COMPORTEMENT DES TIRANTS PRÉCONTRAINTS DANS UNE ARGILE PLASTIQUE

Behaviour of prestressed anchors in plastic clay

par

M. BUSTAMANTE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Paris - France

F. DELMAS et J. LACOUR

Entreprise SIF-BACHY - Paris - France

SOMMAIRE

Les possibilités remarquables qu'offrent les tirants dans les domaines les plus divers du génie civil, conduisent à envisager leur mise en œuvre dans les sols argileux. Toutefois, le manque d'études systématiques relatives à leur tenue à long terme dans ces matériaux, oblige encore les constructeurs à ne pas les utiliser comme organes définitifs.

A partir d'essais en vraie grandeur effectués sur dix tirants scellés dans une argile plastique, les auteurs se sont proposés d'étudier les différents aspects de leur comportement.

Le programme de recherche comportait également le déterrement des tirants.

Les résultats obtenus à ce jour apportent un début de réponse aux problèmes suivants :

- dispersion des tractions limites T_L et admissibles T_A ;
- validité de la méthodologie d'épreuve basée sur la recherche d'une traction critique T_C ;
- comportement d'un tirant au sein d'un groupe ;
- mécanisme de transmission de l'effort de traction au scellement ;
- incidence des paramètres de l'injection sur la formation de la zone scellée.

SUMMARY

The outstanding performances offered by anchors in the various fields of Civil Engineering leads to an extension of application in clayey soils.

However, the lack of systematic study concerning the long term behaviour in this type of soil is a limitation for the designer to use them as permanent anchorages.

From full scale tests carried out on 10 anchors set in a plastic clay, the authors of this paper study the different aspects of the carrying behaviour of the anchors.

The research program included also the unearthing of the anchors.

Results obtained bring partial answers to the following topics:

- scattering of the values of ultimate and working loads;
- validity of the testing procedure based on the determination of a critical load;
- behaviour of a single anchor as part of a group of anchors;
- stress distribution along the grouted length;
- influence of the main grouting factors on the construction of the grouted part.

1. INTRODUCTION

Les possibilités remarquables qu'offrent les tirants injectés précontraints dans les domaines les plus divers du Génie Civil, incitent parfois les constructeurs confrontés à certaines configurations de terrains, à envisager leur mise en œuvre dans les argiles plastiques. Toutefois, le manque ou la rareté d'études systématiques relatives à la tenue des scellements injectés dans ce type de matériau, soupçonnés de présenter des risques de fluage et des performances médiocres obligent ces mêmes constructeurs à rechercher pour les tirants définitifs, des sols non argileux.

Partant d'essais en vraie grandeur effectués sur des tirants scellés dans une argile plastique, on s'est proposé d'examiner les différents aspects de leur résistance :

- 1) Validité de la méthode de détermination de la traction de service T_A , basée sur la recherche de la traction critique T_C .

- 2) Importance et dispersion des tractions limites T_L .
- 3) Comportement du tirant au sein d'un groupe.
- 4) Incidence des paramètres de l'injection sur la tenue du bulbe de scellement et la formation de ce dernier.
- 5) Mécanisme de transmission de l'effort de traction le long du scellement.
- 6) Corrélation entre les caractéristiques géotechniques de l'argile et la résistance du tirant.

Le programme d'étude comportait le déterrement des tirants et notamment de leur partie scellée. Comme il n'a pas été procédé à l'excavation de certains tirants toujours soumis à des essais de longue durée, on ne présentera qu'une partie des résultats obtenus à ce jour.

2. RECONNAISSANCE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DE L'ARGILE

Préalablement à la mise en œuvre des tirants d'essais et dans le but de définir les propriétés de l'argile, on a exécuté :

- un sondage carotté avec prélèvement d'échantillons intacts ;
- un essai de pénétration statique ($\varnothing$ 45 mm) ;
- trois sondages pressiométriques avec essais tous les mètres ;
- la gamme complète d'essais d'identification et de cisaillement sur échantillons intacts.

Au droit du plot d'essai, et sur toute la hauteur des bulbes de scellement, on rencontre l'argile des Flandres

(Ypresien). Le tableau 1 en synthétise les caractéristiques géotechniques essentielles déterminées en laboratoire.

Les essais en place, qui confirment d'ailleurs l'homogénéité de l'argile, ont respectivement donné pour le même niveau :

a) Résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique : $R_p = 1$ à 1.5 MPa

b) Pression limite : $p_l = 0.5$ à 0.7 MPa

Module pressiométrique : $E = 4$ à 6 MPa.

TABLEAU 1

Prof. (m)	Essais d'indentification				Essais de cisaillement			Compressibilité
	γ (kN/m ³)	W (%)	W _L (%)	I _p	C _{ult} (kPa)	C' (kPa)	ϕ' (°)	Etat de Consolidation
5	185	30	80	50	60			Argile surconsolidée $\sigma'_o < \sigma'_c$
à	à	à	à	à	à	38	12	
7	195	40	90	60	80			

3. IMPLANTATION, MISE EN ŒUVRE ET EQUIPEMENT DES TIRANTS

Les essais ont porté sur un total de dix tirants du type TMD (brevet Sif-Bachy) [1], répartis sur trois plots (fig. 1) :

- plot A (tirants A₁, A₂, A₃, A₄) ;
- plot B (tirants B₁, B₂, B₃) ;
- plot C (tirants C₁, C₂, C₃) ;

Le tableau 2 résume les caractéristiques de chaque tirant ainsi que ses paramètres d'injection.

Certains tirants ont été équipés de tubes-logements ($\varnothing$ 27/30 mm) permettant de recevoir un extensomètre amovible [2] ainsi que de deux tubes ($\varnothing$ 10/12 mm) logeant chacun un fil d'invar reliant les extrémités du bulbe aux dispositifs de mesure en surface.

Fig. 1. — Implantation et coupe sur les plots d'essais.

TABLEAU 2

TIRANT	GEOMETRIE			PARAMETRES D'INJECTION				
	Longueur scellée L_S (m)	Longueur Libre ⁽¹⁾ L_L (m)	Section armature	Pression moyenne (MPa)	Volume de coulis (m ³)	Dosage du coulis C/E	Nombre de phases	Coloration du coulis de scellement ⁽²⁾
A ₁ A ₂ A ₃ A ₄	6	6.20	940 mm ² (10 T 13)	0.5 0.5 0.5 0.5	0.955 0.958 0.890 0.858	2.27	3	Aucune
B ₁ B ₂ B ₃	6	7.20		0.5 0.5 0.5 à 1.0	0.325 0.498 1.340	2.27	1 2 3	R + J N + R N + J + R
C ₁ C ₂ C ₃	6	7.20		0.5 0.5 0.5	0.725 0.848 0.773	2.27	3	Aucune

⁽¹⁾ Celle-ci inclut un séparateur gonflable de 1 m.

⁽²⁾ R = Rouge J = Jaune N = Noir.

4. PROGRAMMES ET DISPOSITIFS DES ESSAIS

L'un des buts essentiels de l'expérimentation a consisté à vérifier si la méthode de détermination de la traction de service (T_A), basée sur l'interprétation des mesures de fluage du scellement, s'appliquait au cas des argiles plastiques.

On rappellera brièvement le principe de cette méthode [3], [4].

On établit tout d'abord, pour différents niveaux de traction, l'évolution des déplacements absolus de l'extrémité du tirant (Δl) en fonction du logarithme du temps (log. t). Les relations obtenues, qui donnent en fait la mesure du fluage du scellement, présentent certaines propriétés :

- elles restent pratiquement linéaires (*) jusqu'à une valeur critique de la traction (T_c), et cela indépendamment de la vitesse de chargement ;
- leur pente (α_i) croît avec le taux de traction (T_i).

La traction critique (T_c) peut être déterminée graphiquement. Le diagramme pente (α_i)-traction (T_i) est linéaire jusqu'à la traction critique (T_c) et s'incurve au-delà de cette valeur, ce qui correspond à une accélération du fluage.

La valeur de la traction de service (T_A), appelée aussi traction admissible, est prise égale à une fraction de

la traction critique (T_c). Les recommandations françaises actuellement en vigueur [5] préconisent un coefficient minorateur égal à 1.1 (**). Les normes allemandes, par contre, stipulent d'adopter comme valeur de la traction de service (T_A) un taux de traction pour lequel le fluage reste inférieur à 6 mm pour un intervalle de temps de l'ordre de cinquante ans [6].

Les programmes de chargement retenus (tableau 3) consistaient en une succession de paliers de traction croissants, d'égales durées et intensités. Au total, quinze essais ont été réalisés, dont quatorze du type statique et un du type cyclique.

La précision de la mesure des déplacements de la tête de l'armature et des extrémités du bulbe, par rapport à des points fixes, est de l'ordre du 1/100 de millimètre. Les efforts appliqués ont été mesurés au moyen de dynamomètres à jauges, intercalés entre les massifs de réaction et les vérins. L'ensemble des appareils de mesure utilisés a fait l'objet d'un étalonnage préalable. La figure 2 offre une vue générale des dispositifs de mesure et de mise en traction utilisés en surface.

(*) A l'exception des toutes premières minutes d'application de la charge.

(**) Ces mêmes recommandations préconisent un coefficient de 1.5 sur la traction limite (T_L). Il y a lieu d'adopter comme traction de service (T_A), la plus petite des valeurs obtenues par application de ces deux coefficients minorateurs.

Fig. 2. — Vue générale du plot C. Exécution d'un essai de groupe sur trois tirants.

TABEAU 3

Tirant	Essai n°	Traction maximale atteinte au cours de l'essai ⁽¹⁾	Durée des paliers	Incrément de traction par palier (kN)	Déterrement ⁽²⁾
A ₁	1	T _c	1 h	100	—
	2	T _L (chargement cyclique)	1 h	100	
	3	T _L	1 h	100	
A ₂	1	T _L	1 h	100	—
	2	T _L	1 h	100	
A ₃	1	T _c	1 h	100	—
	2	Calage à long terme < T _c	1 an	100	
A ₄	1	T _c	1 h	100	—
	2	T _L	6 h	100	
B ₁	1	T _L	1 h	100	+
B ₂	1	T _L	1 h	100	+
B ₃	1	T _L	1 h	100	+
C ₁	1	T _L	30 mn	75	+
C ₂	1	T _L	1 h	150	+
C ₃	1	T _L	30 mn	75	+

⁽¹⁾ T_c : traction critique ; T_L : traction limite.

⁽²⁾ A ce jour, les tirants du plot A n'ont pas été excavés.

5. L'INTERPRETATION DES MESURES DE FLUAGE ET LA VALIDITE DE LA METHODE

Les figures 3 a et b présentent un exemple caractéristique de relation $\Delta l - \log t$ et de détermination graphique des tractions critiques (T_c), pour le tirant A_4 .

On remarque :

- la quasi linéarité (à l'exception des toutes premières minutes des relations $\Delta l - \log t$ jusqu'à la traction critique (T_c);
- la similitude des relations $\Delta l - \log t$, correspondant à la tête du bulbe et l'extrémité des torons, ce qui prouve bien que l'observation des déplacements des torons en surface est bien représentative de ce qui se passe au niveau du scellement (fig. 3 a);

- l'existence d'un coude caractéristique sur les graphiques $\alpha_i - T_i$, au-delà duquel les fluages augmentent non seulement très rapidement avec le temps mais cessent d'être prévisibles en raison de la non-linéarité de la relation $\Delta l - \log t$ (fig. 3 b);
- enfin, que les différentes relations caractéristiques ont exactement les mêmes allures que celles obtenues pour des tirants scellés dans des matériaux pulvérulents.

L'interprétation des essais effectués sur A_4 (fig. 4), sollicité une première fois par paliers de une heure, puis par paliers de six heures conduit à des valeurs

b)

Fig. 3 a et b. — Tirant A_4 . Relations $\Delta l - \log t$ et $\alpha_i - T_i$ pour l'extrémité des torons et la tête du scellement. Paliers de une heure.

a)

Fig. 4. — Tirant A_4 . Détermination de la traction critique T_c à partir des mesures de fluage effectuées lors de paliers de une à six heures.

Fig. 5. — Evolution dans le temps de la tension du tirant A₃.

de la traction critique (T_c) du même ordre (850 kN). Ceci étant la preuve que T_c ne dépend pas de la vitesse de chargement, on voit qu'il semble possible de prédire le comportement futur du scellement à partir de conclusions tirées d'un essai d'arrachement ne durant tout au plus qu'une dizaine d'heures.

Il faut toutefois faire remarquer, que le fait de ne posséder qu'une seule expérimentation de ce type, en limite la portée.

L'ensemble des essais auxquels a été soumis le tirant A₃ montre qu'un tirant calé à une traction légèrement inférieure (825 kN) à celle de sa traction critique T_c (850 kN) n'indique pas de perte de tension notable (fig. 5). En effet, en l'espace de quatre mois, le tirant A₃ a perdu environ 100 kN sur lesquels 65 kN sont dus à l'incidence de la mise en tension du tirant A₄ situé à proximité immédiate (voir à ce sujet § 7).

Le tableau 4 présente les valeurs des tractions caractéristiques T_c et T_A pour les tirants des plots A et B, ainsi que les valeurs des fluages correspondants, calculés pour des intervalles de 10 à 100 mn.

Les essais ont montré par ailleurs :

- que de faibles dépassements de la traction critique T_c (de l'ordre de 10 % de cette dernière) n'entraînent aucune diminution de la capacité d'ancrage;
- que des sollicitations de types cycliques d'amplitudes modérées (de l'ordre du 1/10 de la traction limite T_L) ne détériorent pas la tenue d'un scellement ;
- qu'une fois la traction limite T_L atteinte, un tirant perdait environ 30 % de sa capacité d'ancrage initiale.

TABLEAU 4

Tirant	Traction critique T_c (kN)	f_{TC} ⁽¹⁾ (mm)	Traction de service T_A (kN) ⁽²⁾	f_{TA} ⁽³⁾ (mm)	Traction limite T_L (kN)	T_L/T_A
A ₁	1 050	0.4	930	0.3	1 200	1.30
A ₂	850	0.4	760	0.3	1 100	1.45
A ₃	850	0.5	750	0.3	1 200	1.60
A ₄	850	0.5	760	0.4	1 000	1.35
B ₁	600	0.5	530	0.3	800	1.50
B ₂	700	0.6	620	0.5	900	1.45
B ₃	850	0.6	760	0.5	1 100	1.45

(¹) f_{TC} : fluage correspondant à la traction critique T_c .

(²) Calculée en frappant T_c d'un coefficient minorateur égal à 1.1.

(³) f_{TA} : fluage correspondant à la traction de service T_A .

6. LES VALEURS DES TRACTIONS LIMITES ET LEUR DISPERSION

Le tableau 5 présente l'ensemble des valeurs des tractions limites (T_L) obtenues pour la totalité des tirants.

TABLEAU 5

Tirant	A ₁	A ₂	A ₃ ⁽¹⁾	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
Traction limite T_L (kN)	1 200	1 100	1 200	1 000	800	900	1 100	950	750	900

(¹) Cette valeur est estimée car le tirant A₃, toujours soumis à un essai de longue durée, n'a pas pu être sollicité jusqu'à la rupture de son scellement.

On constate que dans l'ensemble, les valeurs des tractions limites (T_L) sont particulièrement élevées compte tenu de la modestie des longueurs de scellement ($l_s = 6$ m) et de la médiocrité relative du sol.

Les résultats du plot A sont particulièrement intéressants. En raison de la quasi-similitude de leurs paramètres d'injection (voir tableau 2), il est possible de se faire une idée sur la dispersion des tractions limites (T_L). Il apparaît que pour des tirants dont l'exécution

du scellement a fait l'objet d'un maximum de soins, l'écart entre tractions limites (T_L) extrêmes peut atteindre 200 kN, ce qui situe ces mêmes tractions à environ ± 10 % de la valeur moyenne (soit 1 125 kN).

Seule l'observation visuelle des bulbes de scellement qui pourrait expliquer la raison de ces écarts, n'a pas pu être effectuée pour l'instant. L'étude de la résistance à long terme du tirant A_3 interdisant toute excavation du plot A.

7. RESISTANCE DU TIRANT AU SEIN DU GROUPE

Le même tableau 5 indique, pour le plot C, des tractions limites (T_L) nettement inférieures (en moyenne 25 % de moins que celles du plot A) pour des paramètres d'injection somme toute très voisins (voir tableau 2).

Les trois tirants de ce plot, dont les entre-axes sont de 1 m, ont fait l'objet d'un essai de groupe consistant à les mettre en tension simultanément tout en mesurant le fluage du scellement de chaque tirant (fig. 2).

Le programme de chargement observé, présentait quelques particularités (fig. 6) :

- le taux de traction appliqué aux tirants latéraux C_1 et C_3 est resté constamment supérieur à celui du tirant central C_2 ;
- lors de l'application d'un nouvel incrément de tension aux tirants C_1 et C_3 , la traction de palier correspondante est rigoureusement maintenue sur le tirant central C_2 .

L'analyse et la comparaison des relations $\Delta l - \log t$ a montré :

- que toute application de nouveau palier de charge aux tirants latéraux C_1 et C_3 provoque une augmentation nette du déplacement du scellement du tirant central C_2 , mais cela uniquement lors des premières minutes. On observe par la suite une stabilisation, tout au moins jusqu'à la traction critique (T_c) ;
- que dans l'ensemble, à taux égal de traction, le fluage du tirant central (C_2) est légèrement plus important que celui des tirants voisins et sa traction limite (T_L) inférieure, d'environ 20 %, à celle des tirants C_1 et C_3 . Le déterrement des bulbes a permis de vérifier que cet écart de capacité d'ancrage ne pouvait être nullement attribué à la géométrie du bulbe : le diamètre moyen du tirant central C_2 étant même légèrement supérieur à celui du tirant latéral C_1 . La raison semble bien être la proximité des tirants. L'excavation a montré que les surfaces latérales des bulbes du plot C se trouvaient parfois à moins de 70 cm.

Fig. 6. — Programmes de chargement des tirants C_1 , C_2 et C_3 .

Parallèlement, l'interprétation des résultats obtenus sur le tirant A_3 confirme l'incidence défavorable de la mise en tension d'un tirant sur un tirant voisin déjà calé.

Le tirant A_3 , soumis à un essai de longue durée (six mois) a été calé à une traction voisine de 825 kN. L'arrachement du tirant A_4 , situé à 2 m du tirant calé A_3 , a provoqué une perte de tension irréversible de ce dernier tirant de l'ordre de 65 kN, soit 8 % environ de la tension de blocage (fig. 5).

Un autre essai, effectué sur le tirant A_1 , situé cette fois à 4 m de A_3 , n'a entraîné aucune chute de tension (fig. 5).

L'ensemble des observations effectuées sur les plots C et A semblent indiquer que, dans notre cas précis, un écartement de 2 m entre tirants constitue une valeur en-dessous de laquelle il n'est pas prudent de descendre si l'on ne tient pas à diminuer considérablement la capacité d'ancrage des tirants.

8. LES PARAMETRES DE L'INJECTION ET LA RESISTANCE ULTIME DU TIRANT

On envisageait d'étudier initialement sur le plot B, pour des longueurs et des quantités de coulis injectées identiques, l'incidence d'une variation de la pression d'injection sur la traction limite (T_L).

La réalisation des tirants du plot A, mis en œuvre en premier, montra que la pression d'injection se stabilisait toujours et pour l'ensemble des phases, aux alentours de 0.5 MPa (pression voisine de la pression limite p_l).

On décida alors de faire uniquement varier le nombre de phases d'injection, les quantités de coulis injectées devant rester identiques pour les trois tirants. Mais là encore, l'apparition de résurgences conduisit à limiter les quantités de coulis prévues, manifestement trop élevées.

On se trouva finalement obligé d'étudier l'effet conjugué du nombre de phases et des quantités injectées, sur la résistance ultime.

Fig. 7 a. — Incidence des quantités de coulis entrant dans la constitution du bulbe (V_s) sur les tractions T_L et T_c .

Fig. 7 b. — Incidence des quantités de coulis injectées (V_i) sur les tractions T_L et T_c .

Les essais de traction effectués sur les tirants des plots A et B, ainsi que l'observation des tirants déterrés de ce dernier plot, montrent :

- que si les tractions T_L et T_c d'un tirant augmentent en principe avec la quantité de coulis (V_s) entrant effectivement dans la constitution du scellement (fig. 7 a), au-delà d'une certaine quantité injectée (V_i), ces mêmes tractions cessent de croître (fig. 7 b) ;
- que les tractions T_L et T_c augmentent avec le nombre de phases d'injections (fig. 7 a et 7 b). Les tirants du plot A injectés en trois phases et le tirant B₃, également injecté en trois phases présentent, malgré des quantités injectées (V_i) quelque peu différentes, des tractions T_L et T_c du même ordre. Le partage de la quantité globale de

coulis à injecter en plusieurs phases favorise, semble-t-il, la constitution d'un bulbe de scellement plus important et par conséquent capable de mobiliser des efforts de traction plus élevés.

Pour ce qui est des deux tirants C₁ et C₂ également déterrés (*), la proportionalité de la relation « capacité d'ancrage-quantité injectée » est moins évidente. Si, d'une part, les tractions limites (T_L) des tirants C₁ et B₂ sont bien du même ordre (900 kN) pour des quantités de coulis effectives très voisines (0.28 contre 0.25 m^3), la résistance ultime (T_L) du tirant central C₂, dont le volume réel du bulbe est égal à 0.58 m^3 , n'a pas excédé 750 kN.

On voit par là toute l'incidence du facteur « écartement entre tirants » sur une relation du type « capacité d'ancrage - quantité de coulis ».

9. L'INJECTION ET LA FORMATION DU BULBE DE SCHELLEMENT

L'observation du mécanisme de formation des bulbes a été également effectuée sur les tirants du plot B : les coulis ayant été colorés pour mieux discerner les différentes phases d'injection.

On a pu établir pour chaque tirant déterré, à partir du relevé des diamètres, une comparaison entre la quantité de ciment injectée à partir de la surface (V_i)

et la quantité de ciment présente dans le bulbe autour de l'armature (V_s). Le tableau 6 indique le relevé des différents paramètres (fig. 8).

On remarque pour les tirants du plot B :

- que B₁, injecté en une phase (0.077 m^3 de coulis par manchette) présente un maximum de déperditions ;
- que B₂, injecté en deux phases (0.0385 m^3 de coulis par manchette et par phase) présente une déperdition plus faible ;

(*) Le tirant C₃ n'a pas pu être déterré pour des raisons de stabilité de fouille.

TABLEAU 6

Tirant	Quantité de coulis injecté V_i (m^3)	Quantité de coulis autour de l'armature V_s (m^3)	Déperdition (%)	Diamètre moyen du bulbe (cm)
B ₁	0.310	0.090	env. 70	16
B ₂	0.450	0.220	env. 50	24
B ₃	1.200	0.420	env. 65	24
C ₁	0.650	0.250	env. 60	23
C ₂	0.780	0.545	env. 30	36

(¹) Les valeurs indiquées ne tiennent pas compte des quantités injectées dans le séparateur.

- que B₃, injecté en trois phases (0.088 m³ de coulis par manchette et par phase) présente à nouveau une déperdition de l'ordre de celle du premier tirant.

Ces observations restent difficiles à interpréter. Leur analyse incite toutefois à penser que le partage des quantités injectées en plusieurs phases, réduit quelque peu les déperditions.

On est cependant frappé par les taux élevés de déperditions du coulis. Celles-ci, provoquant le claquage de l'argile, se présentent sous forme de nappes horizontales d'épaisseurs variables. Ces nappes, se propageant à quelques mètres du scellement, finissent par se ramifier en réseaux extrêmement tenus, épousant le système de fissuration naturel de l'argile. On est aussi en droit de se demander si les différents cla-

quages et apophyses n'influent pas sur la résistance globale du tirant par l'amélioration des propriétés de l'argile, notamment au contact immédiat du bulbe.

Les observations effectuées sur le plot C, inciteraient aussi à croire que le facteur « écartement entre tirant » a une répercussion certaine sur l'importance des déperditions : le tirant C₂, injecté entre un tirant terminé (C₃) et un tirant déjà partiellement injecté (C₁), accuse le plus faible taux de pertes.

La répartition du coulis des phases consécutives est quelconque. Le coulis de la première phase ayant fait prise est brisé, puis repoussé vers l'extérieur ou contourné par le coulis des phases suivantes (fig. 8 et 9). On obtient bien, après chaque phase, une augmentation notable du diamètre.

Fig 8. — Géométrie des bulbes de scellement des tirants B₂ et C₁.

Fig. 9. — Tirant B₂. Aspects du bulbe de scellement. Une partie des coulis a été enlevée pour montrer l'armature.

10. LA TRANSMISSION DE L'EFFORT DE TRACTION LE LONG DU SCHELLEMENT

La répartition des déformations unitaires $\Delta l/l$, mesurées à l'aide de l'extensomètre logé au sein du bulbe (fig. 10), a la même allure que celle observée sur les pieux arrachés. Les difficultés liées à la détermination du module équivalent du bulbe, n'ont pas permis pour l'instant d'établir les courbes de mobilisation du frottement latéral.

Il faut signaler que lors du déterrement, on a pu observer au contact du bulbe des surfaces brillantes et striées, qui pourraient être des surfaces de cisaillement. Celles-ci prouveraient en quelque sorte la similitude des mécanismes de ruptures des tirants et des pieux arrachés.

Enfin, l'observation du bulbe a mis en évidence l'extrême fissuration du coulis de la zone de scellement et cela sur toute la longueur.

Fig. 10. — Répartition des déformation $\Delta l/l$ le long du scellement.

11. LES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DE L'ARGILE ET LA RESISTANCE DU TIRANT

Dans la mesure où la rupture s'effectue au contact de la surface latérale du bulbe, on peut tenter de

déduire des valeurs de frottement latéral unitaire $T_{\max}$ correspondantes.

Le tableau 7 présente ces valeurs pour le plot B.

TABEAU 7

Tirant	Traction limite T_L (kN)	Diamètre moyen (cm)	Surface latérale du scellement ⁽¹⁾ (m ²)	Frottement latéral unitaire $T_{\max}$ (kPa)
B ₁	800	16	env. 3.00	265
B ₂	900	24	env. 4.50	200
B ₃	1 100	24	env. 4.50	240

⁽¹⁾ Celle-ci inclut la surface du séparateur gonflable.

On voit combien ces valeurs sont élevées, trois fois plus élevées en moyenne que les valeurs de cisaillement mesurées en laboratoire (60 à 80 kPa). De pareilles valeurs pourraient s'expliquer par une aug-

mentation du taux de résistance de l'argile au voisinage immédiat du bulbe, provoquée par l'injection (voir § 9).

12. CONCLUSIONS

En dépit du trop faible nombre d'essais réalisés, notamment ceux portant sur de longues durées, on retiendra comme conclusions principales :

- que les tirants injectés peuvent être utilisés comme ancrages provisoires et définitifs dans les argiles plastiques, à condition de ne pas être sollicités au-delà d'une traction de service (T_A) définie comme précédemment (voir § 4) ;
- qu'il est possible, pour une argile plastique, de prédire à partir de conclusions tirées d'un essai à court terme, des enseignements relatifs au compor-

tement à long terme d'un ancrage injecté (voir § 5) ;

- que la traction limite (T_L) d'un tirant isolé scellé dans une argile plastique, reste essentiellement proportionnelle à la quantité effective de coulis entrant dans la constitution du bulbe (voir § 8) ;
- enfin, qu'il existe pour les tirants scellés dans ce type de sol, un phénomène « d'effet de groupe », se traduisant par une diminution sensible de la capacité d'ancrage en deçà d'une valeur critique de l'écartement (2 m dans notre cas) entre tirants (voir § 7).

13. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CLEMENT - NAVARRO. — Les tirants en terrains meubles, type TM. *Travaux* (octobre 1972).
- [2] BUSTAMANTE - JEZEQUEL. — Mesures des elongations dans le pieux et tirants à l'aide d'extensomètres amovibles. *Travaux* (décembre 1975).
- [3] CAMBEFORT - CHADEISSON. — Critère pour l'évaluation de la force portante d'un pieu CR du 6^e Congrès International de Mécanique des Sols et Fondations, Montréal (1965).
- [4] BUSTAMANTE - FORESTIER - SEVESTRE. — Essais préalables de tirants pour la voie Rive Gauche de Seine, Bull. Liaison Laboratoires des P. et C. (janvier 1975).
- [5] BUSTAMANTE - LOGEAS. — Les tirants d'ancrage. Recommandations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage. Conférence de l'ITBTP, Paris (décembre 1976).
- [6] OSTERMAYER. — Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. Conference on Diaphragm Walls and Anchorages, London (1974).