

ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DU CONFINEMENT SUR L'ARRACHEMENT DES BOULONS DE FRONT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONFINING PRESSURE EFFECT ON PULL-OUT CAPACITY OF SOIL NAILING

Isabelle THENEVIN¹, Emad JAHANGIR¹, Faouzi HADJ HASSEN¹,
Jacques SCHLEIFER¹, Pascal RODRIGUEZ²

1- Centre de Géosciences, Mines ParisTech, PSL Research University, 35 rue Saint-Honoré 77305 Fontainebleau cedex France

2- Direction Développement Innovation et Matériel, Solétanche-Bachy, 280, avenue Napoléon Bonaparte CS 60002 92506 Rueil-Malmaison cedex

RÉSUMÉ – Une campagne d'essais montre l'effet du confinement sur la résistance au cisaillement de l'interface scellement-sol. Au préalable, une étude de tous les éléments composant cet essai est présentée. Le sol, la surface du forage, le scellement et l'inclusion doivent être représentatifs de la réalité des chantiers. Les résultats permettent de dégager les paramètres qui influencent le comportement de l'interface.

ABSTRACT – For accurate dimensioning of soil nails in shallow tunnels, experimental pull out tests were performed. The results highlight the effect of confining pressure on the shear strength of the soil-grout interface. A detailed description of these tests is first presented. Laboratory results compared with in-situ result, allowed authors to propose parameters which influence behavior.

1. Introduction

Pour la construction d'un tunnel, lorsque le creusement au tunnelier n'est pas applicable, il faut avoir recours à la Méthode Conventionnelle (Martin, 2012). C'est un procédé agile et flexible, il est souvent retenu comme base pour la construction de tout le projet et demeure indispensable pour les points singuliers. Mais la technologie a peu progressé dans les dernières décennies. Depuis 2012, SOLETANCHE-BACHY et ses filiales sont chef de file d'un groupement comprenant : EGIS Tunnels et EGIS Géotechnique, la RATP, ITECH, l'IFSTTAR, le laboratoire IBISC et le centre de Géosciences dans le cadre du projet de recherche « NEWTUN » (Cascarino, 2014). La diversité de ce groupe de travail permet au projet NEWTUN de traiter toutes les étapes de la chaîne de réalisation des travaux de construction d'un tunnel peu profond. Le centre de Géosciences, spécialisé dans le comportement mécanique des sols et des roches, est chargé de l'approche expérimentale concernant le boulonnage de front. Cet article présente des résultats expérimentaux obtenus sur 2 années de travail.

Tout d'abord, il était très important d'identifier les mécanismes physiques entrant en jeu sur les chantiers de pré soutènement afin de pouvoir les reproduire lors des expérimentations. De même, les matériaux à utiliser doivent être, soit identiques à ceux utilisés en chantier, soit correspondre à ces derniers via un changement de dimension par exemple. Une attention particulière est portée aux surfaces de rupture ou interfaces de faiblesse : le contact inclusion-scellement et surtout le contact sol-scellement plus souvent impliqué dans les désordres observés sur chantiers de faible profondeur. Dans cette

première étape, l'ensemble des inclusions mises en œuvre sur chantier a été passé en revue. Puis une étude détaillée du sol «généralement » rencontré sur les sites de tunnel pouvant faire l'objet de la méthode d'excavation NEWTUN est conduite car le matériau choisi doit avoir un comportement mécanique représentatif. Ensuite, il s'agit de définir le protocole expérimental à mettre en œuvre sur les séries d'essais. Les normes Françaises et Américaines sont étudiées afin de respecter les ratios de dimensions et vitesse de déplacements. A partir de cette définition, le dispositif expérimental et d'enregistrement mis en place par Blanco-Martin (2012) durant sa thèse, est modifié et partiellement adapté, aux dimensions des inclusions à tester, à la gamme des pressions ou forces appliquées et aux déplacements et déformations observés.

Une fois l'ensemble des éléments définis, 3 séries d'essais d'arrachement ont été menées pour 4 pressions de confinement et 3 longueurs de scellement. Des essais ont été reproduits, et 2 essais particuliers ont permis de mieux qualifier le bruit et les erreurs sur les mesures. A partir des résultats bruts, une analyse a été menée afin d'obtenir la relation entre la force axiale et le déplacement. Puis, après calcul de la contrainte moyenne de cisaillement le long de l'interface sol-scellement, 2 types de lois de comportement sont ajustés. L'un correspond à l'approche classique de Frank et Zhao (CLOUTERRE, 1991) et Bourgeois (2012). L'autre, plus complet, puisqu'il comprend la phase post-rupture, correspond à une approche déjà proposée par le centre de Géosciences (Blanco-Martin, 2012).

2. Présentation des composants

Dans ce cadre, de nombreuses informations recueillies sur le chantier du tunnel Sud de Toulon (Arcadis, 2007) et dans une moindre mesure sur le tunnel Nord ont été utilisées. Quelques autres chantiers de tunnels comme celui de Tartaiguille (TGV) (CEBTP, 1998) ou du puits d'accès à Marseille (TGV) sont également consultés.

2.1. Les inclusions

Les inclusions étudiées sont les boulons en fibres de verre posés au front et les boulons en acier de type autoforeur utilisés pour les essais d'arrachement in situ. Ces derniers sont aussi, parfois utilisés en boulons radiaux.

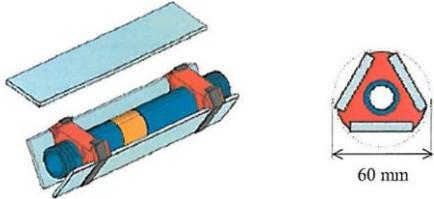
Pour les boulons de front, les marques fournisseur, les caractéristiques des matériaux, et les procédures de mise en place sur chantier sont répertoriées dans le tableau 1. Ce tableau fait également la synthèse comparative entre ces dernières et celles utilisées au laboratoire.

Les entreprises vérifient souvent la qualité des matériaux et de leur mise en œuvre via des essais d'arrachement in-situ. Notre étude a pris appui sur les mesures faites sur des boulons autoforeurs arrachés dans le tunnel Sud de Toulon.

Deux types de résultats sont distingués : le faisceau des lignes quasi verticales et voisines de la réponse élastique de la partie libre (non scellée) d'un boulon acier et les arrachements montrant une réponse plus complexe voire complète avec rupture, cas des clous n°1 ou n°19 qui sont détaillés en figure 1.

Pour les essais avec rupture, si la surface de faiblesse reconnue est l'interface scellement-sol, le tracé des déplacements en fonction des valeurs de contraintes moyennes de cisaillement est possible. Le comportement observé (points) est du type tri-linéaire (traits) comme proposé par Frank et Zhao en 1982 et repris dans les recommandations CLOUTERRE. La résistance latérale unitaire q_s est précisée.

Tableau 1. Inclusions sur chantiers de présoutènement du tunnel sud de Toulon et répliques de laboratoire

Chantier de Toulon Boulons au front	Labo : Série n°1 &2 Boulon cylindrique	Labo : Série n°3 Boulon 3 lamelles
		
3 x Barres plates en fibre de verre 3 x 40 mm x 5 mm = 600 mm ²	1 boulon fibre de verre diamètre 13 mm	3 x Barres plates en fibre de verre 3 x 10 mm x 3 mm = 90 mm ²
Résistance à la traction 750 à 1000 MPa - Résistance au cisaillement >100 MPa - Module d'élasticité à la traction 40 GPa Surface à haute adhérence par ajout de sable siliceux (0.15-0.3 mm) fixé à la résine lors de la fabrication ; Marque SIREG Durglass FL		
Forage D = 90 mm Les inclusions sont « poussées » manuellement dans le trou de foration creusé par la méthode roto- percussion à l'eau et non tubé.	Forage D = 30 mm Les inclusions sont « poussées » manuellement dans le trou de foration creusé par carottage à l'eau et rainurage « Newton ».	
Scellement au coulis de ciment C/E = 2 Ciment CEM I 52.5 PMES Ou à la Résine Minova Carbopur WL	Scellement résine Lockset	Scellement résine Carbopur WF ou Lockset

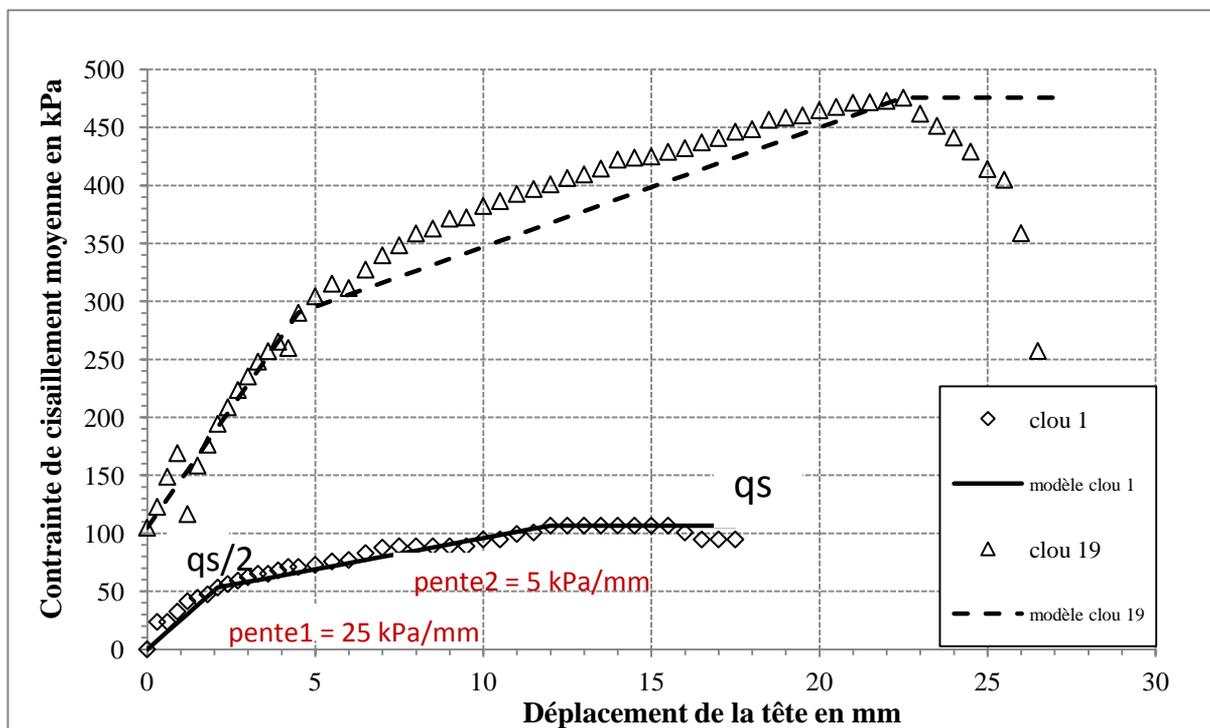


Figure 1. Courbes contrainte-déplacement des boulons n°1 et 19 scellés sur 4 et 2 m à la résine et testés sur chantier (ERG 2008)

Pour le clou n°19 scellé à la résine mais dans les matériaux du socle bréchiques et non plus dans les colluvions, le comportement observé est différent à l'origine, l'augmentation des valeurs des pentes traduit de meilleures caractéristiques mécaniques pour le sol. Le comportement post-rupture, avec des valeurs de frottement résiduel très faible ne correspond plus au modèle tri-linéaire proposé dans Clouterre.

Des essais de traction sur les boulons en fibre de verre posés au front ont également été réalisés sur quelques chantiers (Tartaiguille Nord 1998). Pendant ces essais, seule la partie élastique du comportement est testée car les observations sont très voisines des valeurs de déplacement calculées avec le module d'Young des sections de fibres. En effet les longueurs de scellement sont toujours importantes et les efforts à mettre en œuvre pour obtenir la rupture du contact scellement-sol sont alors considérables et souvent supérieurs à ceux qui provoquent la rupture en traction des fibres. Ce n'est également pas l'objectif de ces essais in-situ qui visent au contraire à valider la bonne mise en place des dispositifs de présoutènement.

2.2. Le sol

Pour cette étude, les données des chantiers de tunnels à Toulon sont particulièrement intéressantes, car ces ouvrages traversent une dizaine de faciès géologiques différents et pour certains à plusieurs profondeurs. Les caractéristiques mécaniques des matériaux rencontrés ont été mesurées au laboratoire et parfois in situ.

Afin d'obtenir un matériau ayant des caractéristiques voisines de ceux rencontrés sur les chantiers, il a été choisi d'utiliser un gel de silice additionné de sable fin. Ses caractéristiques mécaniques sont reportées sur la figure 2. Le sol synthétique se comporte plutôt comme un sol dense, son volume s'accroît lors du cisaillement en raison du phénomène de dilatance. Il est très intéressant vis à vis de la reproductibilité des résultats mais pose le problème de la conservation des éprouvettes préparées car on constate un vieillissement important à la dessiccation ou l'humidification et des tests de conservation sont mis en place. Les essais d'arrachement sont donc réalisés moins de 7 jours après la prise du matériau.

2.3. Le scellement

L'expérience des entreprises réalisant ce type de chantier, ainsi que les cahiers des clauses techniques et pratiques suggèrent d'utiliser des coulis de ciment, ou des résines. Trois moyens de scellement sont donc testés (1 coulis et 2 résines). Le contact boulon-scellement est toujours parfait quelque soit le matériau choisi. Le coulis de ciment se rétracte ou se retire légèrement lors de sa prise. La résine Lokset SiS SF-L de marque Minova semble obtenir de bons résultats même si sa maniabilité est délicate car la prise est rapide et sa granularité grossière. Enfin la résine utilisée sur les chantiers de boulon de front : Minova Carbopur, est sensible à la présence d'eau et différentes quantités d'eau sont testées.

2.4. La surface de foration

Du fait du rôle majeur de l'état de surface de foration dans le cadre de la rupture en cisaillement, une expérimentation a porté sur l'observation de surfaces de foration obtenues à l'aide de la foreuse Hi-Drill sur des matériaux dont un échantillon volumineux (100 litres) de sol synthétique. Les observations ont également été filmées et un endoscope a permis de visualiser l'intérieur des forages secs. L'outil de coupe a été utilisé en mode vibration plus rotation et l'eau était le fluide de forage. Sur le sol synthétique, les parois de forage sont très lisses et les aspérités voisines du millimètre. Suite à ces

constatations, le traitement des surfaces de foration des éprouvettes au laboratoire est adapté. Un protocole de rainurage reproductible est établi avec des outils dédiés.

3. Essais et résultats

Le dispositif qui permettait d'arracher des boulons aciers scellés dans du grès (Blanco-Martin, 2012) est modifié afin de l'adapter aux boulons en fibre de verre et surtout à la roche très tendre du projet Newton. Ce dispositif complexe, non élaboré pour ce test, a pour inconvénient que les valeurs mesurées résultent de plusieurs phénomènes physiques. Les modifications les plus importantes sont les suivantes : changement des capteurs de pression pour enregistrer les mesures de la gamme 0-50 bar ; changement de la pompe d'application de la pression de confinement, pour une plus précise ; 2 nouveaux capteurs d'enregistrement des déplacements entre la cellule et le vérin sont installés sur le dispositif. L'ensemble des matériaux étant choisi, ainsi que leur mode de mise en place, la figure 2 en fait la synthèse.

3.1. Les campagnes d'essais

Elles comprennent principalement 3 séries d'essais dont les tableaux 2, 3 et 4 font la synthèse. La série n°1 a pour objet l'étude de l'influence de la longueur de scellement sur la force axiale nécessaire à l'arrachement. La série n°2 vise à comprendre l'influence de la pression de confinement sur la force axiale nécessaire à l'arrachement. La série n°3 met en évidence l'effet des boulons constitués de 3 lamelles et celui de la résine Carbopur.

Au sein de chaque série, 1 ou 2 essais sont répétés, afin de vérifier la reproductibilité des résultats. L'ensemble des essais a été conduit avec une mise en confinement à raideur constante. Typiquement, durant les 30 minutes de l'essai, la pression de confinement décroît légèrement suite à la petite déformation du sol synthétique.

Bourgeois et al (2012) recommandent une représentation en intensité de ce type de résultat. On montre l'évolution de l/l_{max} en fonction du déplacement, avec l : la force axiale par unité de longueur (kN/m) et l_{max} : la force axiale maximale enregistrée par unité de longueur (kN/m) pour un essai.

Tableau 2. Série d'essais n°1 sur boulon cylindrique scellé à la résine Lockset – effet de la longueur de scellement

n°d'essai	14	9	16	19	11	17
longueur de scellement initiale L (cm)	15.0	20.0	20.7	24.8	25.0	31.5
pression de confinement maximale P (kPa)	493	507	508	500	507	478
Fmax (kN)	6.90	8.40	8.22	9.05	8.79	14.10
lmax (kN/m)	46.34	42.38	39.86	36.79	36.03	45.07

Tableau 3. Série d'essais n°2 sur boulon cylindrique scellé à la résine Lockset – effet de la pression de confinement

n°d'essai	12	11	19	13	18
longueur de scellement initiale L (cm)	25.0	25.0	24.8	26.0	25.5
pression de confinement maximale P (kPa)	430	507	501	644	752
Fmax (kN)	5.50	8.79	9.05	11.80	14.70
lmax (kN/m)	22.16	36.03	36.79	45.67	57.91

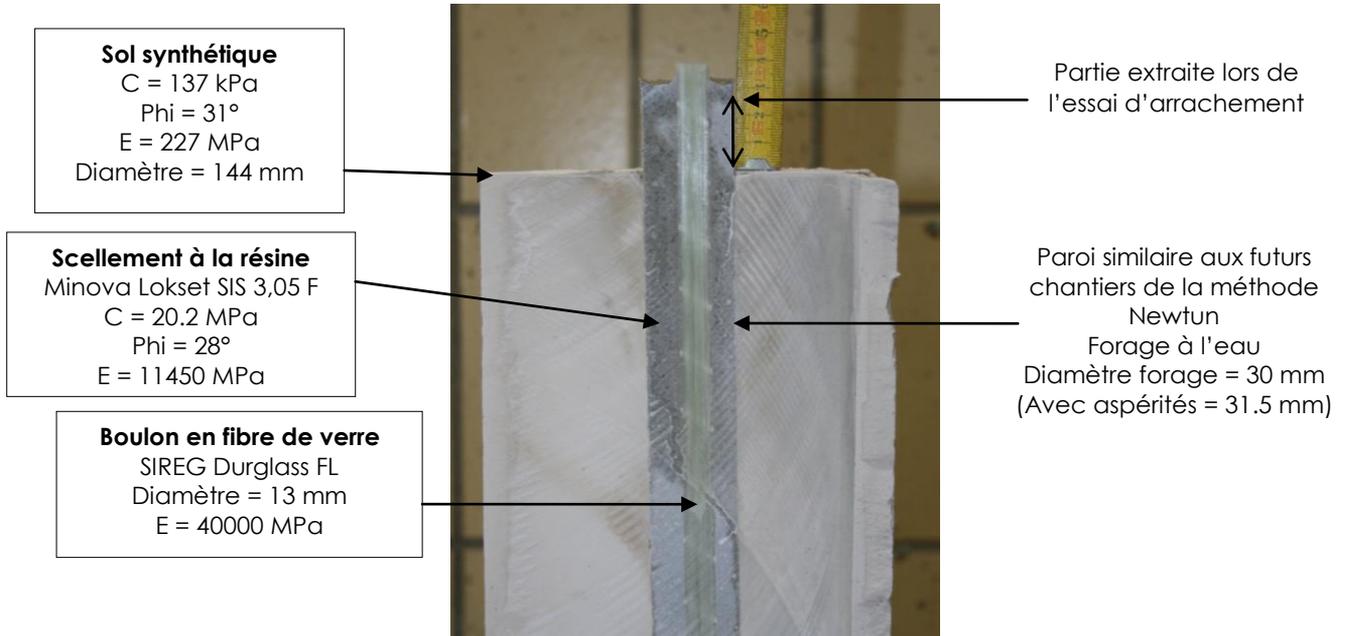


Figure 2. Section du sommet de l'éprouvette après essai d'arrachement (boulon cylindrique scellé à la résine lockset)

Tableau 4. Caractéristiques de la série d'essais n°3 sur boulon 3 lamelles

N°d'essai	32	31	33	35	36	34
L (cm)	27.0	26.5	25.0	26.0	25.5	25.5
P (kPa)	416	622	639	442	554	627
Imax (kN/m)	39.65	45.46	60.31	37.90	51.50	54.81
Résine	Carbopur			Lockset		

L'influence de la longueur de scellement est effectivement mieux visible. On remarquera sur le tableau 2 la valeur moyenne d'Imax autour de 41 kN/m et la variation linéaire de la force maximale d'arrachement ou du déplacement au pic lors de l'arrachement en fonction de la longueur de scellement.

3.2. Influence de la pression de confinement

Deux lois d'interface ont été essayées afin d'interpréter les résultats d'essais d'arrachement : une loi tri-linéaire et une loi exponentielle. Ces deux lois décrivent l'évolution de la contrainte de cisaillement au niveau de l'interface scellement-sol en fonction du déplacement tangentiel subi.

Depuis la parution en 1991, des recommandations CLOUTERRE, les modèles trilineaires sont couramment choisis dans ce contexte. On remarquera sur la figure 3, la faible variation du déplacement au pic environ 1.65 mm. Les autres variables dont la valeur d'Imax évoluent linéairement avec la pression de confinement (tableau n°3). La force d'arrachement est donc nettement influencée par la pression de confinement. Le modèle tri linéaire ajusté à la contrainte moyenne de cisaillement (figure 3) est intéressant dans la partie pré-pic mais après la rupture, il n'est plus satisfaisant. Dans ce contexte, un deuxième type de loi d'interface est suggéré. Cette loi (1) est équivalente à un joint, le comportement au cisaillement est non linéaire et tient compte du confinement. Dans notre

cas u_c s'exprime en mm et τ_c en kPa. Les coefficients a, b et c dépendent de la contrainte normale σ_n égale à la pression de confinement de l'éprouvette.

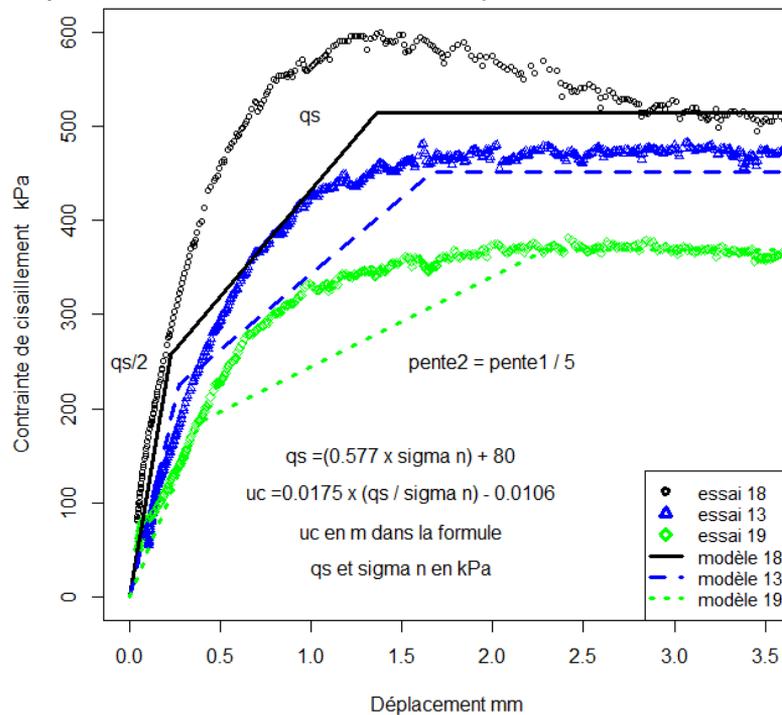


Figure 3. Contrainte moyenne de cisaillement en fonction du déplacement et modèle tri-linéaire pour les boulons cylindriques scellés à la résine Lockset.

$$a(\sigma_n) = \begin{cases} a_1 \left(2 - \frac{\sigma_n}{\tau_c} \right) \frac{\sigma_n}{\tau_c} & \text{si } \sigma_n < \tau_c \\ a_1 & \text{si } \sigma_n \geq \tau_c \end{cases}$$

$$(1) \quad \tau(u, \sigma_n) = \left[a \sqrt{u/u_c} + b \right] * \exp - \left[\frac{u}{u_c} / c \right]^{0.67}$$

$$b(\sigma_n) = a_2 + a_3 \left(\frac{\sigma_n}{\tau_c} \right)$$

$$c(\sigma_n) = 1 + a_4 \left(\frac{\sigma_n}{\tau_c} \right)$$

A partir des résultats des essais n°31, 32, 33, on recherche les valeurs de u_c , τ_c , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 afin que les courbes du modèle s'ajustent le mieux possible aux résultats expérimentaux. Les valeurs des coefficients sont reportées sous la figure 4. On peut également essayer de vérifier que cette loi théorique est proche du comportement de l'interface d'arrachement du clou n°19. On notera que le modèle exponentiel est calculé à partir de la pression de confinement instantanée de l'éprouvette. Pour le clou 19, le confinement proposé peut correspondre à sa localisation.

4. Conclusions

Les études bibliographiques et les retours d'expériences de chantiers se rapportant aux inclusions, aux sols et enfin aux scellements ont été présentés. Les résultats des 3 séries d'essais sont analysés. Les préparatifs expérimentaux dont ceux sur le sol synthétique ont permis une réduction des délais de mise en œuvre. A partir de cette campagne expérimentale sur des boulons cylindriques et tri lamelles, deux types de loi sont ajustés au comportement de l'interface scellement-sol. Aucun des deux n'étant totalement satisfaisants, ils permettent toutefois d'apprécier quantitativement les paramètres influençant de manière prépondérante ce comportement.

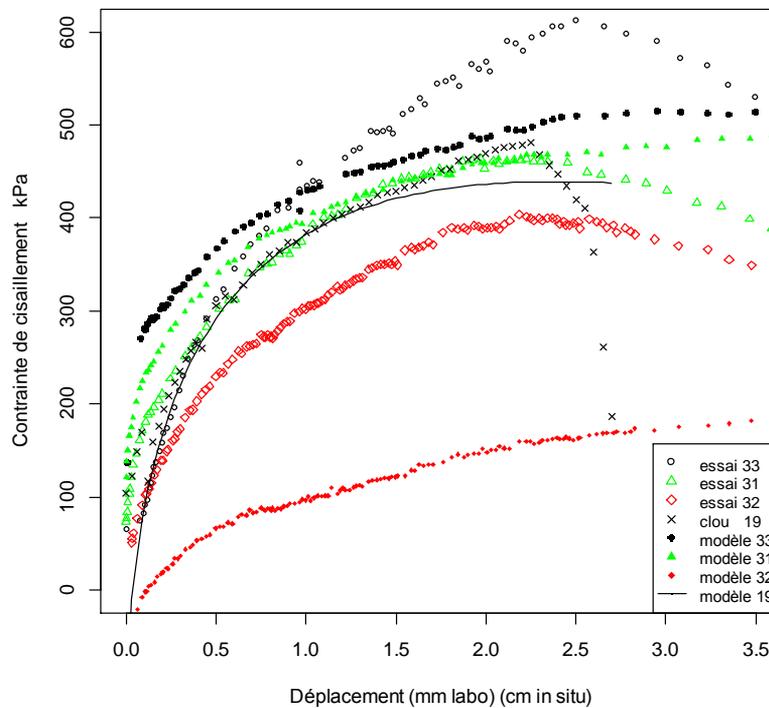


Figure 4. Ajustement d'une loi aux résultats pour les boulons 3 lamelles et 1 essai in-situ

Paramètres du modèle : essais de laboratoire : $\tau_c = 15377$ kPa ; $u_c = 13.91$ mm ;
 $a_1 = 23906$; $a_2 = -526$; $a_3 = 16005$; $a_4 = 14.84$ essai in-situ : $u_c = 22.5$ mm ; $\sigma_n = 369$ kPa

5. Remerciements

Nous remercions vivement les entreprises SIREG-S.p.A, WOELLNER France pour leurs contributions gracieuses à ce travail de recherche. Les partenaires du projet NEWTUN remercient vivement la Banque Publique d'Investissement, ainsi que le Conseil Général des Yvelines pour leur soutien et leur confiance.

6. Références bibliographiques

- ARCADIS (2007). Liaison A50 / A57 Traversée souterraine de Toulon, 2nd tube du tunnel routier (sud) Tunnel Foré, Note de justification des taux de déconfinement de terrain pour le profil de soutènement type PS4/PS5, 147p
- CEBTP Direction régionale Méditerranée (1998). TGV Méditerranée Lot 1 C, Tunnel de Tartaignille, Essai de traction contrôle sur les boulons fibre de verre, tunnel nord, 9p.
- Recommandations CLOUTERRE (1991). Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 268p.
- Additif aux recommandations CLOUTERRE 1991 (2002). Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 217p.
- Blanco Martin L. (2012). Etude théorique et expérimentale du boulonnage à ancrage réparti sous sollicitations axiales. Thèse MINES ParisTech, 191p.
- Bourgeois E., Le Kouby A., Soyez L. (2012). *Soils and foundations* 52(3): 550-561 « Influence of the strip-backfill interaction model in the analysis of the behavior of a mechanically stabilized earth wall ».
- Cascarino S., *Congrès de l'AFTES (2014)*. NEWTUN – Nouvelles techniques en tunnels voûtes parapluies, 9p.
- ERG ingénieur conseil (2008). Procès verbal d'essai d'arrachement de clou à vitesse de déplacement constante, Tunnel de Toulon, clou n°1.
- ERG ingénieur conseil (2008). Procès verbal d'essai d'arrachement de clou à vitesse de déplacement constante, Tunnel de Toulon, Attaque ouest PM 728, clou n°19.
- Martin F., Saïtta A. (2012). *Mécanique des Roches et Travaux Souterrains - Cours et exercices corrigés*, Cours de l'ENS Cachan, huitième édition, 88p.