

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

L'Essai Non-Destructif des Pieux par Impédance Mécanique

The Non-Destructive Testing of Piles by Mechanical Impedance

A.G. DAVIS Chef de Division Mécanique des Sols et des Chaussées, C.E.B.T.P., Paris, France, et Directeur Technique, Testconsult, U.K.

RESUME Le contrôle non-destructif de la qualité des pieux par la méthode d'impédance mécanique (vibration) est pratiqué en France par le C.E.B.T.P. depuis plus de douze ans. L'application principale de la méthode a été surtout la détection des défauts et des discontinuités dans un pieu de fondation. Or, compte tenu des caractéristiques mécaniques que l'on peut déduire de cet essai, il est possible d'interpréter géotechniquement la courbe de réponse d'un pieu excité et de mettre en évidence l'interaction d'un pieu chargé avec le sol de fondation. Deux cas sont ici présentés : des pieux travaillant en pointe encastrés dans un grès tendre, et des pieux flottants forés dans l'argile de Londres. Les essais d'impédance mécanique ont mis en évidence la relation entre les raideurs dynamiques mesurées, les caractéristiques géométriques des pieux, et les caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

INTRODUCTION

La méthode d'auscultation par impédance mécanique, mise au point par le C.E.B.T.P., est couramment employée dans le contrôle non-destructif des pieux et barrettes en béton. Jusqu'à présent, cette méthode fournit des renseignements concernant la qualité du béton employé et les caractéristiques géotechniques du pieu. La méthode et son application au contrôle des pieux sont décrites par Paquet (1968), Paquet et Briard (1975) et par Davis et Dunn (1974).

Or, la méthode par impédance mécanique se différencie d'autres méthodes de contrôle non-destructif par le fait que l'excitation du pieu engendre une réponse de la tête qui est fonction non seulement de la qualité du pieu, mais aussi de l'interaction du pieu avec le sol d'ancrage et le sol latéral. Il est donc possible d'interpréter les courbes de réponse qui en résultent pour obtenir des renseignements géotechniques concernant le sol de fondation et l'interaction du pieu sous charge avec ce sol. Des recherches entreprises dans ce domaine par le C.E.B.T.P. en France, et par sa filiale Testconsult Ltd. en Grande-Bretagne ont déjà obtenu des résultats prometteurs (Davis et Robertson, 1976 ; Davis et Guillermain, 1979 et 1980).

DESCRIPTION DE LA METHODE

Nous rappelons ici la méthode décrite par Paquet et Briard (1975). On applique sur la tête du pieu et selon son axe une force sinusoïdale d'amplitude constante. La tête du pieu se trouve donc animée d'un déplacement et d'une vitesse sinusoïdale, dont la fréquence correspond à celle de l'excitation. Cette vitesse est enregistrée par un capteur de vitesse posé sur la tête du pieu. La courbe de réponse obtenue a en général l'allure indiquée sur la figure 1, et fournit les grandeurs suivantes :

$$(i) \text{ La raideur du pieu : } E_D' = \frac{\text{force appliquée}}{\text{déplacement}}$$

Ce rapport est constant à basse fréquence et le système pieu-sol se comporte comme un ressort. La raideur dynamique E_D' est exprimée en MN/mm pour plus de commodité ; son inverse est la souplesse du pieu, S .

$$(ii) \text{ Le degré d'affaiblissement de propagation du phénomène dû à la dissipation d'une partie de l'énergie dans le sol, donné par :}$$

$$e^{-\sigma l} \quad \text{avec} \quad l = \frac{1}{r} \cdot \frac{\rho_c'}{\rho_c} \cdot \frac{\beta_c'}{v_c} \quad (1)$$

La constante d'amortissement σl dépend du rapport l/r qui caractérise l'élanement du pieu, et du rapport $\frac{\rho_c'}{\rho_c} \cdot \frac{\beta_c'}{v_c}$ faisant intervenir principalement les propriétés mécaniques du sol entourant le pieu.

La méthode par impédance mécanique exposée ci-dessus a été améliorée récemment par l'introduction d'une méthode de mesure accélérée, dite méthode impulsionnelle. Cette méthode décrite par Higgs et Robertson (1979) permet l'auscultation de 40 pieux par jour.

RAIDEUR DYNAMIQUE DU PIEU

A basse fréquence, la raideur dynamique E_D' d'un pieu cylindrique est constante, et donnée par :

$$E_D' = \frac{2\pi f_m}{|v_o/F_o| m} \quad (2)$$

Les paramètres contrôlant la raideur dynamique mesurée à la tête du pieu sont :

- (i) Le modèle du béton constituant le pieu, E_c
- (ii) La raideur du sol latéral entourant le pieu, caractérisée par σ_1
- (iii) La raideur du sol d'ancrage situé sous la base du pieu.

Si l'on suppose connues les grandeurs E_c et σ_1 , il est possible de déterminer les raideurs limites du système pieu-sol pour les deux cas extrêmes suivants:

Pieu posé sur une base infiniment raide

Avec une raideur maximale, E'_{\max} donnée par :

$$E'_{\max} = E'_{\infty} \coth(\sigma_1) = E' \sqrt{P/Q} \quad (3)$$

$$\text{avec } E'_{\infty} = A_c E_c \sigma_1 \quad (4)$$

P et Q sont les valeurs maximales et minimales d'admittance mécanique enregistrées dans la partie résonnante de la courbe (figure 1). La moyenne géométrique de ces deux valeurs est appelée admittance caractéristique, donnée par :

$$N = \frac{1}{\rho_c A_c v_c} = \sqrt{PQ} \quad (5)$$

$$\text{où } P = N \coth(\sigma_1) \quad (6)$$

$$Q = N \th(\sigma_1)$$

Pieu infiniment souple, se comportant comme un pieu coupé

Avec une raideur minimale, E'_{\min} donnée par :

$$E'_{\min} = E'_{\infty} \th(\sigma_1) = E' \sqrt{Q/P} \quad (7)$$

CORRELATION ENTRE L'ESSAI D'IMPEDANCE MECANIQUE ET L'ESSAI DE CHARGEMENT STATIQUE

L'essai de chargement statique est un essai de contrôle qui, tel qu'il est couramment pratiqué, conduit notamment à la détermination du tassement d'un pieu en place dû à une charge de service prédéterminée, soit la raideur statique E'_S du pieu dans le domaine élastique. Il est donc naturel de tenter d'établir une corrélation entre les raideurs dynamiques et statiques d'un pieu (E'_D/E'_S). Plusieurs

comparaisons de cette nature (Davis et Robertson, 1976) ; Davis et Guillermain, 1980) ont permis une première tentative pour l'établissement du rapport E'_D/E'_S , qui est généralement compris entre 1 et 2.

Ce rapport est plus élevé dans le cas d'un pieu vibré après l'essai de chargement statique que dans le cas inverse puisque l'essai d'impédance mécanique apparaît alors comme un rechargement de pieu.

La mise en évidence de la corrélation E'_D/E'_S avant chargement est importante dans la mesure où elle permet :

- (i) de prévoir, à partir d'un simple test de vibration, le comportement du pieu sous charge dans le domaine élastique du système pieu-sol, ou parfois jusqu'à la charge de service (pieux travaillant fortement en pointe).

- (ii) de choisir d'une façon rationnelle, à partir d'une campagne systématique d'essais de vibration nettement moins onéreuse, les pieux que l'on doit charger statiquement.
- (iii) d'évaluer à priori les tassements d'un pieu dans certains terrains bien connus, tels que l'argile de Londres par exemple (Davis et Guillermain, 1979).

INTERACTION PIEU-SOL

1. Pieux travaillant en pointe

Nous présentons ici le cas d'un chantier de pieux forés de diamètre 1200 mm qui traversent des alluvions récentes constituées de limon et d'argile molle, avant de s'ancrer dans une couche de grès tendre d'âge Carbonifère. Les pieux sont de longueur variable de 5 à 15 m, car le niveau du toit de grès est très irrégulier.

Chaque pieu est encastré de 1,5 m dans le grès. Une campagne d'auscultation par la méthode impulsionnelle sur 18 pieux a permis de vérifier la longueur et le diamètre des pieux, ainsi que la qualité du béton, qui présente une vitesse des ondes longitudinales de l'ordre de 4000 m/s. En même temps, les valeurs de raideur dynamique, E'_D des pieux ont été mesurées.

Six des pieux auscultés présentent des courbes de réponse de qualité suffisante pour la détermination de E'_{\max} et E'_{\min} à partir de la partie résonnante de la courbe. Ces valeurs sont présentées sur la figure 2 avec les valeurs de E'_D mesurées.

Une courbe de raideur théorique est dessinée sur cette figure en fonction de la longueur des pieux, avec les hypothèses suivantes :

- les pieux sont construits sur une base infiniment rigide ;
- Le frottement latéral est nul ;
- le modèle du béton $E_c = 30\ 000\ \text{MN/m}^2$;

$$- E'_{\text{théorique}} = \frac{A_c E_c}{l}$$

D'après la figure 2, il est évident que 15 des 18 pieux ont le comportement d'un pieu qui travaille en pointe (E'_D se rapproche de E'_{\max}) et que le frottement latéral est très faible (E'_{\max} légèrement supérieur à $E'_{\text{théorique}}$, $E'_D \approx E'_{\text{théorique}}$).

Par contre, trois des cinq pieux de longueur $l \leq 7\text{m}$ (donc les plus courts) montrent des valeurs de E'_D au voisinage de E'_{\min} . Ces pieux se comportent comme des pieux coupés à leur base, avec une raideur due uniquement au frottement latéral généré par les alluvions et la partie inférieure du pieu pénétrant le grès. Il est fort probable que le grès est très altéré à ce niveau, ou que le forage a désagrégé la roche tendre sous la pointe des pieux. La première hypothèse semble plus vraisemblable, étant donné que ces trois pieux se trouvent au même endroit sur le chantier.

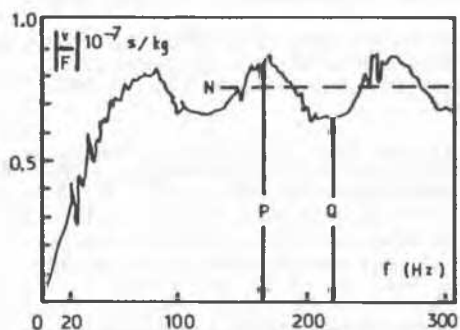


Figure 1. Courbe de réponse d'un pieu cylindrique.

Liste des notations :

A_c	section du pieu	m^2
E_c	module d'élasticité du béton	N/m^2
E'_D	raideur dynamique de la tête du pieu	N/m
l	longueur du pieu	m
r	rayon du pieu	m
v_c	vitesse des ondes longitudinales dans le béton	m/s
v_o / F_o	Admittance mécanique de la tête du pieu	s/kg
β'	vitesse de propagation des ondes transversales dans le sol	m/s
ρ'	masse volumique du sol	kg/m^3
ρ_c	masse volumique du béton	kg/m^3
σ	paramètre d'amortissement	m^{-1}

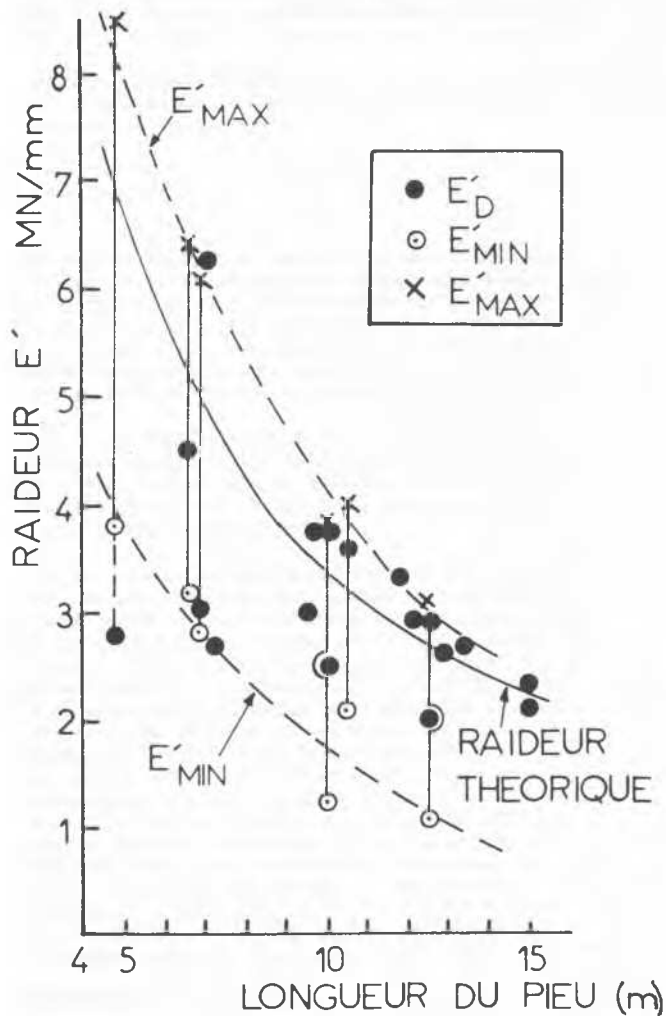


Figure 2. Pieux encastrés en pointe : valeurs limites de raideur dynamique.

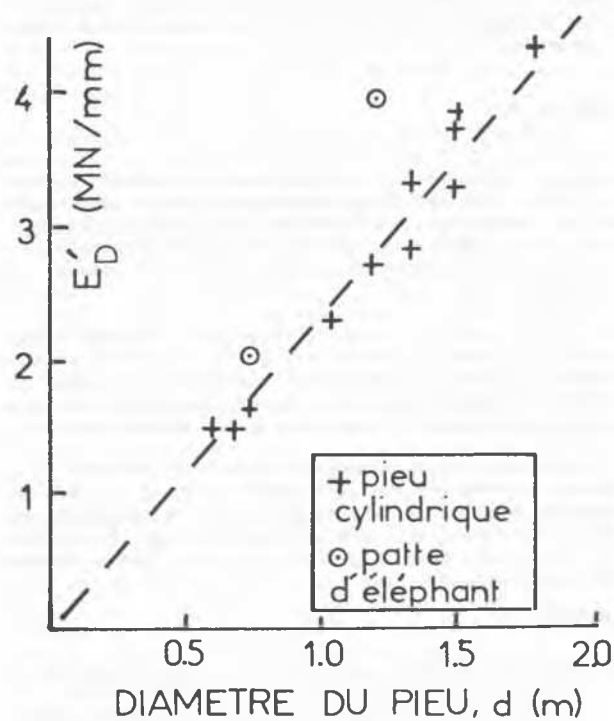


Figure 3. Raideur dynamique et diamètre du pieu : argile de Londres.

2. Pieux travaillant en frottement latéral

Davis et Robertson (1976) ont établi une relation linéaire entre la raideur dynamique E'_D et la section A_c des pieux de même longueur dans la Vallée de la Tamise en Angleterre, aux environs de Londres. Tous ces pieux traversent des terrains très mous composés de vase, d'argile molle et de tourbe, avant de s'ancrez soit dans des graves de rivière, soit dans la craie, et travaillent donc en pointe.

Depuis l'établissement de cette relation, la filiale du C.E.B.T.P. en Angleterre, Testconsult Ltd, a eu l'occasion de faire des essais sur plusieurs chantiers où les pieux sont fondés dans l'argile de Londres, et travaillent donc en frottement latéral.

La raideur d'une colonne de béton ancrée à sa base est fonction de la section de la colonne. Or, il n'en est pas de même pour un pieu travaillant en frottement latéral, car la charge verticale appliquée à la tête du pieu est dissipée dans le sol latéral par son fût. La raideur du pieu est ainsi fonction de son périmètre et donc de son diamètre.

La figure 3 met en évidence une bonne corrélation entre la raideur dynamique E'_D et le diamètre des pieux fondés dans l'argile de Londres. Les diamètres des pieux auscultés varient entre 600 mm et 1,8 m, sur six chantiers différents.

Rapportés également sur la figure 3 les résultats des pieux avec la base en patte d'éléphant. Les diamètres indiqués sont ceux des fûts ; il est évident que la présence des pattes d'éléphant augmente la raideur dynamique mesurée, montrant ainsi que la force appliquée à la tête de ces gros pieux par la méthode de vibration est suffisante pour provoquer une réaction à la base, même à basse fréquence.

CONCLUSIONS

Lorsque le C.E.B.T.P. a développé la méthode d'auscultation par impédance mécanique, il y a douze ans, on ne considérait, à l'époque, que l'intégrité du pieu, sans prendre en compte les renseignements concernant l'interaction du pieu avec le sol de fondation.

Or, cette méthode permet l'étude de l'interaction pieu/sol grâce aux relations qui existent entre la raideur dynamique mesurée à la tête du pieu, les caractéristiques géométriques du pieu et les caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

L'existence d'une corrélation entre la raideur dynamique mesurée par cette méthode et la raideur déduite d'un essai de chargement statique permet un choix rationnel des pieux à vérifier par chargement, et donc une économie importante lors d'une opération de construction.

REFERENCES

Davis, A.G. et Dunn, C.S. (1974). From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, 57, pp. 571 - 593.

Davis, A.G. et Guillermain, P. (1979). Interprétation géotechnique des courbes de réponse de l'excitation harmonique d'un pieu. Revue Française de Géotechnique, n° 8, pp. 15-21.

Davis, A.G. et Guillermain, P. (1980). La vibration des pieux : interprétation géotechnique. Annales I.T.B.T.P., série SF/170, n° 380, pp. 70-86.

Davis, A.G. et Robertson, S.A. (1976). Vibration testing of piles. Structural Engineer June 1976, pp.A7-A10.

Higgs, J.S. et Robertson S.A. (1979). Integrity testing of concrete piles by shock method. Concrete, Vol. 13, n° 10, pp. 31-33.

Paquet, J. (1968). Etude vibratoire des pieux en béton : réponse harmonique et impulsionnelle application au contrôle. Annales I.T.B.T.P., série EM/111.

Paquet, J. et Briard, M. (1975). Contrôle non-destructif des pieux en béton. Annales I.T.B.T.P., série SF/128.