



# DETERMINATION DES PARAMETRES DE BATTAGE DANS LES ARGILES AU MOYEN D'UN PENETROMETRE DYNAMIQUE

A. OULARBI <sup>(1)</sup> ; D. LEVACHER <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratoire de Mécanique et Géomécanique - 2 rue de la Houssinière -  
44072 NANTES CEDEX

<sup>(2)</sup> Laboratoire de Mécanique des Fluides - Quai Frissard - BP 265 -  
76055 LE HAVRE CEDEX

## ABSTRACT

*This paper concerns test results obtained with an instrumented dynamical penetrometer in a clayey site. The penetrometer is equipped at the tip and the top with strain gauges and with an accelerometer at the top. The accuracy of the measurement signal acquisition and treatment have been already discussed (1). The stress-wave travel analysis through the penetrometer provides the tip velocity and the total dynamic resistance required during the driving. The force - velocity relationships at the penetrometer toe is particularly studied. It is interesting to define a such interaction law which is very useful for numerical driving codes. Indeed, the interaction laws are not well determined and does not satisfied the computing users. This penetrometer stays a classical way to get geotechnical informations. All the presented results are only concerning the homogeneous Beautour clay.*

## 1. INTRODUCTION

Durant ces dernières décennies, plusieurs codes de calcul ont été développés pour tenter de résoudre les problèmes de prévision de battage. Différentes méthodes numériques ont été utilisées (éléments finis, différences finies, méthode des caractéristiques). Dans tous les cas, ces méthodes nécessitent la connaissance de l'interaction à l'interface sol-pieu. Des paramètres relatifs aux lois rhéologiques qui représentent le comportement du sol au voisinage du pieu lors du battage sont alors déterminés.

En outre, la plupart des codes de calcul sont établis en fonction du type d'interface (pointe ou partie latérale du pieu), du type de pieu et de l'énergie. D'autres codes de calcul utilisent des lois plus sophistiquées qui tiennent compte de la dissipation radiale et des phénomènes de contraintes résiduelles. Il faut noter que plus la loi de comportement est complexe, plus le nombre de paramètres est important.

La grande difficulté réside dans la définition et la détermination de tous ces paramètres. La limite élastique, généralement notée  $Q$ , et les facteurs d'amortissement notés  $J$  ou  $J_c$  sont les paramètres les plus élémentaires et les plus utilisés. Leurs valeurs sont déterminées à partir d'un ajustement de la réponse théorique sur un signal enregistré.

Il est important de noter que, d'une part, le critère d'ajustement est fixé au préalable et sans justification, d'autre part, l'opération d'ajustement elle-même est réalisée à l'aide de codes de calcul faisant intervenir des lois de comportement supposées à priori correctes.

Par ce procédé de calage, plusieurs paramètres ont été déterminés pour des lois usuelles telles que les lois élasto-plastiques, visco-élastiques, de frottement sec de Coulomb.

Les intervalles ainsi déterminés sont très larges et très différents et la détermination des valeurs nécessite un nombre important d'essais. Les codes utilisés à cet effet ne sont ni des codes de prédiction, ni des codes de calcul.

Une autre manière d'appréhender le comportement du sol à l'interface sol-pieu et tous les autres paramètres consiste à effectuer des essais dynamiques simulant le battage d'un pieu.

L'article relate les essais réalisés dans une argile et présente les principaux résultats obtenus concernant le comportement d'une argile sous la pointe d'un pénétromètre dynamique. Des essais, de même type ont été également conduits sur des sables siliceux et carbonatés (2).

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus a été menée de façon à approcher une loi simple du comportement de l'argile en pointe du pénétromètre.

## 2. CONDITIONS EXPERIMENTALES

### 2.1 Site

Les essais de battage du pénétromètre accompagnés d'essais scissométriques sont effectués dans un sol constitué d'une couche d'argile homogène sur le site de Beautour, près de Nantes.

## 2.2 Suivi de battage

Le système d'acquisition (1, 3) permet, pour chaque coup de marteau, de numériser un couple de données choisies en fonction des paramètres souhaités : contrainte en tête, accélération en tête, contrainte en pointe.

Le traitement des mesures nécessite des corrections qui s'imposent (3) au moment de l'intégration de l'accélération, puis de l'intégration de la vitesse.

## 3. METHODE D'ANALYSE

L'instrumentation en cours de battage du pénétromètre permet d'obtenir une mesure de contrainte (plus précisément des déformations) et des vitesses obtenues après intégration de l'accélération.

Le signal de contrainte enregistré en tête est composé d'une onde incidente, provoquée par l'impact du mouton sur la tête du pénétromètre, et des ondes induites par réflexion et transmission le long de la surface latérale et aux extrémités du pénétromètre.

La décomposition de l'onde de contrainte en une onde montante et descendante permet à la fois le calcul de la résistance dynamique totale et la compréhension du comportement du sol à l'interface par l'intermédiaire des ondes réfléchies. Cette analyse impose naturellement certaines hypothèses simplificatrices.

Compte tenu de l'instrumentation adoptée nous avons appliqué l'analyse décrite ci-dessus uniquement dans le cas du calcul de la résistance dynamique totale. En ce qui concerne le comportement du sol en pointe nous utilisons directement les mesures de contrainte effectuées en pointe.

La résistance dynamique totale est calculée, à l'aide des maxima de l'onde descendante, par simple différence de deux pics successifs (4). La vitesse de pointe est estimée en utilisant la théorie de la propagation des ondes dans un milieu élastique (5).

## 4. LOI D'INTERACTION SOL-POINTE

Dans l'argile testée, le pénétromètre présente uniquement une résistance en pointe. Les signaux de mesure des contraintes et de la vitesse en pointe du pénétromètre sont exploités de façon à tracer les relations "forces en pointe  $F_p$  en fonction de la vitesse en pointe estimée  $V_p$ " et "force en pointe  $F_p$  en

fonction du déplacement en pointe  $D_p$ ", calculé par simple intégration de la vitesse.

L'analyse de ces deux types de relation a permis de montrer que l'évolution de la force en pointe  $F_p$  en fonction de la vitesse particulière en pointe  $V_p$  est la plus adéquate pour caractériser le comportement de l'argile testée au voisinage de la pointe. En effet, la courbe de variation de la force en pointe  $F_p$  en fonction du déplacement  $D_p$  (fig. 1) est caractérisée par un palier défini sur un large intervalle de valeurs du déplacement. Ce qui signifie que le déplacement est un élément insignifiant dans le comportement de l'argile en pointe du pénétromètre d'autant plus que les valeurs du déplacement demeurent très faibles. Ainsi la vitesse représente le facteur prédominant dans cette loi de comportement et la schématisation du comportement élastique à l'aide d'un ressort linéaire n'est pas justifiée dans ce cas. La figure 2 regroupe les résultats de l'interprétation des chocs successifs dont chaque point correspond à la résistance dynamique en pointe développée dans le sol en fonction de la vitesse particulière. Bien que la dispersion des points expérimentaux soit marquée, la tendance dans l'évolution de la résistance dynamique en pointe en fonction de la vitesse semble à peu près linéaire dans un large domaine de vitesses, avec cependant une certaine concavité vers l'axe des abscisses. En conséquence l'ajustement de l'ensemble des points expérimentaux suggère la relation analytique linéaire :

$$R_d = a_1 | V_p | + b_1 \quad (1)$$

où  $a_1$  et  $b_1$  sont des constantes ;

Pour l'ajustement adopté les valeurs des constantes  $a_1$  et  $b_1$  sont déterminées.

Les résultats obtenus pour l'argile de Beautour sont récapitulés dans le tableau I.

	Constantes	
	$a_1$	$b_1$
Mode d'ajustement		
Ajustement linéaire	3,7	5,0

Tableau I : Valeurs des coefficients  $a_1$  et  $b_1$

Pour comparer les valeurs particulières des coefficients  $a_1$  et  $b_1$  avec celles proposées dans la littérature, la relation analytique (1) a été modifiée en une relation (2) du type de celle utilisée par la plupart des auteurs (5).

$$R_{dyn} = b_1 \left[ \frac{a_1}{b_1} | V_p | + 1 \right] \quad (2)$$

On pose le rapport  $\frac{a_1}{b_1} = \alpha$  exprimée en  $\text{sm}^{-1}$  et  $b_1 = R_{\text{stat}}$  où  $R_{\text{stat}}$  est la résistance statique exprimée en kN.

$$R_{\text{dyn}} = R_{\text{stat}} [\alpha |V_p| + 1] \quad (3)$$

Les valeurs de  $\alpha$  proposées dans la littérature sont données dans le tableau II.

Nature du sol	$\alpha$ (Smith)	$\alpha$ (Forehand)	$\alpha$ (Jansz)	$\alpha$ (Calculé)
Argile	1.57 - 3.54	0.66 - 3.28	0.3 - 0.6	0.74

**Tableau II : Valeurs du coefficient  $\alpha$  données dans la littérature et déduite de nos essais**

La valeur  $\alpha$  déduite de nos essais s'accorde avec les valeurs de Jansz et Forehand. L'écart constaté peut s'expliquer par les différences au niveau de la nature des sols et des approches ou des conditions expérimentales utilisées.

## 5. CORRELATION ENTRE LA PRESSION DE FONCAGE $P_f$ ET LA COHESION NON DRAINEE $C_u$

Les mesures de la pression de fonçage, qui peut être assimilée à la résistance statique en raison de la faible vitesse de pénétration et de la cohésion non drainée, révèlent une similitude dans les profils (fig. 3) pour des profondeurs comprises entre 0 et 7m. Au-delà de 7m cette similitude n'est plus vérifiée.

## 6. CORRELATION ENTRE LA COHESION NON DRAINEE $C_u$ ET LA RESISTANCE DYNAMIQUE TOTALE $R_d$

L'analyse comparative des courbes scissométriques et des courbes de battage montre une assez bonne concordance dans les profils et plus particulièrement pour les profondeurs comprises entre 0 et 5m (fig 4). Cette concordance est moins bien vérifiée au-delà de 5m : cette observation peut s'expliquer par la cicatrisation ("set-up") du sol consécutive à l'arrêt de battage.

Toujours est-il que l'étude de telles corrélations est très importante dans la mesure où elles permettent la détermination de la cohésion non drainée d'un sol à partir de la résistance dynamique calculée suivant l'interprétation décrite antérieurement.

Il n'est pas utile de rappeler que les essais scissométriques sont relativement plus lents par rapport aux essais de pénétration dynamique. D'où l'intérêt d'un tel type de corrélation.

Par ailleurs, il est important de souligner le bon accord dans l'allure des courbes de variation de la résistance dynamique exprimée en nombre de coups pour un enfoncement de 50 cm et celle déduite des signaux de mesures effectuées en tête du pénétromètre dynamique (fig 5). Ce qui permet de valider, une fois de plus, le type d'essais que nous avons adopté.

## 7. CONCLUSIONS

Le pénétromètre battu dans une argile offre des avantages pour l'analyse du comportement dynamique et du suivi de pénétration. Il est relativement maniable, simple à utiliser et rapidement opérationnel.

La série d'essais réalisée dans un terrain argileux et pour des profondeurs inférieures à 10m, ont permis d'approcher le comportement dynamique en pointe, sachant que la réaction au battage reste concentrée à la pointe. L'analyse des résultats obtenus a démontré que la résistance dynamique est une fonction de la vitesse particulière et indépendante du déplacement. Le comportement dynamique peut être simulé, dans une première approche, à l'aide d'une loi élastique avec un seuil de plasticité initial défini en fonction de la vitesse en pointe.

D'autre part, l'établissement de corrélation entre la cohésion non drainée et la résistance dynamique totale s'avère possible, ce qui représente un grand intérêt sur le plan pratique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) D. LEVACHER and A. OULARBI (1988), "Dynamic Behaviour of a Model Pile Toe in Sands", Third Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada, May 25 - 27, pp 327-333.
- (2) A. OULARBI (1988) "Dépouillements d'essais de battage dans différents sables", Rapports internes LGC ENSM, Nantes.
- (3) D. LEVACHER et A. OULARBI (1987) "Analyse de la propagation des ondes dans un pieu instrumenté", 4ème Congrès Franco-polonais, Grenoble, pp 185-204.

- (4) F. BRUCY, J. MEUNIER et J.F. NAUROY (1988) "Analysis of Pile Driving Tests in Calcareous Sand Sites" Third Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa, May 25 - 27, pp 363-373.
- (5) A. OULARBI (1989) "Applicabilité des mesures dynamiques au calcul des pieux", Thèse de Doctorat, ENSM, Nantes, 190 p.

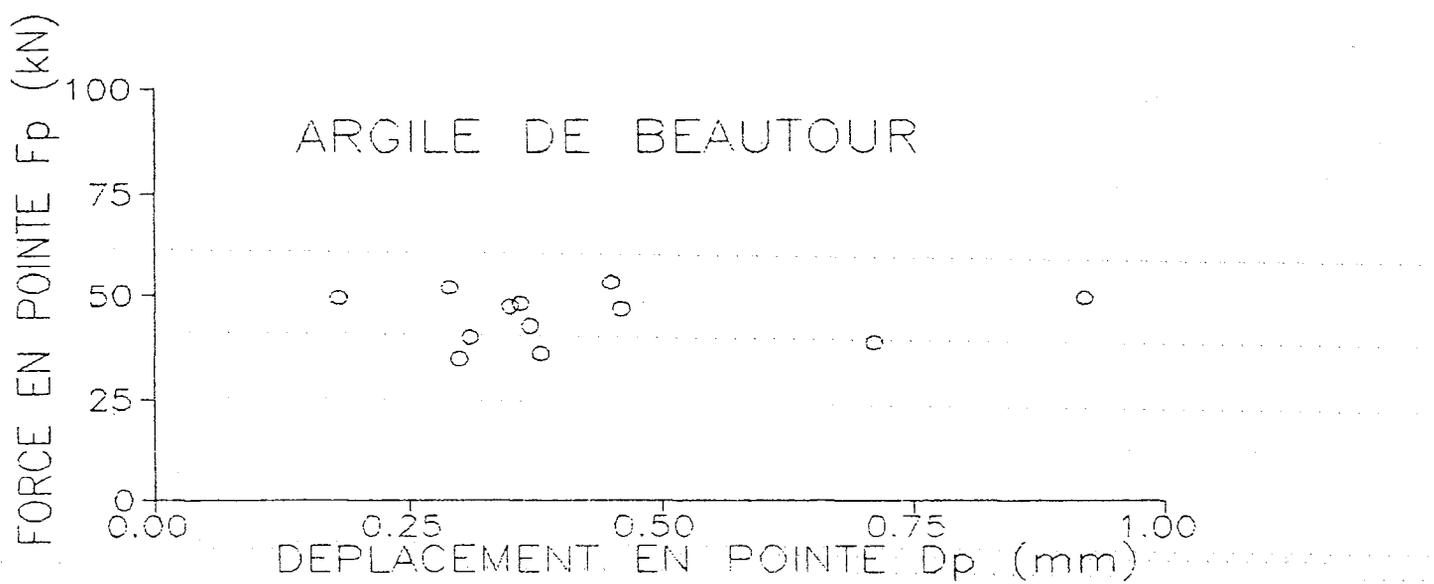


Fig. 1 : Evolution de la force de pointe  $F_p$  en fonction du déplacement en pointe  $D_p$

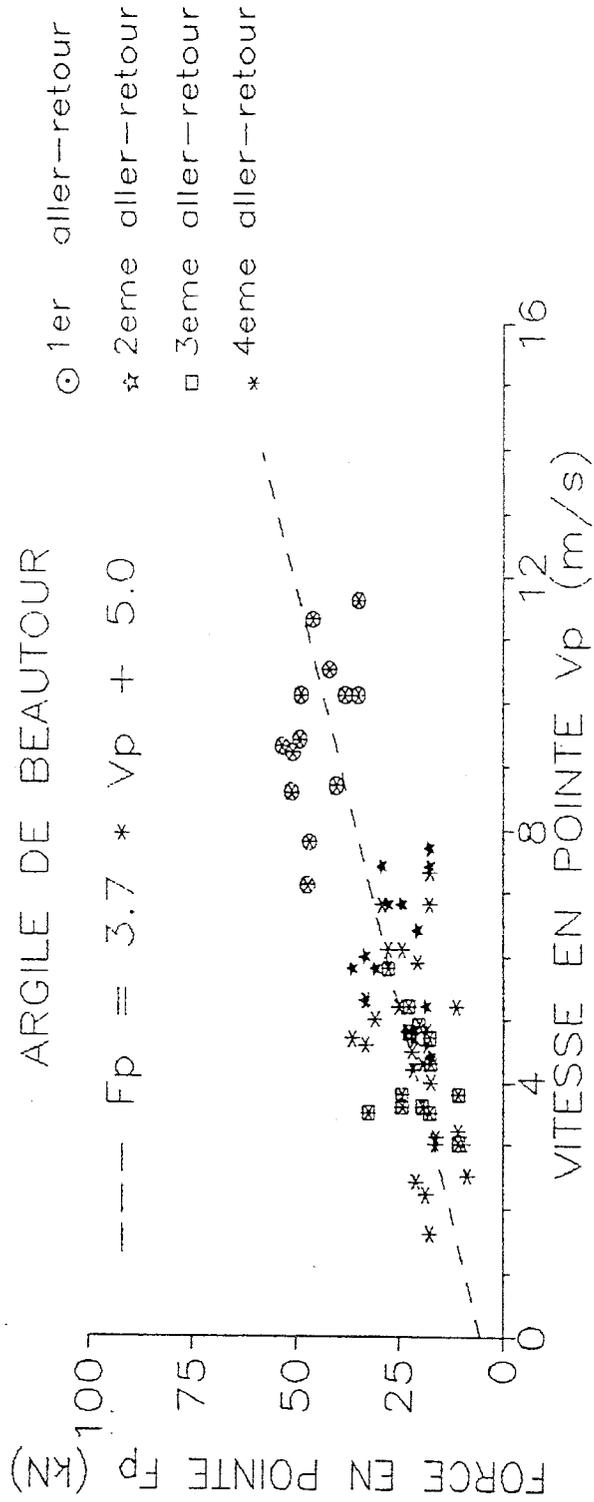


Fig. 2 : Evolution de la force de pointe  $F_p$  en fonction de la vitesse en pointe  $V_p$

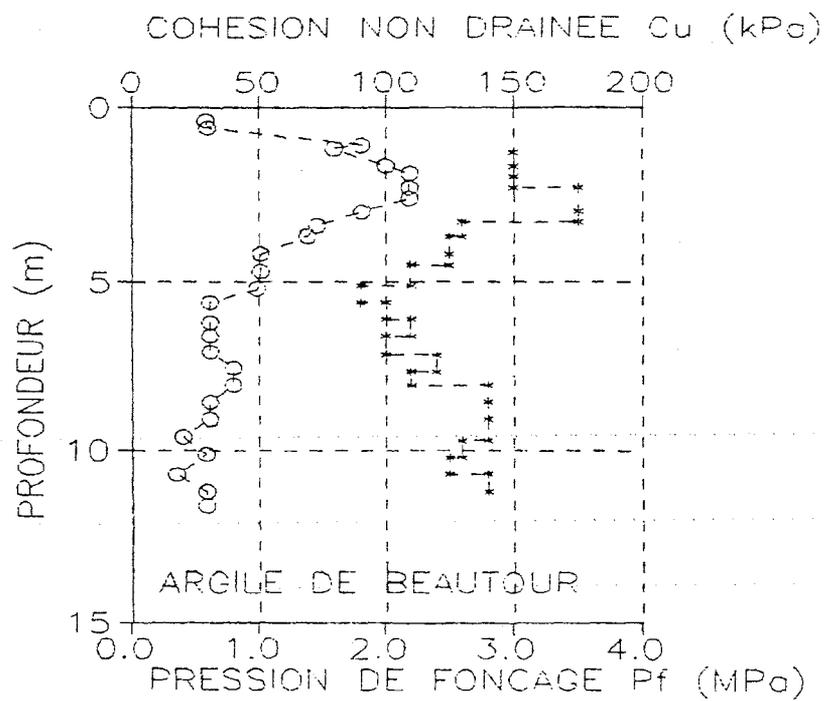


Fig. 3 : Evolution de la cohésion non drainée  $C_u$  (réf. O) et de la pression de fonçage  $P_f$  (réf. \*) en fonction de la profondeur

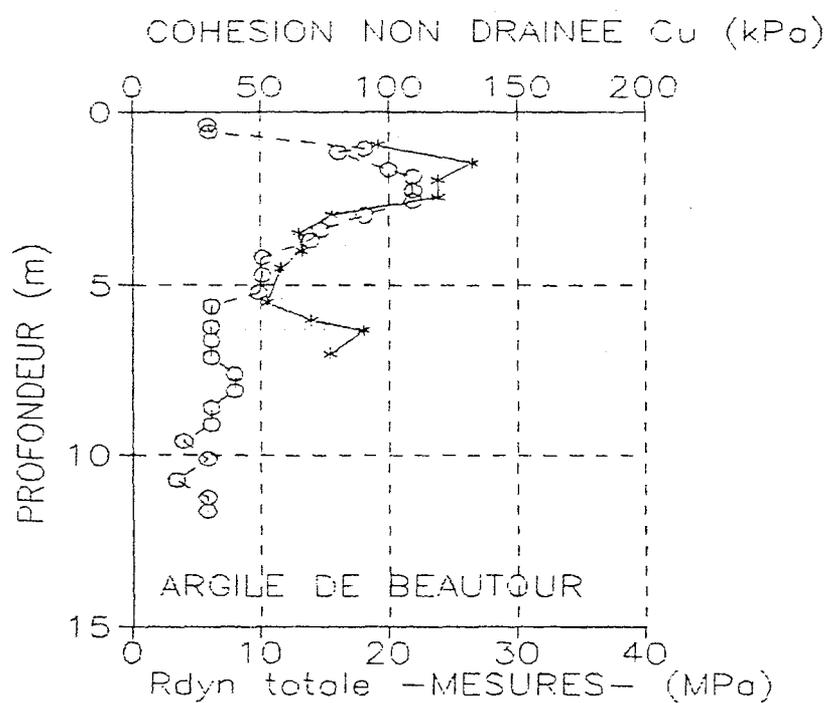


Fig. 4 : Variation de la cohésion non drainée  $C_u$  (réf. O) et de la résistance dynamique totale déduite des signaux de mesures  $R_{dyn}$  totale (Réf.\*)

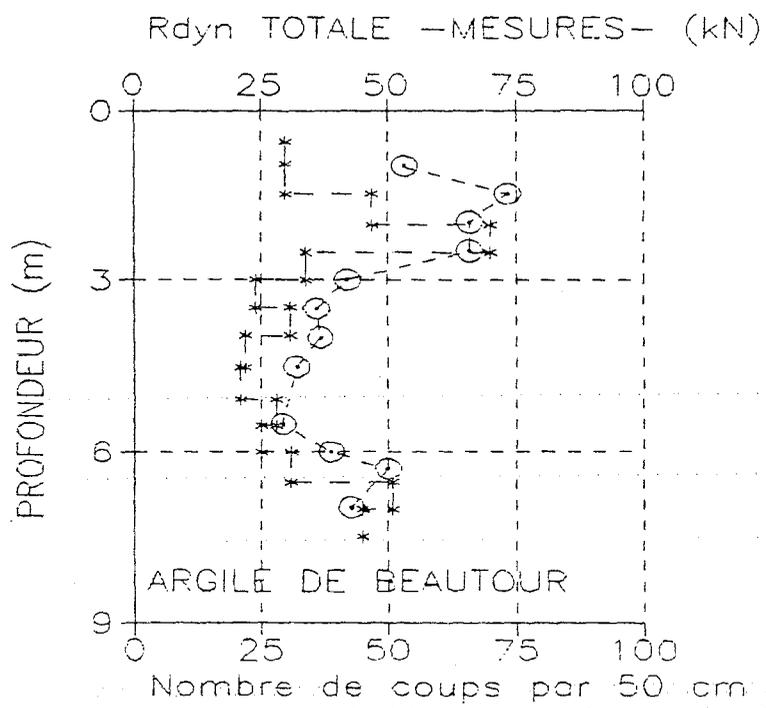


Fig. 5 : Courbes de battage (comparaison entre la méthode classique (Réf. \*) et la méthode basée sur les mesures (Réf.O))