Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

FONDATIONS SPECIALES

Fichier: rapport-asiri-221107

Activité n° 13P07173

Commande n° LC/07/ASI/39

Projet ASIRI

Interprétation des essais de chargement

Site de CHELLES (77)

Frédéric Rocher-Lacoste
Alain Le Kouby

Novembre 2007

Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
A.S.I.R.I./ FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Projet ASIRI – Interprétation des essais de chargement de chelles
RAPPORT :
DATE D'ETABLISSEMENT : Novembre 2007
AUTEURS : Frédéric ROCHER-LACOSTE / Alain LE KOUBY
ORGANISME CHARGES DE L'ACTION : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
THEME DE RATTACHEMENT :thème 1 - Plots d'essais en vraie grandeur, chantier expérimental de Chelles
LETTRE DE COMMANDE : LC/07/ASI/39

Résumé

Dans le cadre du thème 1 « Plots d'essai en vraie grandeur » du projet national ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides), le LCPC a été chargé de réaliser deux essais de chargement statique respectivement sur deux inclusions rigides (colonnes de ciment) ; une inclusion flottante et une inclusion ancrée.
Il s'agit à la fois d'estimer la capacité portante de chacune des inclusions rigides et de comparer leur comportement lors de la phase de chargement en termes de tassement et d'effort de fluage.

Le plot expérimental a été établi à Chelles sur un site du Conseil Général de Seine et Marne. Le site a été choisi en raison de la présence d'une couche de terrain compressible d'épaisseur assez importante. Les inclusions rigides ont un objectif de renforcement des sols.

Les inclusions rigides testées ont été équipées d'un tube logement lors de leur réalisation. Ce tube logement permet d'insérer l'extensomètre amovible et d'avoir des mesures de distribution des efforts à différentes profondeurs en plus de la mesure en tête de l'effort et du déplacement.
Une campagne de sol complémentaire a été réalisée dans le but d'obtenir la profondeur du substratum à l'aplomb des inclusions testées.

Le présent rapport rappelle le contexte géotechnique du site et décrit les moyens mis en œuvre pour la réalisation des essais de chargement statique et la mesure des grandeurs caractéristiques. Il fournit l'essentiel des résultats relatifs à la portance des inclusions rigides et les conclusions qui peuvent en être tirées.

Table des matières

1 INTRODUCTION - CADRE DE L'ETUDE 5

2 DONNEES GEOTECHNIQUES 5

3 CARACTERISTIQUES DES COLONNES 8

4 MATERIELS DE MESURE LCPC 11

4.1 DISPOSITIF DE REACTION 11
4.2 APPLICATION DE LA CHARGE 12
4.3 CAPTEURS ET JAUGES DE MESURE 13
4.4 PROGRAMME DE CHARGEMENT 14
4.5 EQUIPE D'ACQUISITION 14

5 ESSAIS DE CHARGEMENT ET RESULTATS 15

5.1 INCLUSION RIGIDE FLOTTANTE 15
5.1.1 Mesures en tête – courbe de chargement 15
5.1.2 Mesures extensométriques – distribution des charges 16
5.2 INCLUSION RIGIDE ANCREE 18
5.2.1 Mesures en tête – courbe de chargement 18
5.2.2 Mesures extensométriques – distribution des charges 19

6 CONCLUSIONS 21

1 Introduction - Cadre de l'étude

Dans le cadre du projet national de recherche ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions RIgides), le LCPC a été chargé d'effectuer des essais de chargement statiques sur deux inclusions rigides sur le plot expérimental. Il s'agit de colonnes de ciment réalisées avec refoulement flottante et ancrée. Ces essais s'inscrivent dans la tranche 1 du projet national.

Les colonnes ont été réalisées par un partenaire du projet la société KELLER Fondations Spéciales. Une campagne de sol a été effectuée à proximité du plot expérimental pour permettre d'identifier deux couches de sol bien distinctes : une première couche de mauvaise caractéristiques mécaniques d'épaisseur variable et un substratum.

Les colonnes forées ont été soumises à un essai de chargement statique instrumenté afin de déterminer leurs capacités portantes.

Le présent rapport rappelle le contexte géotechnique du site et décrit les moyens mis en œuvre pour la réalisation des essais de chargement statique et la mesure des grandeurs caractéristiques. Il fournit l'essentiel des résultats relatifs à la portance des colonnes instrumentées et les conclusions qui peuvent en être tirées.

2 Données Géotechniques

Le plot de Chelles est le deuxième site expérimental de la tranche 1 du projet national ASIRI. Ce site appartient au Conseil Général de Seine et Marne. Il a fait l'objet d'une campagne géotechnique pour la réalisation de l'échangeur. On dispose de résultats géotechniques qui doivent être complétés pour les besoins du projet. L'objectif étant d'avoir un profil de terrain, notamment les limites de la zone compressible et ses caractéristiques mécaniques au droit des essais de chargement.

L'ensemble des résultats des différentes campagnes de reconnaissances et d'identification ne rentre pas dans le cadre de ce rapport. Seules les caractéristiques pressiométriques indispensables à l'interprétation des essais de chargement sont présentées dans ce rapport.

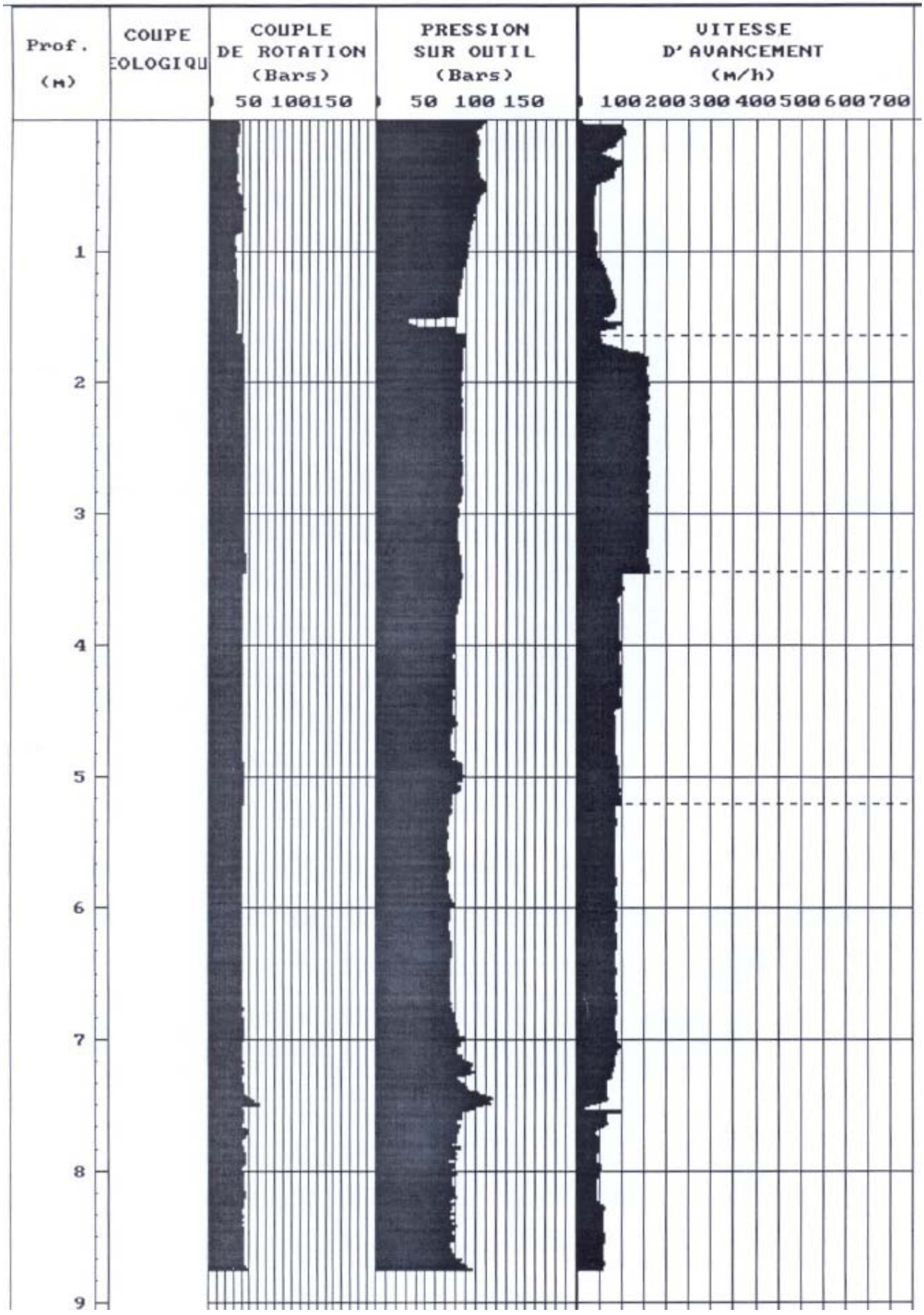

Figure 1. Sondage destructif au droit des inclusions testées

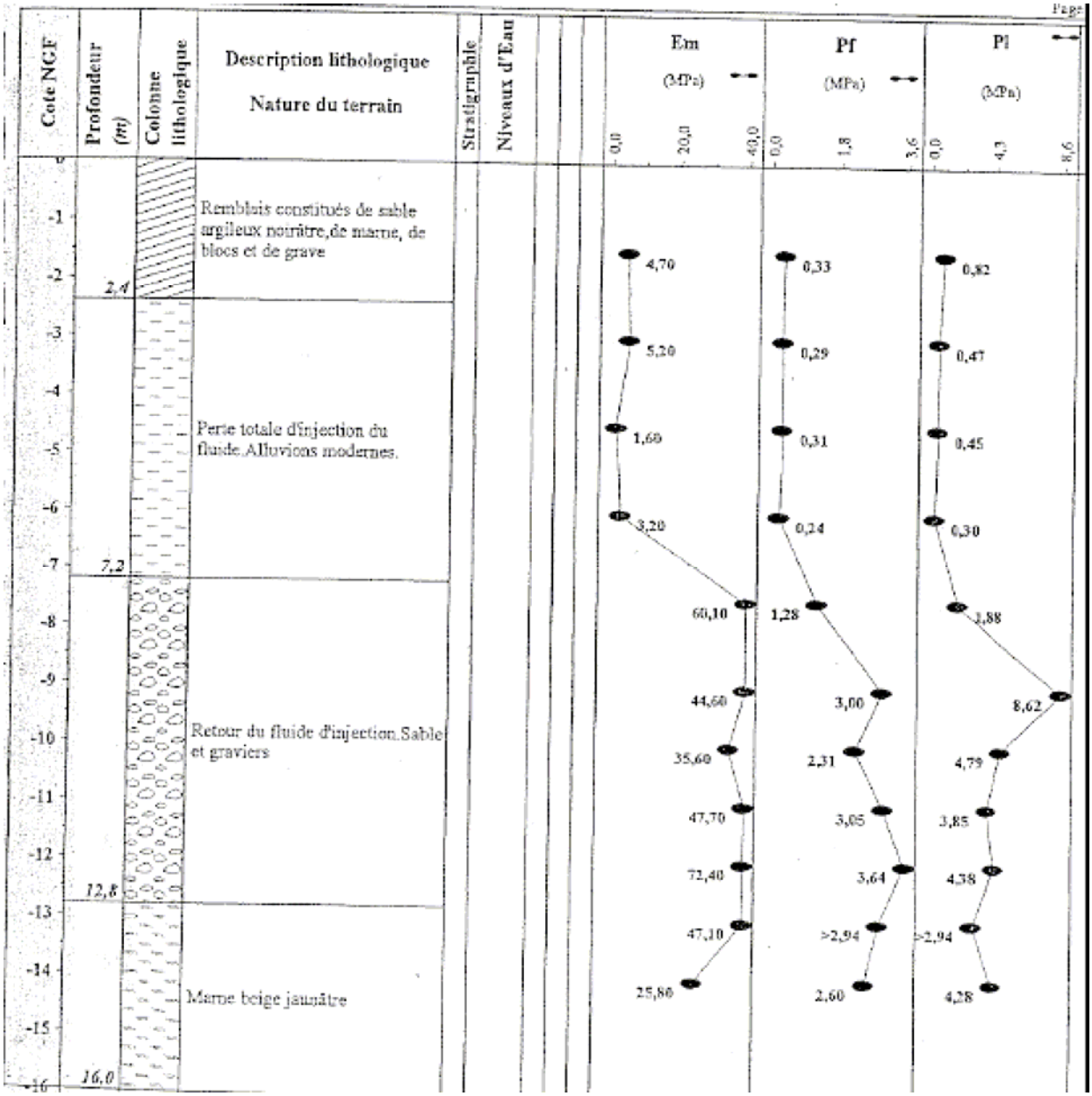

Figure 2. Sondage pressiométrique le plus proche de la zone d'essais

3 Caractéristiques des colonnes

Les colonnes du plot d'essais (colonnes d'ancrage et colonnes testes) ont été réaliseés le 18 juillet 2007 par la société KELLER Fondations Spéciales (**figure 3**).
Les essais de chargement ont eu lieu entre le 17 et le 20 septembre 2007 soit plus deux mois après la réalisation des colonnes.

Figure 3. Inclusion refoulante

Les colonnes ont une longueur de 6,02m pour la colonne flottante et de 7.44 pour la colonne ancrée avec un diamètre prévu de 360mm (**figures 4 et 5)**. Les tubes foncés dans les colonnes, pour pouvoir y installer l'extensomètre amovible lors de la phase d'essai, lors de leur réalisation ont les caractéristiques suivantes : un diamètre extérieur de 60mm et une épaisseur de 4 mm soit des tubes 52/60.

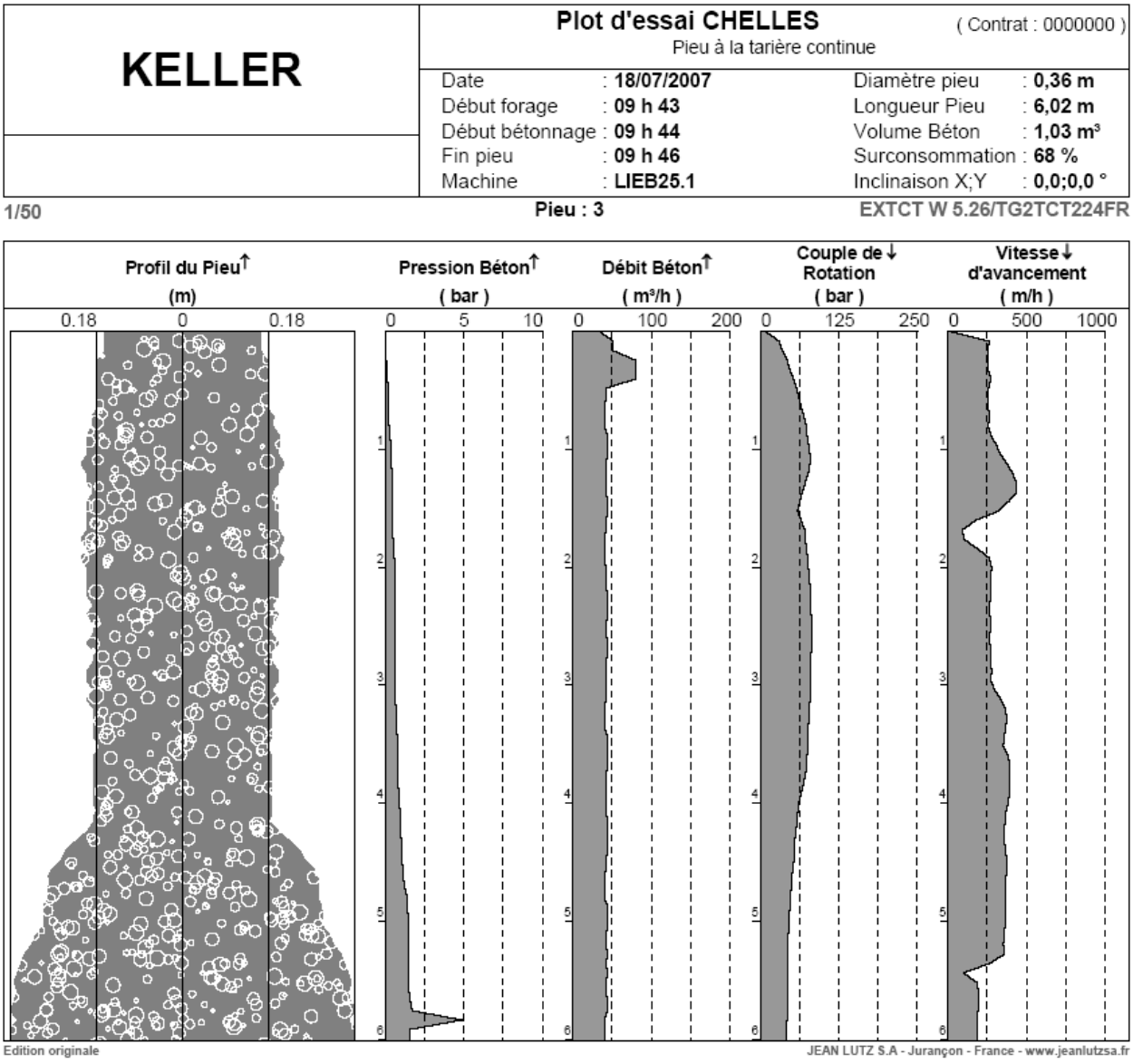

Figure 4. Enregistrements des paramètres de réalisation de l'inclusion flottante

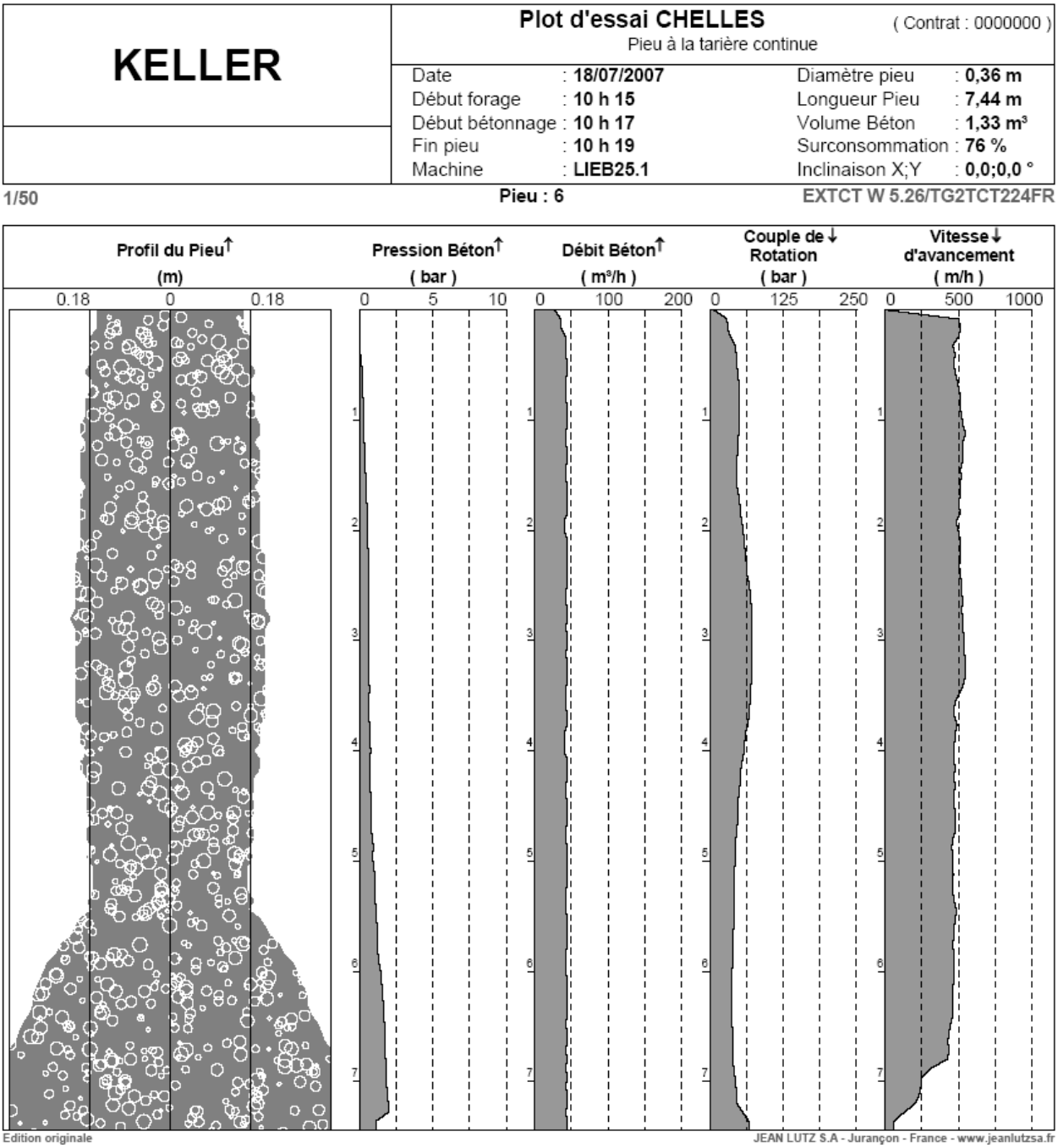

Figure 5. Enregistrements des paramètres de réalisation de l'inclusion ancrée

Puis, on a réalise une tête de pieu en haut de la colonne, qui devait avoir une surface parfaitement horizontale et servir de surface de contact avec le vérin afin que l'effort puisse être appliqué correctement (**figure 6**).

Figure 6. Tête de colonne

4 Matériels de mesure LCPC

4.1 Dispositif de Réaction

Pour les deux essais de chargement, un seul système de réaction a été mis en place. Il est constitué d'une poutre de réaction de 10 mètres de long et de 6 colonnes de réaction qui sont sollicitées en traction en utilisant des barres GIWE de 40mm d'épaisseur. Les colonnes de réactions ont été réalisées le 18 juillet 2007.

Le dispositif de réaction réalisé par l'entreprise KELLER avec l'assistance du LCPC est illustré sur la **figure 7**. Il est composé d'un chevêtre métallique relié à l'aide de six barres GIWE ∅ 40mm à trois rideaux de réaction. Ce dispositif a été conçu pour reprendre en toute sécurité la charge limite de l'essai.

Figure 7. Massif de réaction

4.2 Application de la charge

Les charges ont été appliquées à l'aide d'un vérin de 200 tonnes et de 20 cm de course, alimenté par une pompe hydraulique (**figure 8**). Elles étaient contrôlées en simultané par un peson annulaire de 800 kN (suivant les essais) et par un manomètre de 0-600 bar, préalablement étalonnés au LCPC (suivant la procédure Qualité Interne). Une rotule était installée au-dessus du vérin afin d'éviter la transmission des moments de flexion.

Figure 8. Ensemble vérin - rotule - peson

4.3 Capteurs et jauges de mesure

Les enfoncements verticaux de la tête du pieu ont été mesurés à l'aide de 4 comparateurs potentiométriques au 1/100e mm (classe 0,5, course 150 mm), montés sur des bases de références fixes (**figure 9a**).

Figure 9a. Comparateurs et bases fixes

Figure 9b. Assemblage de l'extensomètre

Les mesures des raccourcissements unitaires Δl/l ont été effectuées à l'aide d'un chapelet d'extensomètres amovibles (**figure 9b**) délimitant 6 et 7 tronçons de mesure, suivant la longueur du pieu testé, et disposés au sein des tubes-logements comme indiqué sur la **figure 10**.

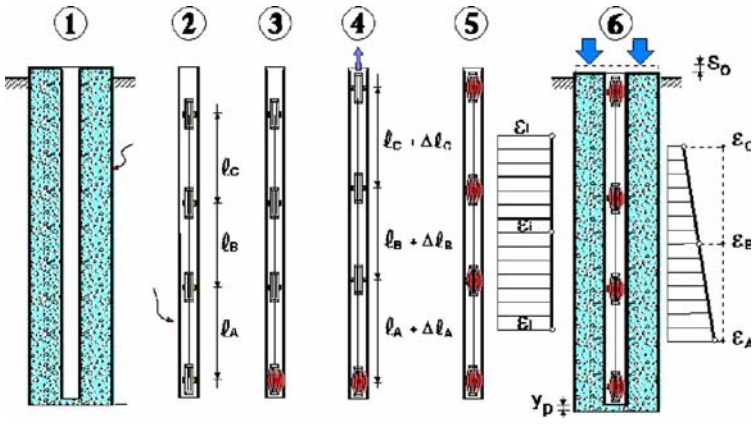

Figure 10. Disposition de l'extensomètre amovible

Les mesures des enfoncements verticaux et des raccourcissements unitaires Δl/l ont été enregistrés selon la procédure LCPC.

4.4 Programme de chargement

Pour chacun des essais de chargement, les différentes colonnes ont été testées conformément aux principes du Mode Opératoire des LPC. Le chargement a été appliqué par paliers d'incrément constant jusqu'à la rupture vis-à-vis du sol. Le tableau ci-dessous récapitule les dates d'essai ainsi que les délais de repos entre la mise en place des profilés et leur chargement.

Profilé	Date de mise en place	Date d'essai	Délais de repos (jours)
Colonne flottante	18 juillet 2007	19 septembre 2007	63
Colonne ancrée	18 juillet 2007	20 septembre 2007	64

4.5 Equipe d'acquisition

L'équipe était composée de 5 agents :

L'équipe du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en charge de la mise en œuvre de l'extensomètre amovible, de l'acquisition des mesures et de la conduite de l'essai :

- Bernard DOIX,
- Frédéric ROCHER-LACOSTE
- Alain LE KOUBY
- Françoise DUDOUYT
- Christophe CHEVALIER

5 Essais de chargement et résultats

5.1 Inclusion rigide flottante

Cette inclusion a été testée le 19 septembre 2007, 63 jours après sa mise en fiche. Le programme de chargement a comporté 17 paliers de 20 kN, maintenus 30 minutes, la rupture du sol a été progressive au fur et à mesure des paliers.

5.1.1 *Mesures en tête – courbe de chargement*

Les figures 11 et 12 illustrent l'essentiel des relations caractéristiques obtenues après l'interprétation de l'ensemble des mesures. L'interprétation des mesures en tête conduit aux 3 relations caractéristiques :

- charge en tête Q_0 - enfoncement de la tête S_0 et de la pointe (**figure 11**)
- relation S_0 - *log t* traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier (**figure 12**),
- détermination de la charge de fluage Q_C (**figure 12**).

La charge limite (ou ultime) Q_u du pieu a été atteinte sous la charge maximale d'épreuve de 340 kN (34 t) pour laquelle on a observé une augmentation très rapide des enfoncements lors de l'application de la charge. L'enfoncement de la tête a alors largement dépassé 1/10ème du diamètre de l'inclusion avec une valeur S_0 = 40,42mm.

La charge critique de fluage Q_C sur la relation α-Q_0 de la **figure 12**, se situe au quatorzième palier. On a adopté Q_C = 280 kN. Cette charge, après application d'un coefficient minorateur de 0,8 conduit, toujours vis-à-vis du sol, à une charge de service aux ELS (combinaisons quasi-permanente) de : Q_N = 220 kN.

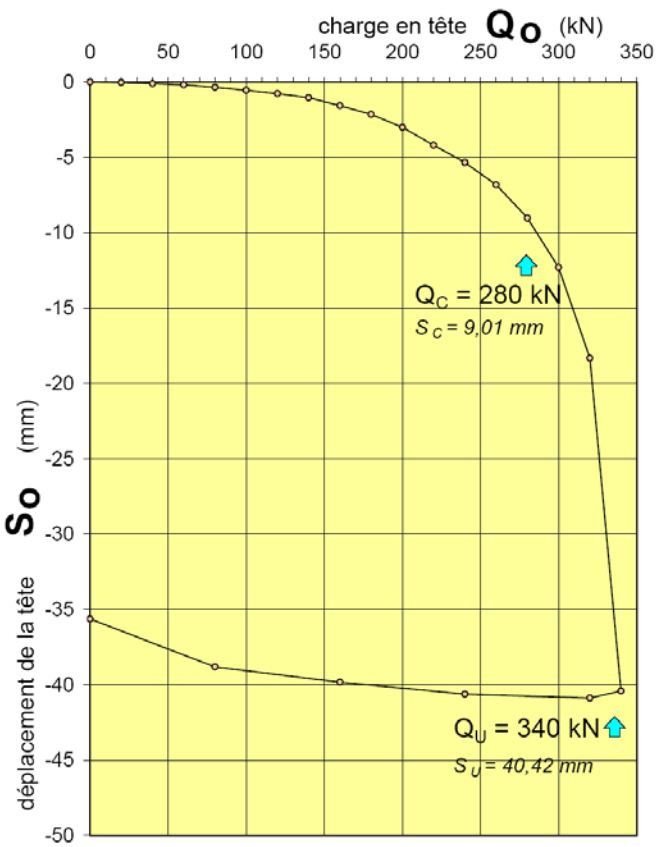

Figure 11. Charge en tête Q_0 – enfoncement de la tête S_0 et de la pointe

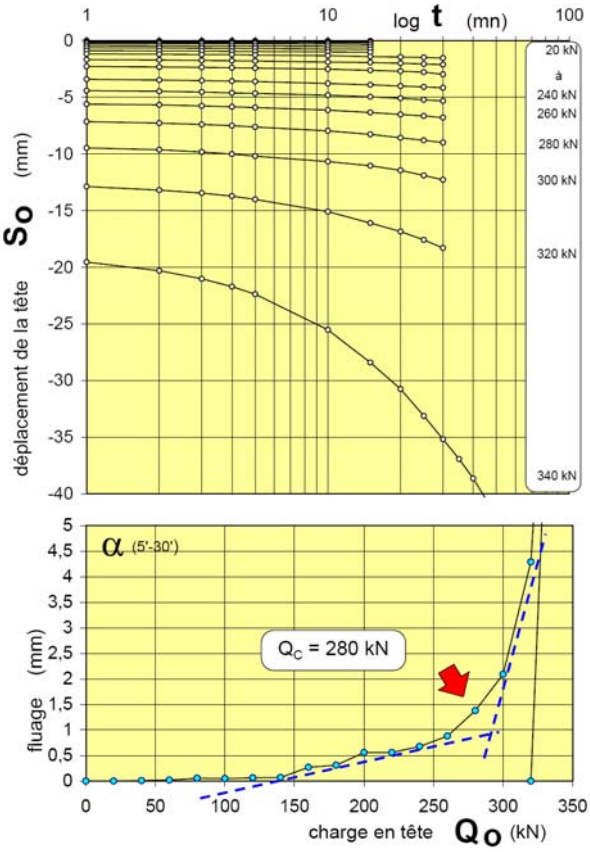

Figure 12. Relation S_0 - *log t* traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier et détermination de la charge de fluage Q_C

5.1.2 Mesures extensométriques – distribution des charges

L'analyse de la distribution des efforts le long du fût, et de leur mobilisation a été effectuée à partir de la distribution des déformations unitaires ε illustrée sur la **figure 13**. Les **figures 14 et 15** illustrent la distribution des efforts le long du pieu et les courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire q_s pour les différents niveaux de mesure.

Pour la charge limite Q_u = 340 kN, 81 % est reprise par frottement latéral (Q_s = 275 kN) et 19 % par la pointe (Q_p = 65 kN).

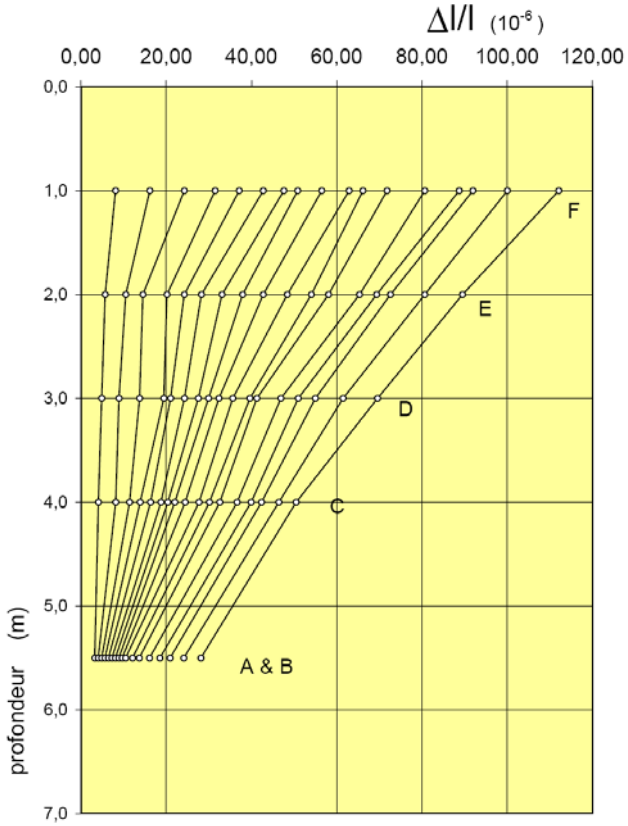

Figure 13. Distribution des déformations unitaires ε (Δl/l)

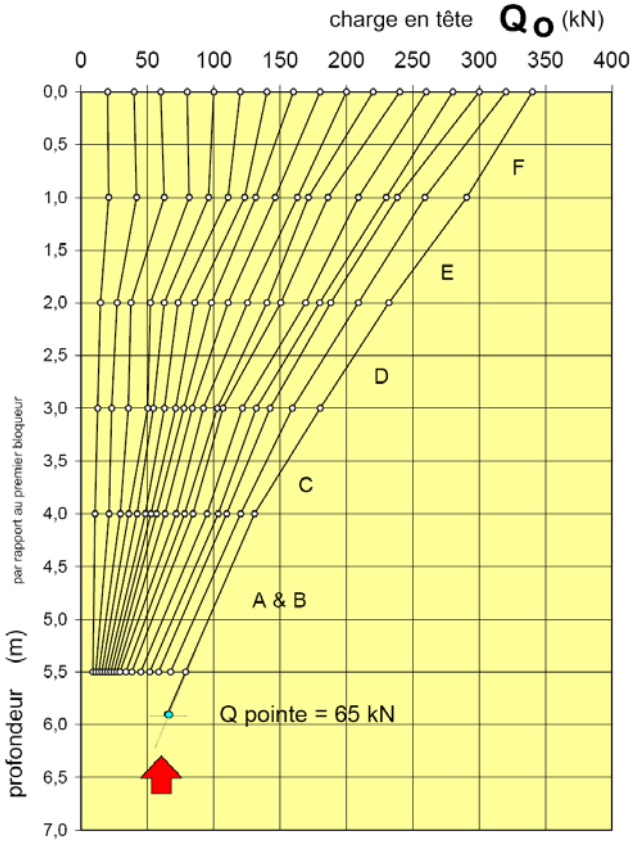

Figure 14. Distribution des efforts le long du pieu

Les courbes de mobilisation du frottement unitaire pour les différents niveaux de fût : A – B – C – D – E – F, sont représentées sur la **figure 15**. Elles correspondent à la surface développée des inclusions rigides. Suivant les niveaux, et pour des déplacements $y_i \approx 41$ mm, les valeurs q_S sont égales à :

⇨ niveaux C, D, E et F, $q_S \approx 45$ kPa,

⇨ niveau A & B, $q_S \approx 30$ kPa.

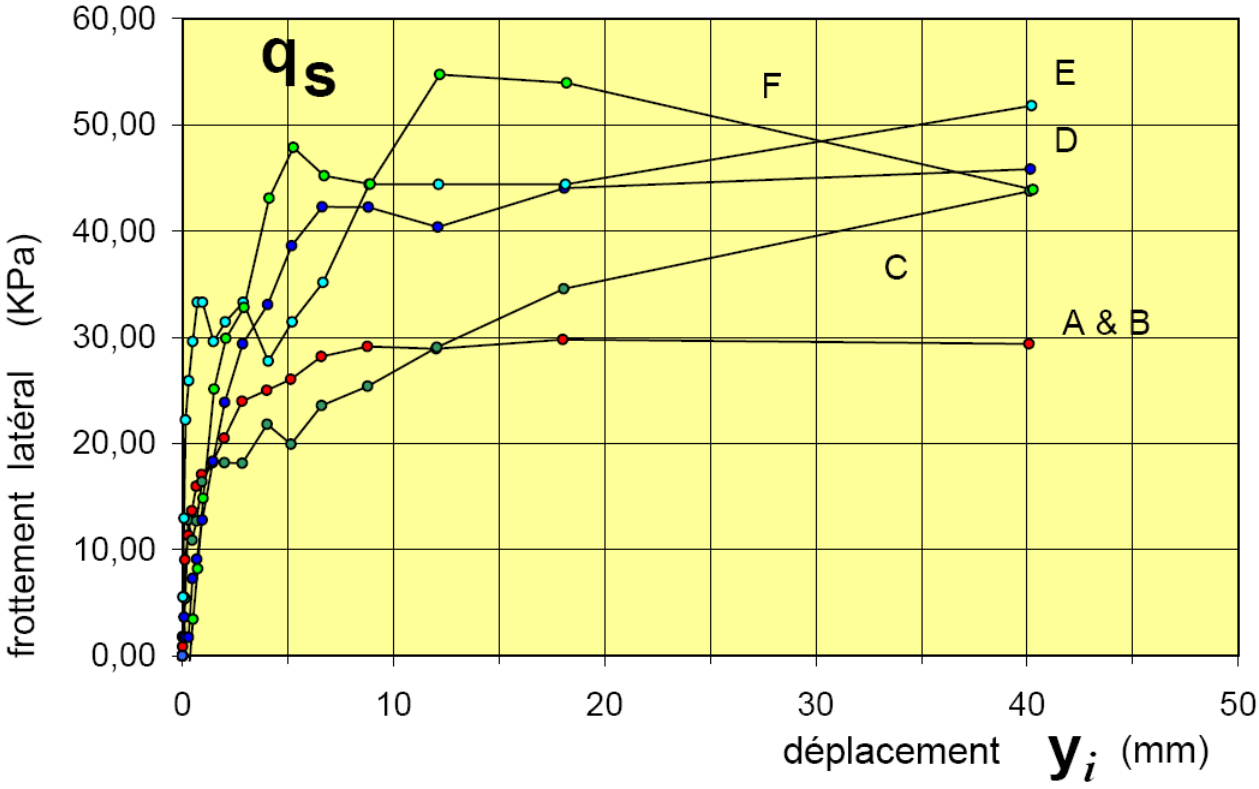

Figure 15. Courbes de mobilisation du frottement latéral (inclusion flottante)

5.2 Inclusion rigide ancrée

Cette inclusion a été testée le 20 septembre 2007, 64 jours après sa mise en fiche. Le programme de chargement a comporté 4 paliers de 150 kN, maintenus 30 minutes, la rupture du sol a été atteinte plus rapidement que prévue par les calculs. L'inclusion dite ancrée est donc certainement aussi une inclusion flottante, il doit manquer quelques centimètres de colonne.

5.2.1 Mesures en tête – courbe de chargement

Les figures 16 et 17 illustrent l'essentiel des relations caractéristiques obtenues après l'interprétation de l'ensemble des mesures. L'interprétation des mesures en tête conduit aux 3 relations caractéristiques :

- charge en tête Q_0 - enfoncement de la tête S_0 et de la pointe (**figure 16**)
- relation S_0 - *log t* traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier (**figure 17**),
- détermination de la charge de fluage Q_C (**figure 17**).

La charge limite (ou ultime) Q_U du pieu a été atteinte sous la charge maximale d'épreuve de 600kN (60t) pour laquelle on a observé une augmentation très rapide des enfoncements lors de l'application de charge maximale. L'enfoncement de la tête a alors largement dépassé 1/10ème du diamètre, avec une valeur S_0 = 48,56 mm.

La charge critique de fluage Q_C sur la relation α-Q_0 de la **figure 17**, se situe entre le 2ème et 3ème palier. On a adopté Q_C = 420 kN. Cette charge, après application d'un coefficient minorateur de 0,8 conduit, toujours vis-à-vis du sol, à une charge de service aux ELS (combinaisons quasi-permanente) de : Q_N = 335 kN.

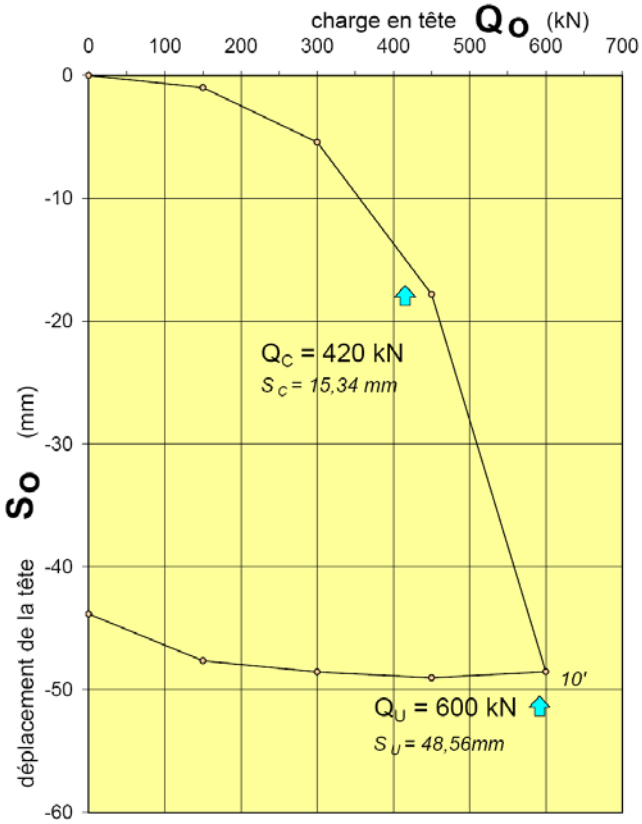

Figure 16. Charge en tête Q_0 – enfoncement de la tête S_0 et de la pointe

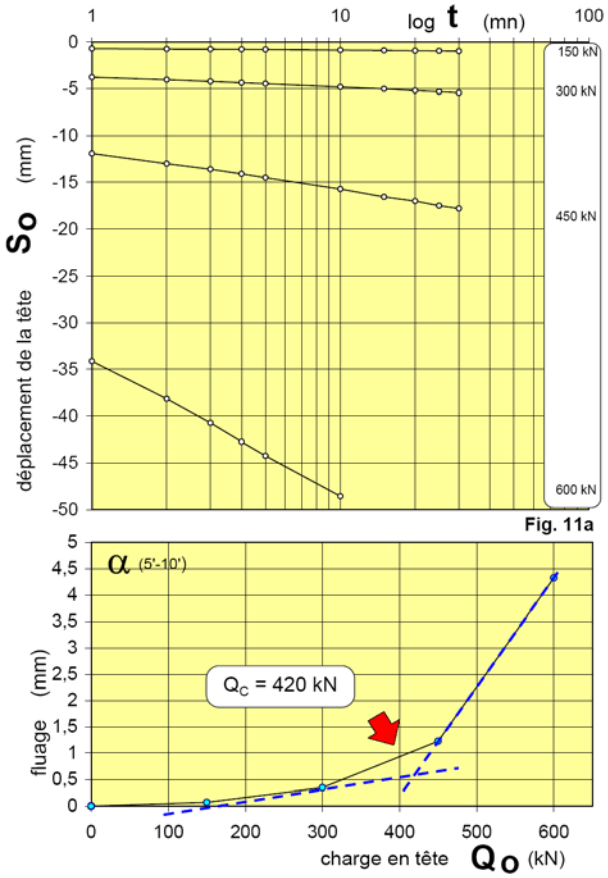

Figure 17. Relation S_0 - *log t* traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier et détermination de la charge de fluage Q_C

5.2.2 *Mesures extensométriques – distribution des charges*

L'analyse de la distribution des efforts le long du fût, et de leur mobilisation a été effectuée à partir de la distribution des déformations unitaires ε illustrée sur la **figure 18**. Les **figures 19 et 20** illustrent la distribution des efforts le long du pieu et les courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire q_s pour les différents niveaux de mesure.

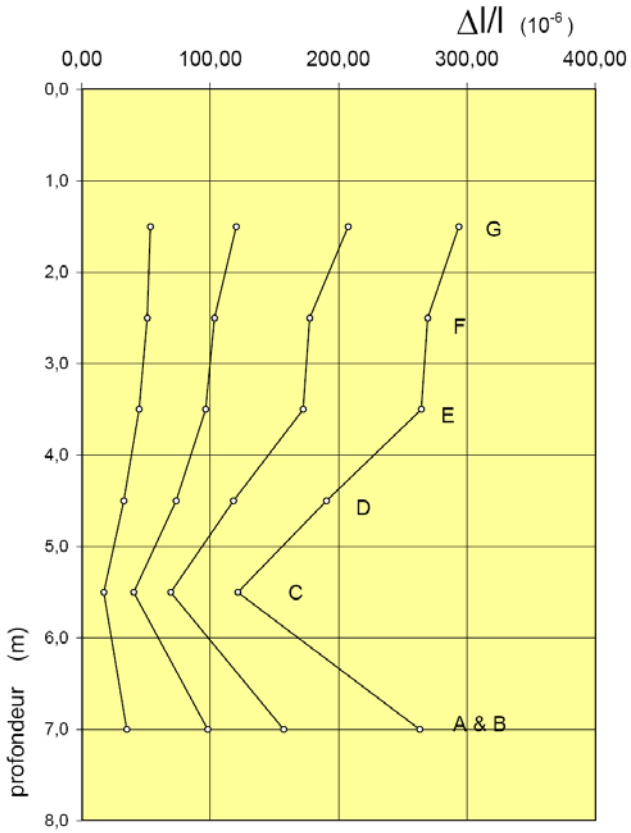

Figure 18. **Distribution des déformations unitaires ε (Δl/l)**

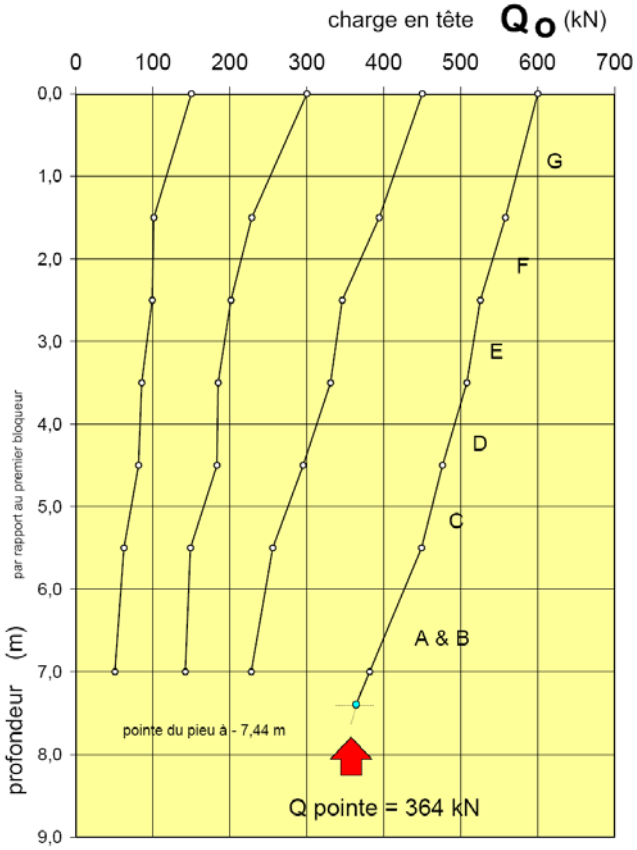

Figure 19. **Distribution des efforts le long du pieu**

Pour la charge limite Q_u = 600 kN, 39 % est reprise par frottement latéral (Q_s = 236 kN) et 61 % par la pointe (Q_p = 364 kN).

La figure 18 présente des faibles déformations sur les niveaux C et D. On peut expliquer ces faibles déformations en supposant que l'inclusion en ces points n'est pas rectiligne mais plutôt bombée (sur-bétonnage). Seul l'extensomètre permet dire cela, car l'enregistrement de paramètre (**figure 5**) ne montre pas cette forme.

Les courbes de mobilisation du frottement unitaire pour les différents niveaux de fût : A – B – C – D – E – F – G, sont représentées sur la **figure 20**. Elles correspondent à la surface développée des inclusions rigides. Suivant les niveaux, et pour des déplacements $y_i \approx 48$ mm, les valeurs q_S sont égales à :

⇨ niveaux F, $q_S \approx 45$ kPa,

⇨ niveau D & G, $q_S \approx 30$ kPa,

⇨ niveau C & E, $q_S \approx 20$ kPa,

⇨ niveau A & B, $q_S \approx 50$ kPa..

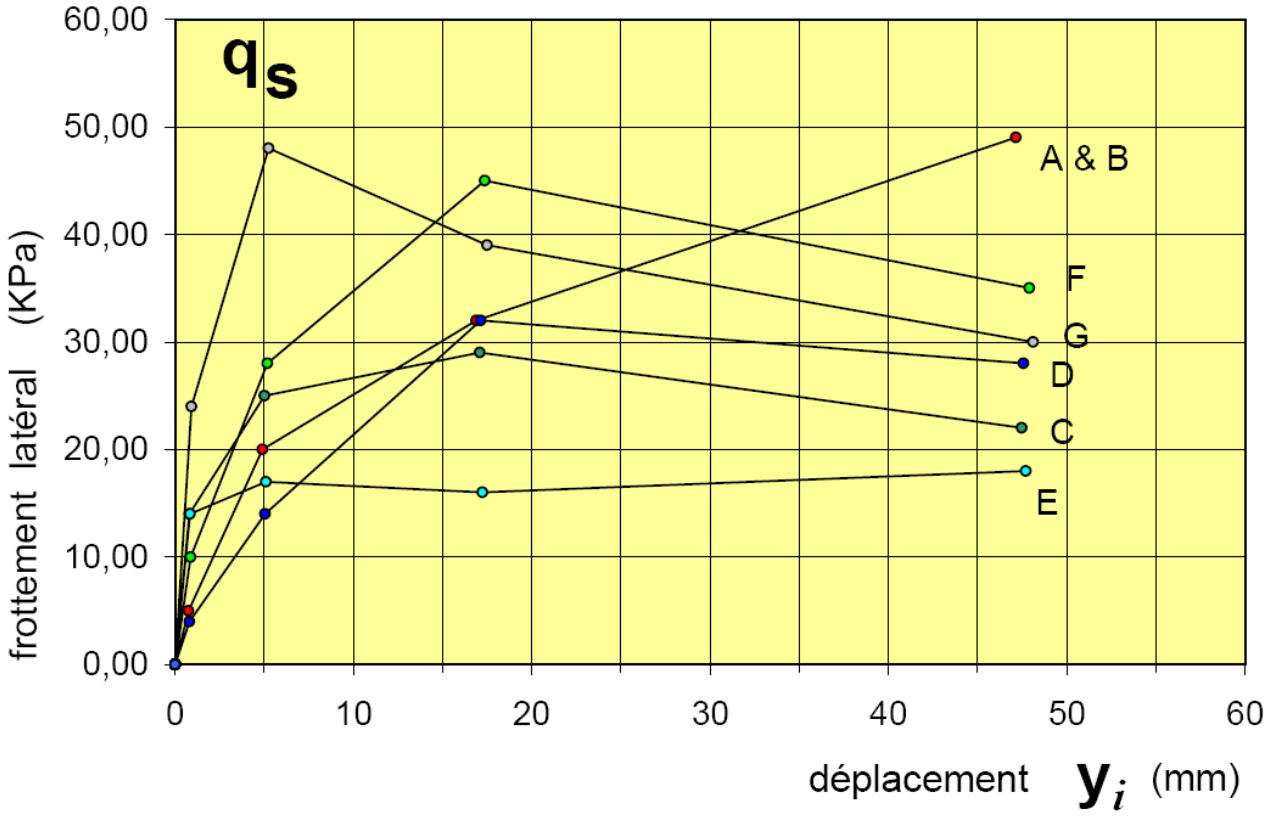

Figure 20. Courbes de mobilisation du frottement latéral (inclusion ancrée)

6 Conclusions

Les essais de chargement réalisés lors de cette étude sur des colonnes de ciment auraient du permettre de comparer les performances relatives de ces deux types de colonnes (flottante et ancrée). Mais la forme bizarre de l'inclusion ancrée limite les conclusions possibles.

On obtient en effet, une capacité portante supérieure de l'ordre de 45% pour l'inclusion ancrée ce qui est un résultat médiocre étant donné que la pointe travaille peu.

Par contre, on constate bien que l'inclusion ancrée travaille presque exclusivement en pointe qu'en frottement latéral.

Pour ce qui concerne les charges de fluage Q_c celle-ci est de 35% plus élevée pour l'inclusion ancré (**tableau I**) mais le manque de points de mesure fausse cette comparaison.

Tableau I **Charges caractéristiques et tassement**

Type d'inclusion	**charge limite Q_u (kN)**	**charge limite en pointe Q_p (kN)**	**charge fluage Q_c (kN)**	**tassement sous Q_c *(mm)***
Inclusion flottante	340	65	280	9,02
Inclusion ancrée	600	364	420	15,34

En ce qui concerne la mobilisation du frottement latéral et la résistance en pointe, nous ne sommes pas en mesure d'associer nos valeurs de frottement avec les valeurs de pressions limites obtenues lors de l'étude de sol et de les comparer aux abaques p_l-q_s du fascicule 62 pour le frottement latéral et aux valeurs de k_p données pour chacun des modes d'installation dans le fascicule 62.

Paris le 22 novembre 2007,

Frédéric Rocher-Lacoste Alain Le Kouby