

Des sondages ont ensuite permis de contrôler les anomalies et de mettre en évidence des terrains présentant des décompressions importantes. Toutefois alors que dans la première partie de la zone la corrélation géophysique/sondage est bonne, dans la seconde partie on trouve sur des anomalies géophysiques des terrains sans hétérogénéités particulières. Il se pourrait que la géophysique ait été influencée latéralement par la présence des cavités que sont les caves présentes sous les immeubles jouxtant les voies à cet endroit.

Certaines zones de la Gare feront, en regard des investigations menées, l'objet de traitement des sols par injection.

6. Références bibliographiques

Durand G., Mouton E., Grandser P., Nebieridze S. (2006) Détection d'anomalies dans le sous-sol à partir d'ondes de surface. Méthode DCOS. AGAP Qualité – GEOFCAN – Géophysique appliquée à la reconnaissance des cavités et structures anthropiques.

Grandser P. (2005) LGV Nord : station d'essais des méthodes géophysiques de détection de cavités sous voies. Revue Générale des Chemins de Fer.