

DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR LIBRE OPTIMALE D'UN TIRANT D'ANCRAGE SOUTENANT UNE PAROI

Determination of the optimal free length of the line of an anchor supporting a wall

par

P. HABIB et M.P. LUONG

Laboratoire de Mécanique des solides - Ecole Polytechnique - Palaiseau - France

D. AUGER et Y. TCHENG

CEBTP, Paris - France

SOMMAIRE

La longueur libre optimale des tirants d'ancrage d'une paroi verticale soutenant un massif de sable sec à surface libre horizontale a été déterminée par des essais en modèles réduits avec des matériaux pulvérulents d'angle de frottement interne $\varphi_1 = 31^\circ \pm 1^\circ$ et $\varphi_2 = 24^\circ \pm 1^\circ$. La similitude ne cherchait pas à représenter les déformations élastiques, mais simplement la rupture plastique. Une règle simple a pu être dégagée pour la longueur libre d'un tirant isolé ou pour celle des tirants d'une ligne horizontale unique d'ancrages.

SUMMARY

Scale models were used in order to find the optimal length of the lines of anchors for vertical walls retaining a mass of dry sand with a horizontal surface using granular materials having an internal angle of friction $\varphi_1 = 31^\circ \pm 1^\circ$ and $\varphi_2 = 24^\circ \pm 1^\circ$. The similitude did not aim at a representation of elastic deformation but only of plastic failure. A simple rule was found for the free length in the case of either a single anchor or a single horizontal line of anchors.

1. INTRODUCTION

La longueur libre des tirants d'ancrage des murs de soutènement n'est pas déterminée actuellement d'une façon très rigoureuse. Les différents règlements, codes de construction ou recommandations ⁽¹⁾ proposent des méthodes de calcul peu satisfaisantes ou des règles

empiriques que les maîtres d'ouvrage ont tendance à considérer comme des minimums. Pourtant, il n'y a pas intérêt à avoir des tirants trop longs : d'une part ils sont plus coûteux et d'autre part ils introduisent inutilement une plus grande souplesse en tête des

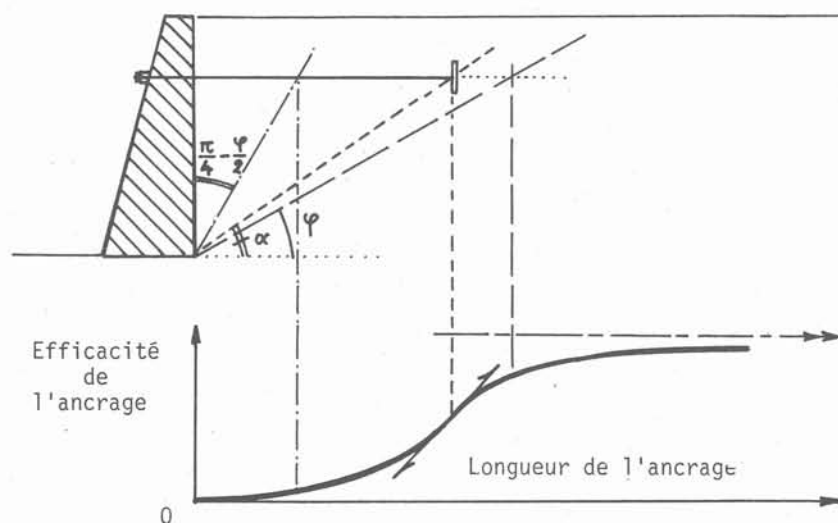


Fig. 1.

⁽¹⁾ Recommandations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage. Bureau Securitas, 2^e édition, Eyrolles, Paris (1977).

tirants. Il est donc souhaitable de définir avec plus de précision la longueur libre optimale des tirants.

Prenons l'exemple d'un mur vertical soutenant un massif à surface libre horizontale et d'une rangée de tirants horizontaux destinée à s'opposer au renverse-

ment du mur. Si les tirants sont ancrés à l'intérieur du coin de Coulomb, c'est-à-dire à l'intérieur du dièdre formé par le mur et par un plan incliné à $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ sur la verticale et issu du pied du mur, leur efficacité est nulle. S'ils sont ancrés au-delà du plan faisant un angle φ avec l'horizontale, c'est-à-dire au-delà du talus naturellement stable, leur efficacité ne doit pas croître beaucoup pour des tirants plus longs. L'efficacité des tirants en fonction de leur longueur (fig. 1) apparaît donc comme une courbe tangente à l'origine à l'axe des abscisses et ayant une asymptote horizontale : elle possède donc un point d'inflexion qui peut être consi-

déré comme donnant une longueur caractéristique. Il reste à définir la notion d'efficacité des tirants et à vérifier si la longueur caractéristique ainsi obtenue correspond à un changement qualitatif net de l'efficacité des tirants.

Nous nous proposons dans cette étude d'apporter une réponse expérimentale à cette question au moyen d'essais sur des modèles réduits. Les expériences ont été menées en parallèle au Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) et au Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) avec des matériaux pulvérulents différents pour obtenir des résultats qui puissent se compléter.

2. PRINCIPE DES ESSAIS

On a utilisé de simples modèles réduits en sable. L'échelle des longueurs étant égale à l'échelle des contraintes et les modules d'élasticité variant d'une façon non linéaire avec les contraintes, il n'y a pas de correspondance simple entre les déformations de la maquette et celles du prototype, c'est-à-dire un mur soutenant un massif du même sable. En conséquence, les petits déplacements qui précèdent la rupture des modèles réduits sont des phénomènes utiles à l'inter-

prétation des essais, mais qui ne permettent en aucun cas de prévoir l'amplitude des mouvements du prototype. Ces maquettes doivent être considérées comme utilisant une similitude volontairement très pauvre, limitée au domaine plastique et à la rupture, à l'exclusion des petites déformations du domaine élastique ou du domaine linéaire.

Il faut définir une mesure de l'efficacité d'un tirant. Soit h_0 la hauteur libre limite à partir de laquelle un

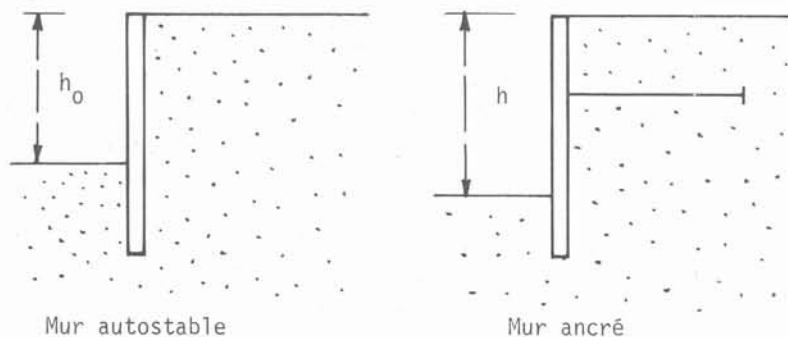


Fig. 2.

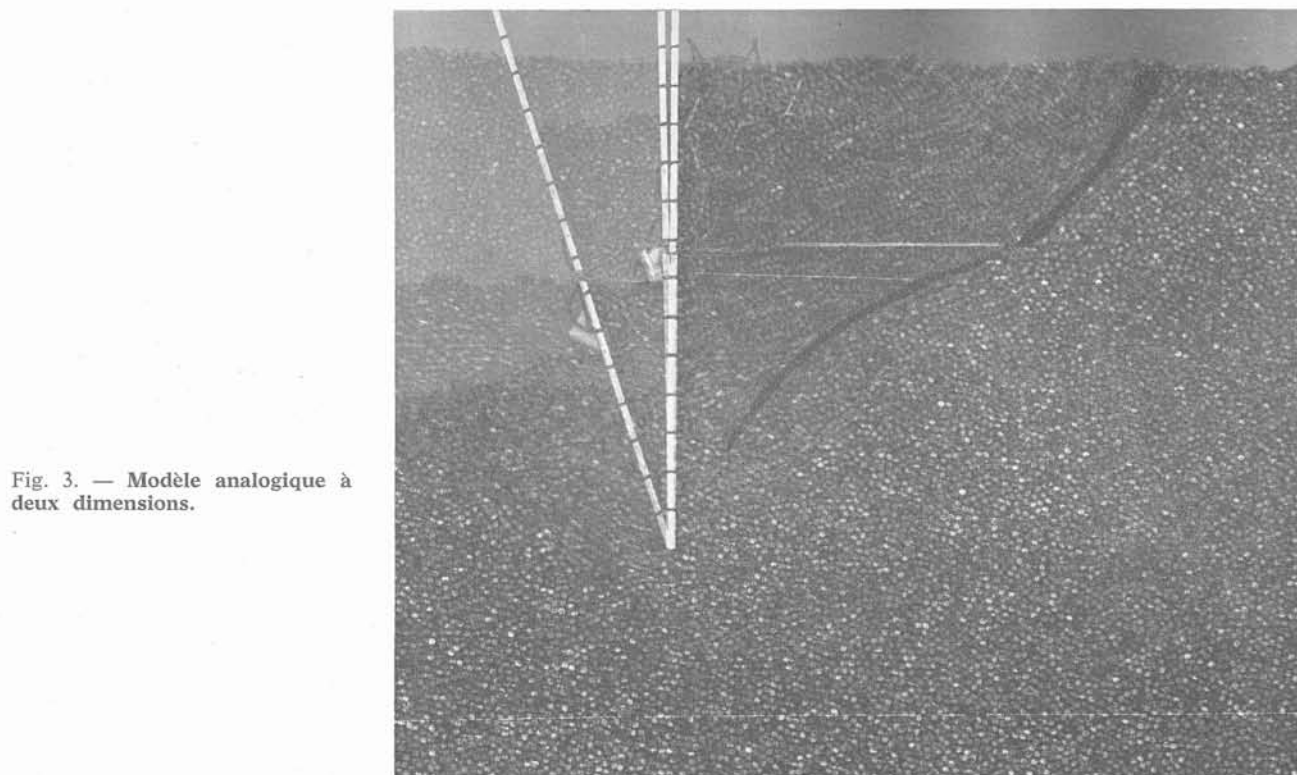


Fig. 3. — Modèle analogique à deux dimensions.

mur autostable s'effondre par renversement (fig. 2) et h la hauteur libre maximale du même mur, mais soutenu par un tirant. Le rapport $\frac{h}{h_0}$ permet de définir

une mesure de l'efficacité. En particulier $\frac{h}{h_0} = 1$ correspond à l'efficacité nulle. Le choix des tirants horizontaux se justifie pour obtenir une résistance du dispositif d'ancrage constante quelle que soit la longueur du tirant. Ce dispositif est constitué par un disque fixé à l'extrémité d'une corde à piano recouverte d'un souplisso. Le souplisso protège la tige du tirant du frottement du sable. Le disque symbolise le scellement d'une barre. On a vérifié au LMS, par des essais sur des maquettes à deux dimensions constituées par des empilements de rouleaux selon la méthode de Schneebeli-Dantu, qu'un ancrage par plaque donne des résultats qualitativement comparables à un ancrage par frottement (fig. 3). Il est évident que la résistance d'un tel ancrage pour un tirant incliné aurait varié avec la longueur du tirant, c'est-à-dire avec la profondeur de l'ancrage, obligeant à modifier le disque et compliquant inutilement les essais.

3. MODE OPERATOIRE

Les essais ont été menés de la façon suivante.

Le mur de soutènement est une plaque carrée rigide qui est mise en place et calée à droite et à gauche. Le sable est déposé en couches, par chute libre à hauteur constante à partir d'un tamis, symétriquement de chaque côté du mur et jusqu'aux deux tiers de la hauteur. Le ou les tirants munis de leurs plaques d'ancrage sont mis en place horizontalement. Le remplissage continue alors côté amont jusqu'à la hauteur du bord du mur. Les cales sont alors ôtées et on simule le creusement d'une fouille en enlevant le sable côté aval centimètre par centimètre, en notant les déplacements correspondants. Au début, les déplacements sont insensibles; on peut considérer que la rupture est généralisée et que des changements de géométrie se sont produits lorsque la rotation du mur a atteint 10° . La courbe hauteur libre devant le mur en fonction du déplacement présente une asymptote qui permet de définir un critère de rupture; on s'est efforcé de réaliser des massifs de sable tels que la courbe efforts-déformations ne présente pas de maximum, de fait on n'observe pas de lignes de glissement isolées, mais bien des domaines plastifiés limités par des surfaces en général assez nettement visibles, au moins en surface.

Les essais ont été menés avec des matériels et des matériaux différents :

- a) Au CEBTP, on a utilisé un sable de Fontainebleau sec, mis en place à une densité relative de 29 %, proche de la densité critique et à laquelle correspond un angle de frottement interne voisin de $\varphi = 31^\circ$ (γ de mise en place = $1.40 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$; $\gamma_{\min} = 1.31 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$; $\gamma_{\max} = 1.69 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$). Le sable de Fontainebleau est un sable siliceux fin ($\gamma_s = 2.66 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$; $d_{10} = 0.1 \text{ mm}$; $d_{60}/d_{10} = 1.45$)
 - diamètre des tirants = 2 mm (gainé d'un souplisso de 3 mm de diamètre);
 - ancrages : disques en laiton de 1 mm d'épaisseur et de 1 cm ou 1.2 cm ou 3 cm de diamètre selon les cas.

Par un calcul de poussée classique, on a évalué sommairement la force du tirant permettant de retenir le mur, en fonction de la hauteur d'accrochage. Le tirant n'a pas été placé trop près de la surface du sable afin que l'ancrage soit obtenu avec un disque de rayon suffisamment petit pour que la perturbation du massif autour de l'ancrage ne soit pas trop affectée par le gradient de pesanteur. Il fallait cependant que la résistance de l'ancrage soit suffisamment grande pour que h soit nettement différente de h_0 et que l'expérience soit sensible, mais aussi il fallait qu'elle ne soit pas trop grande et que la rupture se produise toujours par basculement du mur et non par chassement du pied : un changement de mode de rupture aurait en effet rendu l'interprétation des essais complètement illusoire. La profondeur et la force de l'ancrage ont été ainsi choisies par le calcul. La résistance du dispositif d'ancrage a été vérifiée par des essais d'arrachage en milieu indéfini et en adaptant le diamètre du disque par interpolation pour obtenir la résistance désirée. Enfin, au cours de chaque essai, les déplacements du mur ont été suivis de façon à s'assurer que le mouvement général restait un renversement du mur, même si le centre instantané de rotation était plus profond pour les murs ancrés que pour le mur autostable.

Dans les essais du CEBTP, on a mesuré les tractions dans les tirants au moyen d'un anneau dynamométrique de 2 cm de diamètre intérieur formant rotule et placé à l'extérieur du mur, traversé diamétralement par le tirant et muni d'extensomètres à résistance électrique. Ce dispositif a permis de tracer la courbe des efforts dans le tirant en fonction du déplacement de l'écran, en plus de la courbe des déplacements de l'écran en fonction de la hauteur de la fouille. De même, ce dispositif a permis de mettre en évidence l'évolution de la tension dans un tirant initialement précontraint.

- Dimension de l'écran : 50 cm $\times$ 50 cm.

Des fentes verticales dans l'écran permettaient de placer le ou les tirants à la hauteur voulue sans risque d'encastrement de la tige, ou des tiges, dans le mur. Les fentes inutilisées étaient obstruées.

- Dimensions de la cuve d'essais : canal de 51 cm de large, de 2 m de long, de 0.70 m de profondeur (soit 20 cm de sable sous le mur). L'intérieur des parois latérales du canal étaient rendues lisses par des plaques de verre pour diminuer l'influence du frottement et la jonction entre les parois et l'écran était réalisée par des soufflets en téflon.

- b) Au LMS, on a utilisé un sable de billes de verre sèches ($\gamma_s = 2.58 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$; $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$) mis en place à un poids volumique de $\gamma = 1.6 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$. Du fait du caractère sphérique des grains et de leur état de surface très lisse, la variation de volume en cours de cisaillement est pratiquement nulle. L'angle de frottement interne correspondant est $\varphi \approx 24^\circ$.

- Diamètre des tirants : 1 mm.
- Ancrages : disques en plexiglas de 1 mm d'épaisseur et de 2 cm de diamètre.
- Dimensions de l'écran : 25 cm $\times$ 25 cm avec fentes pour placer le ou les tirants aux positions voulues.
- Dimensions de la cuve d'essais : le massif de sable de billes de verre avait 50 cm de longueur, 25 cm de largeur, 30 cm de profondeur (soit 5 cm de sable sous le mur).

4. INTERPRETATION DES ESSAIS

A partir de la courbe du déplacement du mur en fonction de la hauteur de la fouille, on peut obtenir différents critères de rupture comme on le fait habituellement avec les courbes efforts-déformations. On peut définir la rupture par l'asymptote du déplacement, par un déplacement arbitraire, par un rapport d'affinité des différentes courbes, etc., quoi qu'il en soit les courbes de la figure 4 montrent nettement l'influence de la longueur du tirant. Les courbes A et A' représentent deux essais identiques et donnent une idée de la dispersion des résultats qui est faible. La courbe B correspond à un tirant précontraint ; elle est à comparer à la courbe C d'un tirant de même longueur non précontraint. On voit que les petites déformations sont influencées et réduites par la précontrainte, mais que la résistance à la rupture n'est pratiquement pas affectée. Ce résultat, qui est classique pour un corps de Tresca ($\varphi = 0$) élastoplastique semble pouvoir s'étendre aux structures (mur + tirant) dans un sol pulvérulent. Le tableau ci-dessous, interprété à partir des courbes de la figure 4, donne les résultats des essais d'un tirant unique, muni d'un disque d'ancrage de 3 cm de diamètre, en fonction de sa longueur, pour le sable de Fontainebleau, ainsi que la traction maximale dans le tirant.

TABLEAU I

Tirant isolé dans le sable de Fontainebleau.
Les chiffres indiqués dans le tableau correspondent à une rotation de l'ordre de 5° représentant un état de rupture visiblement généralisée.

Longueur (cm)	Dénivellation (cm)	Traction (N)
0	$h_o = 35.6$	(mur autostable)
30	38.6	17.5
35	39.3	20.3
40	45.0	39.1
50	42.5	non mesurée
50	45.0	28.9

La figure 5 représente la courbe de l'efficacité du tirant en fonction de sa longueur. La précision des résultats ne permet pas de placer exactement le point d'inflexion de la courbe ; on voit néanmoins que

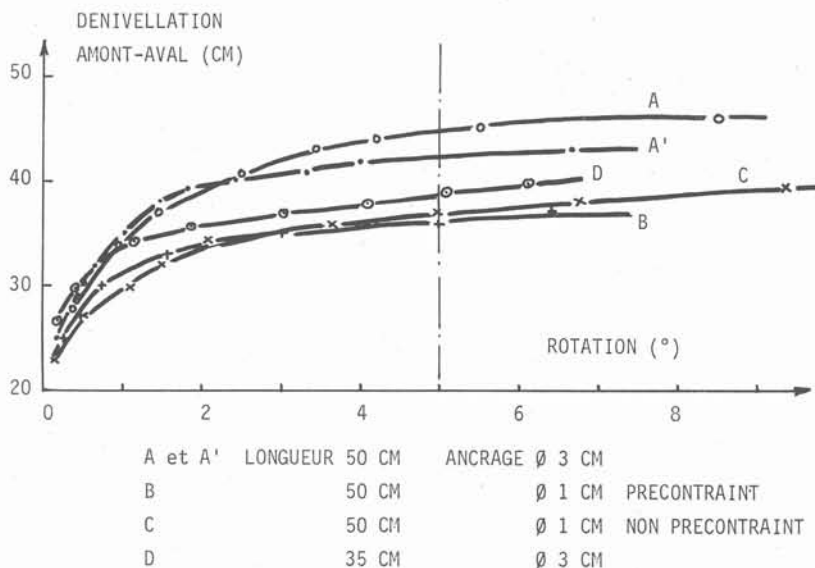
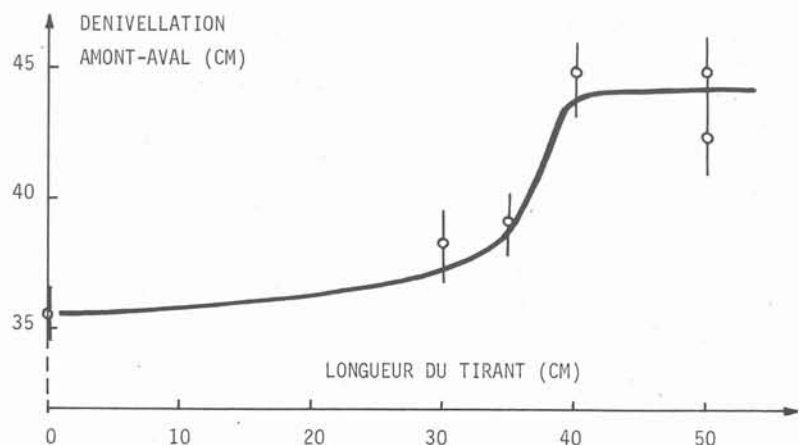


Fig. 4. — Tirants isolés dans du sable de Fontainebleau.

Fig. 5. — Tirants isolés dans du sable de Fontainebleau.



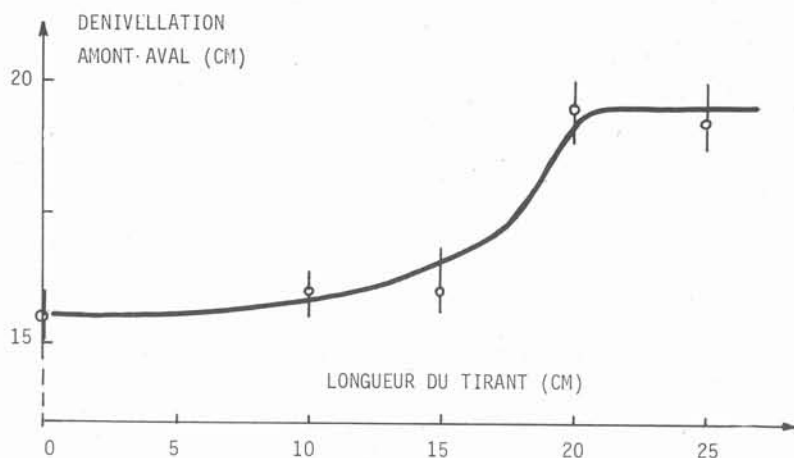


Fig. 6. — Tirants isolés dans des billes de verre.

Fig. 7. — Groupe de cinq tirants dans du sable de Fontainebleau.

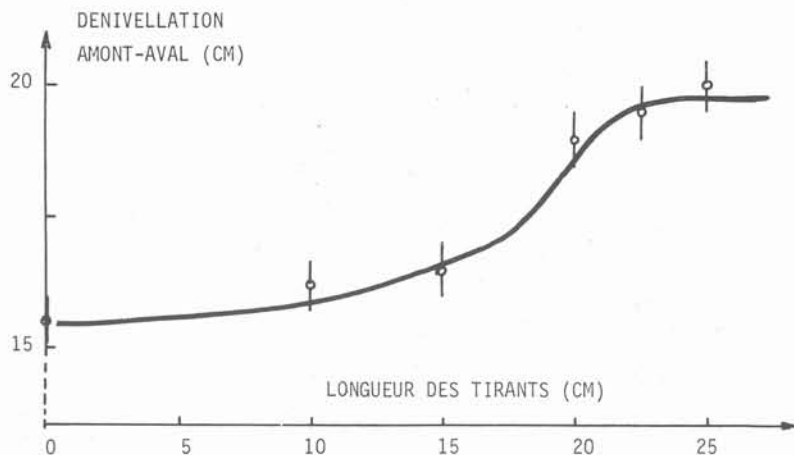
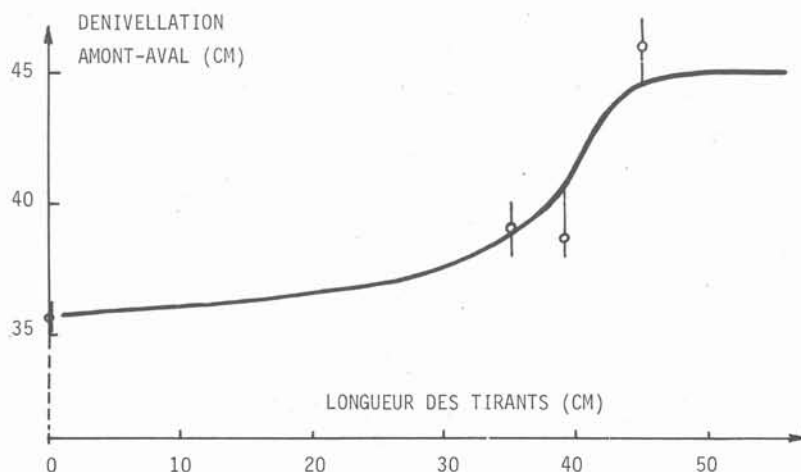


Fig. 8. — Groupe de cinq tirants dans des billes de verre.

l'efficacité maximale est déjà atteinte lorsque la longueur du tirant dépasse 40 cm.

La figure 6 représente la courbe analogue de l'efficacité du tirant unique dans un massif de billes de verre, en fonction de la longueur du tirant. L'efficacité maximale est atteinte lorsque la longueur dépasse 20 cm.

Les essais précédents étudiaient le comportement d'un élément de mur soutenu par un seul tirant. Des essais ont été effectués avec une ligne horizontale de

plusieurs tirants de façon à examiner l'influence du voisinage des tirants sur la longueur optimale, ce qui est plus réaliste si l'on veut prévoir ce qui peut se produire pour les structures les plus courantes. Le tableau ci-dessous donne les résultats des essais dans du sable de Fontainebleau avec une rangée de cinq tirants munis de disque d'ancrage de 1.2 cm de diamètre (donnant à peu près la même résistance totale que le tirant unique précédent), espacés de 10 cm ; les tirants marginaux étaient placés à 5 cm des bords.

TABLEAU II

Nappe de cinq tirants dans du sable de Fontainebleau.

Les chiffres indiqués dans ce tableau correspondent à un état de rupture généralisée obtenu après une rotation de l'ordre de 2.5° . Le phénomène de rupture est donc beaucoup plus net que dans le cas du tirant isolé.

Longueur (cm)	Dénivellation (cm)	Traction dans le tirant central (N)	Traction dans un tirant latéral (N)
35	40.0	4.9	4.4
39	38.6	8.4	8.1
45	46.0	10.8	non mesurée

La figure 7 représente la courbe de l'efficacité des tirants en fonction de leur longueur; on voit que l'efficacité est maximale lorsque la longueur dépasse 45 cm.

La figure 8 représente une courbe analogue de l'efficacité d'une nappe de cinq tirants dans un massif de billes de verre, en fonction de leur longueur. L'efficacité maximale est atteinte lorsque la longueur dépasse 22.5 cm.

Si l'on joint la base du mur et les points où l'on a obtenu un ancrage d'efficacité maximale on peut calculer les angles minimaux suivants avec l'horizontale :

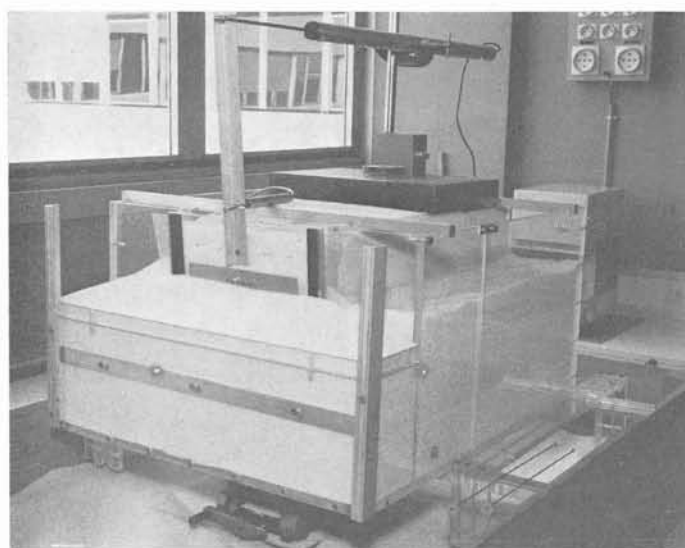


Fig. 9. — Cuve d'essais des tirants d'ancrage dans des billes de verre.

- pour le sable de Fontainebleau :
 - tirant isolé $\alpha = 40^\circ$
 - nappe de tirants $\alpha = 37^\circ$
- pour le sable de billes de verre :
 - tirant isolé $\alpha = 40^\circ$
 - nappe de tirants $\alpha = 37^\circ$

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans deux séries d'essais complémentaires avec des matériaux distincts ayant notamment des angles de frottement interne très différents donnent des longueurs libres optimales des tirants d'ancrage très voisines. Ce résultat n'est pas étonnant dans la mesure où les formes des surfaces de glissement des structures (mur-sol pesant-tirants) sont voisines lorsque les ruptures se produisent par déversement du mur. On remarque en particulier que la longueur optimale des tirants est plus grande pour les groupes de tirants que pour les tirants isolés, ce qui était prévisible et qui est une manifestation de l'interférence des ancrages. La règle d'avant-projet qui consiste à placer le scellement des ancrages au-delà d'une ligne à 45° issue du pied du mur se trouve ainsi vérifiée, mais cette conclusion n'est confirmée par la présente étude que pour des massifs de terre à surface libre horizontale, avec parement vertical, sans force intérieure ou extérieure inclinée comme pourraient l'être, par exemple, les pressions de courant ou des sollicitations dynamiques.