

# Interprétation d'essais d'extraction de renforcements métalliques haute adhérence dans un massif en Terre Armée® soumis à un chargement dynamique cyclique

Interpretation of pullout tests of high adherence steel reinforcements in a Reinforced Earth® structure under a cyclic dynamic loading

Bennani Y.

Département technique et scientifique de Terre Armée Internationale, Vélizy, France

Soyez L.

Egis Structure et Environnement, Egis Géotechnique, Saint Quentin en Yvelines, France

Freitag N.

Département technique et scientifique de Terre Armée Internationale, Vélizy, France

RÉSUMÉ : Entre 2007 et 2009, l'IFSTTAR et la SNCF ont réalisé une expérimentation en vraie grandeur d'un ouvrage en Terre Armée soumis à un chargement ferroviaire sur un grand nombre de cycles. L'interprétation des essais d'extraction d'armatures, sous chargements statique et dynamique cyclique, concluait en une baisse de l'ordre de 15% du coefficient de frottement apparent sol-armature liée aux chargements dynamiques de l'ouvrage. Depuis, ces travaux ont été analysés au moyen de modélisations numériques dynamiques aux différences finies qui ont permis de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. Cet article présente dans un premier temps le phénomène de «chenille» observé. En effet une analyse fine de l'interface sol-armature indique que le déplacement relatif serait commandé par la contrainte verticale exercée par le sol sur l'armature et que ce déplacement se produirait lorsque celle-ci serait minimale. Dans un second temps, les essais d'extraction réalisés en 2009 ont été simulés à l'aide du modèle de l'ouvrage. Les enseignements de cette simulation ont mené à une réinterprétation des résultats obtenus et ont montré que les mesures sur l'ouvrage ne permettent pas de mettre en lumière une érosion de la capacité d'adhérence liée au chargement dynamique.

ABSTRACT: Between 2007 and 2009, IFSTTAR and SNCF realized a full scale instrumental Reinforced Earth structure submitted to a high number of rail load cycles. The interpretation of reinforcing strip pullout tests under static and dynamic loads came with a loss of 15% of the apparent friction coefficient due to the dynamic loading of the structure. In the meanwhile, these works were analyzed thanks to finite difference dynamic numerical models that enabled to get a better understanding of the mechanisms involved. This article first presents the "caterpillar" phenomenon that was observed. In fact, a close analysis of the soil-reinforcement interface during a pull-out test indicates that the soil/strip relative displacement is governed by the vertical stress applied by the ground on the reinforcement: the displacement happens when the stress is at its minimal level. Second, the pullout tests were simulated using a numerical modelling of the structure. The teachings of this simulation enabled the authors to reinterpret the test results and to show that the no reduction of pullout capacity due to dynamic loading can be concluded from the full scale test results.

MOTS CLES : Interaction sol – structure, remblai renforcé, adhérence, dynamique, modélisation numérique, ferroviaire

KEYWORDS: Soil-structure interaction, reinforced fill, adherence, dynamic, numerical modelling, railroad

## 1 INTRODUCTION.

Le fonctionnement de la Terre Armée repose sur la mobilisation du frottement entre le remblai et les armatures. La mise en place de renforcements dans des massifs de remblai technique fait de l'ensemble un bloc composite auto-stable capable de supporter des surcharges très élevées. C'est ce qui explique l'utilisation répandue des ouvrages en Terre Armée dans diverses applications routières, ferroviaires, hydrauliques et industrielles.

L'interaction sol-armature dépend de la nature du renforcement (géométrie, matériau constitutif), de la nature et de la densité du remblai, ainsi que de la pression de confinement (Schlosser et Elias, 1978). La définition du coefficient d'interaction  $\mu^*$  est principalement déterminée à partir d'essais d'extraction d'armatures enterrées dans des ouvrages ou dans des cuves d'extraction de laboratoire. Ce coefficient est utilisé pour la justification du critère d'adhérence dans la stabilité interne des ouvrages en sol renforcé.

L'utilisation d'armatures métalliques inextensibles fait de la Terre Armée une solution d'avenir pour le développement ferroviaire (Freitag *et al.*, 2011). L'influence des vibrations sur le frottement sol-armature a fait l'objet de plusieurs études, notamment les travaux de Murray *et al.* (1979) ainsi que le mur expérimental de Millville en Virginie (1983) réalisé par la société Terre Armée. Murray *et al.* ont conclu que la diminution de la force d'extraction d'armatures lisses correspond à la diminution de la contrainte verticale instantanée et que le

coefficient d'interaction n'est pas dégradé par les vibrations. L'expérimentation de Millville a permis aux auteurs de conclure que les vibrations diminuent la résistance d'extraction mais que, là encore, cette diminution correspond à l'allègement provoqué par l'accélération verticale.

Plus récemment, entre 2007 et 2009, l'IFSTTAR et la SNCF ont poursuivi ces études afin d'approfondir le comportement des ouvrages en Terre Armée sous sollicitations ferroviaires. Une expérimentation en vraie grandeur a été réalisée dans le contexte de ce programme de recherche (Soyez, 2009). Les résultats de l'expérimentation ont montré une très bonne compatibilité de l'ouvrage avec les applications ferroviaires à l'exception de l'évolution du coefficient d'interaction avec les cycles de chargement. Cet article revient sur les essais d'extraction en les réinterprétant à l'aide d'une étude numérique aux différences finies.

## 2 LE FROTTEMENT DANS LA TERRE ARMEE

### 2.1 Définition du frottement apparent

Il est communément admis que la résistance d'ancrage  $dR$  d'une longueur élémentaire d'armature  $dl$  s'exprime de la manière suivante :

$$dR = 2.b.d.l.\tau'_{max} \quad (1)$$

avec  $b$  la largeur de l'armature et  $\tau'_{max}$  la contrainte de cisaillement maximale sur chaque face de cet élément d'armature. Par ailleurs, la contrainte maximale de cisaillement mobilisable localement est liée à la contrainte verticale appliquée localement à la profondeur de l'élément d'armature. Cette contrainte maximale mobilisable est définie par la relation suivante :

$$\tau'_{max} = \mu^*(\sigma'_v) \cdot \sigma'_v \quad (2)$$

avec  $\sigma'_v$  la contrainte verticale effective. Ainsi la résistance caractéristique d'ancrage  $R_{f,k}$  sur une longueur  $L_a$  s'obtient par intégration de l'ensemble des résistances d'ancrage élémentaires  $dR$ . Elle s'exprime de la manière suivante :

$$R_{f,k} = 2b \int_{x=L-L_a}^L \mu^*(\sigma'_v(x)) \cdot \sigma'_v(x) \cdot dx \quad (3)$$

Cette formulation de la résistance caractéristique  $R_{f,k}$  permet de tenir compte des variations spatiales de la contrainte verticale le long de l'armature qui peuvent être générées par des charges concentrées. Elle est couramment utilisée pour la justification des culées de pont en Terre Armée.

Les valeurs du coefficient d'interaction  $\mu^*$  ont fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de calibrer des valeurs « enveloppe ». Elles varient conventionnellement de  $\mu_0^*$  pour une contrainte (virtuelle) nulle à  $\tan\phi'$  pour les valeurs de  $\sigma'_v$  supérieures à 120 kPa. Le lecteur pourra se référer à l'Annexe A de la norme française NF EN 14475 donnant les valeurs normatives du coefficient de frottement apparent pour les armatures métalliques à haute adhérence.

## 2.2 Présentation des résultats du programme de recherche

Le plot expérimental (cf. Figure 1) a été réalisé au Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (CER).

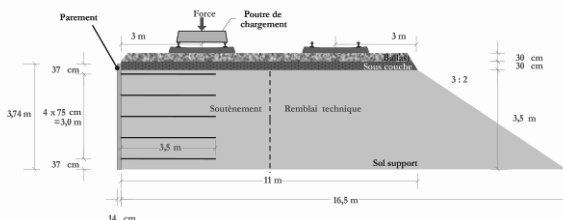


Figure 1. Coupe longitudinale du plot expérimental du CER (d'après Froumentin et al. 2008).

L'ouvrage, d'une hauteur totale de 4,1 m, a été soumis à deux grandes phases de chargements. La première phase correspond à des essais cycliques multifréquences sur un très grand nombre de cycles et la seconde phase à des essais de chargement statique de grande intensité. Entre ces deux phases, des essais d'extraction ont été effectués à quatre niveaux de confinement différents et pour deux zones différentes (cf. figure 2). La première zone correspond à un domaine d'influence directe de la surcharge (armatures 14, 34, 46 et 26) tandis que la seconde zone est considérée hors d'influence (12, 37, 49 et 29). La surcharge correspond ici à un chargement cyclique sinusoïdal entre 20 et 90 kN à la fréquence de 28 Hz, simulant le passage d'un train type TGV à une vitesse d'environ 300 km/h.

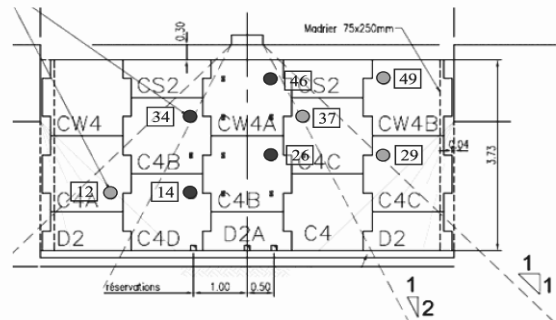


Figure 2. Disposition des armatures extraites en statique sans surcharge, en gris clair, et sous vibrations, en gris foncé (d'après Soyez 2009)

Les valeurs de résistance d'ancrage proposées initialement (Soyez, 2009) (cf. Tableau 1) indiquent des valeurs supérieures en dynamique par rapport à celles en statique. La surcharge en statique étant nulle, la surcharge dynamique oscillant entre 20 et 90 kN génère des contraintes verticales appliquées sur l'armature plus élevées.

Tableau 1. Forces maximales d'extraction (kN) des armatures situées au niveau des deux lits supérieurs d'après Soyez (2009).

Armature	34	37	46	49
Fmax	39.8	36.9	56.1	47

L'analyse du frottement apparent est ensuite réalisée à partir des résistances d'ancrage. La mesure instantanée de la contrainte verticale le long de l'armature pendant le chargement étant difficile, les résultats des essais ont été interprétés à partir de la valeur moyenne des contraintes (cf. Tableau 2). Cette hypothèse mène à conclure en une baisse de l'ordre de 15% du frottement apparent pour le niveau supérieur de renforcement.

Tableau 2. Comparaison des coefficients  $\mu^*$  obtenus lors des essais d'extraction statiques et dynamiques pour les deux lits supérieurs d'après Soyez (2009).

Armature	34	37	46	49
$\mu^*$	4.2	4.4	8.6	10.1
$\mu^*_{dyn} / \mu^*_{stat}$	0.94		0.85	

Le paragraphe présente la simulation numérique d'un essai d'extraction sous chargement dynamique et permet de revenir sur cette hypothèse de contrainte moyennée.

## 3 APPORT DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Les modèles numériques ont été réalisés à l'aide du logiciel 2D aux différences finies FLAC version 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) développé par ITACSA. Ce programme permet de modéliser les ouvrages géotechniques et en particulier les structures en sols renforcés à l'aide du modèle « strip ». FLAC possède aussi un module dynamique permettant d'introduire par exemple des surcharges à variation temporelle.

### 3.1 FLAC et le modèle « strip »

Le modèle « strip » a été développé afin de simuler le comportement de bandes de renforcements discrètes. Le modèle reproduit fidèlement les essais d'extraction sous chargement statique. L'interaction sol-armature est modélisée par un ressort et un patin (cf. Figure 3). Le ressort permet de définir la raideur de l'interface et donc de modéliser la capacité du renforcement à mobiliser rapidement ou non le frottement. La raideur attribuée au ressort est issue de la courbe de l'essai d'extraction. Le patin permet de définir le critère de glissement issu de

l'enveloppe de rupture en cisaillement, de façon similaire à celle présentée dans le paragraphe précédent.

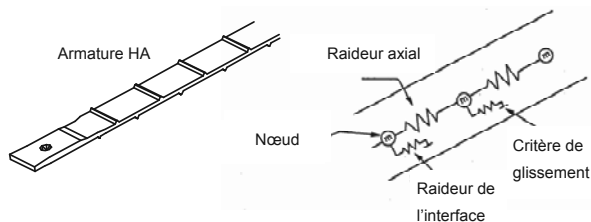


Figure 3. Schématisation du modèle de l'armature dans FLAC.

Une armature est discrétisée en plusieurs segments, régis par le modèle « *strip* ». Le glissement de l'armature par rapport au sol est le résultat d'une saturation du cisaillement sur un ensemble de segments. Cette saturation est elle-même contrôlée par plusieurs paramètres tels que la distribution instantanée de la contrainte verticale, le niveau instantané de déplacement relatif, la raideur du sol ainsi que la raideur du renforcement.

### 3.2 Modélisation d'un essai d'extraction sous chargement dynamique cyclique

Afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu lors d'un essai d'extraction sous chargement dynamique, la configuration de l'ouvrage expérimental de Rouen a été modélisée et l'essai d'extraction a été simulé numériquement. L'objectif étant dans un premier temps de comprendre le phénomène de mobilisation à l'échelle locale, les paramètres du modèle « armature » (raideur d'interface et critères de glissement) n'ont pas été calés pour représenter les essais de Rouen. La raideur d'interface utilisée pour les chargements statiques ainsi que les valeurs normatives du coefficient d'interaction ont été attribuées aux paramètres d'interfaces sol-armature.

Un essai d'extraction correspond à un chargement artificiel bien spécifique imposé à l'armature. Cette dernière est soumise à une vitesse d'extraction constante et faible (1mm/min selon NF P 94-222:1995). Pendant l'extraction, le déplacement de l'armature en tête et la résistance d'ancrage sont enregistrés.

Ces conditions peuvent être reproduites grâce à l'option *dynamique* du logiciel FLAC.

#### 3.2.1 Analyse du cisaillement à l'échelle locale

Au début de l'essai simulé, la résistance d'ancrage croît alors en même temps que le déplacement de la tête de l'armature. Puis la résistance atteint un palier à partir duquel la résistance d'ancrage est sensiblement constante alors que l'armature se déplace globalement par rapport au sol.

Dans cette phase, l'étude fine du cisaillement au niveau d'un des segments permet de bien mettre en évidence l'évolution de la résistance d'ancrage locale pendant la phase de glissement de l'armature (cf. figure 4). Les conclusions de l'analyse sont les suivantes :

- la résistance de cisaillement croît progressivement jusqu'à ce que la contrainte verticale atteigne son minimum cyclique (T1)
- le cisaillement chute alors brutalement, indiquant une perte d'adhérence locale momentanée (T2)
- puis la contrainte verticale augmente à nouveau et une reprise d'adhérence est constatée sur le modèle (T3)

Les conclusions de cette première étude sont en accord avec celles obtenues par Murray et al (1979) indiquant que la diminution de la résistance d'ancrage correspond à un allègement de la contrainte verticale. En effet, l'étude montre que c'est à la fin de la phase de déchargement, quand la contrainte verticale atteint son minimum cyclique, que le glissement a lieu.

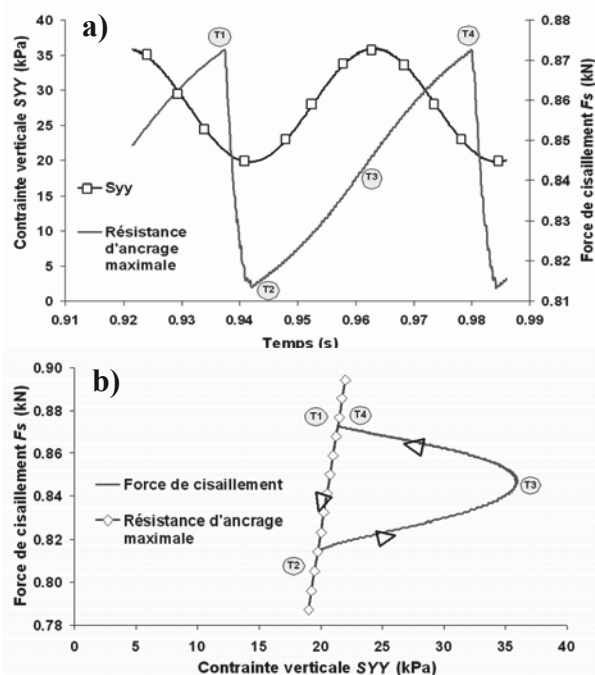


Figure 4. Evolution de l'effort de cisaillement et de la contrainte verticale au niveau d'un segment d'armature : a) Evolution instantanée du cisaillement et de la contrainte verticale en fonction du temps, b) Evolution du cisaillement en fonction de la contrainte verticale avec superposition de l'enveloppe de rupture.

Il semble important de noter que les conclusions de cette première étude numérique sont indépendantes des paramètres du modèle numérique. Plusieurs simulations, pour différentes fréquences de sollicitations, et pour différents paramètres géotechniques (modules de sols, amortissements, etc.) apportent les mêmes conclusions.

#### 3.2.2 Estimation de l'adhérence sous chargement dynamique cyclique : un phénomène de « chenille »

Cette première simulation permet de conclure que la résistance d'ancrage lors d'un essai d'extraction est déterminée par le minimum local atteint par la contrainte appliquée le long de l'armature au cours du chargement dynamique, et non par la contrainte moyenne.

En dynamique, la contrainte de cisaillement mobilisable à l'instant  $t$ , à une abscisse  $x$  est donnée par la relation suivante :

$$\tau'_{\max}(x, t) = \mu^*(\sigma'_v(x, t)) \cdot \sigma'_v(x, t) \quad (4)$$

Ainsi la résistance à l'extraction sous chargement sinusoïdal entre  $t=0$  et la période  $T$  du signal peut être définie par la relation :

$$R_{f,k} = 2b \int_{x=L-L_a}^L \mu^*(\sigma'_{v\min}(x)) \cdot \sigma'_{v\min}(x) \cdot dx \quad (5)$$

avec  $\sigma'_{v\min}(x)$  la contrainte verticale minimale à l'abscisse  $x$  le long de l'armature au cours du cycle.

En raison de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement et de compression dans le sol, la contrainte verticale minimale  $\sigma'_{v\min}(x)$  n'est pas atteinte à l'instant où la sollicitation sur la voie est minimale, mais avec un décalage temporel. Par ailleurs, le minimum de contrainte vertical locale n'est pas atteint simultanément tout au long de l'armature (du fait de la vitesse de propagation des ondes de compression dans le sol). Le glissement sol/armature n'est donc pas simultané sur toute sa longueur, mais progressif. Le comportement de

l'armature peut donc être assimilée au déplacement d'une « chenille ».

### 3.3 Retour à l'ouvrage expérimental

A l'aide du logiciel FLAC, un essai d'extraction dans des conditions similaires à celles des essais réalisés sur le plot expérimental de Rouen a été simulé.

Afin de tenir compte de la diffusion 3D de la sollicitation appliquée dans notre modèle 2D, une correction de la valeur de la charge appliquée sur la traverse a été réalisée. Le calcul des incréments de contraintes verticales a été réalisé en appliquant une diffusion suivant la théorie de Boussinesq. Le modèle est donc ciblé sur un lit d'armatures donné, et les paramètres de charge 2D sont déterminés pour chaque lit étudié. Par ailleurs, les paramètres du modèle tels que les caractéristiques géotechniques, et l'amortissement du remblai, ont été au préalable validés en comparant les incréments de tractions mesurés aux valeurs numériques enregistrées. Une bonne correspondance entre le modèle et l'expérimentation a été notée.

En se fondant sur la courbe enveloppe minimale des contraintes appliquées sur l'armature supérieure [armature pour laquelle la plus grande baisse de frottement a été calculée dans Soyez (2009)], et en prenant comme valeur cible la résistance à l'extraction mesurée, il a été recalculé, à l'aide de la formule de la résistance d'extraction précédemment définie (cf. Eq. 1), la courbe bilinéaire de la variation du coefficient de frottement apparent  $\mu^*$  en fonction de la contrainte verticale.

La réinterprétation du coefficient de frottement à partir de la contrainte minimale locale déterminée numériquement n'indique pas de baisse du frottement (cf. Figure 5). En effet la plage de variation du frottement apparent (entre 10.8 et 9.2), en fonction de la contrainte verticale, pendant la phase dynamique, est très semblable à la courbe en statique sans chargement. Une analyse similaire sur les autres lits a abouti aux mêmes conclusions

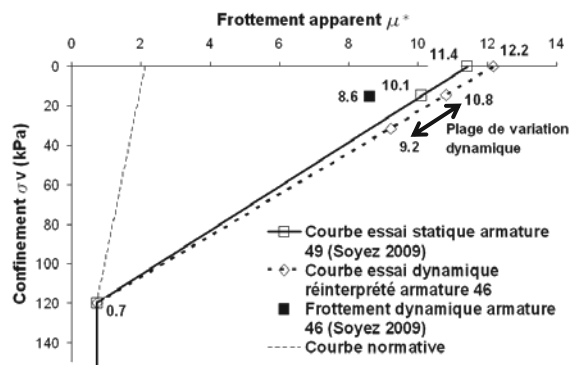


Figure 5. Comparaison des coefficients de frottement apparent dans le cas statique et dans le cas dynamique à 28 Hz

La courbe bilinéaire du frottement apparent obtenue a ensuite été introduite dans le modèle « armature » afin de simuler l'essai d'extraction et de confronter ce dernier à la courbe expérimentale obtenue. Lors de cette simulation la raideur d'interface (déterminant la pente de la montée en charge au début de l'essai) n'a pas été modifiée par rapport à la valeur usuelle basée sur le calage d'essais statiques. La comparaison entre les deux courbes indique que le modèle reproduit fidèlement l'essai d'extraction sous chargement dynamique (cf. Figure 6).

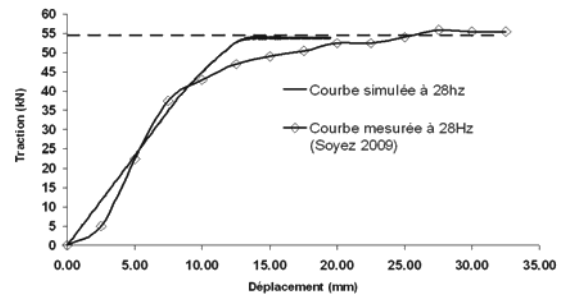


Figure 6. Comparaison entre l'essai d'extraction simulé et celui mesuré en dynamique à 28 Hz

## 4 CONCLUSION

Cet article analyse les mécanismes en jeu lors d'un essai d'extraction sous sollicitation dynamique comme ceux réalisés sur l'ouvrage expérimental de Rouen. La simulation numérique a permis, sous les hypothèses du modèle « armature » du logiciel aux différences finies FLAC, de valider que ce n'est pas la contrainte moyenne mais la contrainte minimale au cours des cycles de chargement qui est déterminante pour l'interprétation de ces essais. Une réinterprétation du frottement apparent à partir de cette nouvelle compréhension des phénomènes indiquerait qu'aucune perte de frottement n'a été enregistrée. Cette étude combinant à la fois l'expérimentation et l'analyse numérique apporterait donc des conclusions similaires à celle donnée par Murray *et al* (1979).

De plus, en se basant sur les résultats expérimentaux et cette nouvelle compréhension des phénomènes en jeu, une analyse détaillée du niveau de sécurité instantané d'ouvrages soumis à des chargements dynamiques cycliques comme les ouvrages sous voies ferrées circulées à grande vitesse paraît possible.

## 5 REMERCIEMENTS

Nous tenons tout particulièrement à remercier Réseau Ferré de France pour avoir rendu public le mémoire de thèse de M. Laurent Soyez.

## 6 REFERENCES

- AFNOR, 1995. *Renforcement des sols – Ouvrages en sols rapportés renforcés par des armatures ou nappes peu extensibles et souples*. NF P 94-222. Août 1995. Paris
- AFNOR, 2009. *Calcul géotechnique – Ouvrage de soutènement – Remblai renforcés et massifs en sol cloué*. NF P 94-270, Juillet 2009. La plaine Saint-Denis. Paris
- CEBTP. 1975. Procès verbal d'essais – Mur expérimental de Triel sur Seine. Non publié
- Floss R. and Thamm B.R. 1979. Field measurements of a Reinforced Earth retaining wall under static and dynamic loading. Colloque international sur le renforcement des sols: Terre Armée et autres techniques. Paris. Vol. III, 183-188.
- Froumentin M. *et al.* 2008. Comportement des ouvrages sous charges ferroviaire – Application au cas des ouvrages de soutènement en sol renforcé et en remblai. Rapport interne, V2.0, CETE N-C/CER
- Freitag N. *et al.* 2011. Terre Armée: Une solution d'avenir pour le développement ferroviaire. Symposium International Georail. Paris
- Murray R.T *et al.* 1979. Pullout tests on reinforcements embedded in uniformly graded sand subjected to vibration. Design parameters in geotechnical engineering, Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol.III, 115-120
- Schlosser F. Guilloux A. 1981. Le frottement dans le renforcement des sols. Revue française de géotechnique 16, 65-77.
- Soyez L. 2009. Contribution à l'étude du comportement des ouvrages de soutènement en sol renforcé, soumis à des charges d'exploitation ferroviaire. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 312 p.