

SCHLOSSER F.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France

GUILLOUX A.

Société d'Etudes de la Terre Armée, France

Le frottement sol-armature dans les ouvrages en terre armée**Friction between soil and strips in reinforced earth structures**

The principle of Reinforced Earth is based on the development of friction between the fill material and the reinforcements. This friction is principally investigated in pull-out tests of strips in embankments or in reinforced earth walls. This paper presents data on the main factors that affect the friction and its mobilization : nature of the strip surface, nature and density of the fill material, overburden pressure. The effect of these results on the design of Reinforced Earth structures is analysed.

1 - IMPORTANCE ET COMPLEXITE DU PHENOMENE DE FROTEMENT**1.1. Fonctionnement de la terre armée.**

Le matériau terre armée, résultant de l'association de sol et d'armatures, présente un fonctionnement qui repose essentiellement sur le frottement entre ces deux constituants principaux.

Rappelons que l'on distingue deux zones dans un ouvrage en terre armée (fig. 1) :

- la zone active, où la terre, en frottant sur les armatures, tend à les entrainer vers le parement,
- la zone résistante, où les armatures sont retenues par la terre grâce au frottement.

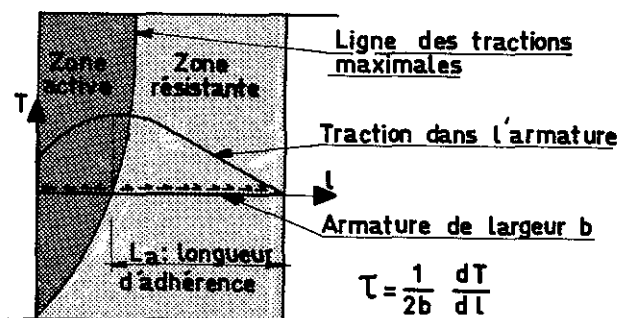


Fig. 1 : Zone active et zone résistante dans un mur en terre armée

La force de traction varie tout au long de l'armature, et elle est maximale à la frontière entre les zones active et résistante. Il en résulte que la contrainte de cisaillement moyenne sur les faces de l'armature est égale à :

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

En outre chaque élément de l'armature est soumis à un effort de cisaillement simple $\frac{\tau_2 - \tau_1}{2}$, où τ_2 , contrainte de cisaillement s'exerçant sur la face supérieure, est supérieure à τ_1 , contrainte s'exerçant sur la face inférieure.

1.2. Rupture par défaut d'adhérence.

Si le frottement terre-armature est insuffisant, il y a glissement des armatures par rapport au sol ; c'est la rupture par défaut d'adhérence. On l'évite par exemple en choisissant un matériau de remblai présentant un frottement suffisant avec les armatures, c'est-à-dire un sol comportant peu de fines (3). Dans le dimensionnement interne des ouvrages en terre armée on vérifie par ailleurs que la sécurité par rapport à la cassure des armatures et à la rupture par défaut d'adhérence est satisfaisante.

La vérification à l'adhérence consiste à s'assurer que l'inégalité suivante est satisfaite :

$$T_{\text{Max}} \leq 2b \int_{L-La}^L f^* \sigma_v dl$$

où T_{Max} est l'effort de traction maximal dans l'armature,
 b la largeur de l'armature,
 f^* un coefficient de frottement apparent reliant τ à σ_v ,
 σ_v la contrainte due au poids des terres au-dessus de l'armature,
 L la longueur de l'armature,
 L_a la longueur d'adhérence.

Pour calculer l'effort de cisaillement τ le long des armatures, on ne connaît pas la composante verticale de la contrainte réelle qui s'exerce et on ne peut donc pas utiliser le coefficient de frottement réel f entre la terre et les armatures. Nous avons ainsi été amenés à relier empiriquement τ à la contrainte due au poids des terres s'exerçant sur l'armature par un coefficient de frottement apparent f^* . L'expérience montre que ce coefficient f^* peut être très supérieur au coefficient de frottement réel f tel qu'il est mesuré dans un essai de cisaillement. Cette différence provient de la complexité du frottement terre-armature, qui, outre le frottement proprement dit, fait également intervenir d'autres phénomènes et en particulier la dilatance.

Le frottement à prendre à compte est donc basé sur les valeurs du frottement apparent observées dans les essais d'extraction d'armatures, qui sont bien représentatifs du frottement qui se développe entre la terre et les armatures. On présente les résultats les plus importants obtenus à ce jour et leur implication dans le dimensionnement interne des ouvrages en terre armée. Nous ne traiterons pas des critères de choix du matériau de remblai, qui sont développés dans une autre communication (3).

2. LE FROTTEMENT APPARENT ENTRE LES ARMATURES ET LE SOL

2.1. Principe de l'essai.

On réalise un essai de traction sur des armatures enterrées dans un remblai, dans un ouvrage en terre armée, ou dans un massif en modèle réduit. L'armature est extraite à l'aide d'un vérin (fig. 2), et on détermine la courbe traction-déplacement.

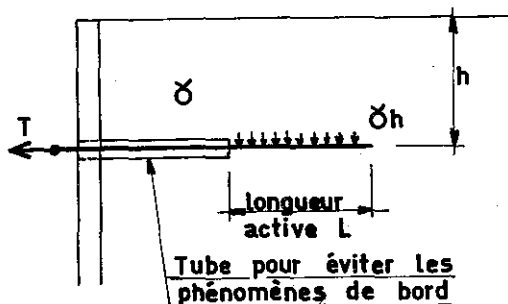


Fig. 2 : Essai d'extraction d'une armature

Il faut noter que, suivant la déformabilité relative de l'armature (influence de la rigidité) et du sol (influence de la densité), on peut observer deux types de comportement (fig. 3) :

- dans une armature rigide, l'effort de traction se distribue linéairement le long de l'armature, parce que tout déplacement en tête se répercute tout au long de l'armature. Le déplacement est le même en tout point, et le coefficient de frottement apparent est constant.

- dans une armature déformable, le déplacement en tête s'amortit progressivement pour devenir nul en un point qui peut être différent de l'extrémité de l'armature. L'effort de traction ne se distribue donc pas linéairement le long de l'armature, et la distribution évolue en fonction du déplacement imposé en tête. Le coefficient de frottement mesuré est donc un coefficient moyen, qui peut être très différent des coefficients locaux (égaux à la pente de la courbe sur la fig. 3).

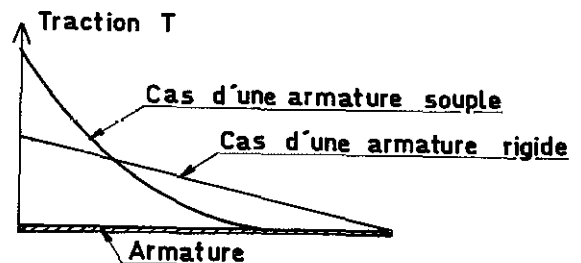


Fig. 3 : Types de distribution des efforts de traction dans une armature

Cette différence de comportement a été également observée dans des essais utilisant les mêmes armatures, mais avec une densité variable du matériau de remblai : à faible densité, le comportement est celui d'une armature rigide, alors qu'à forte densité, la déformabilité de l'armature joue un rôle prépondérant.

Dans le cas d'une armature déformable ou d'une forte densité du matériau de remblai, on sature le frottement mobilisable au fur et à mesure des déplacements, à partir de l'extrémité de l'armature sur laquelle est imposé le déplacement.

Cet essai qui n'est qu'une schématisation du phénomène de frottement entre la terre et les armatures fournit des résultants intéressants concernant :

- la valeur du coefficient de frottement apparent mobilisé f^* , défini par la formule

$$f^* = \frac{T}{2b L \delta h}$$

où T est l'effort de traction à l'extrémité de l'armature, et la mobilisation de ce coefficient en fonction du déplacement, en particulier les valeurs de pic et résiduelle.

- les paramètres influant sur f^*

Des essais de laboratoire ont été réalisés aux U.S.A. sur une boîte de grandes dimensions (0,90 m x 0,90 m x 0,45 m), munie de fentes pour extraire des morceaux d'armatures, et dans laquelle les pressions normales appliquées peuvent atteindre 200 kPa. Les résultats de ces essais ne sont pas directement comparables à ceux obtenus sur des armatures enterrées, car les influences de la déformabilité des armatures et de la dilatance du sol sont probablement plus faibles.

On ne présente ici que les résultats concernant les paramètres les plus influants.

2.2. Influence de la densité du sol

La densité du sol joue un rôle important sur la mobilisation du frottement ainsi que le montrent les courbes (f^* , Δl) (fig. 4) provenant d'essais sur des modèles réduits. Aux faibles densités, le pic est obtenu pour de petits déplacements (quelques millimètres) et il est très accentué. La valeur résiduelle de f^* est inférieure de moitié à celle correspondant au pic. Aux fortes densités, il n'y a pas pratiquement plus de pic, mais un palier, obtenu pour de grands déplacements (plusieurs centimètres). De plus les valeurs de f^* sont très fortes aux densités élevées.

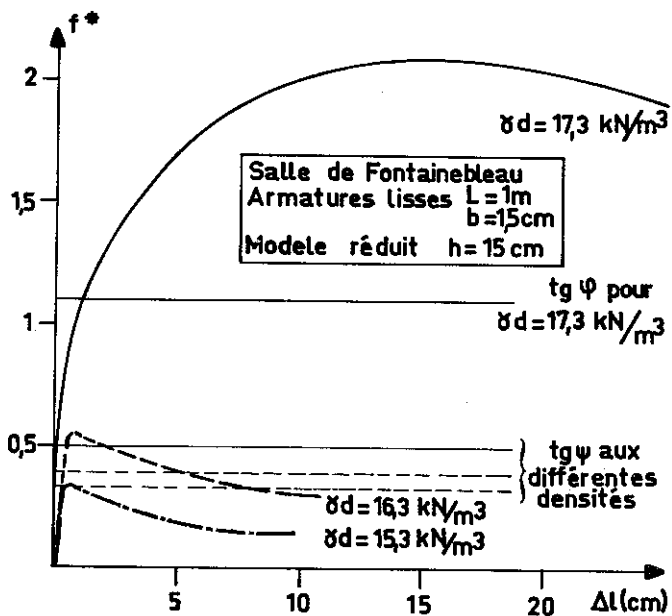


Fig. 4 : Influence de la densité sur les valeurs du coefficient de frottement apparent dans un essai d'extraction

Cette différence de comportement est due au phénomène de dilatance. Lors du cisaillement d'un sol, deux phénomènes se superposent : un désenchevêtrement des grains et un frottement grains sur grains. Le désenchevêtrement s'accompagne d'une variation de volume, qui

est liée à la densité du sol. Si le sol est lâche, il y a cisaillement avec diminution de volume (dilatance négative), si le sol est dense, le cisaillement se fait avec augmentation de volume.

Dans un remblai dense, les variations locales de volume sont limitées par la compressibilité de la masse de sol environnante. Lors du cisaillement du sol autour des armatures, la dilatance se traduit par une augmentation de la composante normale σ_n de la contrainte sur l'armature.

Le coefficient de frottement apparent f^* étant défini par rapport au poids des terres, qui peut être très inférieur à σ_n , la valeur mesurée f^* peut être beaucoup plus élevée que celle du coefficient de frottement réel. Cette différence est surtout sensible aux fortes densités, car un sol est d'autant plus dilatant qu'il est dense. Au contraire, aux faibles densités, le cisaillement se produit avec diminution de volume ; il y a effondrement local de la structure du sol autour de l'armature, qui se déplace ensuite comme dans un tunnel, avec des contraintes normales très faibles. Ceci explique que le coefficient de frottement mesuré soit inférieur à celui déterminé dans un essai de cisaillement sol-armature à la boîte.

2.3. Influence de l'état de surface des armatures

La figure 5 montre les courbes traction-déplacement obtenues, toutes choses égales par ailleurs, pour une armature lisse et pour une armature crénelée, dite à haute adhérence (H.A.) dans des essais d'extraction sur ouvrages. Les principales conclusions sont les suivantes :

- la valeur du coefficient de frottement apparent est plus élevée pour des armatures H.A. que pour des armatures lisses.

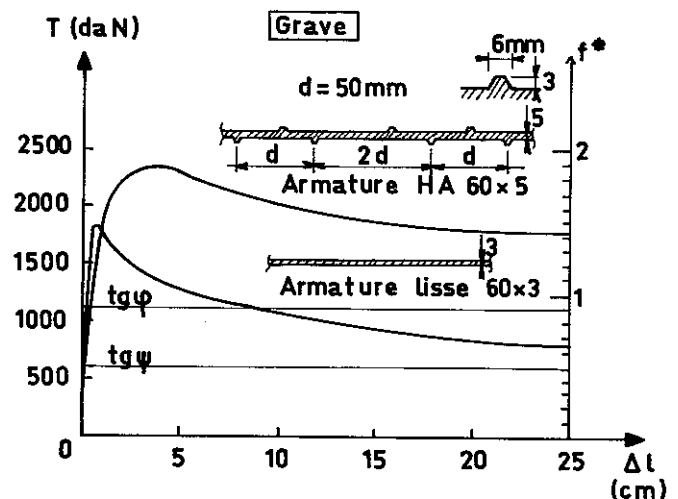


Fig. 5 : Influence de l'état de surface sur les valeurs du coefficient de frottement apparent dans un essai d'extraction.

- le pic est atteint pour des déplacements de l'ordre de 0,5 mm pour les armatures lisses et de 5 mm pour les armatures H.A.
- le pic est très accentué pour les armatures lisses et conduit à une valeur résiduelle de la traction de l'ordre de 50% de celle du pic. Pour les armatures H.A., la valeur résiduelle est peu inférieure à celle au pic (environ 80%).

Ces résultats conduisent à préférer presque toujours les armatures H.A., qui procurent une meilleure sécurité à l'adhérence, et à utiliser dans ce cas la valeur de f^* correspondant au pic.

La différence de comportement entre ces deux types d'armatures provient de la présence des reliefs, qui mobilisent un volume de sol plus important qu'une surface lisse. Le cisaillement accompagné d'une dilatance se fait donc dans un volume important, ce qui conduit à une augmentation d'autant plus forte de la composante normale de la contrainte verticale sur l'armature. De plus, cette différence inclue probablement un effet lié à la déformabilité, puisque les armatures lisses ont 3 mm d'épaisseur et les armatures H.A. 5 mm. Tous ces essais ont été réalisés à une densité assez forte, mais il est probable que la différence de comportement entre les deux types d'armatures soit d'autant moins sensible que le sol est moins dense.

2.4. Influence de la nature du matériau de remblai

Il semble évident que l'angle de frottement interne et l'angularité du sol doivent intervenir dans le frottement sol-armature, mais les paramètres intervenant dans ces phénomènes sont si nombreux qu'il est difficile de les isoler.

Il apparaît néanmoins que le frottement apparent mesuré augmente de façon sensible avec l'étalement de la granularité du sol. Pour des profondeurs d'essai faibles (inférieures à 1 m), et pour des densités de mise en oeuvre voisines de l'optimum Proctor, les valeurs de f^* sont inférieures à 2 pour les

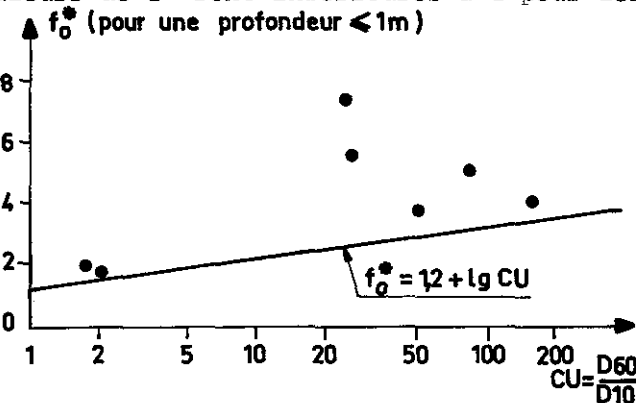


Fig. 6 : Variations du coefficient f_0^* en fonction du coefficient d'uniformité du sol

sables uniformes, et elles atteignent 8 pour des graves (fig. 6). Cette observation doit être rapprochée également du phénomène de dilatance, avec un désenchevêtrement des grains mobilisant une résistance au cisaillement d'autant plus forte que l'arrangement des grains du sol est compact, ce qui n'est possible qu'avec une granulométrie bien étalée.

Cas particulier des sols contenant beaucoup de fines :

Des essais de traction ont été réalisés sur des armatures enterrés dans un remblai constitué d'une grave fortement argileuse (30% de passant à 80 μ m) non saturée ($w \approx 10\%$). La valeur de f^* au pic n'est guère plus faible que celle mesurée sur des graves propres (de l'ordre de 1 pour les armatures H.A. et 0,4 pour les armatures lisses, à une profondeur de 6 m), mais la valeur résiduelle est très faible, voire nulle (fig 7).

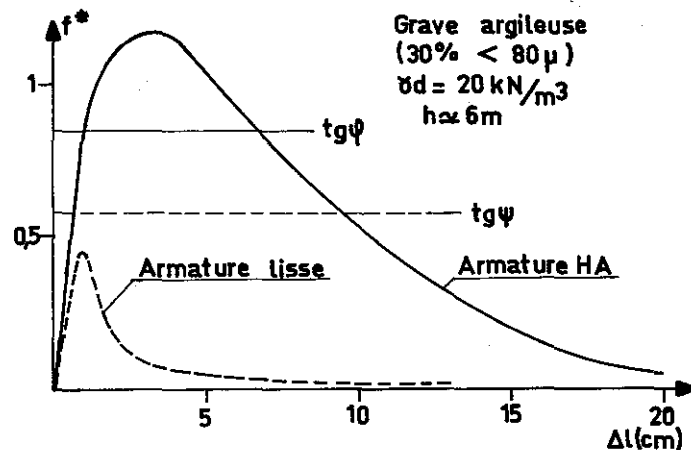


Fig. 7 : Cas particulier d'une grave fortement argileuse

Ce comportement particulier s'explique en considérant que le pic correspond essentiellement au désenchevêtrement des grains, peu sensible à la présence de fines, alors que le frottement résiduel correspond plutôt au frottement grain sur grain. Dans le cas d'une grave argileuse, les grains sont entourés d'une gangue argileuse, dans laquelle se concentre l'eau et qui est donc proche de la saturation, d'où un frottement intergranulaire pratiquement nul.

2.5. Influence du poids des terres et valeurs de f^*

La figure 8 montre les variations du coefficient de frottement apparent obtenues lors de nombreux essais d'extractions dans des sols utilisés habituellement en terre armée, en fonction de la hauteur de terre au-dessus de l'armature. On donne les valeurs de f^* au pic et pour un déplacement en tête de 100 mm.

On observe que :

| | | | | | |
|-----------------------------|------------|--------------|------------|-------|----------------|
| $f^* \text{ pic}$ | ● | ▲ | ▼ | ◆ | ■ |
| $f^* \text{ rés.}$ | ○ | △ | ▽ | ◇ | □ |
| $\Delta l = 100 \text{ mm}$ | | | | | |
| Sol | Grave | Grave | Sable fin | Grave | Grave sableuse |
| ψ | 30° | $27,5^\circ$ | 24° | | 22° |
| φ | 47° | 46° | 35° | | 37° |

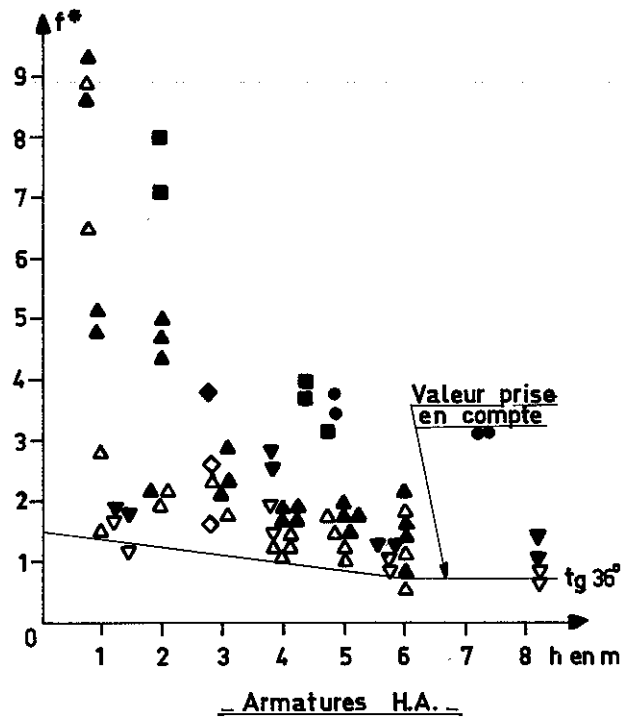
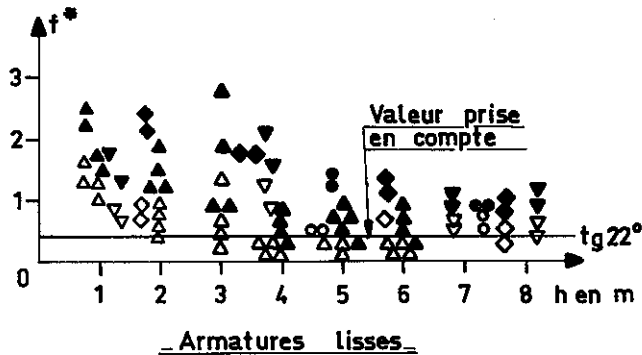


Fig. 8 : Variations du coefficient de frottement apparent f^* en fonction de la hauteur de remblai au-dessus de l'armature

- dans tous les cas, le frottement apparent diminue quand la hauteur de remblai au-dessus de l'armature augmente. Ce phénomène est très accentué pour les armatures crânelées
- f^* atteint un palier voisin de $\text{tg } \varphi$ ou $\text{tg } \psi$ selon le type d'armature, pour une hauteur de remblai de 6 m environ,
- les valeurs de f^* correspondant à une faible hauteur de remblai sont élevées : 1 à 2,5 avec les armatures lisses, 1,5 à 10 avec les armatures crânelées.

L'ensemble de ces résultats a été confirmé par les essais à la grande boîte (U.S.A.).

3. INCIDENCE SUR LE DIMENSIONNEMENT INTERNE

Les principaux résultats de ces études sont pris en compte dans les nouvelles méthodes de dimensionnement interne pour la vérification à l'adhérence.

On ne considère comme longueur d'adhérence L_a que la partie de l'armature comprise dans la zone résistante (fig 9). On vérifie que, sur cette longueur, les contraintes de cisaillement entre le sol et l'armature suffisent à équilibrer les efforts de traction dans l'armature, soit :

$$T_{\text{Max}} \leq 2b \int_{L-L_a}^L f^*(x) \sigma_v(x) dx$$

ou f^* et σ_v peuvent varier le long de

l'armature en fonction de la géométrie du remblai.

Valeur de σ_v :

La valeur de σ_v est prise égale à γh , contrainte due au poids des terres au-dessus de l'armature.

Valeur de f^* dans le cas des armatures à haute adhérence :

Puisque le pic des courbes effort-déplacement dans les essais de traction d'armatures correspond à de grands déplacements (de l'ordre de 50 mm) et qu'il est peu accentué, il est justifié de considérer la valeur de f^* au pic. On en prend en compte l'enveloppe du côté de la sécurité, schématisée sur la figure 8. Le coefficient de frottement apparent varie ainsi avec la profondeur y de l'armature par rapport à la surface libre du remblai (fig 9), selon la formule :

$$f^* = f_0^* \left(1 - \frac{y}{y_0}\right) + \text{tg } \varphi \frac{y}{y_0} \quad \text{pour } y \leq y_0 = 6 \text{ m}$$

$$f^* = \text{tg } \varphi \quad \text{pour } y > y_0$$

ou : φ est l'angle de frottement interne correspondant aux conditions de mise en oeuvre. Les critères de choix des matériaux de remblai permettent d'assurer dans tous les cas un angle supérieur ou égal à 36° ($\text{tg } \varphi = 0,726$)

f_0^* est la valeur du coefficient de frottement à la surface du remblai. Elle dépend essentiellement de l'étalement de la courbe granulométrique, caractérisée par le

coefficient d'uniformité $CU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$. On en prend également une enveloppe sécuritaire (fig 6), définie par la formule :

$$f^* = 1,2 + \lg CU$$

Si on ne connaît pas CU , et sauf pour des matériaux très uniformes ($CU < 2$), la valeur de f^* est prise égale à 1,5.

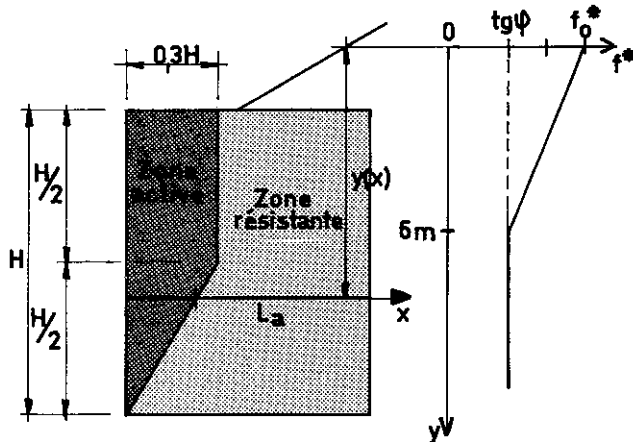


Fig. 9 : Valeurs de f^* dans le dimensionnement interne à l'adhérence

Valeur de f^* dans le cas des armatures lisses :

Les essais de traction sur armatures lisses montrent que le pic observé est très accentué, et qu'il correspond à de faibles déplacements (de l'ordre de 0,5 mm). Il est donc prudent de prendre en compte la valeur résiduelle, qui est généralement voisine de $\tan \psi$ où ψ est l'angle de frottement sol-armature mesuré à la boîte de cisaillement.

Au stade du projet, on ne connaît généralement pas la valeur de ψ , mais les critères de choix des matériaux de remblai sont tels que l'on a toujours $\psi \geq 22^\circ$. On prendra donc une valeur de f^* constante et égale 0,4 ($\tan 22^\circ$).

4. CONCLUSIONS

Ces nombreuses études sur le phénomène de frottement entre le sol et les armatures ont permis de mettre en évidence les principaux facteurs : état de surface des armatures, densité du sol, poids des terres au-dessus de l'armature.

On a pu voir également que le frottement proprement dit n'est pas le seul phénomène mis en jeu, et que la dilatance, dans le cas des sols denses, joue également un rôle prépondérant. Mais ce phénomène n'a pas encore été formulé théoriquement dans le frottement terre-armature.

Toutefois, les nouvelles méthodes de dimensionnement (7) tiennent largement compte des nombreux résultats expérimentaux obtenus à ce jour, essentiellement en ce qui concerne :

- l'existence d'une zone active et d'une zone résistance
- la valeur du coefficient de frottement apparent, qui est supérieure, dans le cas des armatures à haute adhérence, à celle mesurée en laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE :

- (1) ALIMI I., BACOT J., LAREAL P., LONG N.T., SCHLOSSER F. (1977)
Etude de l'adhérence sol-armature- Proc. of 9th Inter. Conf. on Soil Mech and Found. Eng. - Moscow 1973 - Vol 1. pp 11-14
- (2) GUILLOUX A., SCHLOSSER F., LONG N.T., (1979)
Etude du frottement sable-armature en laboratoire
Colloque International sur le renforcement des sols : Terre Armée et autres techniques - E.N.P.C. - L.C.P.C. - Paris 20-22 Mars 1979
- (3) AMAR S., CANEPA, LONG N.T., SCHLOSSER F. (1979)
Influence des fines et de la teneur en eau sur le frottement sol-armature
Colloque international sur le renforcement des sols : Terre Armée et autres techniques - E.N.P.C. - L.C.P.C. - Paris - 20-22 Mars 1979
- (4) MEVELLEC P. (1977)
Etude de l'adhérence sol-armature dans la terre armée. Thèse - L.C.P.C. - Paris
- (5) SCHLOSSER F. (1972)
La Terre Armée - Recherches et réalisations - Bull. de liaison des labo. des Ponts et Chaussées - n° 62 - Novembre - Décembre 1972
- (6) SCHLOSSER F., ELIAS V. (1978)
Friction in Reinforced Earth.
ASCE convention - Pittsburgh - April 24-28 1978
- (7) SEGRESTIN P., SCHLOSSER F., (1979)

Dimensionnement des ouvrages en terre armée par la méthode de l'équilibre local
Colloque international sur le renforcement des sols : Terre Armée et autres techniques - E.N.P.C. - L.C.P.C. - Paris 20-22 Mars 1979.