
La terre armée une solution d'amélioration des fondations pour remblais sur terrain meuble

Mustapha Tekkouk*, Riad Benzaid

L.G.G., Université de Jijel. BP.98 Ouled Aissa, Jijel – 18.000, Algérie.

* tekkouk@yahoo.com

RÉSUMÉ. Parmi les domaines où la terre armée connaît actuellement une remarquable expansion, nous avons les infrastructures et les remblais sur terrains meubles. Cependant, le sol de fondation d'une construction ou d'un ouvrage en terre reste un siège de déformation sous l'effet de l'application de la charge provenant de la superstructure. Cette déformation qui est une source de dégradation de la structure est liée en grande partie au problème de tassement du sol support, un problème dont les causes sont diverses et qu'on va essayer d'étudier à travers une étude au laboratoire. Cette étude consiste à analyser par voie expérimentale les rapports qui existent - sous chargement vertical statique - entre les armatures de renforcement introduites dans un sol de fondation et le sol lui-même, et d'établir les conditions de la réduction du tassement afin d'améliorer la stabilité de la fondation et augmenter par conséquent la durabilité de l'ouvrage.

ABSTRACT. Among the areas where the armed earth is undergoing a remarkable expansion, we have the infrastructure and embankments on soft ground. However, the soil foundation of a building or earthwork remains a seat of deformation under the effect of the application of the load from the superstructure. This distortion is a source of degradation of the structure is largely related to the problem of compaction of sub-grade, a problem whose causes are many and we will try to study through a laboratory study. This study is to analyze experimentally the relationship - as vertical static load - between the reinforcing means inserted in a foundation soil and the soil itself, and establish conditions for decreasing its settlement to improve the stability of the foundation and therefore increase the sustainability of the work.

MOTS-CLÉS : Renforcement, terre armée, tassement, fondation, stabilité.

KEYWORDS: Reinforcement, armed earth, settlement, foundation, stability.

1. Introduction

Renforcer un sol par une inclusion résistante à la traction afin de lui conférer de meilleures caractéristiques, a toujours été le rêve de bien des ingénieurs. L'idée est séduisante et déjà fort ancienne (briques fabriquées par nos ancêtres à partir de mélange d'argile et de paille).

La première application moderne de ce procédé est la terre armée. Les premières recherches décrites par Vidal (1966) et Schlosser et Vidal (1969) résultent de l'association d'un sol pulvérulent avec des lits d'armature. Ainsi associés, le sol et les armatures développent donc par les forces de frottement une certaine traction. Yamanouchi (1970) a utilisé le sol armé dans la technique routière. Harrison et Gérard (1972) étudiaient les contraintes et déplacements dans le sol armé, considéré comme un système stratifié et anisotrope. Schlosser et Long (1972) ont effectué des essais à l'appareil triaxial sur des échantillons de sable armé par des disques horizontaux de papier d'aluminium. Useawa et Nasu (1973) étudiaient l'utilisation de la terre armée dans la construction des remblais. Schlosser et al. (1973) ont présenté deux cas concrets de la construction d'ouvrages de soutènement reposant sur des sols de faible portance. Plusieurs études ont été faites du point de vue de la capacité portante du sol armé. Milović (1970) a présenté une étude sur modèle réduit de la capacité portante des semelles de largeur $B = 25$ cm, reposant sur le sable d'Ottawa, renforcé par des armatures en acier. Binquet et Lee (1975) ont présenté des résultats de la capacité portante des semelles de largeur $B = 7,5$ cm. Le sol de fondation a été renforcé par des bandes d'aluminium. Milović (1979) a réalisé des essais de chargement d'un sol armé. Kuibboer et al. (1993) ont présenté les résultats d'une instrumentation d'un ouvrage réel suite à une étude d'une culée de pont en terre armée. L'important développement de ces vingt dernières années et le concept du sol renforcé introduit par Vidal contribuent à la naissance de nouveaux espaces d'amélioration et de renforcement des sols (Benzaid, 2002).

Parmi la multitude des techniques de renforcement de ces espaces, nous avons celles qui sont :

- basées sur le phénomène de frottement entre l'élément de renforcement et le sol,
- d'autres, basées sur la mobilisation de la pression passive des terres par le moyen des ancrages et des grilles (Long *et al.*, 1984).

2. Principe de la terre armée

Pour rappel, nous donnons en figure 1, le concept de base du matériau de la terre armée (Schlosser et Bastick, 1991). Ce matériau résulte de l'association de deux composants de modules d'élasticité différents. Une contrainte ou pression appliquée à la masse provoque une déformation du sol. L'effort de tension ainsi subi sera alors transmis du sol aux armatures de renforcement.

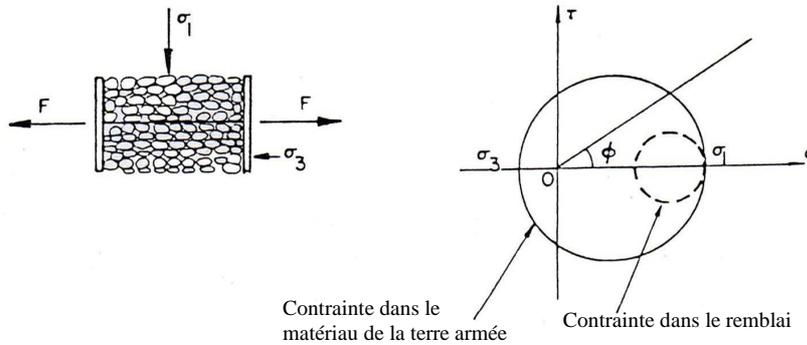


Figure 1. Concept de base de la terre armée

Le comportement de la masse ainsi renforcée sera identique à celui d'un matériau anisotrope cohésif, le concept de la terre armée basé sur le frottement d'interaction sol-renforcement y est bien représenté. Les déplacements sont mesurés dans la direction des armatures. Comme illustré par la figure 2, le mécanisme d'interaction est le résultat des contraintes tangentielles exercées par le remblai à l'interface du renforcement (Boulon *et al.*, 1986 ; Costet J., et Sanglerat 1983).

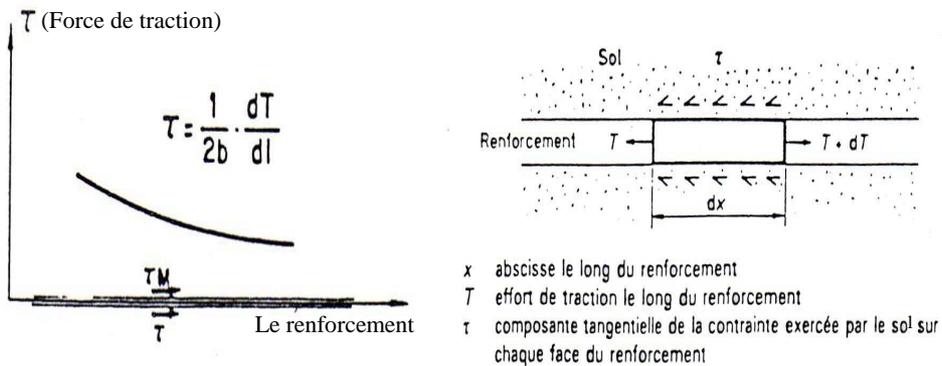


Figure 2. Variation de la force de traction et contrainte de cisaillement dans le renforcement (Schlosser F., et Unterreiner 1994)

L'effort de traction le long du renforcement varie de façon continue. Proportionnelle à la contrainte tangentielle ci-dessus, cette variation agit selon la formule (Schlosser et Bastick, 1991 ; Schlosser F., et Unterreiner 1994) :

$$\tau = \frac{1}{2b} \frac{dT}{dl} \tag{1}$$

Avec, τ : Contrainte tangentielle à l'interface. (Sol- armature)
 T : Effort de traction dans l'armature.
 l : Abscisse le long de l'armature.
 b : Largeur de l'armature.

La mobilisation des contraintes tangentielles τ nécessite un déplacement relatif du renforcement par rapport au sol. La déformabilité des inclusions participe donc dans la distribution des efforts le long des renforcements.

On se propose d'analyser par voie expérimentale les relations (sol-armature) dans un sol de fondation renforcé et, d'établir les conditions d'amélioration du tassement de ce dernier (Benzaid, 2002). Pour cela, on essaiera de connaître :

- L'influence du renforcement sur le tassement de la couche de sol et par conséquent sur la stabilité de la structure.
- L'influence de la disposition des armatures de renforcement à des niveaux différents de la couche de sol étudié à partir des résultats obtenus en matière de tassement.

4. Description du mode d'exécution des expériences

Les essais de simulation effectués au laboratoire ont été réalisés sur la dalle d'essais que nous avons schématiquement représentée en figure 3.

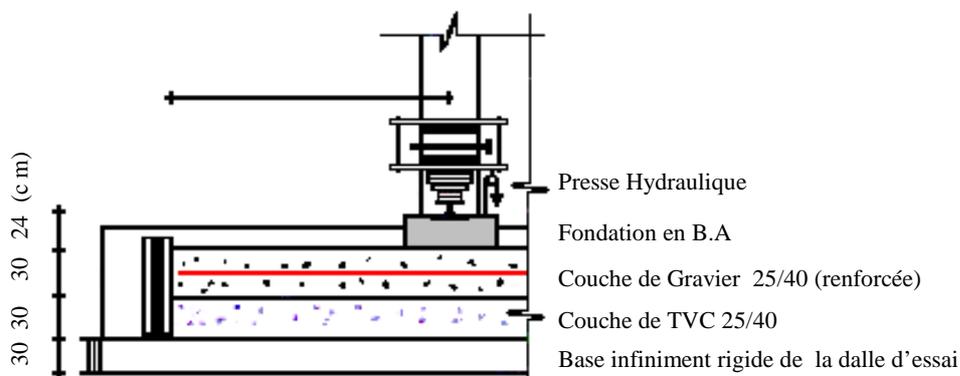


Figure 3. Banc d'essai en élévation

Le banc d'essai se composait d'une base infinement rigide sur laquelle était placé la couche de sol étudiée, qui est un système bicouche (Gravier-TVC) d'épaisseur identique de 30 cm pour chaque couche et de dimensions en plan de (360 x 260) cm², chargée d'une fondation rectangulaire en béton armé de dimensions : B = 29 cm, L = 68 cm et h = 24 cm.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

L'armature de renforcement de la couche de gravier était constituée de treillis soudés en fil de diamètre 4 mm à mailles carrée de $(15 \times 15) \text{ cm}^2$, disposé horizontalement. Le type d'armature a été choisi sur la base des remarques suivantes : il devrait être suffisamment résistant à la traction, peu extensible (à cause de l'assemblage des fils au nœud) et durable (acier inoxydable ou de préférence galvanisé). Notons que le treillis d'armature ne divisait pas le sol étudié en deux couches séparées, il augmentait (localement) seulement l'effet de l'angle de frottement interne de ce dernier, tout en transmettant les forces de tractions latérales. La couche de gravier étudié de granulométrie 25/40 mm, été placée sur la couche de TVC et est chargée d'une fondation en béton armé, soumise à l'aide d'une presse hydraulique à une sollicitation maximale d'une forces verticale statique de 10 tonnes. Le pas de chargement pour les essais est de 1 tonne jusqu'à la valeur maximale. Pour les mesures des tassements, un comparateur de déplacement été placé au dessus de la fondation chargée (voir figure 1).

Pour nos deux dispositions (gravier seul et gravier renforcé), deux séries d'essais ont été réalisés. Notons qu'entre deux utilisations, le gravier utilisé est retourné et remis à son état initial ou état d'avant expérience.

5. Programme des essais

Tel que réalisés, les essais sont repris dans le tableau 1.

Tableau 1. *Programme des essais réalisés.*

N° de l'essai	Type d'essai	Armature	Type d'armature	Prof.arm./surface (cm)
1	Référence	Néant	Néant	Néant
2	Renforcé	Oui	Treillis soudé	15
3	Renforcé	Oui	Treillis soudé	7,5

6. Étude et analyse des résultats expérimentaux :

6.1. *Tassements de la fondation chargée sur une couche de gravier normal et renforcé :*

Le dispositif expérimental gravier seul, gravier consolidé, la fondation en béton subissant les chargements de 1 à 10 tonnes donnent (pour les deux essais considérés) les valeurs d'affaissement représentées sur les graphes 1 et 2 de la figure 4.

La terre armée et les fondations sur terrain meuble

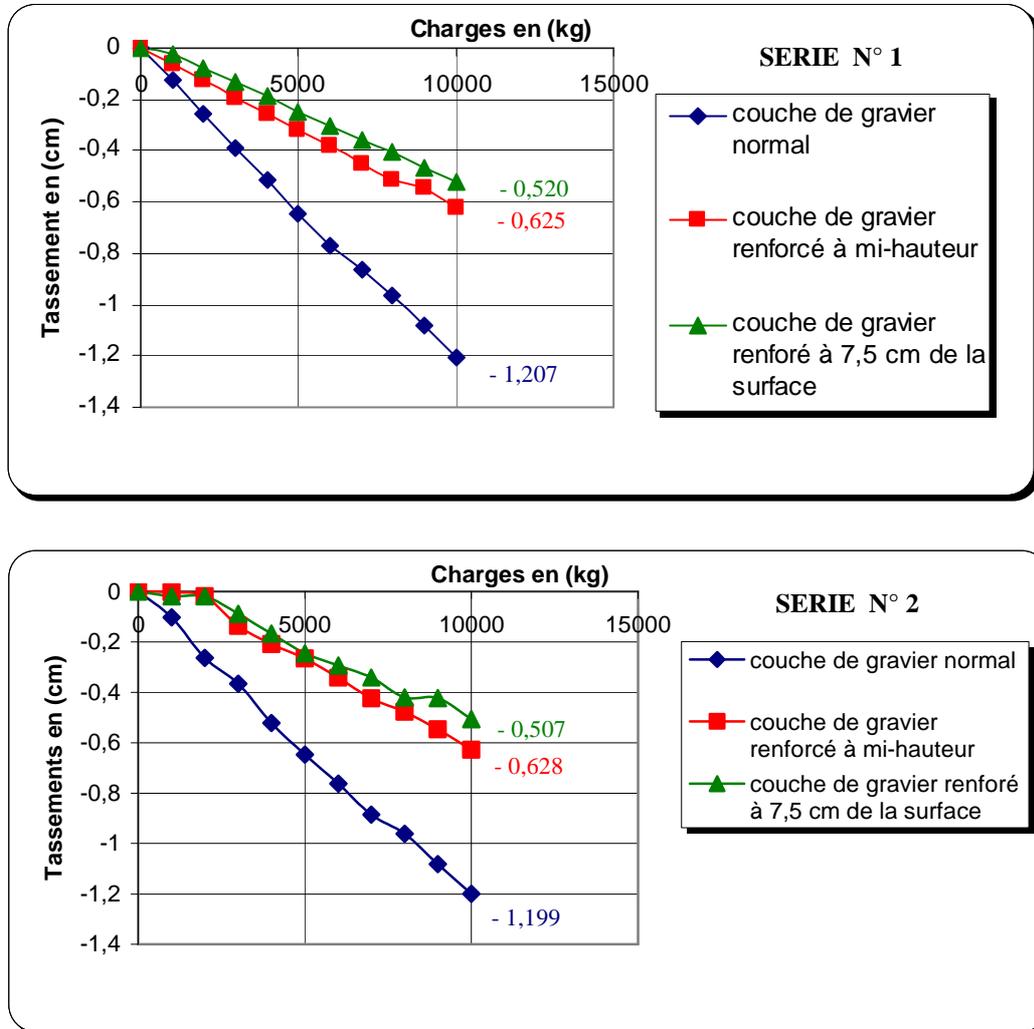


Figure 4. Tassements de la fondation chargée sur une couche de gravier normal et renforcé.

Les différences entre les tassements maximum de la fondation sur gravier normal et gravier renforcé sont considérables. En effet,

- Les valeurs du tassement sur gravier renforcé à mi-hauteur sont réduites de 48% par rapport aux valeurs enregistrées sur du gravier normal (non renforcé).
- A 7,5 cm de profondeur, l'armature de renforcement du sol réduit nettement les tassements. La réduction du tassement maximum moyen est de 57%. L'amélioration dans ce cas est assez marquée.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Sous les charges appliquées, les agrégats non renforcés se déplacent latéralement. On assiste à une formation d'ornières suivies de rupture(s). Le système de renforcement confine quant à lui (grâce aux mailles de l'armature) les agrégats et aussi le remblai. Les couches granulaires résistent aux mouvements latéraux et enregistrent par conséquent un meilleur rendement en matière de stabilité vis-à-vis le tassement.

Notons aussi que le système utilisé réduit la pression verticale sous la fondation et répartit sur une plus grande surface la charge appliquée. L'efficacité du système suscitée est par conséquent assurée.

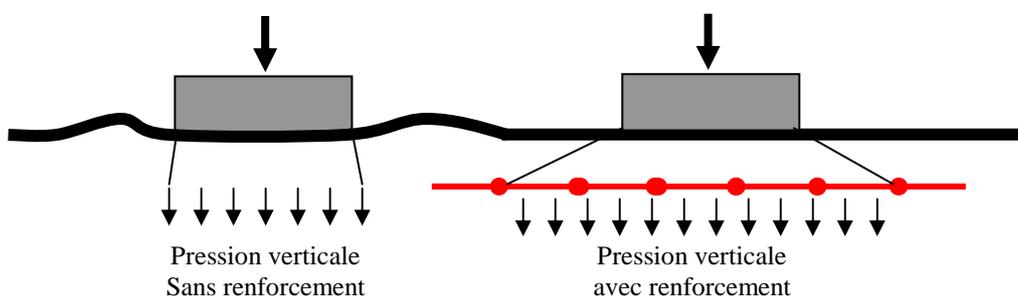


Figure 5. Répartition de la pression sur le sol support avec et sans renforcement

Le résultat obtenu confirme parfaitement l'aspect théorique du comportement de la terre armée. Ce résultat est encore plus confirmé si le matériau utilisé (terre armée) est de composition granulaire car dans ce cas, le treillis soudé à mailles carrées contribuera largement à accroître l'adhérence des grains confinés (piégés) à l'intérieur des mailles. Le frottement sol-armature sera ainsi mobilisé. Sous ces conditions (frottement mobilisé est adhérence améliorée), la masse de gravier aura un glissement latéral limité et ses déformations verticales atténuées. Le glissement latéral des grains ainsi empêché, l'armature aidera à transmettre les efforts de traction tout en assurant la cohésion locale de la couche de gravier chargée.

Notons au passage que l'intérêt de l'utilisation des armatures d'un tel type réside dans le fait que la couche renforcée garde son unicité, elle n'est nullement stratifiée ou divisée en deux une fois l'armature introduite en son sein. Cette même armature participe à augmenter l'effet de l'angle de frottement interne du gravier par la transmission des efforts de traction et la diminution des déformations latérales dues aux charges verticales appliquées.

6.2. Influence de la disposition des armatures de renforcement au niveau du gravier :

Les graphes 1 et 2 de la figure 4 représentent l'évolution de l'affaissement de la fondation sur la couche de gravier renforcé à deux niveaux différents. La mise en place des armatures de renforcement aux deux niveaux de la couche traitée réduisent

La terre armée et les fondations sur terrain meuble

nettement le tassement du sol considéré. En effet, placée à 7,5 cm sous la surface des graviers, l'armature a contribué à réduire le tassement enregistré lorsque celle-ci était située à mi hauteur de la couche de gravier. Ainsi donc, le tassement moyen enregistré à mi hauteur est réduit de 17% quant l'armature est placée plus haut, soit à 7,5 cm sous la surface de la couche de gravier. Sachant que le coefficient de frottement apparent f^* varie en fonction de la profondeur, plus on s'approche de la surface et plus le glissement des grains devient de plus en plus important.

Notons qu'en plus des améliorations constatées lors de l'introduction de l'armature dans le sol, la contrainte moyenne sera à son tour augmentée par l'effet du poids de la quantité de gravier surmontant le dispositif de renforcement (grille de treillis). Le sol sera alors confiné, le coefficient de frottement apparent f^* sera atténué et les forces de frottement sol-armature, réduites.

Tous ces éléments expliquent parfaitement les conditions de l'amélioration du renforcement du sol étudié. Par le biais de ces résultats, nous confirmons ici que le gravier renforcé (armé) a gardé le même principe de comportement que celui des massifs en terre armée.

7. Conclusion

Nous avons par le présent travail mené une étude expérimentale sur modèle réduit où il a été question d'introduire des armatures de renforcement dans un sol de fondation et d'étudier son comportement sous l'effet d'un chargement vertical statique croissant. Le dit chargement a été assuré par une semelle rectangulaire posée à la surface du sol en question. L'étude ainsi menée nous permet de conclure ce qui suit :

- Le procédé de la terre armée constitue un système d'amélioration de fondations pour remblais sur terrains meubles.
- L'introduction des armatures de renforcement réduit de 50% le tassement du même sol non armé.
- Ainsi introduit, le système de renforcement permet de réduire le tassement différentiel. Un tel système améliorera la stabilité et donc la durabilité des structures construites sur des sols compressibles.
- Les efforts de tractions dans le sol armé repris par la mobilisation des frottements « sol-armature », ont pour effet de limiter les déformations horizontales et verticales de la couche considérée.
- L'utilisation des treillis soudés a permis de réaliser un renforcement bidimensionnel ce qui favorise d'une part la répartition des charges appliquées sur une plus large surface et développe d'autre part, un frottement sol-armature dans les deux sens du renforcement.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

8. Perspectives

Pour le cas de sols plus fermes, un système de renforcement bidimensionnel consoliderait le sol support et permettrait aux matériaux de remblayage de s'imbriquer et de se trouver coincés à l'intérieur des mailles. Le frottement sol-armature peut être amélioré par l'augmentation de la surface de contact armature - sol renforcé. Un résultat pratique et efficace peut être obtenu par l'utilisation de lanières métalliques plus larges ou par l'introduction des géogrilles. Une telle solution peut facilement être appliquée aux tronçons instables de remblais routiers ou remblais de chemins de fer. Les essais ici présentés peuvent servir de base aux études sur des ouvrages réels à caractère expérimental.

9. Références bibliographiques

- Benzaid R., Stabilité des Traverses Ferroviaires sur un Ballast Armé sous Chargement Statique sur un Support Rigide, Étude Expérimentale - Mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, 2002.
- Boulon M., Plytas C., Foray P., « *Comportement d'Interface et Prévission du Frottement Latéral le Long des Pieux et Tirants d'Ancrage* », Revue française de géotechnique, N°35, 1986.
- Costet J., Sanglerat G., *Cours Pratique de Mécanique des Sols 2 : Calcul des Ouvrages*, troisième édition, Paris, Dunod, 1983.
- Kuibboer C.P.M., Bastick M., Segrestin P., « Monitoring of Reinforced Earth Bridge Abutment at Amersfoot, the Netherlands », In: *Renforcement des Sols - Expérimentation en vraie grandeur des Années 80'*, Symposium international sur le renforcement des sols, 18-19 novembre 1993, Paris, presse de l'ENPC, p. 277-297.
- Long N.T., Delmas P., Pouget P., « Soutènement Avec Armatures », *bull. liaison labo ponts et chaussées 129*, Janv., févr.1984 - réf. 2860.
- Milović D., « Field load tests on reinforced soil », *International Conference on soil reinforcement: reinforced earth and other techniques*, vol. 1, 20- 22 Mars 1979, Paris, p. 101-106.
- Schlosser F., Unterreiner P., « *Renforcement des Sols par Inclusions* », Techniques de l'ingénieur, traité construction, C2 (I) / C245, 5-1994.
- Schlosser F., Bastick M., *Foundation Engineering Hand Book*, Second edition, edited by: Hsai-yang fang, Chapman and hall, New York 1999.