

# Concours de prévision du comportement d'un mur en Terre Armée en vraie grandeur

L. SOYEZ <sup>1,2</sup>

A. LE KOUBY <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est  
Laboratoire central  
des Ponts et Chaussées  
58, boulevard Lefebvre  
75732 Paris Cedex 15

<sup>2</sup> SNCF  
direction de l'Ingénierie  
6, avenue  
François-Mitterrand  
93574 La Plaine-  
Saint-Denis Cedex  
laurent.soyez@lcpc.fr  
alain.lekouby@lcpc.fr

## Résumé

La Société nationale des chemins de fer (SNCF) s'est associée au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) pour mener des recherches visant à mieux comprendre le comportement des ouvrages en Terre Armée sous sollicitations ferroviaires. Un des axes du programme de recherche est la modélisation de ce type d'ouvrage sous chargement statique afin d'en prévoir les déformations. Pour ce faire, un concours de prévision a été organisé, sous l'égide du Comité français de mécanique de sols (CFMS), dans le cadre des Journées nationales de géotechnique et géologie de l'ingénieur 2008 (JNGG'08). Cinq participants ont calculé « à l'aveugle » les efforts dans les armatures et les déplacements d'un soutènement expérimental, soumis à un chargement statique (charge de service). Les résultats des calculs ont été comparés aux mesures puis commentés sur la base de la séance de restitution qui a eu lieu lors des JNGG'08. Par la suite, trois participants ont mené des études complémentaires, notamment sur la modélisation de l'interface sol/armature dont le rôle devait être éclairci. Leurs résultats sont synthétisés ici. La conclusion revient sur le niveau de pertinence actuel des calculs prévisionnels pour ce type de chargement.

**Mots-clés :** concours de prévision, Terre Armée, modélisation numérique, interface sol/armature, charge de service.

## Benchmark exercise of the full-scale reinforced earth wall behaviour

## Abstract

The French National Railway Company (SNCF) is 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 part of this study is the modelling of that kind of works subjected to static loading in order to predict the deformations. A benchmark exercise was organised, under the care of the French Soil Mechanic Society (CFMS), during the JNGG'08. Five participants predicted the tensile forces in strip reinforcements and the displacements of an experimental structure subjected to a static loading (service load). Results were compared to measurements and discussed based on the talk during the parallel session. Then, three participants continue complementary studies, especially about the part of the soil/reinforcement interface. Results are summarised here. The conclusion deals with the actual ability to predict wall behaviour subjected to this kind of load.

**Key words:** reinforced earth, Benchmark exercise, numerical modelling, soil/reinforcement interface, service load.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 01/06/2010.

## Introduction

La méthode de justification du dimensionnement des ouvrages de soutènement en sol renforcé par armatures inextensibles (AFNOR, 1998) est une méthode à la rupture et ne tient pas compte des déformations propres du soutènement. La circulation de trains implique une maîtrise des déformations de la voie ferrée, qui doit être de plus en plus précise avec l'augmentation des vitesses de circulation. Avant d'utiliser cette technique de renforcement, Réseau ferré de France et la Société nationale des chemins de fer, en association avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, souhaitent améliorer la prévision des déformations de ces ouvrages afin de pouvoir se prémunir lors du dimensionnement contre leurs effets néfastes éventuels.

La modélisation des ouvrages de soutènement en sol renforcé, que ce soit à l'aide de modèles discrets (Sellali-Haraigue, 1999) ou de modèles homogénéisés (Rosparis *et al.*, 2004), a permis de compléter avantageusement les expérimentations en vraie grandeur pour mieux comprendre le comportement de ce type d'ouvrage. Cet outil a aussi été utilisé pour la mise au point des règles de dimensionnement au séisme de la Terre Armée (Segrestin et Bastick, 1988). Parmi les nombreuses recherches menées, certaines furent l'occasion de confronter des modèles *a posteriori* à des expérimentations d'ouvrages soumis à des surcharges en tête, de type culée de ponts (Nagao *et al.*, 1988). En raison de l'élargissement des types de renforcement, la modélisation de l'interface sol/renforcement fait toujours l'objet de recherches (Abdelouhab *et al.*, 2007). Malgré tout, on commence à voir apparaître des simulations numériques qui permettent de prévoir les déplacements du parement liés à l'application d'une charge sur l'ensemble de la partie supérieure de l'ouvrage (Hatami et Bathurst, 2006). Profitant d'une expérimentation en vraie grandeur menée au Centre d'expérimentation routière de Rouen, un concours de prévision a été lancé, sous l'égide du Comité français de mécanique des sols (CFMS), dans le cadre des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur de Nantes en juin 2008. L'objectif principal de ce concours était de savoir si l'on est aujourd'hui capable d'anticiper le comportement, notamment en terme de déformation, d'un ouvrage en Terre Armée soumis à un chargement pouvant représenter un essieu de train.

Cet article a pour but de faire un bilan de ce concours. On commence par rappeler l'ensemble des données transmises aux participants. Les modèles n'ayant pas fait l'objet d'une publication spécifique de la part de leur(s) concepteur(s) sont présentés ici. Une synthèse des résultats fournis par les participants pour le concours et des calculs complémentaires qu'ils ont bien voulu mener permettra de préciser les enseignements à tirer de cet exercice.

## Sujet du concours

Pour préparer leur modèle, les participants ont eu accès à certaines informations récapitulées ci-dessous, telles que la géométrie de l'ouvrage et la mise en œuvre. *A posteriori*, des essais d'extraction d'armatures ont été réalisés afin d'améliorer la modélisation de l'interface.

## Géométrie de l'ouvrage

L'ouvrage a été construit dans une des fosses du CER de Rouen (Fig. 1). Celle-ci mesure environ 8 m de large au droit du parement et 30 m de long. Elle a été creusée sur 4,30 m de profondeur. Le bord de fosse est bétonné sur 1,5 m de haut, en dessous l'ouvrage est en contact avec le terrain naturel. Le sol support est considéré comme indéformable.

L'ouvrage est composé de deux structures : un soutènement en Terre Armée et un remblai technique (Fig. 2). Le plot expérimental occupe toute la largeur de la fosse. Des bastings et des géotextiles ont été disposés de manière à combler le jour entre les bords de la fosse et le parement. Ce dernier est constitué de cinq demi-écailles et de dix écailles entières mesurant 1,5 m de côté. Chacune d'elles est connectée à quatre armatures, du type HAR 45 x 5, qui font 3,5 m de long, 45 mm de large et 5 mm d'épaisseur. Les lits d'armatures sont numérotés de 1 à 5 en partant du haut. Le reste des dimensions de l'ouvrage est récapitulé sur la figure 2.

Chaque structure est surmontée d'une traverse mesurant 2,4 m de long, 0,30 m de large et 0,27 m de haut. Le grand côté est parallèle aux armatures et elles sont centrées dans la largeur de l'ouvrage (Fig. 3).

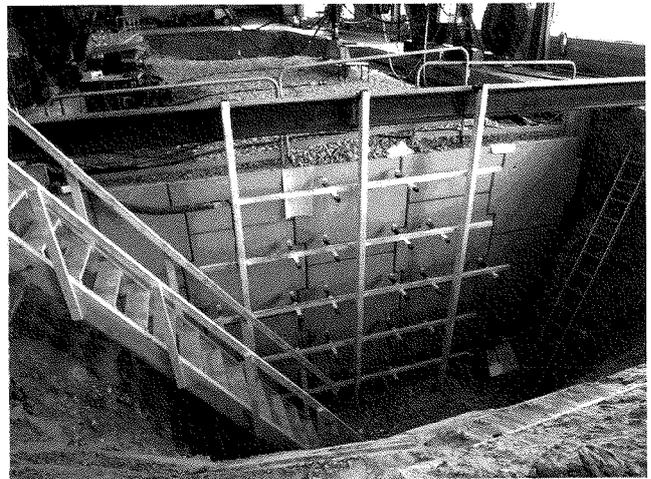


FIG. 1 Vue de la fosse du CER de Rouen et de l'ouvrage côté parement.

View of the CER test facility and the structure facing.

## Phasage

Après décaissement de la fosse, le coulage de la semelle de fondation du parement a été effectué. Les structures « soutènement et remblai technique » ont été montées en dix couches, les neuf premières de 37,5 cm d'épaisseur et la dernière de 15 cm. Pour chaque couche, l'objectif de compactage était Q4. Enfin, on a réalisé une sous-couche de 30 cm, en une fois, avant la pose du ballast (30 cm).

Le chargement a été appliqué en trois paliers : 30 ; 60 ; 90 kN. C'est d'abord la structure Terre Armée qui a été sollicitée puis le remblai technique.

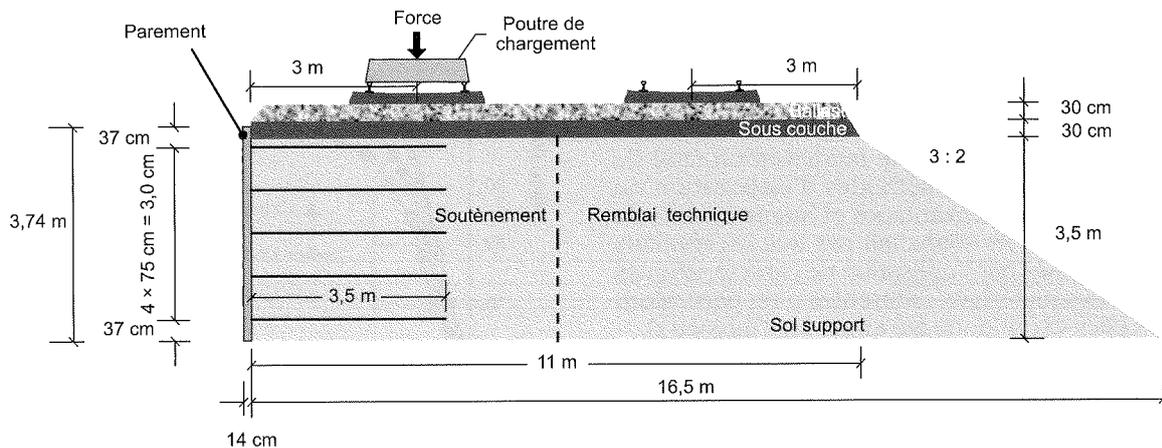


FIG. 2 Coupe longitudinale du plot expérimental (d'après Froumentin *et al.*, 2008).  
Longitudinal section of the structure (according to Froumentin *et al.*, 2008).



FIG. 3 Traverse en place et dispositif de chargement.  
Sleeper and loading system.

## 2.3

### Instrumentation

Seuls sont cités ici les capteurs ayant une utilité pour le concours. Une description plus complète est donnée dans Soyez *et al.* (2009). Des jauges de déformation ont été collées sur certaines armatures attachées aux écaïles situées dans l'axe de la charge. Les jauges ont été disposées de la manière suivante :

- sur l'ensemble des armatures, un point de mesure près du parement, un point au niveau du maximum théorique des contraintes dans un ouvrage soumis à son poids propre, un point à l'extrémité « libre » ;
- sur les armatures des lits 2 et 3, on a ajouté deux points de part et d'autre du maximum.

Les déplacements des écaïles ont été mesurés au moyen de capteurs avec contact fixés sur un treillis soudé (Fig. 1). L'objectif de l'étude étant d'étudier le comportement propre du massif en sol renforcé, il fallait mesurer les déplacements verticaux en tête du mur, c'est-à-dire sous la sous-couche. Le CER a développé un procédé original pour mesurer des déplacements à l'intérieur d'un massif de sol. Lors de la mise en œuvre, une fois arrivé au niveau dont on souhaite suivre les

déplacements, un forage tubé à l'avancement est réalisé avec un pénétromètre jusqu'au substratum. Une tige métallique y est introduite puis scellée dans le fond du trou. En tête, elle est solidarisée avec un capteur LVDT qui va suivre les déplacements d'une plaque métallique posée à même le sol (Fig. 4). Ensuite, on peut mettre en œuvre la sous-couche et le ballast.

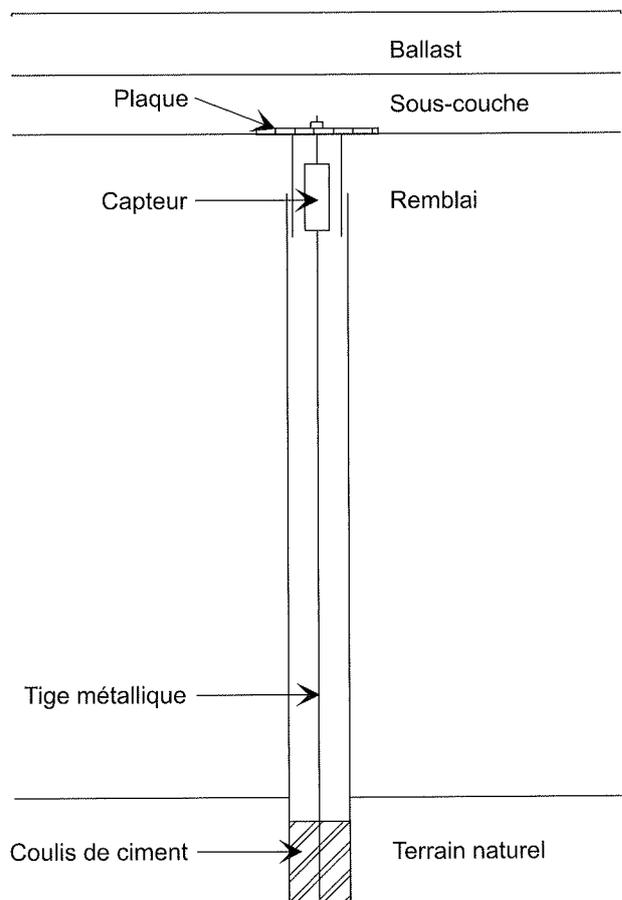


FIG. 4 Schéma du système de mesure des déplacements verticaux dans l'ouvrage (d'après Froumentin *et al.*, 2008).  
Schema of the measurement system of vertical displacement in the structure (according to Froumentin *et al.*, 2008).

## Caractéristiques des matériaux et des interfaces

L'objectif de cet exercice de modélisation était de comparer les différentes méthodes d'élaboration du modèle pour cerner les avantages et inconvénients de chacune d'elles. On ne souhaitait pas que les résultats soient conditionnés par l'utilisation de caractéristiques mécaniques des matériaux différentes d'un participant à l'autre. Celles-ci ont donc été imposées (Tableau I).

Pour le ballast et la sous-couche, elles sont tirées de la littérature (NGI, 2005). Celles du béton et des armatures sont des valeurs « classiques ». Pour le joint, il fallait marquer une différence de rigidité importante avec celles des écailles. Enfin, le matériau de remblai a fait l'objet d'essais de caractérisation et d'essais *in situ*. C'est une grave argileuse provenant de la carrière de Criquebeuf qui a été criblée avec une grille de 40 mm. Pour ce type de matériau, les essais de caractérisation sont très dépendants du protocole d'essai (Reiffsteck *et al.*, 2005), les résultats sont donc à prendre avec précaution.

Les choix des paramètres d'interface sol/écaille et sol/armature étaient laissés libres aux participants. Néanmoins, après les JNGG'08, trois essais d'extraction d'armature ont été menés pour permettre aux modélisateurs qui le souhaitaient de caler leurs paramètres d'interface sur ces mesures. Elles ont été transmises sous la forme d'un graphique qui présente, pour les trois lits testés, la force d'extraction appliquée en fonction du déplacement mesuré au niveau de l'attache de l'armature (Fig. 5).

## Calculs demandés

L'exercice consistait à prévoir l'augmentation, entre la fin de la construction du massif et chaque palier de chargement (30, 60 et 90 kN) :

- des tractions le long des armatures en fonction du lit auquel elles appartiennent ;
- des déplacements horizontaux du parement ;
- des tassements des deux structures à l'interface remblai - sous-couche, à l'aplomb des rails (la distance entre les axes des rails d'une voie est de 151 cm).

## Modèles présentés

Cinq équipes ont participé à ce concours de prévision. Deux d'entre elles ont utilisé des modèles 2D :

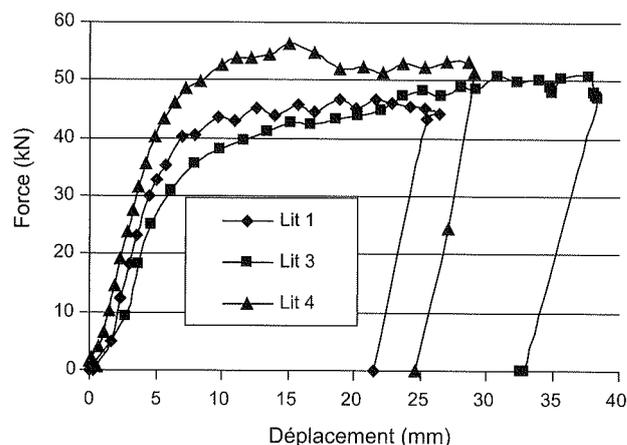


FIG. 5 Courbes force/déplacement pour les trois lits d'armatures testés.

Force/displacement curves for the three tested strips.

Terre Armée France avec le logiciel PLAXIS et Terre Armée International avec FLAC 2D. Les trois autres ont construit des modèles 3D et présenté leurs travaux au travers de publications. La société Egis Géotechnique (Breugnot et Boutonnier, 2009) et l'INSA de Lyon (Dias et Adbelouhab, 2009) se sont servis de FLAC 3D. Le LCPC a utilisé le logiciel CESAR-LCPC pour faire un modèle discret 2D, dont les résultats n'ont pas été présentés lors de la séance de restitution, et un modèle 3D homogénéisé (Soyez et Bourgeois, 2009). On revient ici sur les deux modèles proposés par le groupe Terre Armée.

## Modèle Terre Armée France

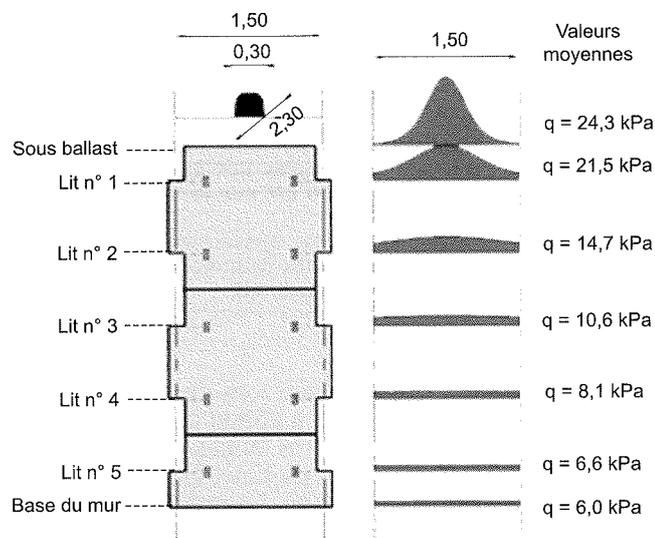
Dans le cas du modèle réalisé avec PLAXIS, les valeurs des caractéristiques mécaniques des différents matériaux imposées ont été respectées. La seule exception concerne les armatures qui ont été considérées comme des nappes. Le module d'Young du matériau a été évalué à partir de celui des armatures réelles et du matériau de remblai, ce qui donne environ 63 MPa. Les éléments d'interface ont été définis de manière à limiter le frottement mobilisable à la tangente de l'angle de frottement du sol. L'ouvrage a été simulé en phases successives, sans prise en compte du compactage.

Pour représenter la diffusion dans la troisième dimension lors de l'application du chargement, celui-ci a d'abord été simulé sur un ouvrage en terre constitué par la même succession de couches. Les incréments de

TABLEAU I Caractéristiques des différents matériaux.  
Mechanical properties of the materials.

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$	c (kPa)	$\phi$ (degrés)
Ballast	17	150	0,2	-	-
Sous-couche	23,3	90	0,3	10	36
Remblai	20,8	50	0,3	10	36
Béton	25	$2,5 \times 10^4$	0,2	-	-
Armatures	78	$2,1 \times 10^5$	0,28	-	-
Joint	2,5	1	-	-	-

contrainte verticale dans le sol aux profondeurs correspondant aux différents lits d'armatures et à l'interface sous-couche/remblai en ont été déduits. Ceux-ci ont ensuite été moyennés. Ces valeurs de contraintes ont été utilisées dans six calculs indépendants pour déterminer le déplacement vertical de l'interface et les cinq profils de variation de traction dans les renforcements ainsi que les déplacements du parement aux hauteurs correspondantes (Fig. 6).



**FIG. 6** Détermination de la contrainte verticale à appliquer en fonction du lit pour lequel on veut déterminer les incréments de traction (source Terre Armée France).  
Determination of the vertical stress to apply depending on the strip level the increase of tensile forces to be computed.

### 3.2

## Modèle Terre Armée international

La version 5.0 du logiciel FLAC 2D a été utilisée. Le sol support, ayant les mêmes caractéristiques mécaniques que la sous-couche, ainsi qu'une semelle de fondation, ont été pris en compte dans le modèle. Le comportement du matériau de remblai, de la sous-couche et du ballast est décrit par une loi de comportement de type Mohr-Coulomb, avec une dilatance nulle pour les deux derniers. L'angle de dilatance du matériau de remblai a été ramené à 4 degrés. Pour le parement, des éléments poutres (*beam*) ont été utilisés et les paramètres ont été adaptés en conséquence. Il a été encasté dans la semelle de fondation et deux articulations simulent les joints.

Le logiciel dispose d'éléments spécifiques pour la modélisation des renforcements. Le tableau II donne les différents paramètres ainsi que les valeurs retenues.

**TABEAU II** Valeurs des paramètres retenues pour les éléments de renforcement.  
Retained values of reinforcement properties.

Largeur de calcul (m)	Nombre d'armatures	Aire (m <sup>2</sup> )	Module d'Young (kPa)	Résistance à la traction et compression (kN)	Déformation à la rupture (%)	Frottement initial	Frottement minimal	Pression de confinement (kPa)
3	4	0,004 x 0,05	2,1.10 <sup>8</sup>	32	12	1,5	0,65	120

Les valeurs considérées pour les paramètres de l'interface sont : 10<sup>6</sup> kPa pour la raideur normale et pour la raideur de cisaillement et 24 degrés pour l'angle de frottement. Enfin, la diffusion du chargement parallèlement au parement a été prise en compte de la même manière que celle retenue par Terre Armée France.

### 4

## Présentation des résultats

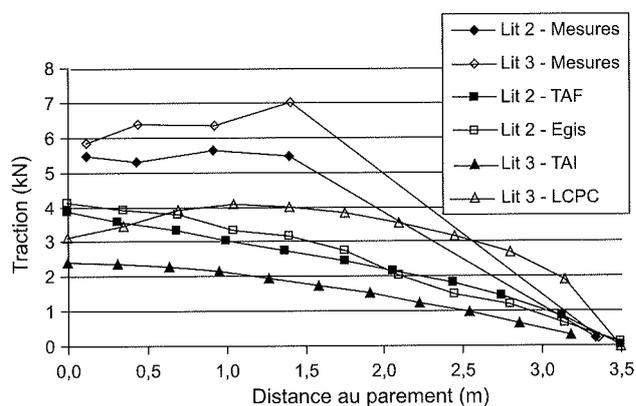
Les résultats ont été séparés en deux parties. La première concerne les calculs prévisionnels réalisés par les participants. La deuxième partie est consacrée à l'amélioration des modèles à l'aide, entre autres, du calage des paramètres d'interface sur les résultats des essais d'extraction.

### 4.1

## Résultats des calculs prévisionnels

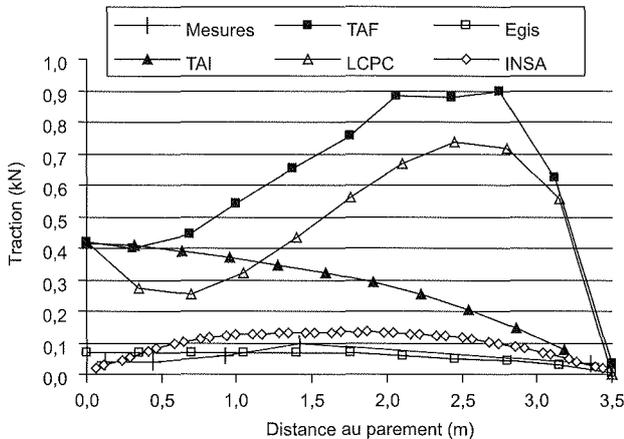
Bien que celles-ci n'aient pas été demandées, quatre participants ont donné les tractions dans les armatures en fin de construction. On remarque une tendance forte à la sous-estimation de celles-ci (Fig. 7), probablement liée à la difficulté de prendre en compte le compactage. Néanmoins, on a au maximum un facteur légèrement supérieur à 2 entre les mesures et les calculs, ce qui signifie que l'ordre de grandeur des valeurs calculées est correct.

Par contre, les résultats des calculs de l'incrément de traction dans le lit 3 provoqué par l'application de la charge de 90 kN diffèrent nettement, jusqu'à un facteur 9 (Fig. 8). L'allure des courbes est très différente d'un participant à l'autre. Il semble que l'augmenta-



**FIG. 7** Tractions mesurées et calculées en fin de construction dans les armatures des lits 2 et 3.  
Tensile forces measured and computed in the strip levels 2 and 3.

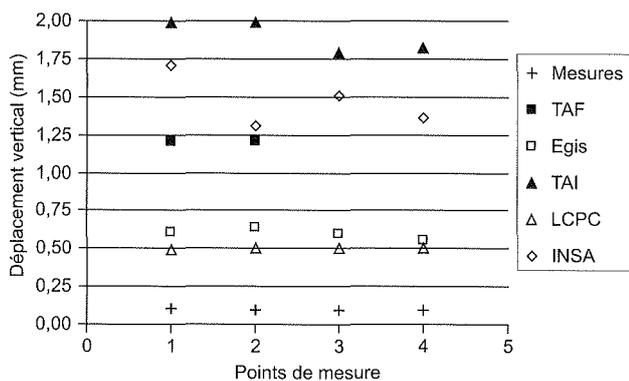
tion maximale soit dans la partie de l'armature qui n'a pas été instrumentée. On peut raisonnablement penser qu'elle est de l'ordre de 0,2 kN. Trois participants ont trouvé des valeurs comparables et deux les surestiment assez largement. Cette tendance se retrouve pour les autres lits. Alors que tous les participants avaient calculé des tractions en fin de construction inférieures aux valeurs mesurées, presque tous ont obtenu des augmentations de traction supérieures aux mesures.



**FIG. 8** Variations de traction mesurées et calculées dans le lit 3 provoquées par l'application de la charge de 90 kN sur la structure Terre Armée.

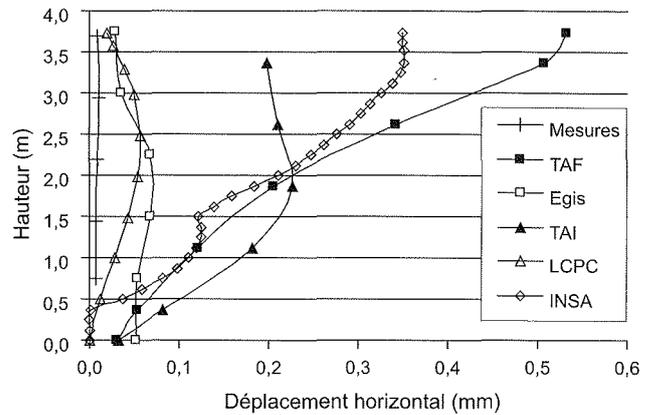
The increase of tensile forces due to the 90 kN loading on Reinforced Earth structure measured and computed.

Bien que les modules d'Young des différents matériaux aient été fixés, les déplacements verticaux calculés de l'interface sous-couche/remblai varient d'un facteur 4 (Fig. 9). Les déplacements calculés les plus faibles sont environ cinq fois plus importants que les mesures. Les deux modélisateurs (Egis et LCPC) qui trouvent les déplacements verticaux les plus faibles sont aussi ceux qui obtiennent les déplacements du parement les moins grands, environ 5 fois plus élevés que les mesures (Fig. 10). Cependant, l'augmentation de traction maximale dans le lit 3 calculée par Egis est environ 7 fois plus petite que celle calculée par le LCPC.



**FIG. 9** Déplacements verticaux de l'interface sous-couche/remblai mesurés et calculés aux quatre points demandés.

Vertical displacements of the backfill/sub-ballast interface at four points of measurement.



**FIG. 10** Déplacements horizontaux du parement calculés et mesurés liés à l'application de la charge de 90 kN sur la structure Terre Armée.

Facing horizontal displacements due to the 90 kN loading on the Reinforced Earth structure measured and computed.

La discussion, qui a eu lieu lors de la séance des JNCG'08 dédiée à l'exercice, a abouti aux conclusions suivantes. Les mesures sont très faibles, notamment en termes de déplacements, et globalement 10 fois plus petites que ce qui était attendu. La précision des capteurs est suffisante pour ne pas remettre en cause les mesures. D'une manière générale, l'ouvrage est très peu sollicité par le chargement de 90 kN et son comportement doit probablement être élastique, ce qui mériterait d'être vérifié par les modélisateurs. On pourrait aussi tenir compte de la non-linéarité du comportement élastique des sols dans le domaine des petites déformations et prendre un module plus élevé.

L'utilisation des modèles 2D, si elle est associée à une méthode représentant la diffusion dans la troisième dimension, permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Par contre, comme elle nécessite plusieurs calculs pour fournir les résultats aux différentes profondeurs, elle ne permet pas d'observer correctement le comportement de l'ouvrage lors de l'application d'une charge.

Enfin, la principale difficulté de la modélisation de ce type d'ouvrage réside dans l'interface sol/armature. L'influence des paramètres de comportement de l'interface est importante sur la réponse de l'ouvrage. Il serait intéressant de caler ces paramètres à partir des essais d'extraction et d'estimer l'amélioration que cela apporte.

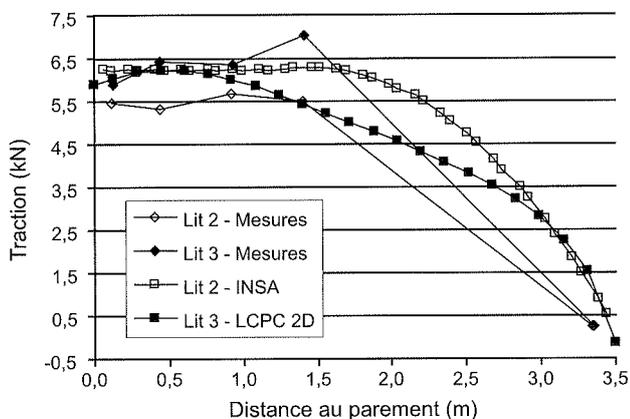
#### 4.2

### Résultats des calculs *a posteriori*

Deux participants ayant utilisé des modèles 3D ont bien voulu compléter le dépouillement de leurs calculs et ils confirment que très peu de plasticité s'est développée dans le sol. Elle est localisée près du parement et en pied de talus. Le chargement n'amène pas de manière significative de plasticité supplémentaire. Concernant les interfaces sol/armatures, si l'on garde les hypothèses conservatives pour les valeurs des paramètres, c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte de la dilatance empêchée, on n'observe que l'interface du lit 1 plastifie lors du chargement (Breugnot et Boutonnier, 2009).

Devant cette constatation, des calculs ont été réalisés, essentiellement avec le modèle 2D discret du LCPC (temps de calcul réduits), pour étudier l'influence des valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau de remblai sur la réponse du mur, notamment une augmentation du module d'Young. Celle-ci conduit à diminuer la sensibilité du mur à l'application de la surcharge, tant en termes de déplacements que de tractions dans les armatures. Par contre, ces tractions en fin de construction, qui étaient déjà plus faibles que les mesures, diminuent dans les mêmes proportions. Pour les maintenir constantes, on a été amené à modifier une autre caractéristique mécanique du sol, par exemple le coefficient de Poisson ou la cohésion. L'influence sur les déplacements verticaux de l'interface est faible ; en revanche, le bénéfice obtenu en terme de déplacements du parement lors de l'augmentation du module d'Young est alors perdu. Il ne suffit donc pas simplement d'augmenter ce module pour caler les modèles.

Les résultats des essais d'extraction ont ensuite été fournis aux participants pour affiner leur modélisation de l'interface sol/armature. Les trois approches utilisées pour caler les paramètres d'interface sont différentes, alors que deux participants utilisent la même modélisation pour l'interface.



**FIG. 11** Tractions calculées en fin de construction dans les lits 2 et 3 après détermination des paramètres de l'interface à partir des essais d'extraction.

Tensile forces in the strip levels 2 and 3 at the end of construction taking into account the final values of interface properties based on pull out tests.

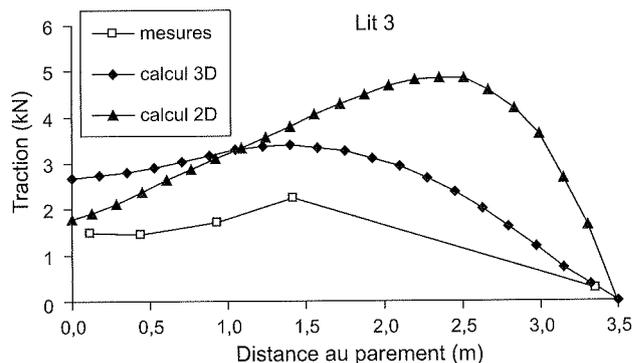
La détermination des valeurs des paramètres de l'interface améliore le calcul des tractions dans les armatures en fin de construction. Les valeurs initialement prises, qui sont conservatrices, sous-estimaient le frottement sol/armature et la raideur de l'interface. Par ailleurs, la prise en compte des effets du compactage permet de recalculer encore plus précisément les résultats numériques sur les mesures (Breugnot et Boutonnier, 2009).

Les augmentations de traction ne sont pas sensiblement améliorées (Soyez et Bourgeois, 2009). Il en va de même pour les déplacements du parement liés à l'application de la charge qui restent à des niveaux bien plus élevés que dans la réalité (Dias et Abdelouhab,

2009). Même à ce stade, augmenter de manière significative le module d'Young du sol ne permet toujours pas de caler le modèle en termes de déplacements du parement (Soyez et Bourgeois, 2009).

Une fois les paramètres d'interface calés, dans le cas des modèles 2D, la prise en compte de la diffusion parallèle au parement permet d'obtenir une estimation satisfaisante des variations de traction (Soyez et Bourgeois, 2009). Elle donne aussi une estimation des déplacements du parement qui est du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les modèles 3D. Bien que TAI n'ait pas calé les paramètres d'interface, leur modèle 2D montrait que les incréments de traction dans les armatures étaient faibles par rapport aux tractions en fin de construction, 15 % au maximum si l'on excepte le lit 1. De plus, en comparaison des deux modèles FLAC 3D, les déplacements du parement n'étaient pas aberrants.

En 2009, dans le cadre du programme de recherche LCPC-SNCF, un chargement de 850 kN de l'ouvrage de soutènement a été entrepris pour sortir du domaine des petites déformations. Il est intéressant de constater que la modélisation de ce chargement, avec les modèles d'interface sol/armature recalés, donne des résultats proches des mesures. Ceci est valable bien pour les incréments de traction dans les armatures (Fig. 12) que pour les déplacements horizontaux du parement (Fig. 13). Les biais que l'on observe pour le faible chargement de 90 kN s'atténuent pour 850 kN. Une des explications possibles est que l'impact du compactage sur la réponse de l'ouvrage est prépondérant par rapport à celui lié à l'application d'une faible charge. Par contre, cet impact se réduit au fur et à mesure que le niveau de chargement augmente.



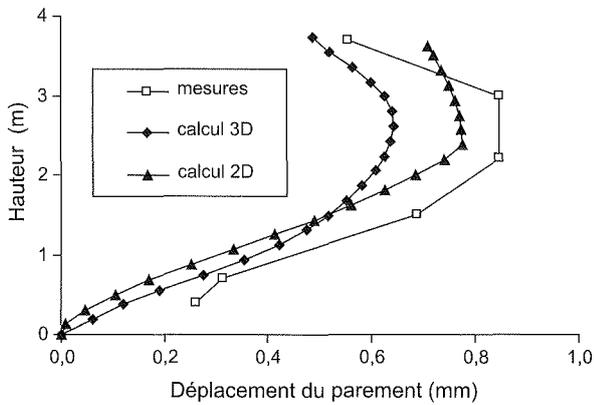
**FIG. 12** Variations de tractions liées à l'application de la charge de 850 kN mesurées et calculées dans le lit 3 avec les modèles LCPC 2D discret et 3D multiphasique (Soyez et Bourgeois, 2009).

The increase of tensile forces due to the 850 kN loading measured and computed for 2D discrete and 3D multiphased models in the strip levels 1 and 2 (Soyez and Bourgeois, 2009).

## 5

## Conclusion

Ce concours de prévisions a permis de confronter plusieurs modèles numériques d'ouvrages en Terre Armée, 2D et 3D, discrets et homogénéisés, réalisés avec les logiciels CESAR-LCPC, FLAC et PLAXIS. L'objectif était d'évaluer la capacité de la communauté géo-



**FIG. 13** Déplacements horizontaux du parement liés à l'application de la charge de 850 kN mesurés et calculés avec les modèles 2D LCPC discret et 3D multiphasique (Soyez et Bourgeois, 2009).

Facing horizontal displacements due to the 850 kN loading measured and computed for 2D discrete and 3D multiphased models in the strip levels 1 and 2 (Soyez and Bourgeois, 2009).

technique à faire une modélisation prévisionnelle du comportement de l'ouvrage, notamment de prévoir ses déplacements de manière fiable, lors de l'application d'une surcharge correspondant à la moitié de la charge d'un essieu de train.

On constate que, pour l'ensemble des participants, les résultats des calculs s'accordent assez bien avec les mesures de traction dans les armatures réalisées à la fin de la construction du soutènement. Par contre, la prévision des incréments de traction dans les différents lits liés à l'application de la charge n'est pas satisfaisante avec tous les modèles. Concernant les

déplacements horizontaux du parement et verticaux de l'interface, les résultats les plus proches sont 5 fois plus élevés que les mesures, ce qui n'est pas satisfaisant non plus.

Le calage des paramètres sur les résultats des essais d'extraction est positif sur le calcul des tractions dans les armatures. Il permet d'améliorer sensiblement les calculs en fin de construction et de conserver des calculs d'incrément corrects. Néanmoins, à ce stade des connaissances, ce n'est pas suffisant pour ramener les déplacements calculés au bon ordre de grandeur. Jouer sur les valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau de remblai, notamment le module d'Young, n'est pas non plus une solution en soi. On peut envisager deux pistes d'amélioration qui sont l'utilisation de modèles d'interface sol/armature plus complexes et surtout une meilleure prise en compte du compactage du remblai.

En effet, la charge reprise par l'essieu d'un TGV représente, en statique, une faible sollicitation de l'ouvrage en comparaison de ce qu'il a subi lors de sa mise en œuvre. Si le modèle numérique ne tient pas compte du compactage, il est normal qu'il surestime l'impact du chargement sur l'ouvrage. Toutefois, pour des surcharges dix fois plus élevées, les modèles donnent des résultats prévisionnels nettement plus satisfaisants, à condition que l'interface soit correctement modélisée.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Éric Lucas et Jeremy Plancq (TAF), Yassine Bennani et Nicolas Freitag (TAI), Daniel Dias et Abdelkader Abdelouhab (INSA, Lyon), Antonin Breugnot et Luc Boutonnier (Egis Géotechnique) et Emmanuel Bourgeois (LCPC) d'avoir bien voulu participer à ce concours. Les remerciements vont également aux organisateurs des JNGG'08 et au CFMS pour l'aide apportée à cet exercice. Enfin, nous remercions le groupe Terre Armée pour le prêt d'une partie du matériel d'extraction d'armature. Les auteurs tiennent enfin à remercier RFF et l'ANRT pour leur soutien financier important dans le cadre de ce projet de recherche.

- Abdelouhab A., Dias D., Bouredeau Y., Freitag N. – Soil/reinforcement interface characterization using three-dimensional physical modelling. *The 5th International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japon, 2007, p. 317-320.
- AFNOR – NF P 94-220-0, Renforcement des sols. Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles, 1998.
- Breugnot A., Boutonnier L. – Modélisation continue tridimensionnelle du comportement mécanique d'un mur en Terre Armée. *Revue française de géotechnique*, n° 129, 2009.
- Dias D., Abdelouhab A. – Modélisation numérique tridimensionnelle de murs en Terre Armée. Confrontation à une modélisation physique en vraie grandeur. *Revue française de géotechnique*, n° 129, 2009.
- Froumentin M., Hosseingholian M., Mercadier D., Charles I. – Comportement des ouvrages sous charge ferroviaire. Application au cas des ouvrages de soutènement en sol renforcé et en remblai, V2.0, Rapport interne, CETE N-C/CER, 2008.
- Hatami K., Bathurst R.J. – Numerical Model for Reinforced Soil Segmental Walls under Surcharge Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE vol. 132, n° 6, 2006, p. 673-684.
- Nagao A., Kitamura T., Mizutani J. – Field experiment on reinforced earth and its evaluation using FEM analysis. *International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japon, 1988, p. 329-334.
- Norges Geotekniske Institutt (NGI) – Sustained Performance of Railway Track (SUPERTRACK). Final Report, Norway ([www.supertrack.no](http://www.supertrack.no)), 2005.
- Reiffsteck P., Arbaut J., Sagnard N., Khay M., Subrin D., Chapeau C., Levaucher D. – Mesures en laboratoire du comportement mécanique des sols hétérogènes. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 268-269, 2007, p. 1-23.
- Rospars C., Bourgeois E., de Buhan P., Humbert P. – Modélisation numérique de la construction d'un mur expérimental en Terre Armée à Bourron Marlotte à l'aide d'un modèle homogénéisé. *Colloque international de géotechnique*, Beyrouth, 2004, p. 275-280.
- Segrestin P., Bastick M.J. – Seismic design of Reinforced Earth retaining walls. The contribution of finite element analysis. *International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japon, 1988, p. 577-582.
- Sellali-Haraigue N. – *Modélisation des contacts dans le calcul tridimensionnel des ouvrages géotechniques*. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, 1999.
- Soyez L., Bourgeois E. – Étude du comportement d'un mur en Terre Armée : rôle de l'interface sol/armature dans la modélisation. *Revue française de géotechnique*, n° 129, 2009.
- Soyez L., Le Kouby A., Mestat P., Hosseingholian M., Champion G. – Comportement d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé soumis à des sollicitations de type ferroviaire. *The 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandrie, Égypte, octobre 2009.