

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Solution innovante pour les murs Terre Armée – Connexion par frottement

Innovative solution for reinforced earth walls – Friction connexion

N. Freitag, J.-C. Morizot & G. Berard
Soiltech, Terre Armée, Nozay, France

K. Silveira Fernandes
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, France

RÉSUMÉ

La connexion des renforcements à des éléments de parements pour des ouvrages en sol renforcé de type Terre Armée est un aspect important du coût et de la durabilité de l'ouvrage. Suite à ses recherches, la société Terre Armée a déposé un brevet sur un procédé innovant de connexion. Les éléments de renforcement du remblai (armatures métalliques ou synthétiques, géogrilles, nappes de géotextiles) ne sont pas directement connectés aux éléments de parement. Cependant ils assurent la stabilité générale du remblai. Des éléments de renforcement courts sont connectés au parement lors de la préfabrication. L'ouvrage est monté de telle façon que les éléments courts de renforcement et les renforcements principaux non connectés présentent une zone commune dans le remblai. On utilise le frottement interne du remblai dans cette zone commune, ainsi que l'interaction sol-renforcement, pour assurer la stabilité de l'ensemble. Ce système représente une étape supplémentaire d'utilisation de l'interaction sol-structure par rapport aux solutions désormais traditionnelles de murs en sol renforcé. Différents niveaux de justifications de ce système innovant sont développés dans cette communication : théorie, maquette à échelle réduite, simulation numérique.

ABSTRACT

Connection between reinforcements and facing panels of mechanically stabilized earth (MSE) structures like Reinforced Earth walls is a very important aspect in terms of cost and durability of the structure. As a follow-up to its studies, the Reinforced Earth company has filed a patent regarding an innovative connecting system. The reinforcements of the backfill (metallic or synthetic strips, geogrids, geotextiles) are not directly connected to the facing elements. However they keep their role of maintaining the general stability of the structure. Short secondary elements are connected to the facing panels during precasting. The structure is built so that the main reinforcements and the secondary short elements are partially overlapping over a zone of select backfill. Internal friction of this part of backfill as well as soil-reinforcement interaction, are used to ensure local stability close to the facing. This system represents a new step in the use of soil-structure interaction compared to the nowadays traditional solutions for MSE walls. Different levels of justification are shown in this paper : theory, scaled model, numerical simulation.

1 INTRODUCTION

Depuis l'invention du concept de la Terre Armée aux début des années 1960, cette technique a rencontré un succès croissant dans le monde entier. L'efficacité économique, la fiabilité et la souplesse des structures en sol renforcé ont fait de cette technique un premier choix pour les entreprises et les maîtres d'ouvrage, non seulement pour les murs de moyenne et grande hauteur, mais aussi pour de nombreuses autres applications telles que :

- talus raidis ;
- culées de ponts ;
- structures industrielles complexes ;
- murs de quai et applications marines.

Initialement basée sur l'utilisation d'armatures métalliques lisses connectées à un parement en feuilles métalliques cintrées, la technologie a été déclinée dans une large variété de renforcements et de parements.

La présente communication montre qu'un nouveau pas dans l'optimisation de ce type de structures peut être accompli en comprenant le rôle respectif des renforcements et du parement. En séparant physiquement ces deux éléments, une séparation des rôles est obtenue (stabilité globale et locale), ce qui confère à l'ingénieur un surcroît de liberté pour la conception et l'optimisation des ouvrages.

2 TECHNOLOGIE ACTUELLE

La technologie actuelle repose très généralement sur l'utilisation conjointe de renforcements flexibles placés horizontalement entre des couches successives de remblai de qualité contrôlée et des éléments de parement préfabriqués. Les éléments de parements et les renforcements sont connectés ensemble.

Divers types de renforcements sont employés :

- acier :
 - armatures lisses et nervurées ;
 - échelles de treillis soudé ;
 - nappes de treillis soudé ;
- matériaux synthétiques :
 - bandes géosynthétiques ;
 - géogrilles ;
 - géotextiles ;
 - geocells.

Les types de parement sont nombreux, les plus communs étant :

- écaillés en béton (parements verticaux ou sub-verticaux) ;
- panneaux de treillis soudé (verticaux ou inclinés, avec aspect minéral ou végétalisation) ;
- gabions légers (remplis de pierres et graviers) ;
- blocs de béton sec de type maçonnerie.

2.1 Rôle des renforcements

Les renforcements sont les véritables éléments stabilisateurs qui assurent l'équilibre interne et externe de la masse de sol renforcé. Selon l'extensibilité de ces renforcements, ce bloc peut se comporter comme un monolithe (renforcements inextensibles – typiquement métalliques), ou comme un lieu où les renforcements ancrent la partie active de cette masse de sol (qui tend à glisser) à la partie stable à l'arrière de cette zone active, après extension des renforcements (renforcements extensibles – géosynthétiques) (Fig. 1).

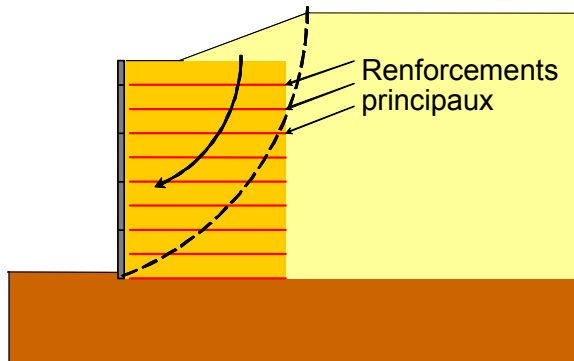


Figure 1. Rôle des renforcements principaux

Les renforcements en forme de bande, contrairement aux nappes, bénéficient d'un phénomène favorable qui se développe dans les sols granulaires compactés, la dilatance. Quand une couche de bandes de renforcement tend à glisser à l'intérieur du remblai, elles appliquent une contrainte de cisaillement dans leur voisinage. Ce cisaillement est converti en une augmentation de volume, du fait de la dilatance. Comme le sol bénéficie localement d'un effet de confinement vertical, cette augmentation de volume est empêchée, ce qui conduit à une augmentation de la contrainte normale qui s'applique autour des armatures (Fig. 2). Ceci est un phénomène clé qui est pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages en Terre Armée. Comme l'effet de la dilatance diminue quand la contrainte moyenne augmente, cet effet est pris en compte dans les 6 m supérieurs des murs.

L'angle de frottement naturel de l'interface sol-armature est égal à l'angle de frottement interne du sol pour les armatures dites à haute adhérence. En raison de l'augmentation de la contrainte locale, un coefficient de frottement apparent est défini. Celui-ci est pris égal à 1,5 à la surface et décroît jusqu'à $\tan(\varphi')$ à 6 m de profondeur (120 kPa), puis reste constant sous ce niveau (Fig. 3). Ceci peut être étendu aux armatures synthétiques constituées de fibres de polyester, avec pour certains types de remblais un coefficient de frottement réduit en raison du phénomène de rupture progressive (Lo, 1998).

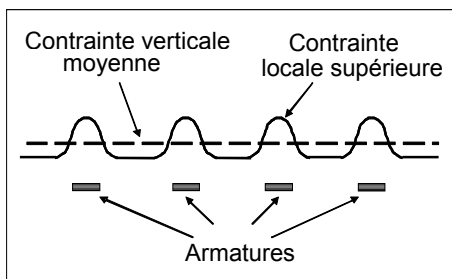


Figure 2. Effet de la dilatance du remblai sur la contrainte locale appliquée aux armatures

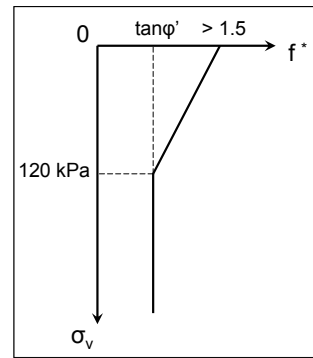


Figure 3. Coefficient de frottement apparent en fonction de la contrainte normale

2.2 Rôle de la connexion entre les renforcements et le parement

Le rôle du parement est toujours présenté comme mineur pour la stabilité de la structure. Cependant sa présence est essentielle, en particulier pour les murs verticaux et sub-verticaux.

Bien que les renforcements assurent la stabilité globale de l'ouvrage, elles n'assurent pas une stabilité locale suffisante à proximité du parement. Sans connexion, des petites lentilles de sols tendent à glisser en raison du manque de cohésion et d'adhérence des renforcements dans cette zone (phénomène de pelage, Fig. 4).

Par conséquent la connexion entre les renforcements et le parement est un élément essentiel de la structure, qui doit résister à des efforts conséquents tout au long de la durée de service de l'ouvrage.

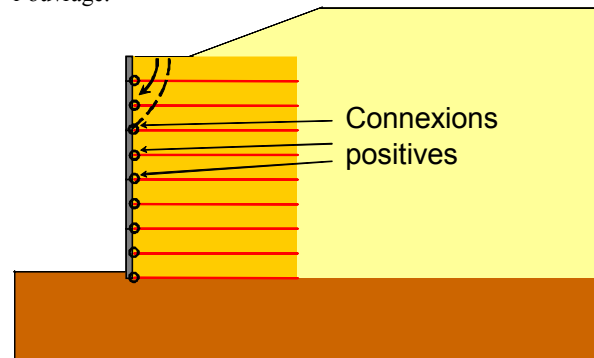


Figure 4. Rôle des connexions

Des mesures effectuées sur des ouvrages en sol renforcé de vraie grandeur ont montré que l'effort de traction appliqué au parement varie entre 100% et moins de 85% de l'effort de traction maximal dans les renforcements, selon le niveau de renforcements considéré dans le mur (par exemple Bastick et al., 1993).

2.3 Types de connexions

Il existe deux types de connexions : connexions positives, et connexions par frottement.

2.3.1 Connexions positives

La grande majorité des systèmes actuellement disponibles sur le marché pour des murs verticaux et sub-verticaux sont basés sur une connexion physique, « positive », entre les éléments de parement et les renforcements. La plupart des combinaisons entre types de renforcements et de parement sont possibles, même si elles ne sont pas toutes aisées à concevoir du point de vue technique.

Les connexions positives font la plupart du temps appel à un élément intermédiaire qui est engagé dans le renforcement et le parement ou une extension du parement, de façon à les lier.

Une solution efficace a été développée pour les armatures métalliques, avec l'utilisation d'amorces ancrées dans le béton et de boulons.

Pour les armatures en matériau synthétique, destinées à être utilisées dans des environnements agressifs envers l'acier (hautes concentrations en sulfates, ouvrages marins), il est plus difficile de concevoir des systèmes de connexion économiques et capables de supporter des efforts tout au long de la durée de service de l'ouvrage. Des matériaux synthétiques à hautes performances sont maintenant disponibles sur le marché, mais les éléments de justification de leur durabilité ne sont pas toujours disponibles, et leur coût peut être élevé (Freitag et al., 2003).

2.3.2 Connexions par frottement

Des connexions par frottement, ou par pincement, sont utilisées dans certains systèmes de murs en sol renforcé dont le parement est constitué de blocs. Les nappes géosynthétiques sont dans ce cas pincées entre des niveaux de blocs. Ce type de connexion souffre de nombreux problèmes, parmi lesquels un manque de flexibilité et une résistance au glissement de la nappe entre les blocs qui est parfois mise en défaut, en particulier lors de l'existence de tassements différentiels au long du mur.

En 1985, Berg et al ont utilisé une solution innovante pour connecter un parement en béton préfabriqué à des géogrilles extensibles en polyéthylène pour la construction d'un mur de soutènement à Lithonia en Géorgie (Etats-Unis) (Berg et al., 1986). Une section de ce mur a été construite comme suit. Les écailles préfabriquées ont été munies de segments de géogrilles de 1,20 m de longueur, encastrées dans le béton lors de la préfabrication. Les grilles réalisant le renforcement réel de la masse de remblai n'ont pas été connectées directement à ces extensions à l'arrière des écailles, mais séparées par une couche de remblai de 75 mm d'épaisseur. Les efforts sont transmis du parement aux renforcements principaux au travers de la couche de remblai. L'avantage d'un tel système tel que présenté par les auteurs a été de ne pas recourir à la goupille qui connecte ordinairement les segments de grille encastrés aux renforcements principaux. Il y a un avantage économique autant que technique à se débarrasser d'éléments structurels dont la durabilité pourrait être remise en cause. Cependant, les auteurs rapportent que les déformations finales du mur (c'est-à-dire le déplacement des écailles de parement) ont été relativement imprévisibles et très sensibles à la méthode de construction. Ceci est probablement la raison pour laquelle l'utilisation de ce système n'a pas été poursuivie.

3 CONNEXION PAR FROTTEMENT : CONCEPT

Le nouveau concept repose sur le fait que les renforcements principaux ne sont pas connectés positivement aux éléments de parement. Les renforcements principaux jouent toujours leur rôle de stabilisation du massif de sol.

En contrepartie, les écailles de parement sont munies d'éléments courts, flexibles ou rigides, qui permettent leur ancrage dans le massif de sol renforcé. L'équilibre local à proximité du parement est donc assuré.

L'application de ce système est optimale quand il est fait usage d'armatures métalliques ou synthétiques en tant que renforcements principaux. Un brevet décrivant un tel système a été déposé.

Les armatures métalliques sont disposées en réseau parallèle, alors que les bandes synthétiques sont généralement disposées suivant un motif en zigzag (ces bandes sont livrées sur le chantier sous forme de rouleaux qui sont déroulés sur place).

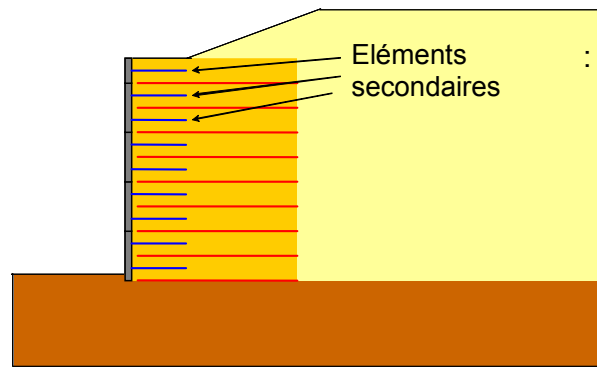


Figure 5 – Connexion par frottement

4 STABILITÉ – JUSTIFICATION

4.1 Modes de rupture classiques

Ces modes de rupture sont ceux qui sont déjà considérés dans la méthode usuelle de dimensionnement des murs en sol renforcé par armatures souples. Cette méthode est décrite dans plusieurs normes nationales, dont la norme française NF-P94-220 et seq. (1994), la norme britannique BS8006 :1995 et le standard américain AASHTO "Design of retaining walls and bridges".

Stabilité externe (identique aux murs de soutènement classiques) :

- glissement sur la base ;
- renversement ;
- capacité portante du sol de fondation ;

Stabilité interne à chaque niveau de renforcements :

- rupture (long terme) ;
- adhérence (au-delà de la « ligne des tractions maximales »).

4.2 Modes de rupture supplémentaires

La connexion positive a été remplacée par une « zone d'interaction » où les renforcements principaux et secondaires interagissent au travers du remblai (Fig. 6). La zone d'interaction s'étend typiquement sur 2 m à l'arrière du parement, quelle que soit la hauteur de l'ouvrage.

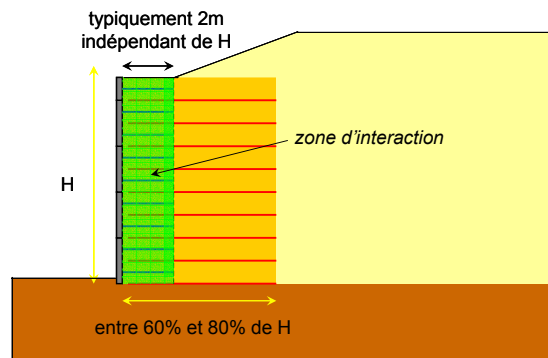


Figure 6. Zone d'interaction

En complément des modes de rupture classiques cités ci-dessus, d'autres modes doivent être pris en compte :

- renforcements principaux :
 - adhérence dans la zone d'interaction ;
- renforcements secondaires :
 - adhérence dans la zone d'interaction ;

- rupture.

Il est à noter que le phénomène de dilatance, qui accroît l'adhérence des armatures en bandes dans les remblais de qualité, est mis à profit dans la zone d'interaction. Ceci permet de justifier de la faible étendue de cette zone, et de son indépendance par rapport à la hauteur du mur.

4.3 Simulation numérique

Des simulations numériques de ce système ont été effectuées à l'aide du programme de calcul géotechnique aux différences finies FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continuum). Les résultats montrent clairement le transfert d'effort qui a lieu dans la zone d'interaction (Fig. 7).

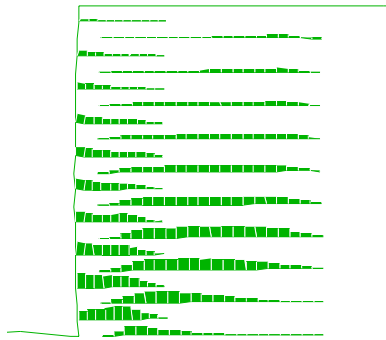


Figure 7. Effort de traction au long des renforcements

4.4 Modèle réduit

Un modèle réduit a été construit pour démontrer de façon empirique la stabilité du système. Le remblai a été constitué de sable sec et les renforcements ont été réalisés à l'aide de bandes étroites en polyester. La maquette de 60 cm de hauteur, à l'échelle 1:15, n'avait qu'un but démonstratif ; aucune mesure spécifique n'a été effectuée car l'échelle était trop petite pour prétendre à un réalisme physique (sensibilité à la cohésion pour une si faible hauteur). La construction par étapes a été respectée. Deux autres modèles ont été construits, l'un sans les éléments secondaires et l'autre sans les renforcements principaux. Ces deux modèles se sont effondrés ; le premier lors de la construction et le deuxième après l'application d'une surcharge très faible. Le modèle complet a été capable de supporter le poids d'une personne sans s'effondrer ni se déformer de façon excessive.

5 AVANTAGES

5.1 Flexibilité – Ductilité

Le manque de compactage ou l'hétérogénéité des sols de fondations conduisent parfois à des tassements différentiels entre les écailles de parement et les renforcements. Une partie de ce phénomène est compensée par l'utilisation de joints compressibles entre les écailles superposées. Cela n'est pas toujours suffisant quand le compactage du remblai n'est pas effectué avec soin. Dans ce cas, le présent système offre une flexibilité supplémentaire, du fait que ce tassement différentiel va être partiellement compensé par un glissement relatif des armatures secondaires par rapport aux principales, en évitant ainsi une augmentation excessive des efforts de traction dans les renforcements.

Le cas sismique est un autre exemple pour lequel ce système présente de grands avantages. Les murs en sol renforcé ont montré au cours des trois dernières décennies une capacité remarquable à résister aux sollicitations sismiques, en particulier quand ils font usage de parements flexibles ou constitués

d'éléments de parement discrets. L'élément clé qui permet d'expliquer cette bonne performance est la grande flexibilité de telles structures. Elles peuvent suivre les déformations imposées sans concentrer excessivement des efforts induits. Le nouveau concept présenté ici est de ce point de vue encore plus flexible, et promet donc un meilleur comportement en cas de séisme.

5.2 Optimisation

Tous les systèmes actuels de remblais en sol renforcé font usage d'une gamme restreinte de résistance pour leurs renforcements. C'est le cas en particulier des systèmes de renforcement par bandes, puisque la densité de renforcement est fonction du nombre de connexions sur les écailles, qui est un nombre entier sur une certaine longueur de mur (généralement égale à deux largeurs d'écaille). C'est aussi le cas des géogrilles et des géotextiles dont la résistance suit une certaine gamme.

Ainsi, quand on compare la quantité de renforcement strictement nécessaire du point de vue du dimensionnement et celle effectivement mise en place dans les structures, on constate communément un surplus de renforcements de l'ordre de 15 à 20%.

Dans le système décrit dans cette communication, l'indépendance des renforcements principaux vis-à-vis du parement permet d'optimiser leur densité en ajustant leur espacement à chaque niveau.

6 CONCLUSION

Le concept présenté ici est prometteur. Tout en étant enthousiasmant pour l'ingénieur, il est finalement une source de plus grande optimisation et d'un surcroît de flexibilité (mot-clé des structures en sol renforcé).

La compréhension du fonctionnement de telles structures peut être facilement obtenue par l'utilisation de modèles numériques de déformation comme les éléments finis ou les différences finies.

Cependant une justification complète ne sera obtenue qu'avec l'édification des premières vraies structures. Celles-ci permettront aussi de déterminer des méthodes de construction adéquates et de confirmer les hypothèses de dimensionnement grâce à leur instrumentation.

RÉFÉRENCES

- Bastick, M., Schlosser, F., Segrestin, P., Amar, S. et Canépa, Y. 1993. Experimental Reinforced Earth wall of Bourron-Marlotte : slender wall and abutment test. *Soil reinforcement : full scale experiments of the 80's*, Paris, France. 201-228.
- Berg, R.R., Bonaparte, R., Anderson, R.P. and Chouery, V.E. 1986. Design, construction and performance of two geogrid reinforced retaining walls. *Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria. 401-405.
- Freitag, N., Morizot, J.-C., Segrestin, P. and Silveira Fernandes, K. 2003. What connexion to facing for polyester strips in mechanically stabilized earth walls ? *Eurogeo 3, Third European conference on Geosynthetics*, 2003, Munich, Germany. 447-450.
- Lo, S.C.R. 1998. Pull-out resistance of polyester straps at low overburden stress. *Geosynthetics International*. 1998, vol. 5, no. 4. 361-382.