

# Ancrages en tête de talus des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques – Études expérimentales et application

Laurent Briançon <sup>a</sup>, Hugues Girard <sup>b</sup> et Étienne Rey <sup>a</sup>

La stabilité et la durabilité des dispositifs d'étanchéité géosynthétiques sur pentes dépendent de l'efficacité des ancrages des nappes en tête de talus. Des méthodes de dimensionnement ont été proposées pour certaines configurations d'ancrage et pour certains types de sols (Briançon, 2003 ; Koerner, 1999 ; Huling et Sansone, 1997 ; Villard et Chareyre, 2004). Cependant, le dimensionnement de ces ancrages reste souvent problématique pour les projecteurs. En effet, il n'existe pas de recommandations dans ce domaine et les méthodes analytiques de dimensionnement existantes ne permettent pas de déterminer de manière satisfaisante la capacité d'ancrage des tranchées.

Pour améliorer les connaissances dans ce domaine, nous avons déjà conduit des études expérimentales (Briançon, 2001 ; Briançon *et al.*, 2000) et participé à des études numériques (Chareyre, 2003 ; Chareyre *et al.*, 2002) ; ces études ont mis en évidence la complexité des mécanismes et n'ont pas permis de proposer des méthodes de dimensionnement acceptables pour la multitude de cas rencontrés (types de sols et géométrie des tranchées notamment). Nous proposons, dans cet article, de comparer expérimentalement trois types d'ancrage dans cinq sols différents à partir d'essais au banc d'ancrage et *in situ* (figure 1). Ceci permettra d'une part, de mieux comprendre les mécanismes d'ancrage et, d'autre part, de déterminer la solution d'ancrage la plus efficace pour une longueur de géotextile à ancrer donnée (figure 2).

## Essais réalisés sur banc d'ancrage

### Appareillage d'essai et instrumentation

Le banc d'ancrage (figure 1) est constitué d'une zone d'ancrage d'un mètre de large et d'un dispositif de traction. Ce dispositif de traction est relié au géosynthétique par un mors. La force d'extraction et le déplacement du mors sont mesurés au cours de l'extraction à l'aide de capteurs fixés sur le dispositif de traction. Dans la zone d'ancrage, cinq capteurs permettent de suivre le déplacement de la nappe géosynthétique au cours de l'extraction (figure 1). La rupture du massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée peut être mise en évidence par le déplacement de colonnes de sable coloré mises en œuvre préalablement.

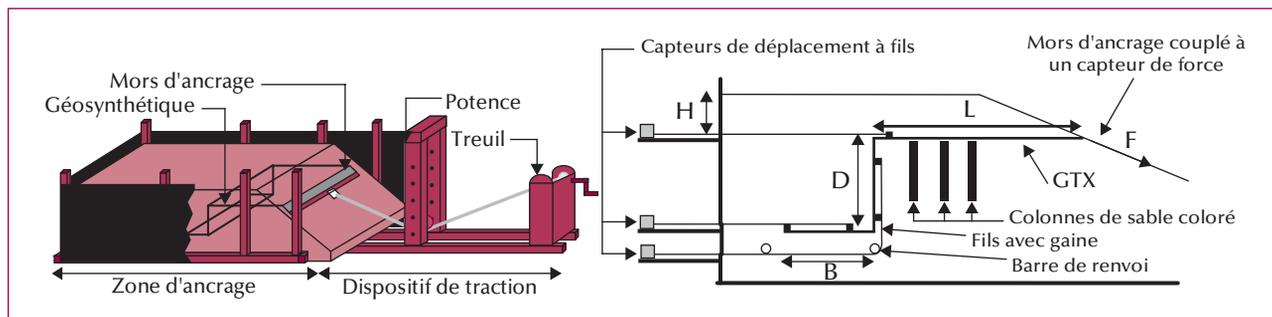
### Matériaux utilisés

Les essais au banc d'ancrage ont été réalisés pour trois sols : un sable, un limon (pour deux teneurs en eau différentes) et un limon sableux. Les principales propriétés de ces matériaux ont été mesurées et sont récapitulées dans le tableau 1. Les angles de frottement  $\delta$  à l'interface géosynthétique/sol ont été déterminés au plan incliné et au banc d'ancrage. Le géosynthétique utilisé pour ces essais est un géocomposite de renforcement constitué d'un non-tissé renforcé par des fibres en PET<sup>1</sup> aiguilletées au non-tissé dans le sens de production.

### 1. Polyéthylène.

#### Les contacts

a. Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), 292 rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex  
b. Cemagref, UR Réseaux, épuration et qualité des eaux, 50 avenue de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas Cedex



▲ Figure 1 – Banc d'ancrage.

▼ Tableau 1 – Propriétés des sols utilisés au banc d'ancrage.

Sol	$\gamma_d^*$ (kN.m <sup>-3</sup> )	w (%)	$\phi$ (degrés)**	c (kPa)**	$\delta$ (degrés)
Sable	15,7	3	41	0	37
Limon 1	13,0	23,5	35	5	30
Limon 2	13,6	19,5	—	—	
Limon sableux	15,7	10,6	—	—	41

\* Valeurs mesurées sur le sol mis en place.

\*\* Valeurs obtenues au triaxial.

### Géométrie des tranchées d'ancrage

Plusieurs géométries de tranchée ont été réalisées pour comparer leur capacité d'ancrage : recouvrement horizontal simple, tranchée rectangulaire, tranchée en V et tranchée trapézoïdale (figure 2). L'ancrage par recouvrement simple a permis aussi de déterminer les angles de frottement entre la nappe géosynthétique et les différents sols.

Les trois premiers types de tranchées sont couramment utilisés, les tranchées rectangulaires étant plutôt réalisées en Europe et les tranchées en V plutôt aux États-Unis. Il nous a semblé intéressant de tester la tranchée trapézoïdale d'une part parce qu'elle est plus facilement réalisable que la tranchée rectangulaire (la partie inclinée de la tranchée trapézoïdale étant plus stable que la partie verticale de la tranchée rectangulaire), et d'autre part parce que la mise en œuvre de la nappe géosynthétique est plus simple que dans le cas d'une tranchée en V.

### Expérimentation sur site

Une expérimentation en vraie grandeur a été réalisée pour lever les incertitudes dues au frottement latéral inhérent au banc d'ancrage. Un remblai de 2 mètres de haut, incliné à 38 degrés, a été mis en œuvre avec une argile à silex dont les caractéristiques, présentées au tableau 2, ont

▼ Tableau 2 – Propriétés de l'argile à silex.

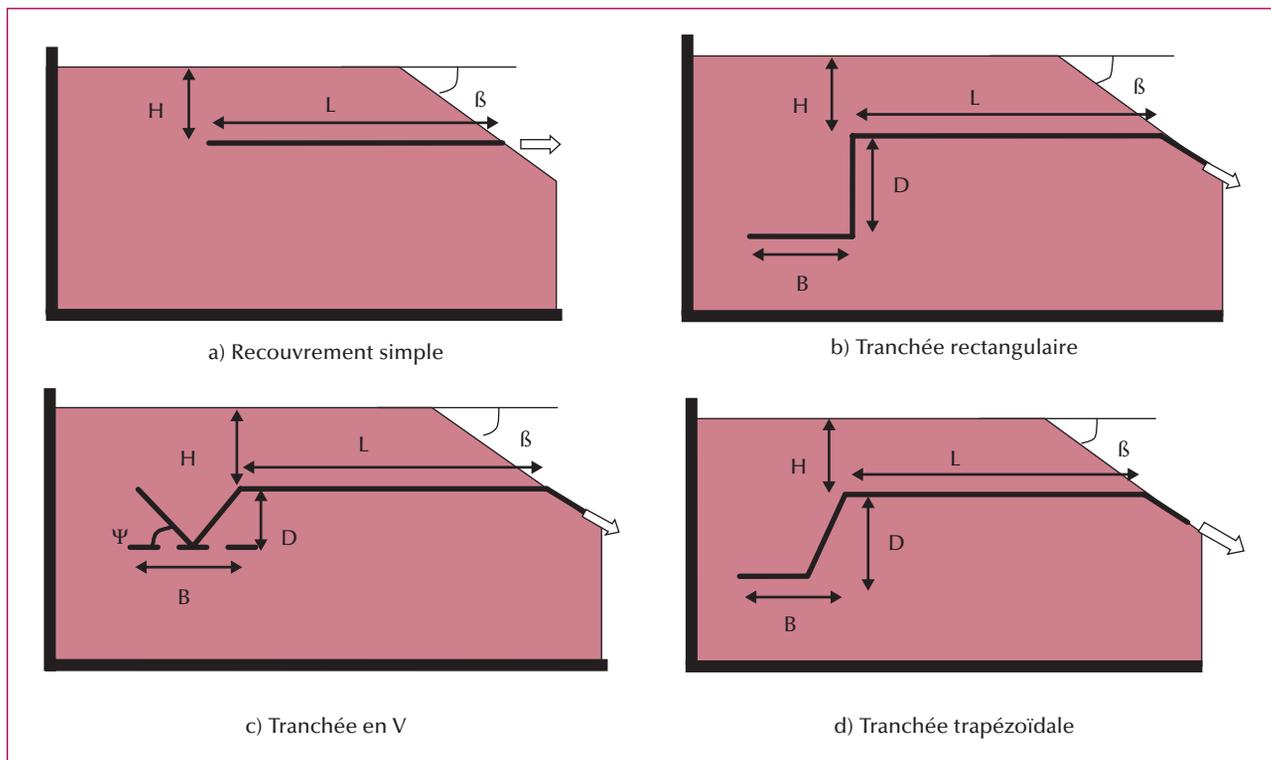
Sol	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\phi$ (degrés)*	$\delta$ (degrés)
Argile à silex	19,3	12,5	42,6	-

\* Valeurs obtenues à la boîte de cisaillement.

été déterminées sur un échantillon de sol écrêté à 25 mm (Valle, 2001).

Trois tranchées d'ancrage différentes (rectangulaire, en V et trapézoïdale) ont été réalisées avec le même géotextile que celui utilisé pour les essais au banc d'ancrage. Pour chaque tranchée, l'extraction des nappes géosynthétiques a été réalisée avec une pelle mécanique, en appliquant une traction croissante le long de la pente. La force de traction au cours de l'extraction a été mesurée par un capteur de force fixé au mors d'ancrage (figure 3a).

Les dimensions des tranchées d'ancrage en vraie grandeur ont été choisies identiques à celles des tranchées au banc d'ancrage pour les essais avec une longueur de nappe géosynthétique donnée. Avant la mise en traction du géosynthétique, le sol a été dégagé de part et d'autre de la tranchée d'ancrage pour éliminer le frottement latéral ; de plus, ceci a permis d'observer le déplacement



de la nappe au cours de l'extraction et celui du sol, ce dernier ayant été mis en évidence par le mouvement et la rupture de bandes de sol colorées (figure 3). L'enregistrement simultané de la force d'extraction avec l'enregistrement vidéo du déplacement de la nappe géosynthétique dans chaque tranchée a permis de mettre en relation l'évolution de la valeur de la force d'extraction avec les mécanismes de rupture observés dans la tranchée.

## Résultats et analyses

### Mesures de la force d'extraction – Résultats antérieurs

La mesure principale lors de nos essais est la valeur de la force  $T$  nécessaire pour extraire le géosynthétique afin de déterminer la capacité d'ancrage de chaque tranchée. Les résultats de nos essais antérieurs (réalisés au banc d'ancrage sur un sable et un limon) montrent que la capa-

▲ Figure 2 – Les différentes configurations de tranchées d'ancrage testées.



◀ Figure 3 – Instrumentation de l'expérimentation en vraie grandeur.

cité d'ancrage ne dépend pas uniquement du frottement à l'interface sol/géosynthétique, mais aussi de :

- la résistance mécanique du massif de sol situé sous le géosynthétique, entre le parement du talus et la tranchée. Cette résistance dépend de la nature du sol (cohésion, angle de frottement) et de la longueur  $L$  séparant le parement du talus du bord de la tranchée (Briançon *et al.*, 2003) ;
- l'état du sol. Pour une tranchée rectangulaire dans un limon relativement humide ( $w = 23,5\%$ ), nous avons noté qu'une diminution de 4 points de la teneur en eau entraînait une augmentation de 15 % de la capacité d'ancrage (Briançon *et al.*, 2003) ;
- la pente du talus. La force nécessaire pour extraire la nappe augmente avec l'inclinaison de la pente.

Les formules analytiques existantes ne prenant pas en compte ces différents paramètres, elles ne prédisent pas avec exactitude la capacité d'ancrage des tranchées (Briançon, 2001). Les deux campagnes d'essais complémentaires (limon sableux au banc et argile à silex *in situ*) décrites dans cette communication et analysées ci-après visent à compléter ces résultats antérieurs.

### Mécanismes de rupture

#### TRANCHÉES RECTANGULAIRES

Pour les tranchées rectangulaires dans le sable et le limon au banc d'ancrage, les mécanismes de ruptures ont été identifiés grâce à l'observation en fin d'essai du déplacement de colonnes de sable coloré mis en œuvre préalablement dans

le massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée (Briançon *et al.*, 2003).

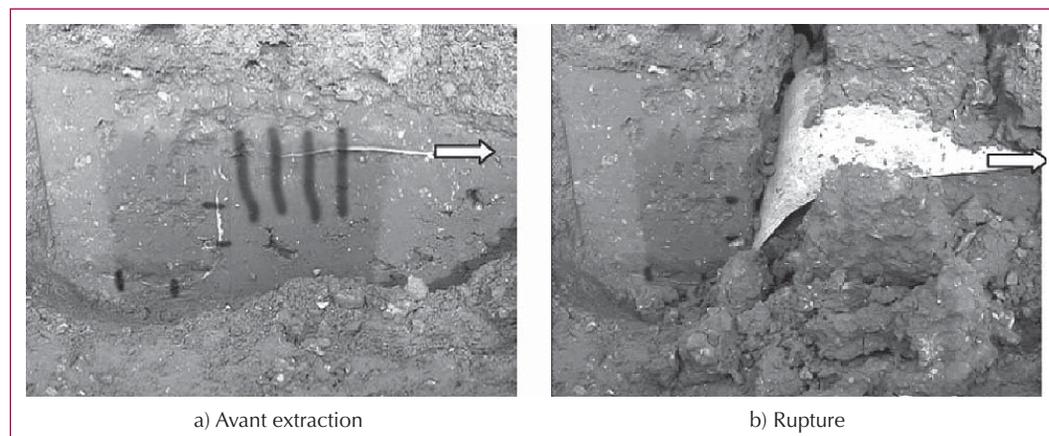
Dans le cas du sable, lorsque  $L = 1,1$  m, deux plans de cisaillement apparaissent en partie haute du massif de sol ; lorsque  $L = 0,5$  m, l'ensemble du massif se déplace, suivant plusieurs plans de cisaillement.

Dans le cas du limon, pour  $L = 1,1$  m et pour la même géométrie de tranchée, aucune rupture dans le sol n'a été observée. Ces résultats illustrent d'une part, l'influence de la géométrie pour un sol donné et d'autre part, l'influence du sol pour une géométrie donnée.

Dans le cadre de l'expérimentation en vraie grandeur, les mécanismes de rupture ont pu être observés tout au long de l'extraction. Pour la tranchée rectangulaire dans l'argile à silex, nous avons observé que la partie verticale de la tranchée a subi une déformation importante (figure 4). En effet, lorsque la force d'extraction a atteint sa valeur maximale, correspondant à la capacité d'ancrage de la tranchée, les angles initialement rectangulaires se sont arrondis, ce phénomène étant probablement amplifié par l'absence de contrainte latérale.

Ces observations démontrent le rôle majeur joué par le sol dans les mécanismes d'ancrage et la nécessité de ne pas considérer uniquement les frottements aux interfaces sol/géosynthétique pour déterminer la capacité d'ancrage d'une tranchée. En effet, dans certains cas, des phénomènes de mise en butée du sol peuvent apparaître alors que dans d'autres cas, un cisaillement du sol peut être observé à l'interface sol/géotextile ou à proximité.

► Figure 4 – Extraction en vraie grandeur d'une nappe ancrée dans une tranchée rectangulaire.



### TRANCHÉES EN V

Deux types de tranchées en V de profondeur différente ont été mis en oeuvre pour comprendre les mécanismes de rupture dans le sable et le limon sableux (figure 5) :

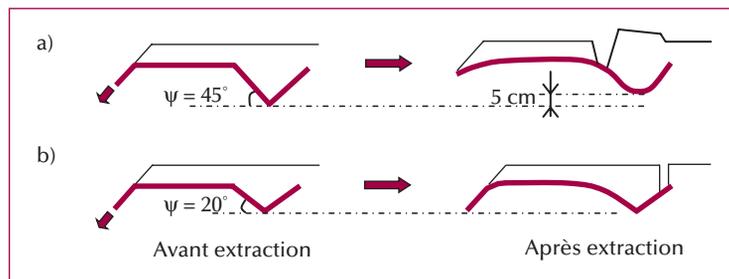
- une tranchée profonde ( $\psi = 45$  degrés),
- une tranchée peu profonde ( $\psi = 20$  degrés).

Dans le cas de la tranchée profonde (figure 5a), le massif de sol situé dans la tranchée ne suit pas la nappe géosynthétique ; le géosynthétique glisse au sein du massif, n'emmenant que le sable situé sur L. L'extraction de la nappe entraîne un arrondi important des angles du V, accompagné d'un soulèvement du sol situé au niveau de la tranchée. Au moment de la rupture de l'ancrage, le soulèvement atteint son amplitude maximale, soit 5 cm. Ce mouvement vertical, provoqué par l'arrondi de l'angle du V, reste par la suite constant si l'on continue l'extraction après rupture.

Contrairement à l'essai précédent, lorsque  $\psi = 20$  degrés (figure 5b), l'ensemble du sable situé au-dessus de la nappe glisse avec le géosynthétique et il n'y a pratiquement pas de soulèvement du sol se situant sur la partie V de la tranchée.

Pour ces deux configurations, la masse de sol situé entre la tranchée et le parement du talus ne subit pas de cisaillement, à l'exception d'une couche mince située sous la nappe et se déplaçant avec ce dernier.

Les mêmes mécanismes de rupture ont été observés avec l'argile à silex au cours de l'essai en vraie grandeur pour la tranchée profonde (figure 6).



### TRANCHÉES TRAPÉZOÏDALES

Les tranchées trapézoïdales ont été uniquement testées dans le limon sableux au banc d'ancrage et dans l'argile à silex en vraie grandeur.

Dans le limon sableux, nous avons observé un plan de glissement dans le sol situé juste sous la nappe. Dans ce cas, l'angle de frottement à considérer dans le dimensionnement doit être l'angle de frottement interne du sol et non l'angle de frottement à l'interface sol/géosynthétique.

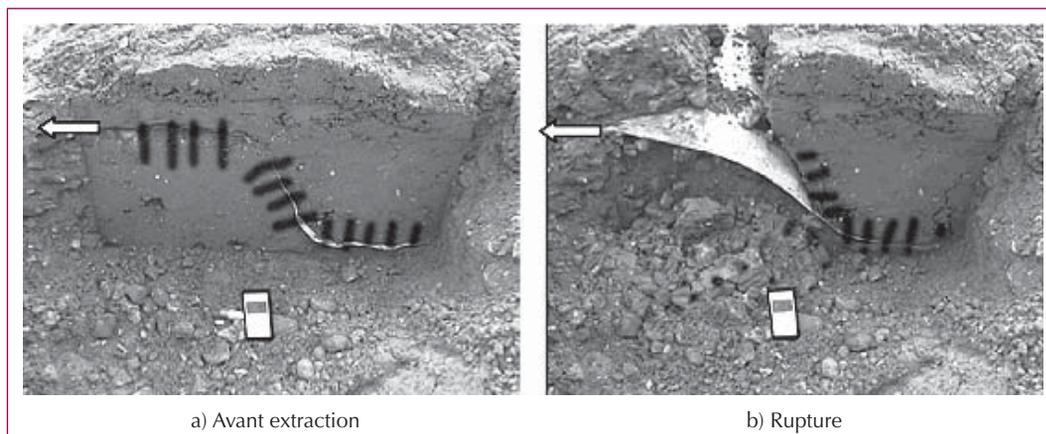
Dans l'argile à silex, les angles de la tranchée trapézoïdale se sont arrondis au cours de l'extraction et le massif de sol situé dans la tranchée s'est soulevé quand la force d'extraction a atteint la capacité d'ancrage de la tranchée (figure 7). Comme pour la tranchée rectangulaire, l'absence d'étreinte latérale semble avoir amplifié l'arrondissement des angles de la tranchée et permis une désolidarisation de quelques mottes du massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée. Cette désolidarisation, moins importante que celle observée dans la tranchée rectangulaire, laisse supposer que la mise en butée du massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée trapézoïdale est inférieure à la mise en butée du

▲ Figure 5 – Mécanismes de rupture dans le cas de tranchées en V réalisées au banc d'ancrage.



◀ Figure 6 – Extraction en vraie grandeur d'une nappe ancrée dans une tranchée en V ( $\psi = 45$  degrés).

► Figure 7 –  
Extraction en vraie  
grandeur d'une nappe  
ancrée dans une  
tranchée trapézoïdale.



massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée rectangulaire.

Ces observations qualitatives démontrent le rôle majeur du sol et de la géométrie dans les mécanismes d'ancrage.

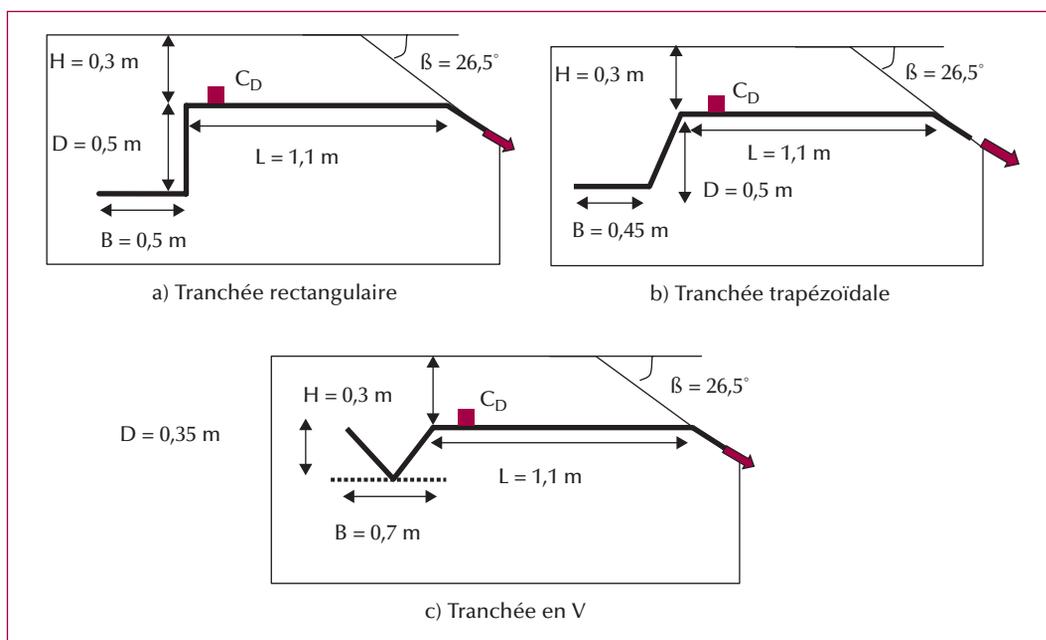
### Application pour une longueur donnée de géosynthétique à ancrer

Pour une longueur de nappe géosynthétique à ancrer fixée à 2,1 m, trois tranchées d'ancrage ont été mises en œuvre dans le limon sableux au banc d'ancrage et dans l'argile à silex en vraie grandeur. Les dimensions des trois types de tran-

chée, identiques au banc d'ancrage et *in situ*, sont représentées sur la figure 8. La longueur  $L$  entre le parement du talus et la tranchée et l'épaisseur  $H$  de la couche de sol au-dessus de la nappe sont identiques dans chacun des cas.

Afin de déterminer la tranchée la plus efficace, nous avons comparé les capacités d'ancrage d'une part à la rupture et, d'autre part, pour un déplacement de 0,1 m, ce dernier étant mesuré par un capteur noté  $C_D$  (figure 8) localisé à 0,1 m de la tranchée. Ce critère en déplacement a été examiné pour prendre en compte l'efficacité d'un ancrage dans le domaine des petites déformations, les déplacements du dispositif géosynthétique sur la pente devant rester limités.

► Figure 8 –  
Dimensions des  
tranchées pour  
une longueur de  
géosynthétique à  
ancrer donnée.

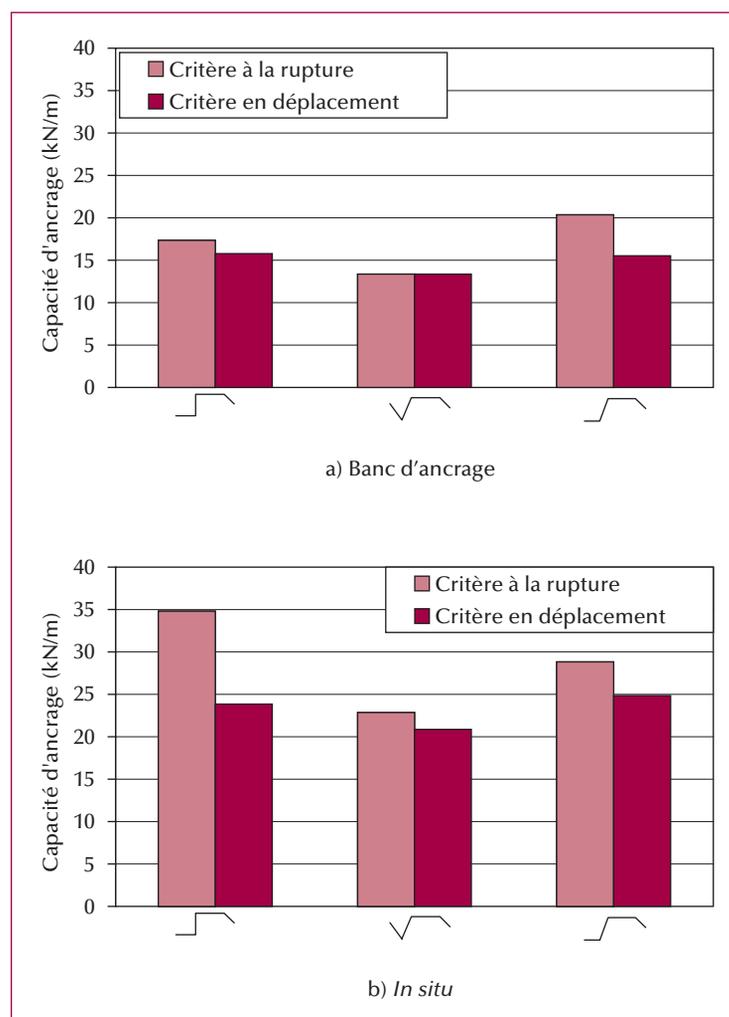


Pour les deux critères, la tranchée en V semble être la moins efficace en terme de capacité d'ancrage (figure 9). Au banc d'ancrage, la tranchée trapézoïdale est plus efficace que la tranchée rectangulaire quand la capacité d'ancrage est définie à la rupture (figure 9a). Cependant, la capacité d'ancrage dans ce cas est atteinte pour un grand déplacement de la nappe géosynthétique, et, lorsque le critère en déplacement est retenu, la capacité d'ancrage de la tranchée rectangulaire est la même que celle de la tranchée trapézoïdale. Lors de l'expérimentation en vraie grandeur (figure 9b), l'épaisseur de la couche de sol mise en œuvre sur la nappe géosynthétique n'a pas été tout à fait respectée pour la tranchée trapézoïdale (0,2 m au lieu de 0,3 m pour les deux autres configurations). Aussi, les capacités d'ancrage ne peuvent pas être comparées en toute rigueur ; nous avons tout de même noté que les tendances observées au banc d'ancrage semblent être validées.

## Conclusions

Cette étude expérimentale met en évidence la variété des mécanismes de rupture. Ces mécanismes sont complexes : la contrainte normale qui s'applique sur les différentes interfaces peut être très différente entre l'état initial et la rupture (tension maximum dans le géotextile), le frottement aux interfaces sol/géosynthétique peut n'être que partiellement mobilisé si la rupture apparaît dans le sol. Aussi, pour dimensionner ces tranchées d'ancrage, il n'est pas suffisant de considérer uniquement la géométrie des tranchées et le frottement aux interfaces sol/géosynthétique : la nature du sol et son comportement doivent également être considérés. La prise en compte de tous ces paramètres doit permettre de prédire le mécanisme à la rupture et sa localisation (à l'interface sol/géosynthétique ou dans le massif de sol situé entre le parement du talus et la tranchée) et de dimensionner la tranchée en fonction du mécanisme concerné.

La comparaison entre différentes configurations de tranchées, pour une longueur donnée de nappe à ancrer a mis en évidence que la tranchée en V était moins efficace que les tranchées rectangulaire et trapézoïdale. La tranchée trapézoïdale est plus simple à mettre en œuvre et permet d'ob-



tenir des capacités d'ancrage semblables à celles obtenues avec une tranchée rectangulaire ; elle nécessite néanmoins un déplacement important de la nappe pour atteindre la capacité d'ancrage à la rupture.

La prochaine étape de notre recherche consistera à proposer de nouvelles méthodes de dimensionnement prenant mieux en compte les mécanismes d'ancrage. Une réflexion sur le choix des critères à considérer pour calculer la capacité d'ancrage et sur les coefficients de sécurité à prendre en compte sera menée parallèlement. □

▲ Figure 9 – Capacités d'ancrage pour une longueur donnée de géosynthétique.

## Remerciements

Nous remercions tout spécialement le Centre d'expérimentation routière de Rouen (M. Khay, G. Vincelas et C. Calmo) pour sa participation aux essais en vraie grandeur ainsi que Bidim Geosynthetics®.

### Résumé

La stabilité des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques dépend de l'efficacité des tranchées dans lesquelles ils sont ancrés en tête de talus. En fonction de l'espace disponible en tête de talus, différents types de tranchées peuvent être mis en œuvre. Plusieurs méthodes de dimensionnement ont été proposées dans ce domaine, cependant des études expérimentales et numériques ont mis en évidence qu'aucune méthode ne décrivait avec précision les mécanismes développés dans les tranchées. Pour compléter les études existantes, des essais ont été réalisés sur un banc d'ancrage et *in situ* pour analyser les mécanismes d'ancrage et pour déterminer quelle est la meilleure géométrie de tranchée pour une longueur de géosynthétique donnée.

### Abstract

Geosynthetic lining system on slopes requires anchoring at the top of the bank. Depending on the space available at the top of the slope and on the applied load, the anchorage trench may take on different geometries. Various design methods have been proposed in this field but experimental and numerical studies showed that no single formula was capable of describing the behaviour of all types of anchorage, even though some were close to the experimental results in certain cases. To complete the existing studies, experimental tests were carried out on an anchorage facility and in-situ to highlight mechanisms and to determine the best anchorage trench for a fixed length of geotextile.

### Bibliographie

- BRIANÇON, L., GIRARD, H., POULAIN, D., MAZEAU, N., 2000, Design of anchoring at the top of slopes for geomembrane lining systems, *in Proc., 2nd European geosynthetics conf.*, Bologna, Italy, 15-18 October 2000, vol. 2, p. 645-650.
- BRIANÇON, L., 2001, *Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques – Caractérisation du frottement aux interfaces et applications*, thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 200 p.
- BRIANÇON, L., GIRARD, H., POULAIN, D., 2003, Dimensionnement des tranchées d'ancrage en tête de talus des dispositifs d'étanchéité en tête de talus, *Revue Française de Géotechnique*, n° 103, p. 13-24.
- CHAREYRE, B., BRIANÇON, L., VILLARD, P., 2002, Theoretical versus experimental modeling of the anchorage capacity of geotextiles in trenches, *in Geosynthetics International*, vol. 9 (2), p. 97-123.
- CHAREYRE, B., 2003, *Modélisation du comportement d'ouvrages composites sol-géosynthétique par éléments discrets – Application aux ancrages en tranchées en tête de talus*, thèse de doctorat, Université Grenoble I, France, 222 p.
- HULLINGS, D.-E., SANSONE, L.-J., 1997, Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches, *in Geotextiles and Geomembranes*, vol. 15 (4-6), p. 403-413.
- KOERNER, R.-M., 1999, *Designing with Geosynthetics*, 4th edition, Prentice Hall.
- VALLE, N., 2001, *Comportement mécanique d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine*. thèse de doctorat, Université de Caen, France, 298 p.
- VILLARD, P., CHAREYRE, B., 2004, Design methods for geosynthetic anchor trenches on the basis of true scale experiments and discrete element modeling, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41 (6), p. 1193-1205.