

BUTÉE DE SOL SUR LES ÉLÉMENTS TRANSVERSES DES INCLUSIONS COMPOSITES VSoL®

BEARING ON THE TRANSVERSE ELEMENTS OF VSoL® COMPOSITE INCLUSIONS

Michalis CHIKARAS¹, Benoit CHANTEPERDRIX²

¹ *Consultant Indépendant, Athènes, Grèce*

² *Bouygues Travaux Publics, Paris, France*

RÉSUMÉ – Cet article présente les résultats des essais statiques d'extraction en laboratoire sur des éléments de renforcement sous forme de treillis métalliques soudés VSoL®. L'influence de la butée passive développée lors de l'essai sur les barres transversales est examinée en détail.

ABSTRACT – This article presents the results of static laboratory extraction tests on VSoL® reinforcing elements in the form of welded metallic meshes. The influence of the passive bearing developed during the test on the transverse bars is examined in detail.

1. Introduction

Cette étude ne concerne que les ouvrages de soutènement en remblai renforcé suivant le procédé géotechnique VSoL® qui est constitué d'armatures sous forme de treillis métalliques soudés. Les lits de treillis sont placés horizontalement dans le massif de remblai à intervalles réguliers et forment une succession de lits parallèles généralement équidistants inclus dans le remblai, depuis la base de l'ouvrage jusqu'à son sommet. Un treillis comprend usuellement deux à quatre barres longitudinales liées entre elles par soudage de barres transversales du même diamètre nominal.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse au mécanisme d'interaction entre le sol et ce type d'armature précis. L'outil le mieux adapté pour caractériser cette interface et définir ses paramètres est l'essai (non normalisé mais largement inspiré de la NF P 94-222) d'extraction statique en laboratoire. Une série d'essais comparatifs a été effectuée afin de mieux comprendre ce mécanisme complexe en vue d'une optimisation de la géométrie de treillis, notamment de la distance entre les barres longitudinales et celle entre les barres transversales (voir Tableau 2).

2. Essai d'extraction

L'essai consiste à extraire un élément de renforcement de sol préalablement mis en place dans un caisson rempli de sol et soumis à différents niveaux de contrainte verticale initiale (surcharge uniforme σ_{v0} au niveau de l'armature), en actionnant un dispositif d'extraction de façon à obtenir un déplacement à vitesse constante de la tête (ou de la queue) du renforcement.

Durant l'essai on mesure l'effort d'extraction nécessaire en fonction de ce déplacement relatif sol-armature. Le but de cet essai est d'obtenir pour un couple sol-inclusion une mesure de l'effort d'extraction limite, ce qui permet de déterminer le coefficient d'interaction sol-inclusion apparent μ^* en fonction de la contrainte verticale initiale σ_{v0} appliquée.

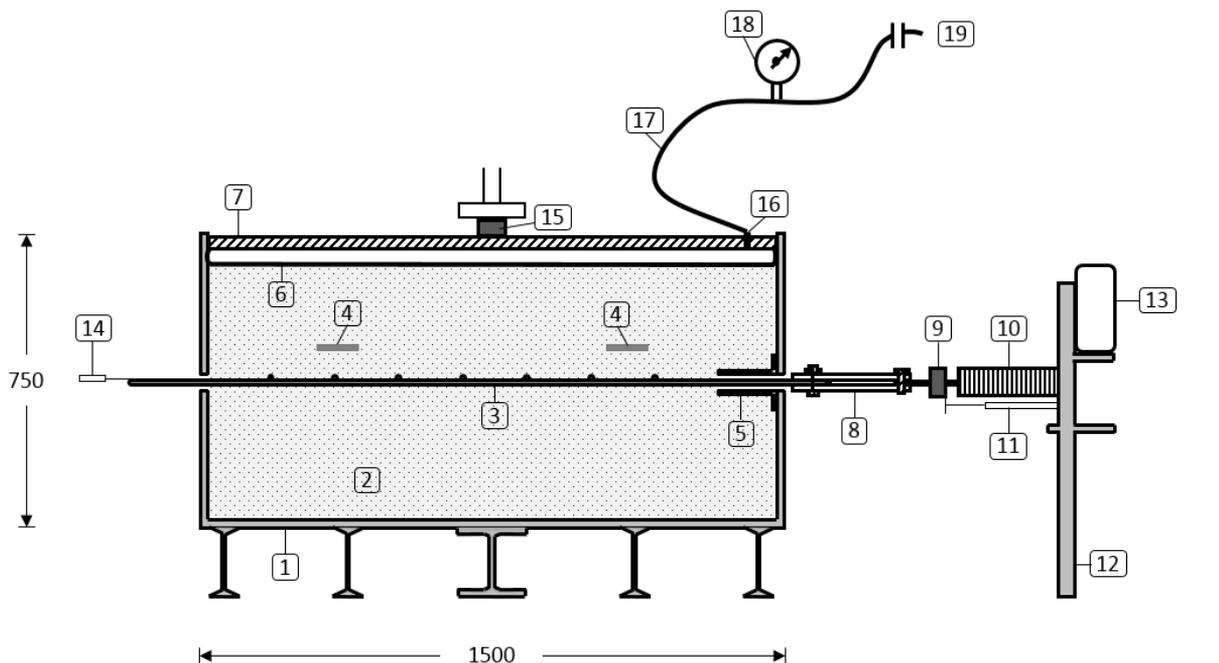
2.1. Composants

2.1.1. Appareil

Le dispositif de l'essai a été conçu et construit dans le Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Université Technique Nationale d'Athènes (UTNA). Il comprend un conteneur rigide, deux actionneurs hydrauliques, un système d'acquisition de données et un compresseur d'air selon la configuration illustrée schématiquement sur la Figure 1.

La boîte d'extraction est en acier. Les dimensions internes sont de 1,5 m de longueur, 0,95 m de largeur et 0,75 m de profondeur, conformément aux recommandations ASTM D6706-01 et EN 00189016. Bien que l'appareil d'essai soit suffisamment grand pour éviter des effets de bord considérables, le frottement entre le sol testé et les parois de la cuve a été minimisé en lubrifiant toutes les surfaces internes. Simultanément, le renfort est pris en sandwich entre des couches de sable d'épaisseur suffisante (200 mm) pour éliminer les effets des limites supérieures et inférieures.

La paroi frontale (dans le sens de la traction) est probablement la plus critique de toutes les frontières et est donc traitée avec une attention particulière. Plusieurs études ont indiqué que près de cette paroi, la contrainte normale agissant sur le renfort peut varier de manière significative au cours de l'arrachement en raison des effets de voûte affectant ainsi de façon significative les résultats de l'essai. Suivant les recommandations d'études antérieures, deux manchons métalliques horizontaux ont été fixés sur le côté intérieur de la paroi avant, s'étendant de 160 mm dans la cuve remplie de sol, afin de minimiser ces effets.



- | | | |
|-------------------------|--|---------------------------------------|
| 1. Boîte d'extraction | 8. Système de fixation | 15. Capteur de force |
| 2. Sol compacté | 9. Capteur de force | 16. Pression de l'air entrée / sortie |
| 3. Armature | 10. Vérin d'extraction | 17. Tuyau rigide |
| 4. Cellules de pression | 11. Extensomètre | 18. Régulateur |
| 5. Manchons métalliques | 12. Dispositif de réaction | 19. Vers compresseur de l'air |
| 6. Coussin d'air | 13. Dispositif de contrôle de la vitesse | |
| 7. Plaque rigide | 14. Capteurs de déplacement | |

Figure 1. Diagramme schématique de l'appareil d'extraction: Coupe transversale.

2.1.2 Sol

Les essais ont été effectués avec un seul type de sol : le sable propre de l'UTNA dont les principales propriétés physiques sont présentées dans le Tableau 1. Les résultats des essais de cisaillement direct effectués à la boîte sont présentés sur la Figure 2.

Tableau 1. Propriétés physiques du sol

Description	Notation	Valeur	Unité	
Dimensions des particules			0,075-2	mm
Dimension caractéristique (<60% de la masse totale des particules)	d_{60}	0,71	mm	
Dimension caractéristique (<50% de la masse totale des particules)	d_{50}	0,55	mm	
Dimension caractéristique (<10% de la masse totale des particules)	d_{10}	0,11	mm	
Coefficient d'uniformité			6,33	-
Coefficient de courbure			0,95	-
Indice de densité			70	%
Poids volumique maxi du sol sec			15,9	kN/m^3
Poids volumique mini du sol sec			13,5	kN/m^3
Angle de frottement interne (volume constant)			33	°
Cohésion			0	kPa

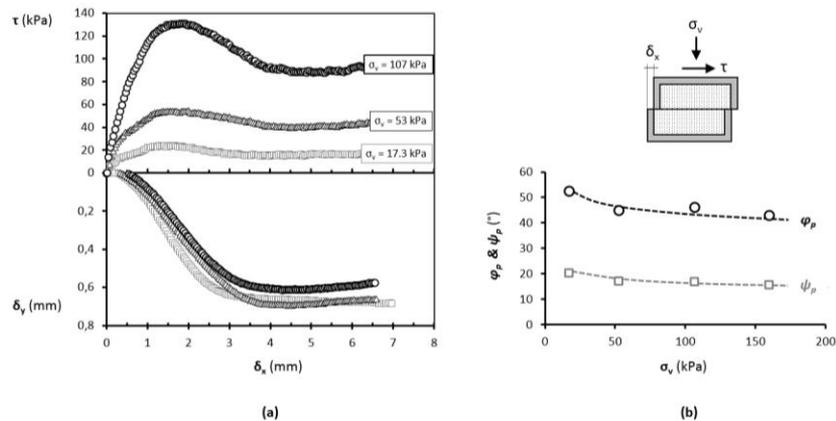


Figure 2. Résultats des essais de cisaillement direct à la boîte.

2.1.3 Inclusions

Les treillis métalliques soudés sont des armatures horizontales unidimensionnelles peu extensibles (module d'Young équivalent du renforcement supérieur à 20 MPa) et souples (une inclusion est considérée comme souple si son matériau constitutif est ductile et si les efforts de flexion induits par les déformations du massif armé sont négligeables, par rapport aux efforts de la traction). La géométrie des armatures testées, dont les résistances font l'objet de cet article, est présentée dans le Tableau 2 et illustrée sur la Figure 3. Le taux de travail de l'acier à l'effort maximal à l'extraction est négligeable ($\approx 40\%$) par rapport à la résistance limite ultime de l'acier en traction ($f_{u;k} > 500 \text{ MPa}$).

Tableau 2. Propriétés géométriques du renforcement

Description	Notation	Valeur			Unité
		B1	B2	B3	
Diamètre nominal de la barre ronde	$\emptyset = d_x = d_y$	12			mm
Nombre des barres longitudinales	n_y	2			-
Nombre des barres transversales	n_x	4	7		-
Pas du motif du treillis (longitudinal)	s_x	300		150	mm
Pas du motif du treillis (transversal)	s_y	150			
Longueur des barres transversales	b	165	250	165	
Longueur active	L_s	900			

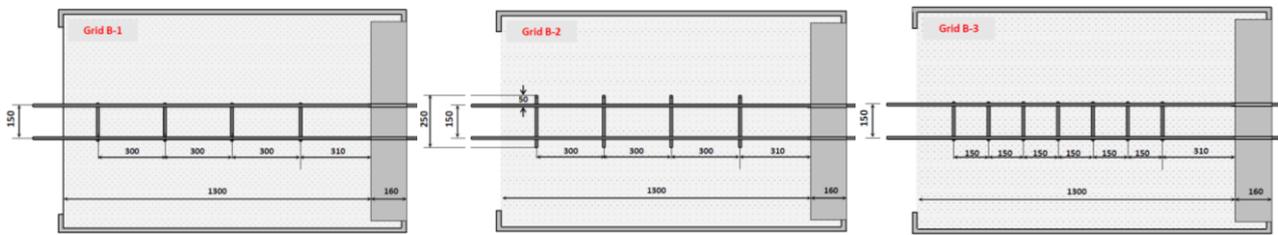


Figure 3. Inclusions extraites.

2.2 Mode opératoire

Dans une première étape, le sable est versé à la main dans la boîte d'extraction et jusqu'à mi-hauteur par couches de 20 cm d'épaisseur moyenne. La mise en place de chaque couche est suivie d'un compactage à l'aide d'un vibreur électrique intégré, dont la fonction est basée sur le principe de la masse en rotation. Après le remplissage et le compactage de la moitié inférieure de la boîte (deux couches), les armatures sont placées sur la surface plane du sol. Une attention particulière est, ensuite, accordée à l'accrochage de la tête de l'inclusion avec précision à un vérin d'extraction positionné à l'avant de la boîte à l'aide du système de fixation afin de permettre la répartition uniforme de la force d'arrachement sur toute la largeur de l'armature et d'éviter les mouvements parasites (glissement, torsion, déplacement). La moitié supérieure du remblai est ensuite remplie et compactée couche par couche de la même manière. Des capteurs de déplacement à l'arrière de l'armature sont installés. Un capteur de force, installé entre le vérin d'extraction et le système de fixation, permet de mesurer l'effort appliqué en tête pendant l'extraction. Après connexion des capteurs, la procédure est achevée de la même manière. Un coussin d'air, permettant d'appliquer une surcharge uniforme, est ensuite placé entre le sol et la plaque rigide. Ce coussin est mis sous pression et contrôlé par un régulateur. Après fermeture de la boîte et application de la pression dans le coussin d'air, le vérin d'extraction qui se trouve à l'avant de l'appareil est mis en marche. Celui-ci permet de tirer l'inclusion à la vitesse d'extraction fixée de 1mm/min, vitesse qui correspond à celle utilisée en général dans ce type d'essai.

3. Résultats

La mobilisation de la résistance d'interaction (T) le long d'un renforcement dépend de sa déformabilité. Un renforcement parfaitement indéformable soumis à un effort d'extraction se déplace de la même façon en tout point et mobilise donc un cisaillement constant sur toute la longueur concernée. On peut alors décomposer l'interaction mobilisée totale en frottement latéral sur les barres longitudinales (T_f) et en butée passive sur les barres transversales (T_b).

$$T = T_f + T_b \quad (1)$$

Lors de l'essai, le sol au voisinage immédiat de l'inclusion est cisailé. Dans le cas d'un sol frottant, dilatant et compacté comme le sable UTNA, le volume de sol cisailé autour de l'inclusion tend à se dilater, mais cette augmentation de volume est partiellement empêchée par le sol environnant. Il en résulte une augmentation ($\Delta\sigma_v$) de la contrainte verticale dont la valeur peut être très importante par rapport à la contrainte verticale initiale (σ_{v0}) et diminue avec la distance à l'inclusion. Ce phénomène de caractère tridimensionnel dit de dilatance empêchée est caractérisé par un coefficient d'interaction apparent, noté μ^* , défini selon la NF P 94-270 par :

$$\mu^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{v0}} = \frac{\left(\frac{T}{P_s L_s}\right)}{\sigma_{v0}} = \frac{\left(\frac{T}{2b \cdot L_s}\right)}{\sigma_{v0}} = \frac{T}{2b \cdot L_s \cdot \sigma_{v0}} \quad (2)$$

$$\mu^* = v^* \cdot \left(\frac{d_x}{2s_x}\right) \quad (3)$$

Où : τ_{max} est la contrainte maximale de cisaillement mobilisable sur la surface conventionnelle de contact entre le sol et le renforcement, $P_s (=2 \cdot b)$ le périmètre conventionnel de cette surface, $L_s (= (n_x - 1) \cdot s_x)$ la longueur de l'armature en contact avec le sol et v^* le coefficient d'ancrage apparent qui diffère de μ^* car il incorpore le rapport adimensionnel de s_x/d_x . Il est important de noter que les valeurs de μ^* correspondent à une mobilisation partielle de cette interaction mobilisable: c'est l'interaction conventionnellement mobilisée pour un déplacement net en tête de l'inclusion limité à 15mm en France (NF P 94-222) et à ≈ 20 mm aux USA.

Le déplacement nécessaire pour mobiliser la résistance de frottement maximale est de l'ordre de 5 mm, tandis que des déplacements plus importants sont nécessaires pour atteindre la résistance ultime des armatures (≈ 50 mm). Néanmoins, l'interprétation faite par la grande majorité des codes nationaux de dimensionnement relatifs néglige l'effet du frottement sur les barres longitudinales et transversales, ou plutôt elle l'amalgame à la butée. Même si le frottement n'entre a priori que pour 10 à 20% dans la résistance à l'interaction totale, suivant la taille des mailles du treillis, il faut admettre que cela fausse un peu l'interprétation des résultats.

L'influence de la dilatance est difficile à prendre en compte dans les méthodes de dimensionnement actuelles. L'augmentation ($\Delta\sigma_v$) de la contrainte verticale initiale (σ_{v0}) est difficile à calculer ou à prévoir car elle est liée à plusieurs paramètres : le volume de la zone de cisaillement entourant l'inclusion, les contraintes normales initiales, l'état de compacité et la dilatance du sol.

Afin d'améliorer la connaissance des conditions de cette interaction complexe, nous avons procédé à des essais statiques d'extraction en laboratoire à l'UTNA sur ces inclusions composites de géométrie variable connues (Tableau 2) dans des caissons remplis de sol et soumis à différents niveaux de contrainte verticale nominale (5,20,40,60,et 120kPa). Dans le but de quantifier la résistance supplémentaire générée dans le ferrailage par la contribution des barres transversales, on effectue une première comparaison entre les treillis B1 et B2 pour trois niveaux de contrainte verticale nominale (20,60,et 120kPa) et dont la seule différence est la largeur b qui passe de 165mm pour le B1, à 250mm pour le B2 (augmentation de 51,5%). La Figure 4 représente l'effort d'extraction (T) par rapport à la réponse de déplacement net en tête de l'armature sous ces trois niveaux de contrainte verticale nominale (20,60 et 120kPa). Conformément aux attentes théoriques, la résistance ultime à l'extraction augmente. Néanmoins, l'augmentation (de +51,5%) de la largeur ne résulte pas en une augmentation équivalente de la résistance. En fait, cette dernière reste inchangée pour la faible contrainte de 20kPa et augmente d'environ +17% pour les contraintes de 60 et 120kPa. Ce phénomène devient plus clair si on raisonne en termes de coefficient d'interaction apparent μ^* ou encore mieux en termes de coefficient d'ancrage apparent v^* .

La Figure 5 représente ainsi les mêmes résultats que la Figure 4, cependant en termes de valeurs de μ^* et la Figure 6 montre la variation du coefficient d'ancrage apparent en fonction de la contrainte verticale σ_{v0} pour les deux types de renforcement comparés (B1 et B2). La forte diminution de ces deux coefficients, surtout sous faibles contraintes, est évidente. Ce qui souligne l'importance des éléments transversaux au voisinage immédiat des nœuds, où la butée est mobilisée beaucoup plus tôt par rapport à la partie centrale de la barre transversale qui ne joue pas un rôle si important à cause de sa déformation.

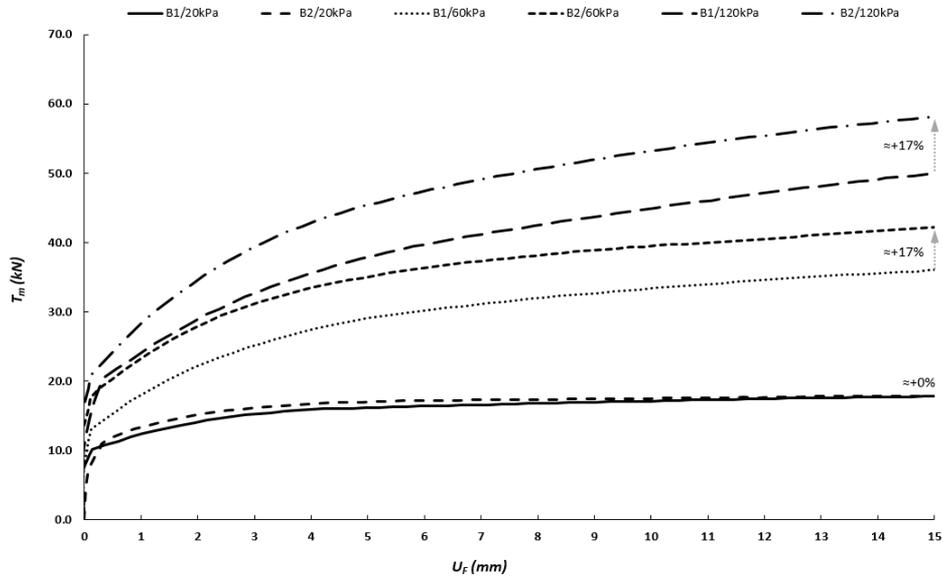


Figure 4. Courbe effort d'extraction-déplacement relatif net en tête de l'inclusion (B1/B2).

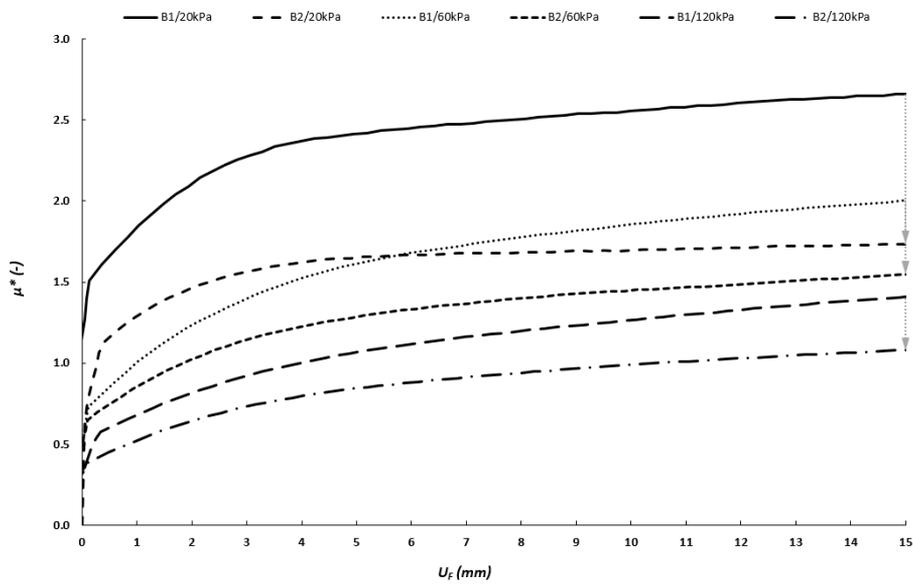


Figure 5. Evolution du coefficient d'interaction apparent lors de l'essai (B1/B2).

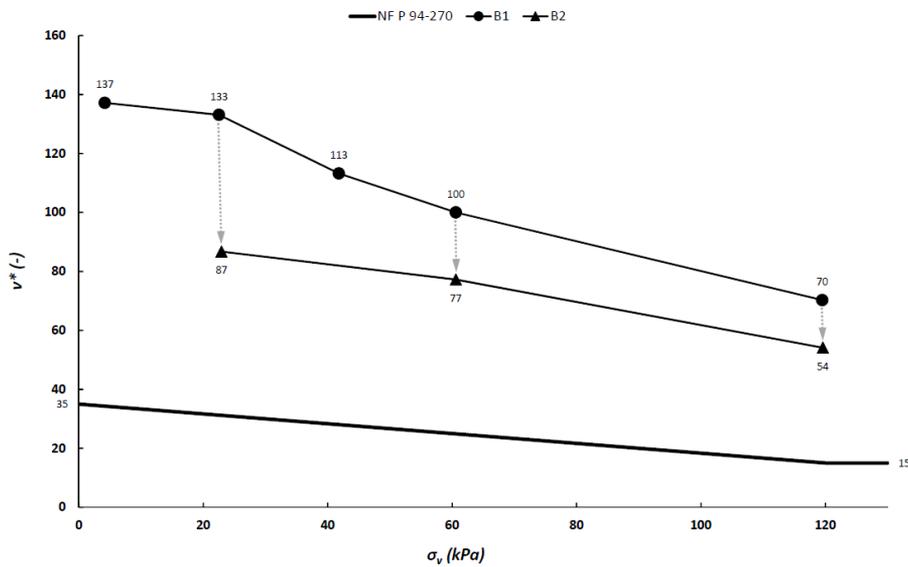


Figure 6. Coefficient d'ancrage apparent en fonction de la contrainte verticale (B1/B2).

Après avoir examiné l'influence de la largeur b à la réponse de l'inclusion à l'extraction, on procède à la comparaison des treillis B1 et B3 dont la seule différence réside en l'espacement des barres transversales (s_x) qui passe de 300mm pour le B1 à 150mm pour le B2. L'effet de cette densification est illustré sur les Figures 7,8 et 9. La Figure 7 représente l'effort d'extraction (T) par rapport à la réponse de déplacement net en tête de l'armature sous trois niveaux de contrainte verticale nominale (5,20 et 40kPa). La Figure 8 présente le coefficient d'ancrage apparent en fonction de la contrainte verticale et la Figure 9 le coefficient d'interaction apparent en fonction du rapport adimensionnel s_x/d_x . Les observations suivantes méritent d'être notées. Le treillis B3 devrait naturellement produire une résistance plus élevée en termes absolus pendant l'extraction, ce qui n'est pas toujours le cas. L'exemple de 5kPa est caractéristique car la résistance a diminué d'environ 3% (Figure 7). On constate également qu'en termes de valeurs de v^* , la tendance à l'augmentation sous faibles contraintes (bien vérifiée pour le treillis B1) est inversée pour les contraintes inférieures à 40kPa (où l'optimum est atteint) en ce qui concerne le treillis B3. Ceci met en évidence l'importance de l'interférence qui se produit entre les barres transversales et qui conduit à un procédé non économique car quelle que soit la densification effectuée, la résistance mobilisée ne pourra pas être égale à la résistance mobilisable.

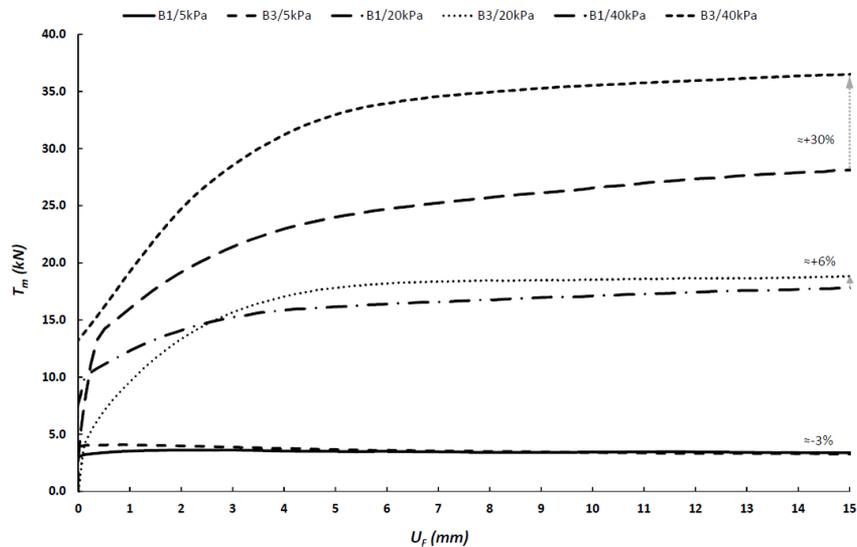


Figure 7. Courbe effort d'extraction-déplacement relatif net en tête de l'inclusion (B1/B3).

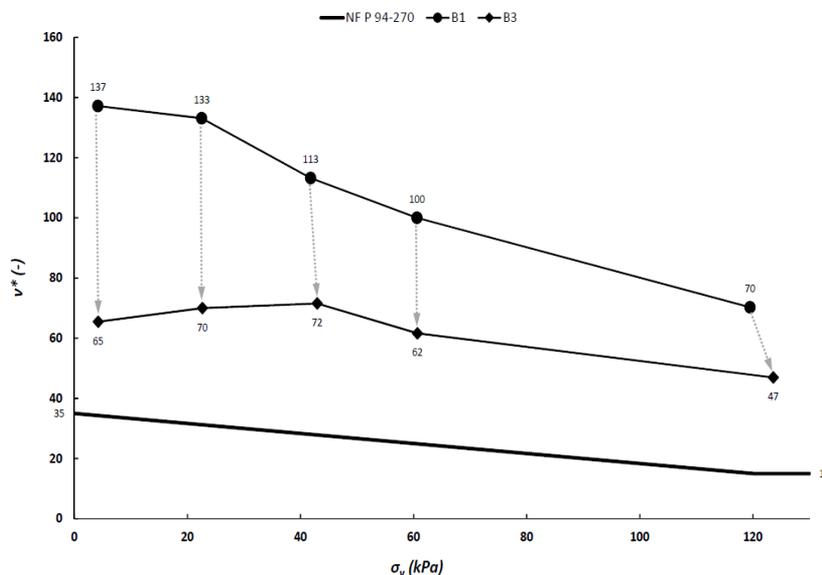


Figure 8. Coefficient d'ancrage apparent en fonction de la contrainte verticale (B1/B3).

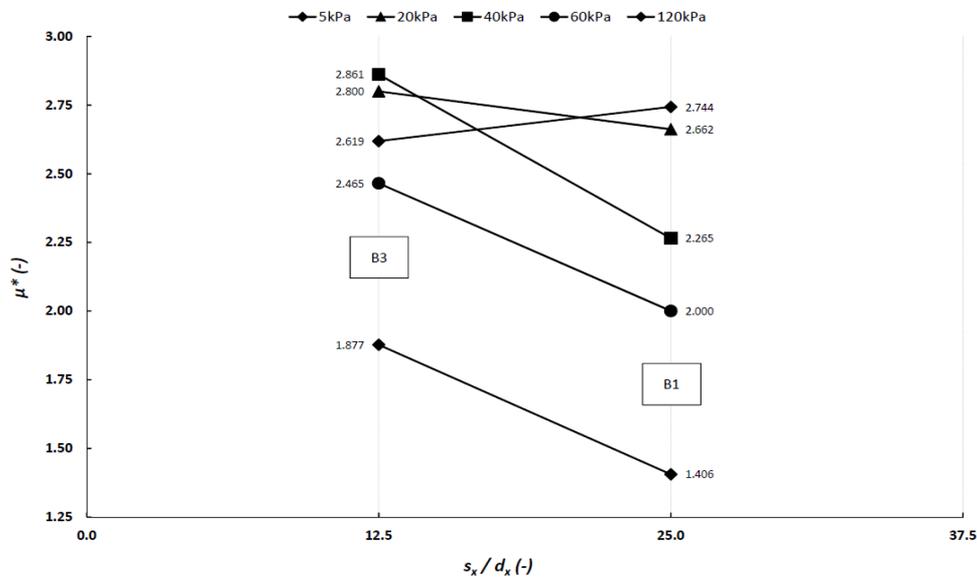


Figure 9. Coefficient d'interaction apparent en fonction du rapport adimensionnel s_x/d_x (B1/B3).

Dans leur grande majorité, les codes nationaux de dimensionnement relatifs considèrent que la résistance totale est égale à la somme de résistances de chaque barre transversale individuelle. Or la réponse d'une seule barre transversale individuelle n'est pas toujours extrapolable au système de l'ensemble des barres résistantes d'un treillis à cause de l'effet de groupe. Ainsi, la résistance mobilisée coïncide avec la résistance mobilisable uniquement quand le rapport de l'espacement des barres sur leur diamètre est suffisamment grand et optimisé pour qu'il n'y ait aucune interférence.

4. Conclusions

Sont passées en revue dans cet article les résultats d'une série d'essais d'extraction des treillis métalliques soudés VSoL[®]. Bien que limités à un sol dilatant spécifique et trois configurations de treillis précises, ces essais ont démontré l'influence des nœuds d'un treillis ainsi que de l'effet de groupe sur l'espacement des barres transversales à la résistance totale. Les réponses de trois treillis à l'extraction (indépendamment du niveau de la contrainte verticale appliquée) sont bien supérieures à l'intervalle fixé par la NF P 94-270, ce qui par ailleurs montre l'intérêt de cet essai lors du dimensionnement d'un ouvrage en sol renforcé.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du professeur Georges GAZETAS à l'Université Nationale Techniques d'Athènes pour les autorisations nécessaires à la publication de cet article ainsi que le département R&D de Bouygues Construction pour son soutien financier.

5. Références bibliographiques

- Bacot J. (1981). Contribution à l'étude du frottement entre une inclusion souple et un matériau pulvérulent : cas de la Terre Armée. Thèse de Doctorat d'Etat, Lyon.
- NF P 94-222 (1995), Association Française de Normalisation. Renforcement des sols – Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples – Essai statique d'extraction en place d'inclusion. Paris.
- NF P 94-270 (2009), Association Française de Normalisation. Calcul Géotechnique. Ouvrages de Soutènement, Remblais Renforcés et Massifs en Sols Cloués. Paris.