

Comportement d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé soumis à des sollicitations de type ferroviaire

Behaviour of reinforced earth retaining wall subjected to railway traffic

L. Soyez

Université PARIS-EST, LCPC, Paris, France ; SNCF, Direction de l'Ingénierie, Saint-Denis, France

A. Le Kouby, P. Mestat

Université PARIS-EST, LCPC, Paris, France

M. Hosseingholian

CETE-NC, Centre d'Expérimentation Routière, Rouen, France

G. Champion

SNCF, Direction de l'Ingénierie, Saint-Denis, France

RÉSUMÉ

Réseau Ferré de France (RFF) et la Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), associés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), souhaitent mieux comprendre le comportement des soutènements en sol renforcé par armatures métalliques dans le domaine ferroviaire. Un plot expérimental, qui représente ce que pourrait être une portion de 8 m de long d'une future LGV incorporant un soutènement, a été mis en œuvre au Centre d'expérimentation Routière (CER). Il a été sollicité à des niveaux de charge de service et aux différentes fréquences rencontrées dans le domaine ferroviaire. Les mesures de contrainte et d'accélération verticale, de déplacement de l'interface sous-couche/remblai et de tractions dans les armatures montrent l'influence de la fréquence de sollicitations sur le comportement de l'ouvrage.

ABSTRACT

The French Railway Network (RFF) and the French National Railway Company (SNCF), are cooperating with Public Work Laboratory (LCPC) in order to get a better understanding of the behaviour of reinforced earth retaining wall for railway embankment. A full scale experimental work of 8m long, which could be a portion of a future high-speed railway track including a retaining wall, was built at the Road Experimental Centre (CER). It was submitted to dynamic vertical loads at serviceability level with typical train frequencies. Measurements of vertical stress, acceleration, crest displacement and tensile stress in the bars reveal the impact of the excitation frequency.

Mots-clés : soutènement, sol renforcé, armatures métalliques, plot expérimental, ferroviaire, fréquences.

Keywords : retaining wall, metallic bars, experimental work, railway, frequencies.

1 INTRODUCTION

A ce jour, il existe trois ouvrages de soutènement en sol renforcé par des armatures métalliques, de technologie Terre Armée (TA), directement implantés sous des voies de chemin de fer en France. Ces ouvrages, datant des années 1970-80, concernent des circulations peu sensibles. Deux autres murs ont été construits (fin 2008 – début 2009) dans le cadre de la branche Est de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Rhin-Rhône pour un raccordement où le Train à Grande Vitesse (TGV) roule à vitesse réduite.

La Société Nationale des Chemins de Fer français (SNCF) s'interroge sur le comportement mécanique de ce type d'ouvrage sous des sollicitations ferroviaires. En effet, les lignes de chemin de fer nécessitent une maîtrise des déformations de la voie et des ouvrages les supportant. Les valeurs d'alerte des défauts d'une voie classique sont de l'ordre 10 mm pour le nivellement et le gauchage sur 3 m (SNCF 2000). Le principal questionnement de la SNCF et de RFF concerne les déformations propres du massif sous chargement. Les textes actuels (AFNOR 1998), s'intéressant principalement aux tassements du sol support, n'apportent pas de réponse à ce sujet.

La SNCF s'est associée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) dans le cadre d'une thèse pour répondre aux attentes de Réseau Ferré de France (RFF). L'objectif principal de l'étude est de mieux comprendre le comportement des ouvrages et d'améliorer les connaissances dans la prévision des déformations de ces ouvrages.

Dans cette optique, un plot expérimental grandeur réelle a été réalisé dans un hall d'essai du Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (CER). Il représente une tranche de 8 m de large de ce que pourrait être une future LGV intégrant un soutènement en TA. Celui-ci a fait l'objet d'un programme de chargement comprenant des essais statiques de référence, des essais de fatigue, des chargements ferroviaires en « double M » et des chargements à différentes fréquences (multifréquences) du domaine ferroviaire. Ces derniers font l'objet de la présente communication.

Les précédentes recherches dans ce domaine (CEBTP 1975 et Terre Armée International 1987) furent des murs expérimentaux sollicités par des compacteurs reposant sur une dalle en béton. Les mesures qui consistaient essentiellement en des mesures d'accélération verticales tendaient à prouver, quand elles n'étaient pas perturbées par le système de chargement, que la fréquence de sollicitation n'avait pas d'influence sur la réponse de l'ouvrage.

2 PLOT EXPERIMENTAL

Le plot expérimental en vraie grandeur a été réalisé dans une fosse, de 30 m de long par 8 m de large, qui a été creusée sur une profondeur de 4,3 m. Le sol support est une grave sablo-argileuse 0/100 mm, substratum que l'on suppose indéformable.

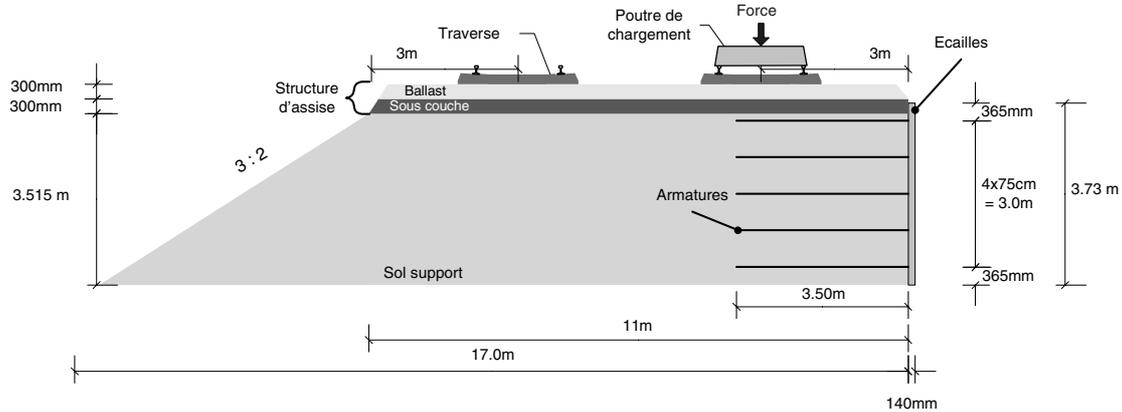


Figure 1. Coupe longitudinale du plot expérimental avec soutènement en Terre Armée du CER.

2.1 Géométrie et mise en oeuvre

La géométrie est inspirée d'un projet récent de remblai d'accès à un ouvrage de franchissement réalisé pour RFF à l'aide du procédé TA. La hauteur totale est d'environ 4,1 m, dont 3,75 m de parement (Figure 1). Il est distant de 3 m de l'axe de la voie, ce qui correspond au minimum autorisé (SNCF 1985). Pour mieux appréhender le coefficient de sécurité global du plot et pour minimiser la longueur des armatures (3,5 m), le dimensionnement, réalisé avec Terre Armée France, n'a pas été fait selon les textes en vigueur (AFNOR 1998 et SNCF 1985). Les valeurs des coefficients de pondération pour les différentes combinaisons d'actions étaient de 0 ou 1, les coefficients partiels de sécurité et les coefficients de méthodes valaient 1 et la majoration des efforts maximaux dans les armatures n'a pas été prise en compte.

Le remblai est constitué d'une grave argileuse 0/40 mm. Le matériau a été mis en place en 10 couches, 9 de 37,5 cm d'épaisseur et 1 de 15 cm. Il a été compacté à l'aide d'une plaque vibrante de classe pq4 (AFNOR 1992) pour atteindre l'objectif de compactage q4. Les résultats des essais réalisés sur la dernière couche avec la Dynaplaque II classent la plateforme en PF2 (LCPC & SETRA 1992).

La structure d'assise, dimensionnée par la SNCF selon les critères spécifiques à une LGV, est composée d'une couche de ballast de 30 cm d'épaisseur et d'une sous-couche de 30 cm, chacune ayant été mise en place en une fois. Le ballast est un matériau 31,5/50 mm concassé et lavé, conforme aux spécifications SNCF pour les LGV (SNCF 1999). Le matériau de sous-couche est une grave concassée 0/31,5 mm (SNCF 1999).

2.2 Instrumentation

Avant la mise en œuvre du remblai, un forage tubé a été réalisé sous chaque structure et on y a inséré une tige métallique qui a été scellée en fond de trou au moyen d'un coulis de ciment. Les tiges ont été équipées en tête d'une pastille sur laquelle est positionné la pointe d'un capteur LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Le corps de ces capteurs a été vissé sur une plaque positionnée à l'horizontal en surface qui repose sur un deuxième tube qui peut coulisser dans le premier. On peut donc suivre les déplacements au niveau de cette plaque. C'est le point vert en bas de la figure 2. Le même procédé a été utilisé après la mise en œuvre du remblai, ce sont les trois points en partie haute.

Des capteurs de pression totale et des accéléromètres ont été placés dans le remblai afin de mesurer la variation des accélérations et des contraintes induites dans le massif lors du chargement en fonction de la profondeur. On retrouve un profil semblable à l'aplomb de l'emplacement théorique de chaque rail.

Des jauges de déformations ont été collées sur douze armatures qui se trouvent pour la plupart dans les deux colonnes centrales. Huit d'entre elles ont été instrumentées en cinq points et quatre en trois points. Pour chaque point de mesure, deux jauges ont été collées, perpendiculairement l'une de l'autre, de chaque côté de l'armature, ceci afin de s'affranchir des variations de température et de la flexion. De plus, chaque jauge a été étalonnée à l'aide d'une résistance de shunt. Pour pouvoir passer des déformations aux contraintes, les sections de tous les points de mesure ont été mesurées. Enfin, des essais de traction en laboratoire ont permis d'établir le rapport du module d'Young sur le coefficient de Poisson, ces deux grandeurs n'étant pas fournies par TA.

Des capteurs laser PSD (Position Sensitive Detectors) ont permis de suivre les déplacements des traverses. Pour mesurer les déplacements horizontaux de certaines écailles, des capteurs LVDT ont été fixés sur un treillis métallique qui a lui-même été positionné devant le parement.

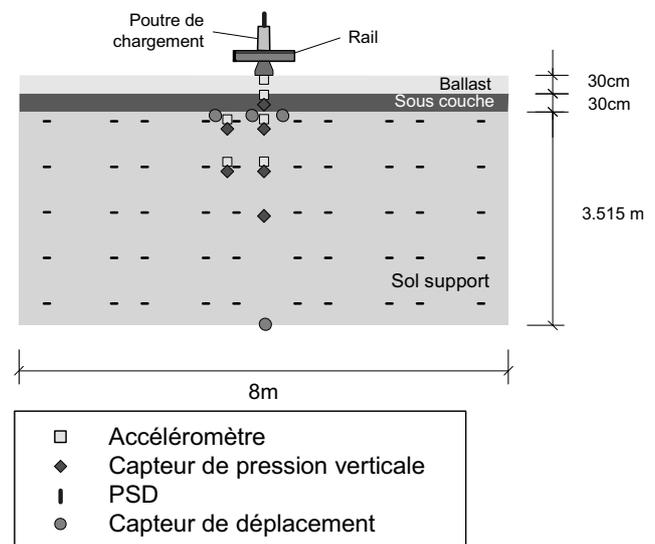


Figure 2. Coupe transversale à 2,3 m du parement.

3 SOLLICITATIONS

3.1 Chargement

Un boggy de TGV à deux essieux, distants de 3 m l'un de l'autre. Si l'on considère que la diffusion de la charge se fait suivant une répartition à 2:1 (vertical : horizontal) (LCPC & SETRA 1991), les zones d'influence de deux essieux se croisent à 3 m de profondeur. Pour un mur de faible hauteur comme

celui étudié ici, il est ainsi possible de ne prendre en compte qu'un seul essieu.

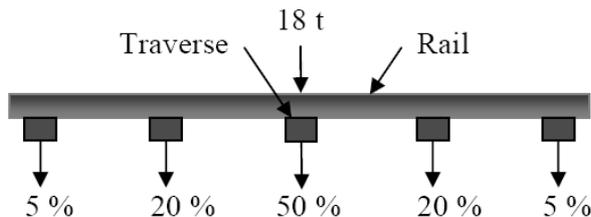


Figure 3. Distribution de la charge sur les traverses par le rail.

La charge à l'essieu TGV est d'environ 18 t. Le rail joue un rôle de répartition de la charge sur plusieurs traverses (Figure 3). En statique, les chiffres varient quelque peu selon les sources (e.g. Profillidis 2006 et Esveld 2001). Cependant, la traverse centrale ne reprend jamais plus de 50 % de la charge. La charge appliquée sur la traverse centrale est en conséquence de 9 t.

3.2 Système de chargement



Figure 4. Portique de chargement au dessus de la structure Terre Armée.

Le CER dispose d'un portique de chargement de 30 t (Figure 4) sur lequel est fixé un servo vérin hydrodynamique (HIFI S C80-100 de chez Quiri) capable d'appliquer un chargement de 100 kN à 35 Hz. Il est piloté par un système électronique qui contrôle un servo distributeur BOSCH HRV NG 16 qui gère l'huile et permet un asservissement en force ou déplacement. Le vérin a été équipé d'un bouton de charge à portée sphérique. Les rails ont été remplacés par des cylindres soudés sur une plaque support fixée sur la traverse par l'intermédiaire d'attaches. Une poutre HEA a pour fonction de répartir la charge sur ces deux cylindres. Les élastomères que l'on place habituellement entre le rail et la traverse ont été conservés.

Les essais multifréquences ont consisté en six paliers de 10000 cycles chacun aux fréquences de 5, 15, 20, 25, 30 et 35 Hz. Le vérin était contrôlé en force. Chaque palier est un signal sinusoïdal dont la charge moyenne était 55 kN et l'amplitude était de 35 kN. L'objectif était d'étudier l'influence de la fréquence de chargement sur la réponse de l'ouvrage de soutènement. Cet essai a fait suite à une série de sollicitation réalisée dans l'ordre suivant : un chargement statique de référence, un essai multifréquences avec une charge variant de 20 à 50 kN et un essai de fatigue (plusieurs millions de cycles) à 28 Hz avec la même plage de chargement.

4 QUELQUES ELEMENTS DE RESULTATS

On ne traite ici que les essais multifréquence d'amplitude 35 kN auxquels on a ajouté les valeurs obtenues lors des derniers cycles de l'essai de fatigue. L'ensemble des valeurs qui sont données par la suite sont des valeurs crêtes moyennes, c'est-à-dire la moyenne des amplitudes maximales de plusieurs cycles du signal. Celles-ci sont obtenues par la méthode de transformation rapide de Fourier (FFT).

Dans un premier temps, le niveau de charge appliqué à chaque fréquence a été vérifié. La figure 5 présente l'amplitude de la force et du déplacement vertical de la traverse mesuré par les capteurs laser PSD en fonction de la fréquence. L'objectif était d'avoir une amplitude de 35 kN, ce qui n'a pas été le cas pour les fréquences 25 et 35 Hz, à cause de difficulté d'obtention d'un PID correct. Cette baisse se retrouve à 25 Hz pour le déplacement de la traverse. Par contre, à niveau de chargement équivalent, les déplacements sont plus importants pour des fréquences aux alentours de 30 Hz que de 20 Hz. Pour rappel, notre ballast a simplement été compacté et n'a pas pu être mis en place comme sur une voie classique. Il semblerait qu'il soit de ce fait sensible à la fréquence de sollicitation. D'autre part, son comportement a aussi évolué lors du changement de fréquence pendant l'essai de fatigue. Enfin, les mesures de pression totale sous le ballast varient de manière semblable, ce qui laisse supposer que l'arrangement des grains varie avec la fréquence et, par voie de conséquence, le réseau de contrainte aussi.

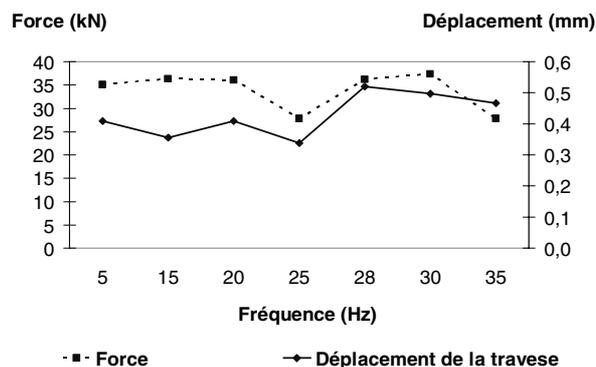


Figure 5. Influence de la fréquence sur la charge mesurée et le déplacement de la traverse.

Dans un deuxième temps, le comportement du remblai sous la structure d'assise est étudié. La figure 6 présente une comparaison entre les amplitudes de pression totale verticale mesurées sous la traverse au niveau du lit d'armatures supérieur et les déplacements verticaux de l'interface sous-couche/remblai. L'allure de la courbe de déplacement de l'interface est proche de celle du déplacement de la traverse. Là encore, il y a un pic pour des fréquences voisines de 30 Hz. L'amplitude des déplacements est divisée par un facteur compris entre 5 et 6 entre le haut et la base de la structure d'assise. Malgré le faible ordre de grandeur des mesures, les capteurs permettent de discerner clairement les évolutions.

On constate une bonne superposition des courbes d'amplitude des contraintes mesurées au dessus et en dessous de la sous-couche. Les mesures de contrainte sous le ballast corroborent l'hypothèse communément admise d'une diffusion quasi-verticale dans le ballast. L'amplitude des contraintes diminue d'un facteur d'environ 2,5 entre le haut et la base de la sous-couche, ce qui tendrait à montrer que l'hypothèse classique de diffusion de 1H / 2V reste valide pour un chargement dynamique.

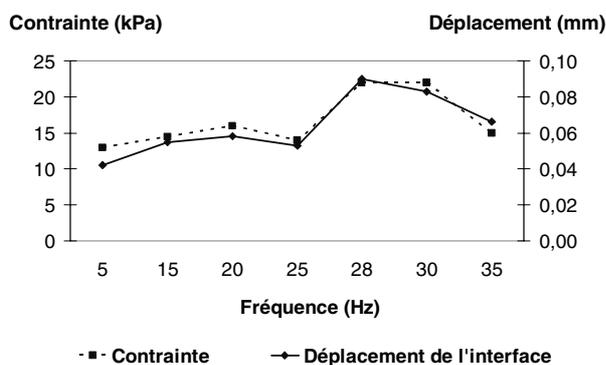


Figure 6. Contrainte et déplacement au niveau de l'interface sous-couche/remblai.

La figure 7 présente les accélérations verticales mesurées à une distance du parement de 2,3 m (au niveau du rail le plus à droite sur la figure 1). Ces courbes sont proches de celles obtenues pour l'autre profil de la même structure. La référence choisie pour la profondeur est la base de la traverse. On remarque que la structure d'assise atténue fortement les accélérations verticales, ce qui a aussi été constaté lors de campagnes de mesures d'accélération sur des LGV (NGI, 2005), donc à des fréquences de l'ordre de 30 Hz.

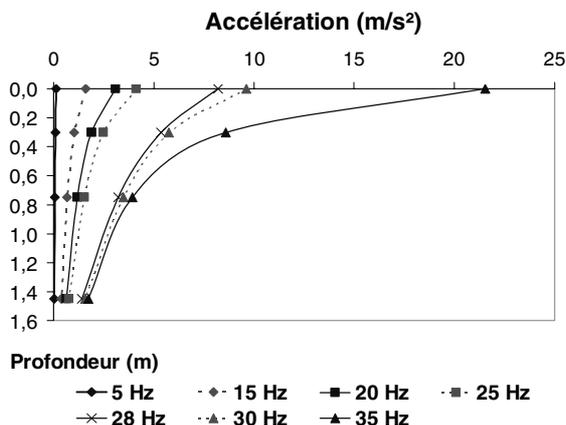


Figure 7. Accélérations à différentes profondeurs.

Ces mesures ne mettent pas en évidence de phénomène de résonance. Par ailleurs, considérons pour simplifier que les déplacements de l'interface sont un signal sinusoïdal dont l'amplitude est donnée par la figure 6 et dont la pulsation correspond à la fréquence de sollicitation. On obtient des résultats inférieurs d'environ 10 % aux mesures, écarts qui peuvent s'expliquer par la différence de profondeur des mesures. De plus, les variations liées à la fréquence sont similaires.

Les amplitudes des incréments de tractions dans une armature, du lit situé à 1,45 m de profondeur depuis la surface du ballast, provoqués par la sollicitation sont très faibles (Figure 8) par rapport au 5 kN de traction moyenne (valeur moyenne des tractions moyennes pendant la sollicitation). Les mesures faites pour cette armature sont représentatives de ce qui a été observé pour l'ensemble des armatures instrumentées.

On constate que le mode de fonctionnement de l'armature dépend fortement de la fréquence de sollicitation, ceci alors que les mesures de contrainte réalisées à la même profondeur sont en accord avec celles obtenues aux niveaux supérieurs. Les incréments de tractions dépendent à la fois de la fréquence de sollicitations et de la position du point de mesure le long de l'armature. C'est là a priori un phénomène de résonance qui

peut venir de l'armature en elle-même ou de son interface avec le sol.

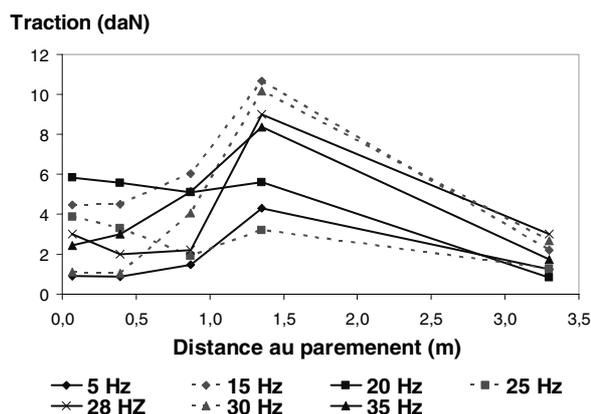


Figure 8. Incrément de traction dans une armature du lit à 1,45 m.

5 CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici confirment ceux qui avaient été obtenus lors des précédentes expérimentations, à savoir que les mesures d'accélération verticales ne montrent pas de phénomène de résonance dans la plage étudiée. C'est aussi le cas pour les mesures de déplacement et contrainte verticales.

Par contre, même si ils restent faibles par rapport aux valeurs moyennes, on constate ici que les incréments de tractions dans les armatures sont sensibles à la fréquence de sollicitation. Des investigations complémentaires pour expliquer le fonctionnement des armatures sont à mener, notamment en ce qui concerne leurs modes propres et l'interface sol/armature.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient RFF et l'ANRT pour le soutien financier qu'ils apportent à ce projet. De plus, ils souhaitent associer l'équipe technique du CER sans qui cette expérimentation n'aurait pu être menée à bien.

RÉFÉRENCES

- AFNOR. 1992. *Matériel de construction et d'entretien des routes, Compacteurs – Classification*. NF P 98-736, Paris
- AFNOR. 1998. *Renforcement des sols, Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples*. NF P 94-220-0, Paris.
- CEBTP. 1975. *Procès verbal d'essais – Mur Expérimental de Triel sur Seine*. Service Sols et Fondations. Paris.
- Esveld C. 2001. *Modern Railway Track*. Second Edition. Nederland.
- LCPC & SETRA. 1991. *Les ouvrages en Terre Armée, Recommandations et règles de l'art*. Paris 2^{ème} édition
- LCPC & SETRA. 1992. *Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme - Principe généraux et annexes techniques*. Paris
- NGI 2005. *Sustained Performance of Railway Track (Supertrack) – Final Report*. Norvège.
- Profillidis, V.A. 2006. *Railway management and engineering*. Third Edition
- Société Nationale des Chemins de Fer. 1985. *Notice Générale, EF 2 B 21 n°1, Ouvrages en Terre Armée*. Paris
- Société Nationale des Chemins de Fer. 1999. *Spécifications techniques pour la fourniture de granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien de voies ferrées*, IN 0091, Mars 1999, Paris
- Société Nationale des Chemins de Fer. 2000. *Référentiel Infrastructure – Procédure*, IN 1895, édition de septembre 2000. Paris
- Terre Armée Internationale. 1987. *The design of reinforced earth structure supporting railway lines*. Bulletin technique (interne), November 1987. France.