

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 116 (1990)
Heft: 12

Artikel: Analyse prévisionnelle de la capacité portante de pieux battus préfabriqué: aspects liés à l'utilisation de méthodes récentes
Autor: Oboni, Franco
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77262>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Analyse prévisionnelle de la capacité portante des pieux battus préfabriqués

Aspects liés à l'utilisation de méthodes récentes

1. Introduction

Parmi la multitude des techniques de mise en place de fondations profondes disponibles, celle des pieux battus est probablement l'une des plus anciennes et reste souvent, de nos jours et dans les conditions du marché actuelles, une solution économiquement avantageuse.

PAR FRANCO OBONI,
MORRENS

Si, d'une part, les techniques modernes de préfabrication et de mise en place des fûts permettent d'atteindre des capacités portantes intrinsèques (résistance de la section en béton armé) et géotechniques (capacité portante globale) inimaginables il y a seulement quelques années, les techniques modernes d'essais dynamiques [14]¹ permettent, d'autre part, d'optimiser le battage et le dimensionnement lors de l'exécution.

Il n'en reste pas moins que la compression générale des délais alloués à la construction et la nécessité de commander à l'avance les fûts d'une longueur aussi correcte que possible nous obligent à développer des outils prévisionnels de plus en plus performants, sans que le budget «reconnaissance» en soit pour autant trop alourdi.

La présente communication résume nos expériences récentes en la matière, fondées sur l'utilisation de sondages pressiométriques [3] [5] en lieu et place des sondages carottés habituels, en partant de l'exemple d'un petit chantier de pilotage situé au nord de la ville de Lausanne.

Afin de montrer les avantages et les inconvénients de la méthode choisie par rapport aux méthodes classiques habituelles, des calculs prévisionnels fondés sur différentes méthodes sont présentés.

2. Campagne de reconnaissance

2.1 Exécution des sondages

Suite à l'exécution de trois sondages préliminaires à la pelle rétro qui avaient révélé l'existence de terrains argileux fortement compressibles à faible profondeur, nous avons indiqué à notre mandant l'opportunité d'entreprendre une étude géotechnique complémentaire ayant pour but de rechercher un horizon portant, capable de reprendre les charges du bâtiment projeté sans générer des tassements excessifs.

Dans le cadre de ce mandat complémentaire trois sondages pressiométriques appelés S1, S2 et S3 (fig. 1) furent exécutés par l'entreprise MS Mesures et Sondages SA de Lausanne qui, conformément aux instructions reçues, effectua un essai pressiométrique tous les 2 m de profondeur dans chaque sondage.

Cette entreprise spécialisée utilise une machine sur chenilles dont l'équipement standard permet le forage à la tarière $\varnothing = 63$ mm jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre, dans des terrains mous, 30 m environ, et dans bien des cas la traversée de strates molassiques. Un marteau de fond de trou peut être utilisé pour l'attaque en destructif de blocs et autres obstacles durs.

Le forage est exécuté en continu avec le levé simultané de la stratigraphie sur la base de l'observation des matériaux évacués par la tarière. Lorsque le niveau de fin de forage est atteint, les essais pressiométriques [9] sont effectués en remontant, à la sonde nue ou avec la sonde protégée par un tube fendu, au cas où le terrain a une très mauvaise tenue.

TABLEAU 1. — Profondeur des limites des couches [m] et description des terrains rencontrés au droit des trois sondages (voir aussi fig. 1).

Couche/Description	S1	S2	S3
A Terre végétale et remblais	0- 0,50	0- 0,20	0- 0,30
B Argiles limoneuses plastiques verdâtres	0,50- 3,40	0,20- 4,80	0,30- 4,50
C Argiles sablo-limoneuses bleues tendres	3,40- 8,80	4,80-11,50	4,50- 8,50
D Moraine bleue, consistance croissant avec la profondeur	8,80-15,00	11,50-15,00	8,50-15,00

Résumé

A partir des résultats fournis par une campagne de trois sondages pressiométriques et de leur interprétation, cet article compare tout d'abord les résultats prévisionnels obtenus par différentes méthodes. Ensuite les résultats obtenus lors du battage sont discutés en les comparant avec les prévisions. Ces comparaisons mènent l'auteur à proposer certains réajustements dans la façon d'aborder ce problème spécifique et à former un certain nombre de recommandations pratiques.

D'emblée, il y a lieu de remarquer que nous avons déjà réalisé passablement d'expériences dans la région avec des méthodes de reconnaissance plus classiques, fondées notamment sur des sondages carottés et des essais SPT, et que de ce fait nous avons décidé de comparer les deux méthodes de travail.

2.2 Résultats des sondages

La stratigraphie interprétative dégagée à partir de l'observation des résidus de tarière extraits dans les trois sondages est résumée dans le tableau 1.

Il est intéressant de noter que, du point de vue géologique, les couches B et C sont à classer parmi les sols déposés lors du retrait glaciaire, la couche B étant constituée par des alluvions lacustres alors que la couche C est formée par des matériaux d'origine glacio-lacustres.

Les eaux souterraines furent mesurées à environ 4 m de profondeur, soit au voisinage de l'interface des couches B et C. Il est utile de rappeler ici que les essais pressiométriques consistent à mesurer le comportement du terrain autour d'une cavité en expansion et à le caractériser par deux paramètres appelés la pression limite p_l et le module pressiométrique E_p . Les conditions de drainage dans les sols fins sont telles qu'il est possible d'admettre que les paramètres dégagés sont des paramètres apparents (non drainés).

Les essais pressiométriques effectués dans les sondages permirent de qualifier la compressibilité des matériaux traversés comme très importante pour la couche B, moyennement importante pour la couche C et faible pour la couche D. En effet, du point de vue quantitatif, le profil idéalisé des

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

$$\text{C.O.V. } S_{\mu} = 35\%$$

Les calculs prévisionnels analytiques classiques de la capacité portante P_{adm} , fondés sur l'estimation de la résistance

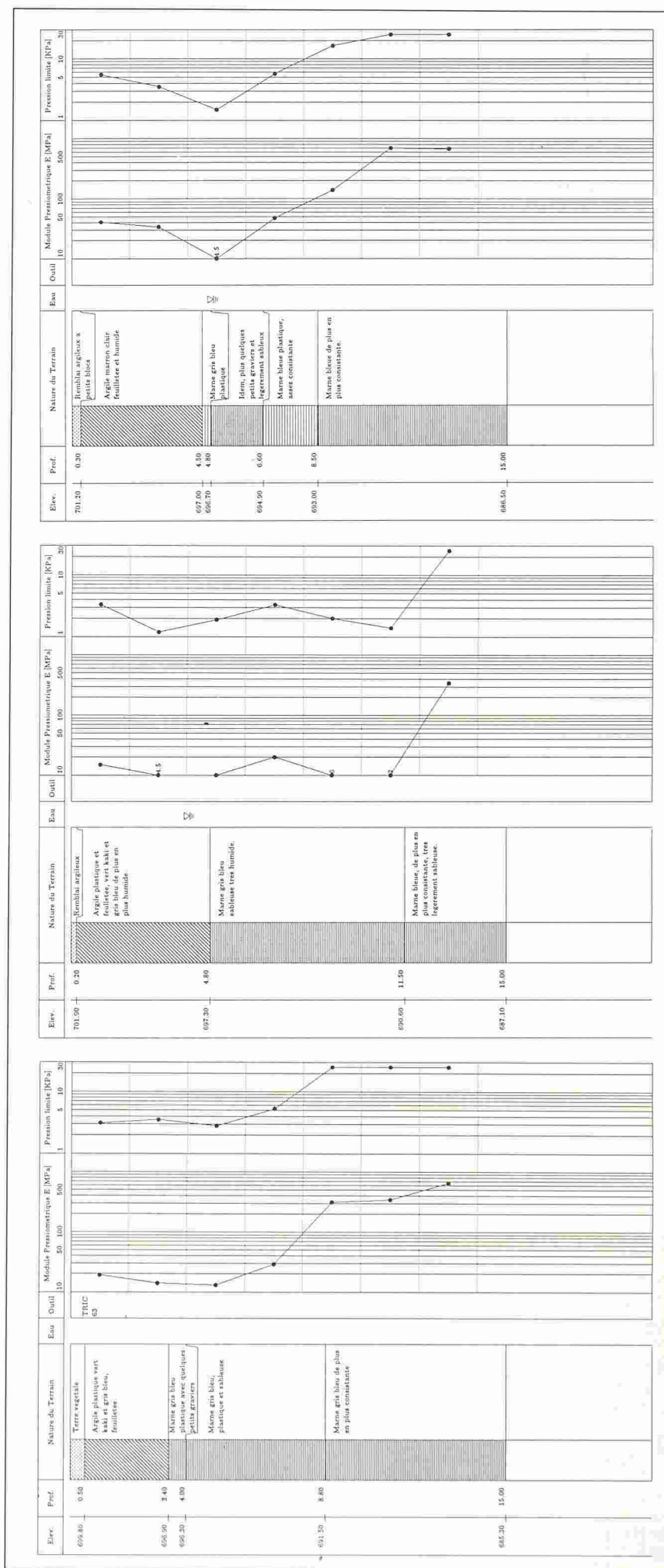


Fig. 1. - Levé des sondages pressiométriques S1 à S3 (de gauche à droite): stratigraphie, module pressiométrique et pression limite.

TABLEAU 2. — Modules pressiométriques de calcul au droit des trois sondages effectués.

S1	S2	S3	Module
entre 0 m et 9,0 m puis, jusqu'à 12,0 m et au-delà on pourra admettre	11,5 m 15,0 m	8,5 m 11,0 m	$E_p < 3 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ $E_p = 30 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ $E_p = 60 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$

TABLEAU 3. — Caractéristiques géomécaniques sélectionnées pour le calcul des pieux considérés.

	$\gamma \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$c' \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$	$\varphi' ^\circ$	$S_u \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$	N_{SPT}	$EMN \cdot \text{m}^{-2}$
B	19	0	28	20	4	6
C	20	0	28	30	8	8
D	21	10	33	80	30	40
où:						
γ Poids volumique apparent						
c' Cohésion effective						
φ' Frottement effectif						
S_u Résistance au cisaillement non drainée						
N Nombre SPT, soit nombre de coups de l'appareil standardisé pour un enfoncement de 0,3 m						
E Module de Young						

en pointe P_{ub} et du fût P_{uf} en contraintes effectives ou totales, donnent les résultats consignés dans le tableau 4, en considérant des facteurs de sécurité théoriques pour la base F_{sb} et pour le fût F_{sf} identiques et égaux à 2.

$$P_{adm} = P_{ub}/F_{sb} + P_{uf}/F_{sf}$$

Dans le tableau 4, la première valeur est obtenue en considérant une longueur de pieu correspondant à un arrêt sur la moraine et la deuxième correspond à une fiche de 1 m dans ce dernier horizon.

Il est facile de constater que le fait de pénétrer de quelques décimètres dans la moraine entraîne une augmentation sensible, de 10 % à 30 % en fonction du diamètre, de la charge admissible.

Ces mêmes méthodes ont permis d'évaluer la fraction de charge reprise par le fût, qui est de l'ordre de 25 à 35 % de la charge totale, les valeurs les plus fortes étant obtenues pour les pieux de faible diamètre.

Des résultats similaires ont été obtenus avec la méthode de Aoki & Velloso [2] ou par celle des recommandations japonaises pour les fondations des ouvrages autoroutiers [7], qui sont fondées sur l'utilisation des résultats des

TABLEAU 4. — Charge de service admissible en fonction du diamètre et de la longueur des pieux.

Diamètre [mm]	Charge de service admissible [kN]
240	433-480
350	783-869
450	1010-1305

essais SPT pour la détermination semi-empirique de la résistance de pointe et de celle du fût.

Dans les deux cas cependant, si les capacités ultimes sont similaires à celles déterminées par la méthode classique en contraintes totales ou effectives, les facteurs de sécurité à appliquer nous amèneraient à utiliser de manière bien moins efficace les pieux, ce qui irait à l'encontre des résultats pratiques obtenus avec ce type de pilotage dans la région (tableau 5).

5. Calculs prévisionnels selon la méthode modifiée de Oboni

L'auteur a présenté, en 1988 et 1989, une méthode probabiliste pour l'évaluation probabiliste des performances

des pieux forés chargés axialement en tête [11] [12] [13].

Dernièrement, cette méthode a été modifiée par l'auteur pour tenir compte du mode d'installation des pieux par battage.

Cette modification, qui demande encore à être vérifiée expérimentalement, est d'une mise en œuvre très simple car elle est fondée sur une augmentation du coefficient de surconsolidation OCR visant à simuler l'augmentation des contraintes latérales provoquée par le déplacement du terrain par le pieu.

Les résultats sont valables, comme d'ailleurs pour l'ensemble des méthodes mentionnées plus haut, après la dissipation des surpressions interstitielles qui se manifestent après le battage.

Comme toutes les méthodes probabilistes, la méthode utilisée permet de tenir compte de la dispersion intrinsèque des caractéristiques mécaniques des matériaux [15] [16] et d'intégrer aux analyses de nouvelles informations [4] [6], si celles-ci deviennent disponibles par la suite.

Dans le cas particulier étudié, cette méthode a donné des résultats assez différents de ceux que donnent les méthodes classiques car la part de charge reprise par le fût a été évaluée égale à environ 56 %, donc approximativement égale à la moitié de la charge appliquée en tête du pieu au stade de service (fig. 2). Il y a d'emblée lieu de remarquer que ce fait ne représente rien de particulier, car de nombreux exemples d'essais de charge bien documentés [8] reportés dans la littérature ont montré que des conditions similaires peuvent exister pour des pieux préfabriqués en béton armé battus, de dimensions analogues à ceux considérés ici.

La méthode utilisée définit la sécurité des pieux par des indicateurs probabilistes parmi lesquels nous citons l'index de fiabilité de la pointe β , qui est le rapport entre l'écart type de la fiabilité et sa valeur moyenne. La fiabilité est en général définie comme la différence entre la résistance et la sollicitation d'un élément, alors que le facteur de sécurité classique est le rapport de ces deux mêmes forces.

L'index de fiabilité β de la pointe a été estimé, pour les pieux de ce projet, égal à environ 2, ce qui implique une probabilité de rupture de l'ordre de 3 % qui, selon nos expériences, est une valeur recommandable pour cet indicateur et ce type de structure.

Le coefficient de variation de la force reprise à la base des pieux a été évalué à environ 17 %, ce qui se compare bien avec des valeurs déterminées dans la littérature dans des cas de battage [1].

TABLEAU 5. — Comparaison des résistances unitaires et des facteurs de sécurité le long du fût et à la base des pieux selon les deux méthodes semi-empiriques utilisées. Les valeurs de la résistance unitaire le long du fût correspondent respectivement aux terrains de couverture et à la moraine.

Méthode	Résistances unitaires [kN · m ⁻²]		Facteurs de sécurité	
	fût	base	fût	base
Aoki	36-180	6000	3,5	1,75
JPR	60-150	6000	3,0	3,00

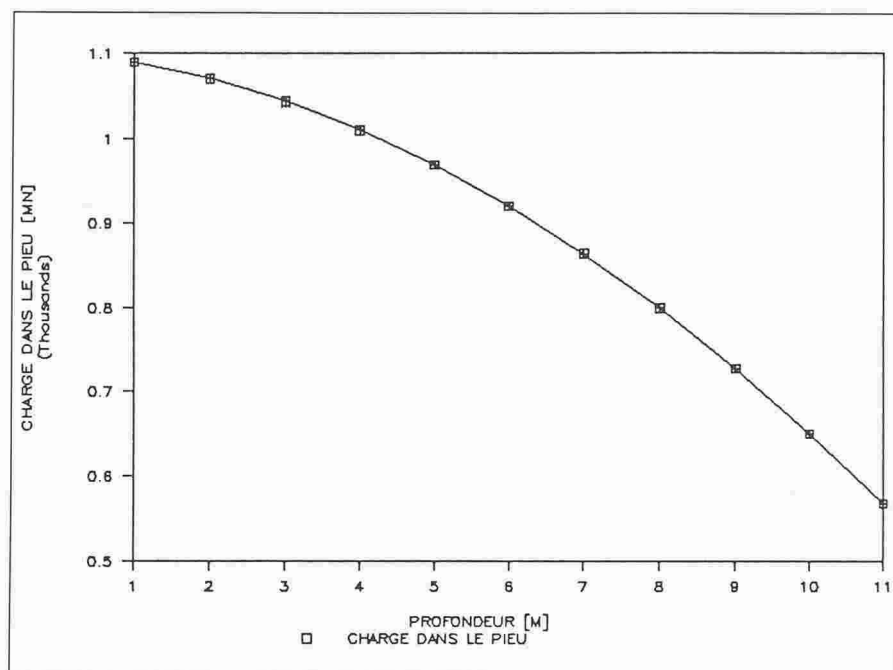


Fig. 2. - Distribution de la charge le long d'un pieu Ø 450 mm, longueur 11 m, selon la méthode probabiliste.

6. Calculs prévisionnels fondés sur les résultats pressiométriques

Les règles de Ménard ont été utilisées pour la détermination de la résistance de pointe q_t et de la résistance au frottement latéral f_u , ces deux valeurs étant obtenues en fonction de la valeur de la résistance de la pression limite p_t .

Lors des analyses, nous avons rapidement remarqué que la densité des pressiomètres que nous avions fait exécuter n'était pas suffisante pour permettre une analyse détaillée et satisfaisante du problème considéré à proximité de la pointe des pieux. En effet, le passage entre la couche C et la moraine D se reflète, au niveau de la pressiométrie, par une augmentation brutale de la pression limite et du module pressiométrique. Ainsi, entre le dernier essai donnant une pression limite médiocre et le suivant, situé 2 m plus profondément, il est resté un «vide» difficile à combler au niveau des analyses numériques visant, entre autres, à déterminer la cote d'arrêt des pieux au sein des couches portantes.

Des calculs paramétriques (tableau 6) nous ont cependant montré que la méthode pressiométrique avait tendance à surestimer l'effet de pointe par rapport aux autres, dès que la pression limite tend vers des valeurs supérieures à 1500 kN·m⁻². En revanche, les valeurs de f_u obtenues se comparent bien avec celles obtenues par les formulations classiques analytiques ou empiriques.

Des expériences récentes effectuées en France ont montré que les valeurs de f_u obtenues en utilisant ces règles sont en

TABEAU 6. - Résistances unitaires le long du fût (couverture-moraine) et à la base (calcul paramétrique en fonction de la profondeur et de la pression limite).

Fût	Résistances unitaires [kN·m ⁻²]		
	Base		
	z	p_t	q_t
50-120	9	500	950
	10	1000	3330
	11	1500	5100
	11	2000	6900
	11	2500	8700

général sous-estimées par rapport à la réalité: il semblerait donc que le résultat amené par la méthode probabiliste utilisée ici soit intéressant, car il se rapproche davantage des résultats des mesures. Naturellement, de nombreuses confirmations seront nécessaires pour vérifier cette tendance.

Bibliographie

- [1] ALM, T.; BYE, A.; KVALSTAD, T.J.: «A new interpretation of soil resistance for pile driveability analysis», *Proc. XII ICSMFE*, 1989.
- [2] AOKI, N.; VELLOSO, D.A.: «An approximate method to estimate the bearing capacity of piles», *Vth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1975.
- [3] BAGUELIN, F.; JEZEQUEL, J.F.; SHIELDS, D.H.: «The pressure-meter and foundation engineering», *Trans tech. publications*, CH4711, Suisse, 1978.
- [4] BAKHT B.; JAEGER, L.G.; DORTON, R.A.: «Deep foundation design in the New Ontario highway bridge design code, discussion», *Canadian geotechnical journal*, vol. 20, 1983.
- [5] BUSTAMANTE, M.; GIANNESSELLI, L.: «Portance réelle et portance calculée des pieux isolés sollicités verticalement, règles pressiométriques», *Revue française de géotechnique*, vol. 116, 1982.
- [6] JAEGER, L.G.; BAKHT, B.: «Number of tests versus design pile capacity», *JGED, ASCE*, vol. 109, N° 6, 1983.
- [7] JPR: «Specifications for highway substructure design IV», Japan road association, 1980.
- [8] JSSMFE: «Task force, Preliminary report on questionnaire survey conducted by technical committee on Pile Driving (TC18)», Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989.
- [9] L.C.P.C: *Mode opératoire de l'essai pressiométrique normal*, Dunod, 1971.
- [10] MÉNARD, L.: «Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour les calculs des fondations», Société L. Ménard, B.P. N° 2, 91160 Longjumeau, Notice Générale D60, édition janvier 1975.
- [11] OBONI, F.: *Evaluation probabiliste des performances des pieux forés chargés axialement en tête*, thèse 716, EPFL-DGC, 1988.
- [12] OBONI, F.: «Probabilistic Evaluation of the Performance of Axially Loaded Bored Piles», International Conference on Structural Safety and Reliability, S. Francisco, 1989-1.
- [13] OBONI, F.: «Probabilistic Methods for Axially Loaded Bored Shafts», XIII Conférence Internationale de Mécanique des Sols et Travaux de Fondation, Rio de Janeiro, 1989-2.
- [14] RAUSCHE, F.; GOBLE, G.G.; GARLAND, E.L.: «Dynamic determination of pile capacity», *JGED, ASCE*, vol. 111, N° 3, 1985.
- [15] RECORDON, E.; DESPOND, J.-M.: «Dispersion des caractéristiques des sols naturels considérés comme homogènes», *Proceedings 9th ICSMFE*, Tokyo, 1977.
- [16] SCHULTZE, E.: «Frequency distribution and correlations of soil properties», *Proceedings ICASP*, 1972.

7. Résultats du battage

Tous les pieux exécutés se sont arrêtés au voisinage de l'interface entre les couches C et D, avec des pénétrations relativement modestes dans la couche D. Les 7 dernières volées de 10 coups ont donné, pour chaque diamètre utilisé sur le chantier, les pénétrations définies dans le tableau 7.

Le coefficient de variation de la pénétration $C.O.V._{pén}$ au niveau de la couche portante est de l'ordre de 20%, ce qui se compare fort bien avec des valeurs de l'ordre de 15 à 17% données dans la littérature lorsque la dispersion de l'énergie de battage est prise en considération.

D'autre part, il est intéressant de comparer le $C.O.V._{pén}$ avec le coefficient de variation de la résistance latérale. En effet, si l'on admet que pendant le battage le sol atteint sa résistance au frottement résiduelle, à cause des grandes déformations, l'on pourrait s'attendre que le $C.O.V._{pén}$ serait encore plus faible que celui de la résistance de pic, suite à la réorientation des éléments granulaires du sol.

A notre avis, la valeur élevée du $C.O.V._{pén}$ est due au fait que la pénétration est le résultat de l'ensemble du frottement sur le fût et qu'elle englobe, en réalité, le comportement de toutes les strates traversées.

Enfin, il y a lieu de remarquer que le calcul de la capacité portante effectué par l'entreprise de battage à l'aide de la

TABLEAU 7. – Statistique des pénétrations obtenues lors des 70 derniers coups de battage pour l'ensemble des pieux du chantier considéré et pour différents diamètres.

Diamètre [mm]	Pénétration [cm]			
	min.	max.	moy.	écart type
240	32	66	48	9,7
350	29	57	37	7,4
450	26	37	29	5,9

formule dynamique de Stern a montré que les charges minimales admissibles étaient atteintes sans difficultés par l'ensemble des pieux, en confirmant les calculs théoriques prévisionnels.

8. Conclusions

Cette communication a montré que la méthode de reconnaissance fondée sur des sondages à la tarière lourde couplés avec l'exécution de pressiomètres est une méthode de reconnaissance valable pour l'étude de projets de travaux de pilotage avec des pieux préfabriqués battus dans notre région.

Le fait que cette technique de reconnaissance soit d'un prix très compétitif par rapport aux méthodes classiques devrait inciter la communauté géotechnique à exploiter la possibilité d'obtenir davantage de renseignements pour un investissement égal, en proposant aux

mandants plus de sondages et des densités d'essais plus importantes.

Cette augmentation du nombre d'essais effectués sur chaque site devrait aussi nous amener, si cela est encore nécessaire, à adopter des techniques probabilistes de prise en compte de la variabilité des paramètres qui permettent d'intégrer les renseignements obtenus dans un cadre conceptuel transparent et pragmatique.

En ce qui concerne les aspects de détail, cette communication a aussi montré que la densité des essais à effectuer pourrait être adaptée à la nature du problème considéré et que, probablement, des résultats optimaux peuvent être obtenus en passant d'une fréquence relativement faible le long de la zone représentant le futur fût des pieux à une densité maximale (1 essai/m¹) dans la zone de fiche.

Aussi, il est rappelé que des résultats de haute qualité peuvent être obtenus en couplant la pressiométrie avec la pénétration dynamique qui permet, à notre point de vue, une meilleure analyse des problèmes liés au battage et à la détermination de la cote d'arrêt des pieux dans les couches portantes.

Adresse de l'auteur:
Franco Oboni
Ingénieur civil EPFL/SIA
D^r ès sc. techn.
Oboni & Associés SA
Les Biolettes
1054 Morrens

Actualité

Le «bac de demain»: un catamaran à coussin d'air

Pour ses constructeurs, la société des chantiers navals Blohm & Voss à Hambourg, le nouveau catamaran avec coussin d'air entre ses deux coques récemment présenté est le prototype du «bac de demain» qui pourra naviguer aussi bien en mer que sur des parcours côtiers.

Plutôt lourd d'allure extérieure, ce bateau long de 36 m pour 13 de large, du type «Corsair», en construction plastique, peut atteindre une vitesse de pointe de l'ordre de 50 nœuds, c'est-à-dire plus de 90 km/h. Il peut affronter sans problème les gros temps avec des creux de 3 m, sans être pour autant plus bruyant qu'un bateau de type classique.

Etant donné la vitesse de croisière élevée, les passagers y seront confinés à l'intérieur tandis que le bateau sera mené par deux pilotes dans un cockpit bourré d'ordinateurs et propulsé par deux moteurs Diesel, un dans chaque coque, pouvant atteindre jusqu'à 3400 ch.

D'un prix unitaire de 12 à 15 millions de deutschmarks, ces bateaux intéressent d'ores et déjà, outre des clients allemands, divers Etats arabes, le Canada et la Grèce, notamment pour les services de police maritime, les

garde-côtes ou encore les patrouilles de douane.

Autre constructeur et autre mode de propulsion aquatique, la Motoren- und Turbinen-Union de Friedrichshafen, qui appartient au groupe Daimler-



Le «bac de demain» sur coussin d'air.