



# MISE EN CHARGE DE PIEUX BATTUS

## 2<sup>e</sup> PARTIE : ESSAIS DYNAMIQUES

Noël Huybrechts, ir., chercheur, division Géotechnique & Procédés d'exécution, CSTC  
Christian Legrand, ir., chef de la division  
Géotechnique & Procédés d'exécution, CSTC  
Alain Holeyman, professeur, Génie civil, UCL

Une campagne d'essais de mise en charge de pieux a été réalisée à la station expérimentale du CSTC à Limelette. Un premier article traitant des résultats d'essais de mise en charge statique a été publié dans un précédent numéro du Magazine [5]. Cette seconde partie présente les résultats d'essais de mise en charge dynamique entrepris sur un pieu battu tubé et sur un pieu préfabriqué.

## 1 ESSAIS DYNAMIQUES ET STATIQUES

Les essais dynamiques consistent à soumettre la tête du pieu à un impact (par exemple, au moyen d'une lourde masse tombante) durant lequel on mesure la force appliquée, la vitesse et le déplacement de la tête. Les résultats obtenus permettent de déduire les caractéristiques du pieu en matière de capacité portante statique, en utilisant la théorie de la propagation des ondes et une modélisation de l'interaction pieu-sol.

Les essais dynamiques ne manquent pas d'attrait en raison de leur coût nettement plus avantageux que celui des essais statiques, mais leur application reste limitée en Belgique. Ceci peut s'expliquer par les facteurs suivants :

- les caractéristiques statiques définies à partir des essais de mise en charge dynamique ne sont pas nécessairement représentatives du comportement statique du pieu à long terme
- le déplacement du pieu occasionné lors d'un essai de mise en charge dynamique est plus faible que celui observé lors de la rupture d'un pieu au cours d'un essai de mise en charge statique exécuté à des fins de recherche (dans ce cas, le pieu est généralement mis en charge jusqu'à ce que se produise un déplacement équivalant au moins à 10 fois le diamètre du pieu). Cet argument n'est cependant pas pertinent lorsque les essais statiques sont destinés au contrôle, car la charge maximale du pieu se limite alors à 1,5 à 2 fois la charge de service.

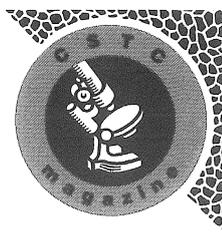
Nous pouvons établir de manière générale que la méfiance à l'égard des essais dynamiques est essentiellement nourrie par un manque d'expérience, notamment dans l'analyse et l'interprétation des mesures au moyen des modèles existants.

Nous étudierons, dans la suite du texte, la manière d'interpréter et d'analyser les résultats d'essais de mise en charge dynamique. Ainsi, les mesures effectuées à Limelette dans le cadre des essais de mise en charge dynamique sur un pieu battu tubé et un pieu préfabriqué ont été analysées et interprétées sur la base du modèle proposé par le TNO (institut néerlandais de recherche en sciences appliquées). Il existe bien entendu d'autres modèles d'analyse des mesures, mais l'objectif principal des expérimentations était de montrer comment se déroulent des essais de mise en charge dynamique sur pieux, quelles sont les hypothèses utilisées dans la modélisation et quels sont les résultats qu'on peut effectivement en tirer.

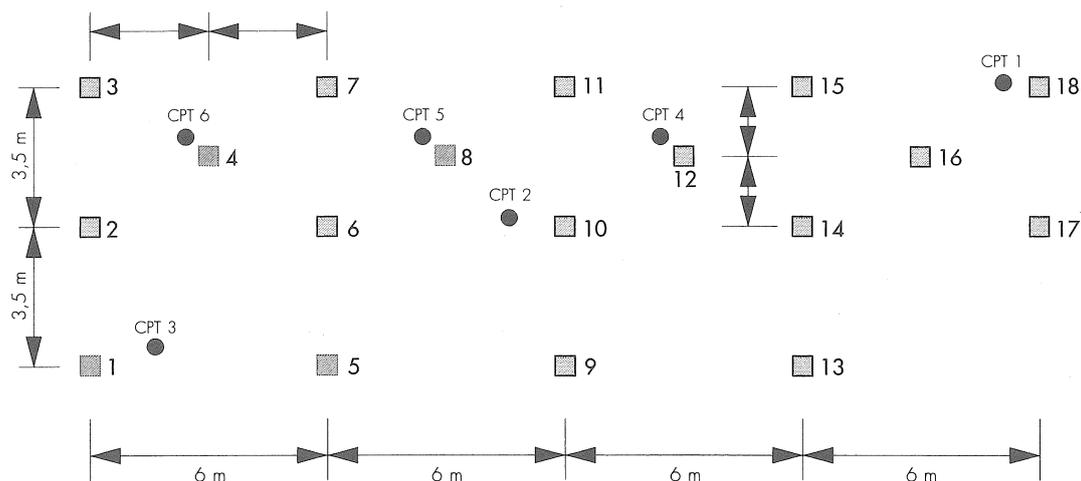
## 2 IMPLANTATION DES PIEUX ET CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Dix-huit pieux ont été mis en œuvre sur le terrain de la station expérimentale du CSTC à Limelette. La figure 1 en schématise l'implantation ainsi que les emplacements choisis pour la reconnaissance du sol (6 CPT – essais de pénétration au cône). Les pieux 1 (tubé) et 5 (préfabriqué) sont des pieux battus soumis à une charge dynamique. Les pieux 4 (tubé) et 8 (préfabriqué) ont, quant à eux, subi des essais statiques. Pour plus d'informations au sujet des résultats des essais statiques, des dimensions et des méthodes d'installation des différents pieux, on se référera à la première partie de l'article [5].

Le sol se compose, sur les 8 premiers mètres de profondeur, de sable et de limon couvrant une couche de sable très compact. La nappe phréatique est très profonde.



**Fig. 1** Plan des essais effectués sur le site de la station expérimentale du CSTC à Limelette.



La figure 2 montre les résultats du sondage CPT 3 effectué à proximité des pieux 1 et 5, sondage utilisé pour calculer la capacité portante des pieux et, ultérieurement, pour analyser les essais dynamiques. Elle donne en outre les résistances dynamiques ( $Q_d$ ) unitaires mesurées sous la base des pieux 1 et 5 lors du battage.  $Q_d$  (en N) est déduite des enregistrements effectués lors du battage des pieux en question et ce, à l'aide de la formule hollandaise de battage, à savoir :

$$Q_d = \frac{\eta_i \cdot \eta_c \cdot M \cdot g \cdot h}{s}$$

où

$\eta_i$  = le rendement de l'impact;  $\eta_i = \frac{M}{M + M_p}$ ,  
 $M_p$  étant la masse du pieu

$\eta_c$  = le rendement de la chute;  $\eta_c = 1$

$M$  = la masse du mouton

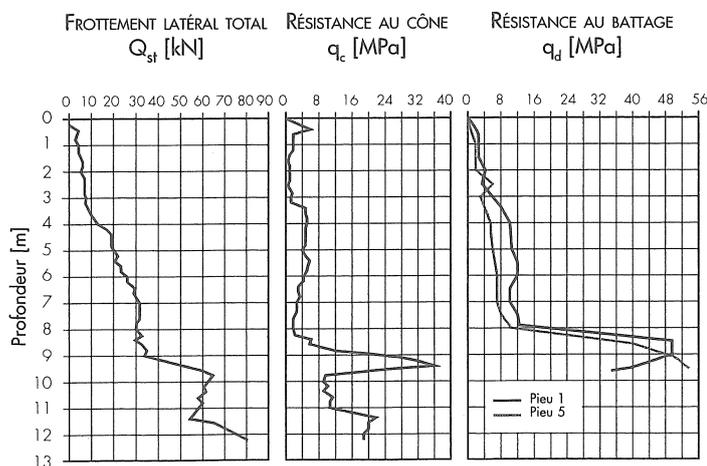
$g$  = l'accélération terrestre

$h$  = la hauteur de chute du mouton

$s$  = l'enfoncement par coup (refus).

Les diagrammes de résistance au battage montrent l'influence de l'hétérogénéité du terrain sur les résultats d'essais, en particulier lorsqu'il s'agit de comparer les résultats des essais dynamiques avec ceux des essais statiques. C'est en fait la couche de sable compact située entre 8 et 10 m de profondeur qui exerce une influence prépondérante. Comme cela ressort de la comparaison des différents sondages, cette couche est plutôt hétérogène tant en ce qui concerne la profondeur à laquelle elle débute, que son épaisseur et sa résistance au cône. Etant donné que les pieux ont leur niveau de fondation dans cette couche de sable compact, les résultats s'en trouvent considérablement affectés.

Le pieu 1 est enfoncé à une profondeur de 9,6 m; sur le diagramme de résistance au battage, on remarque qu'à cette hauteur, la résistance au cône diminue à nouveau, juste au-dessus d'une zone plus faible. La base du pieu 5, à 9,5 m de profondeur, se trouve au milieu de la couche de sable compact. La base des pieux étant située dans la couche de sable compact, l'effet de dalle jou, lui aussi, un rôle dans les résultats des essais dynamiques.



**Fig. 2** Sondage mécanique CPT 3 et diagrammes de résistance dynamique selon la formule hollandaise de battage.

## 3 CALCUL DE LA CAPACITÉ PORTANTE DES PIEUX

Les méthodes de calcul de la capacité portante des pieux ont été décrites dans la première partie de l'article [5].

La capacité portante des pieux comprend deux termes : la résistance à la base et le frottement le long du fût. Ces grandeurs sont calculées à partir des résultats du sondage mécanique CPT 3.

La méthode *De Beer* peut être utilisée pour calculer la valeur de référence de la résistance ulti-



me à la base du pieu ( $Q_{bu}$ ), tandis que la valeur de référence de la résistance ultime du pieu au frottement ( $Q_{su}$ ) peut être déterminée proportionnellement à la résistance totale au frottement mesurée lors du sondage mécanique CPT 3.

Il convient en outre d'appliquer à ces valeurs de référence des coefficients de mise en œuvre tenant compte du type de pieu, de la méthode d'enfoncement et de la nature du sol. Ces coefficients ont en fait été déduits des essais de mise en charge statique (voir première partie). Si l'on applique ces coefficients empiriques aux valeurs de référence calculées pour les pieux 1 et 5 à soumettre aux essais dynamiques, on peut obtenir une bonne approximation de la capacité portante statique réelle des pieux, le site et la nature des pieux étant en effet identiques dans les deux types d'essais.

La capacité portante ainsi calculée des pieux 1 et 5 est reprise aux tableaux 1 et 2, qui donnent à titre de comparaison la charge de rupture ultime des pieux 4 et 8 mesurée sous charge statique.

**Tableau 1** Capacité portante calculée du pieu tubé 1 comparée aux valeurs mesurées pour le pieu tubé 4.

ÉLÉMENT	VALEUR DE RÉFÉRENCE CALCULÉE	COEFFICIENT DE MISE EN ŒUVRE DU PIEU TUBÉ 4 (cf. 1 <sup>ère</sup> PARTIE)	CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE DU PIEU 1	CHARGE DE RUPTURE ULTIME MESURÉE DU PIEU 4
Base du pieu	562 kN	1 (au lieu de 1,24) (*)	562 kN	817 kN
Fût	473 kN	0,79	374 kN	326 kN
Total	-	-	936 kN	1143 kN

(\*) Dans le tableau 4 publié dans la première partie de l'article [5], nous avons proposé, au terme de l'essai de mise en charge statique du pieu 4, un coefficient  $\alpha_b$  de 1,24 pour la base du pieu. Il est toutefois préférable d'appliquer un coefficient de 1 par analogie avec les facteurs  $\alpha_b$  obtenus pour les pieux 8 et 12, car, contrairement à ce qui a été erronément mentionné au tableau 2 de la première partie, la résistance à la base du pieu 4 n'a pas été calculée à partir du sondage CPT 6 effectué au préalable dans l'axe du pieu, mais bien au moyen de CPT 5.

**Tableau 2** Capacité portante calculée du pieu préfabriqué 5 comparée aux valeurs mesurées pour le pieu préfabriqué 8.

ÉLÉMENT	VALEUR DE RÉFÉRENCE CALCULÉE	COEFFICIENT DE MISE EN ŒUVRE DU PIEU TUBÉ 8 (cf. 1 <sup>ère</sup> PARTIE)	CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE DU PIEU 5	CHARGE DE RUPTURE ULTIME MESURÉE DU PIEU 8
Base du pieu	826 kN	0,95	784 kN	851 kN
Fût	461 kN	1,39	641 kN	901 kN
Total	-	-	1425 kN	1752 kN

En comparant les charges de rupture ultimes réelles estimées pour les pieux 1 et 5 aux résultats de mesures obtenus respectivement pour les pieux 4 et 8, on constate d'ores et déjà que

les différences sont importantes, ce qui s'explique en grande partie par l'hétérogénéité de la couche de sable compact où sont ancrés les pieux. En ce qui concerne le pieu 1, c'est surtout la résistance déduite à la base qui s'avère inférieure à celle du pieu 4, étant donné sa plus grande profondeur d'ancrage (9,6 m). Pour le pieu 5, nous avons enregistré un frottement le long du fût sensiblement plus faible qu'avec le pieu 8; le CPT 5 (dans l'axe du pieu 8) révèle à cet égard que la couche de sable compact y est plus épaisse que dans le cas du pieu 1 (CPT 3), occasionnant de la sorte un frottement plus important du pieu 8.

## 4 ESSAIS DYNAMIQUES ET MESURES

Pour la réalisation des essais de mise en charge dynamique, nous avons

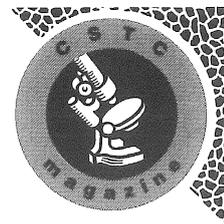
utilisé un engin de battage équipé d'un mouton guidé de 8000 kg présentant une hauteur de chute maximale de 80 cm. La tête du pieu est coiffée d'une fourrure en bois destinée à étaler l'énergie du choc dans le temps et à écrêter ainsi les pointes de charge dynamique trop marquées qui risqueraient d'endommager la tête du pieu.

Lors de l'impact, les forces et la vitesse de la tête des pieux sont mesurées à l'aide de deux systèmes parallèles. D'une part, on recourt à l'équipement de mesure et d'acquisition du TNO conçu pour des essais dynamiques sur pieux. Cet équipement intègre un accéléromètre piézorésistif et un extensomètre fixé directement sur le pieu. L'acquisition se fait à l'aide du logiciel fourni pour l'analyse dynamique du pieu (PDA, *Pile Dynamic Analysis*). Des extensomètres fixés sur la tête du pieu et des accéléromètres piézoélectriques permettent, d'autre part, de contrôler ces enregistrements.

Enfin, on mesure, avec un niveau optique, le tassement des pieux avant et après chaque impact.

La figure 3 présente l'équipement de mesure ainsi que les caractéristiques des pieux 1 et 5. La vitesse de propagation des ondes ( $c$ ) et l'impédance ( $Z$ ) sont définies par des tests d'intégrité selon les méthodes suivantes :

- la méthode de détection par écho, pour laquelle on a recours à un accéléromètre placé sur la tête du pieu. La vitesse  $c$  est déterminée, lors de l'impact sur la tête du pieu, par le rapport entre la distance parcourue par l'onde (2 fois la longueur du pieu) et l'in-



- tervalle de temps entre l'onde émise et l'onde réfléchi
- la méthode d'admittance mécanique, qui permet de déterminer à la fois la force exercée sur la tête du pieu et la vitesse de la tête du pieu (après intégration de l'accélération), ces deux caractéristiques étant converties dans le domaine fréquentiel. Le rapport entre les deux grandeurs en fréquences donne l'admittance moyenne du pieu, c'est-à-dire l'inverse de l'impédance du pieu.

Pour plus d'informations concernant ces méthodes, on consultera la bibliographie [7].

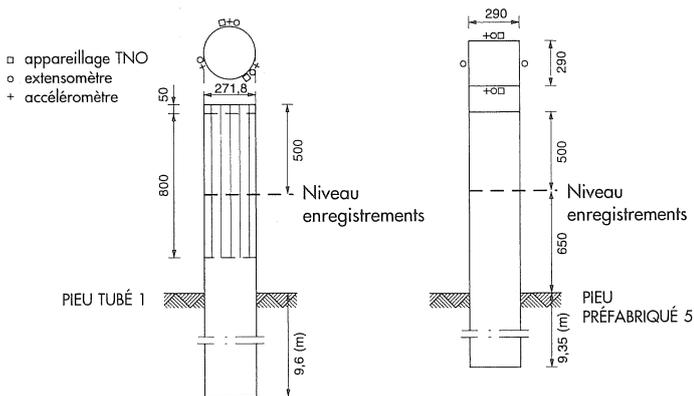
Enfin, le module d'élasticité du pieu est déterminé à l'aide de la formule  $E = \rho \cdot c^2$ , où  $\rho$  représente la masse volumique du matériau constitutif du pieu.

- ◆ le transfert d'énergie vers le pieu devait être maximal, de façon à mobiliser un maximum de résistance. Ceci s'est traduit notamment par le déplacement permanent du pieu.

**Tableau 3** Impacts sur les pieux.

	N° DE L'IMPACT	HAUTEUR DE CHUTE (cm)	PÉNÉTRATION DU PIEU SUITE À L'IMPACT (mm)
PIEU 1	Essais avec fourrure en bois sur la tête du pieu		
	1	5	0,92
	2	10	0,73
	3	15	1,15
	4	25	1,62
	5	35	3,43
	6	50	5,27
	7	60	6,93
	8	80	10,83
	9	80	11,27
	10	60	9,61
	11	80	12,32
	Essais sans fourrure en bois sur la tête du pieu		
	12	10	5,20
	13	10	6,64
	14	15	8,22
	15	30	7,01
	16	50	14,27
	17	80	19,67
	18	80	19,26
19	80	22,87	
20	80	12,57	
PIEU 5	Essais avec fourrure en bois sur la tête du pieu		
	1	5	0,51
	2	10	0,07
	3	15	0,23
	4	20	0,02
	5a	25	0,18
	5b	25	0,15
	6a	40	0,24
	6b	40	0,16
	7	70	0,40
	8	80	0,42
8a	80	0,60	
8b	80	1,38	

**Fig. 3** Installation de mesure et caractéristiques du pieu tubé 1 et du pieu préfabriqué 5.



CARACTÉRISTIQUES	PIEU 1	PIEU 5
Armatures	5 x Ø 25 mm + 5 x Ø 25 mm d'armature supplémentaire en tête de pieu sur 800 mm de long	4 x Ø 20 mm (tête de pieu renforcée par une armature trans- versale supplémentaire)
Section	A = 58021 mm <sup>2</sup>	A = 84100 mm <sup>2</sup>
Vitesse de propagation des ondes	c = 3900 m/s	c = 4285 m/s
Impédance	Z = 669479 kg/s	Z = 883197 kg/s
Module d'élasticité dynamique	E = 45000 N/mm <sup>2</sup>	E = 45000 N/mm <sup>2</sup>

La réalisation des essais de mise en charge dynamique est décrite dans la norme américaine ASTM D-4945-89 (1994).

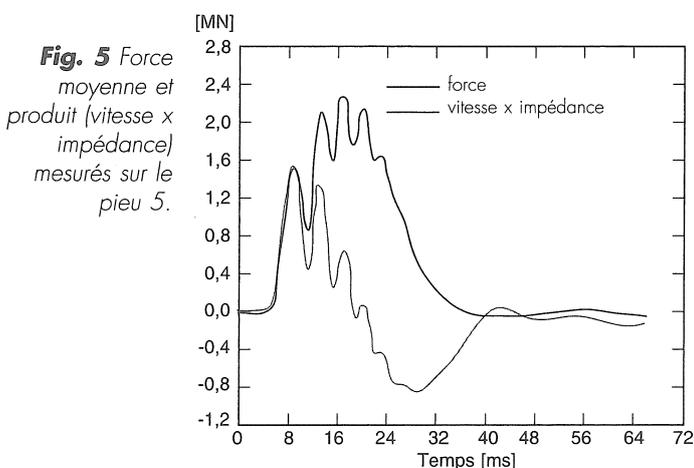
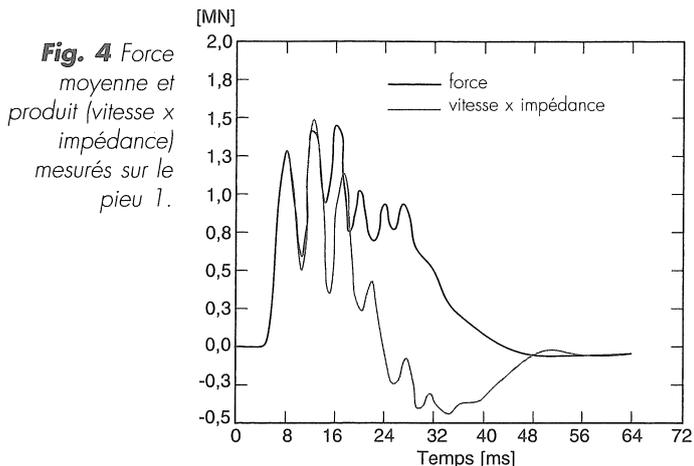
Le tableau 3 présente un récapitulatif des différents impacts réalisés; pour les besoins de l'analyse, on a sélectionné un impact par pieu sur la base des critères suivants :

- ◆ l'impact devait être centré, ce qui a été contrôlé en comparant les forces mesurées sur le périmètre des pieux

Les impacts suivants ont été sélectionnés pour l'analyse :

- ◆ *pieu 1* : impact 11 ayant occasionné un déplacement permanent de 12,32 mm et un déplacement transitoire maximum de 14,7 mm (obtenu après intégration du signal de vitesse mesuré)
- ◆ *pieu 5* : impact 8b ayant occasionné un déplacement permanent de 1,38 mm et un déplacement transitoire maximum de 7,6 mm (obtenu après intégration du signal de vitesse mesuré).

La synthèse des mesures réalisées lors de ces impacts est illustrée aux figures 4 et 5 (p. 22), qui donnent la force moyenne exercée sur la tête du pieu et l'impédance multipliée par la vitesse.



## 5 ANALYSE DES RESULTATS DE MESURES

Il nous semble utile, avant d'entamer l'analyse des résultats de mesures, d'étudier le phénomène de propagation des ondes lorsque le pieu est soumis à un impact.

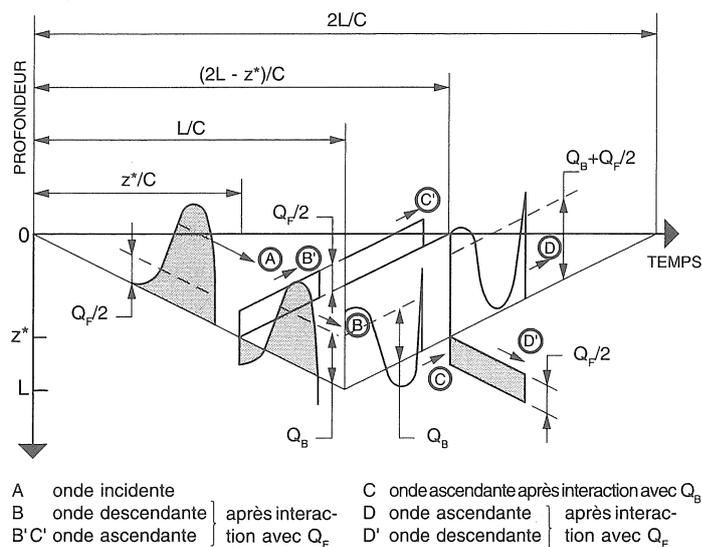
A. Holeyman [3] décrit de manière simplifiée l'interaction d'une onde de choc induite dans un pieu avec la résistance au frottement du fût et la résistance à la base du pieu. La figure 6 illustre l'interaction d'une onde de choc de faible longueur (comparée à la longueur du pieu  $L$ ) se propageant vers le bas, avec une composante du frottement le long du fût à la profondeur  $z^*$  et avec la base du pieu à la profondeur  $L$ . Pour simplifier la représentation de cette interaction pieu-sol, on considère que le frottement  $Q_f$  mobilisé le long du fût et la résistance  $Q_b$  mobilisée à la base sont constants sur toute la durée de l'onde.

Lorsque l'onde de choc descendante initiale atteint le niveau  $z^*$ , deux ondes sont générées :

- ♦ une onde de choc ascendante d'amplitude  $Q_f/2$ , c.-à-d. une nouvelle onde réfléchie

- ♦ une onde de traction descendante d'amplitude  $-Q_f/2$ , qui s'associe à l'onde de choc descendante initiale.

Une fois la base du pieu atteinte, l'onde descendante résultante est réfléchiée vers le haut et est inversée (la compression devient une traction), avec un décalage de la contrainte de compression correspondant à la résistance  $Q_b$  mobilisée à la base. Dans sa phase ascendante, cette onde interagit encore avec le frottement du fût à la profondeur  $z^*$ , puis rejoint la tête du pieu après un laps de temps  $t = 2L/c$ .

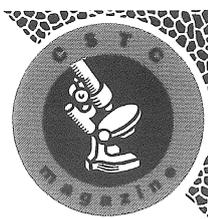


**Fig. 6** Propagation des ondes dans un pieu soumis à une charge dynamique [3].

De cette représentation simplifiée, susceptible d'être généralisée au cas où la résistance au frottement se manifeste tout le long du fût, on peut induire que les effets de la résistance au frottement le long du fût sont observables au niveau de la tête du pieu à partir des ondes ascendantes d'amplitude  $Q_f/2$ .

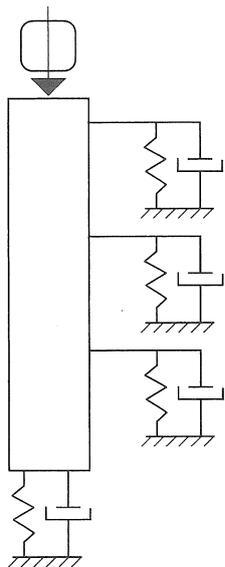
La répartition du frottement le long du fût en fonction de la profondeur peut être déterminée en se fondant sur l'évolution dans le temps des ondes réfléchies vers le haut, jusqu'au moment  $t = 2L/c$ . Les ondes qui se propagent après ce délai résultent de différentes interactions et sont dès lors le plus souvent difficiles à interpréter.

Cette représentation montre l'intérêt des essais dynamiques, à savoir que les informations dépendant de la profondeur peuvent être obtenues à partir des mesures effectuées en tête de pieu en fonction du temps, alors que, pour un essai statique, il faut réaliser des mesures à différentes profondeurs pour obtenir des données sur la répartition du frottement le long du fût.

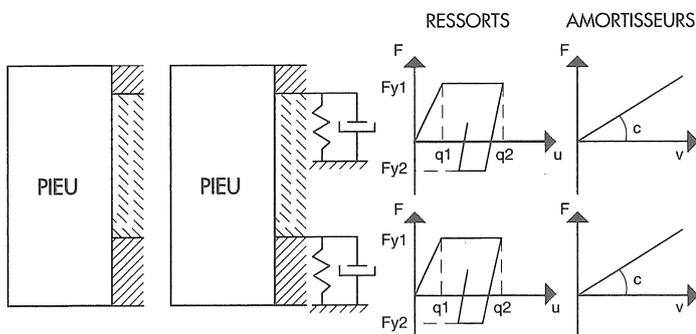


Il existe en outre différents modèles qui permettent d'analyser en détail les résultats de mesures en vue de déterminer la capacité portante statique des pieux. Ces modèles sont basés sur la théorie de la propagation des ondes, qui représente généralement l'interaction pieu-sol par des systèmes à ressorts et amortisseurs (figure 7). La modélisation de cette interaction est déterminante pour les résultats d'analyse d'un essai de mise en charge dynamique.

**Fig. 7** Modélisation de l'interaction pieu-sol.



Le modèle proposé par le TNO est utilisé pour analyser les résultats de mesures des impacts sélectionnés. On introduit les caractéristiques des pieux dans le modèle, puis on divise le sol en cinq couches (à l'aide du CPT 3), que l'on décrit individuellement au moyen de 10 paramètres (figure 8).



**Fig. 8** Modélisation d'une couche du sol.

Comme illustré à la figure 8, la modélisation du sol se fait à l'aide de ressorts élasto-plastiques asymétriques et d'amortisseurs linéaires. La résistance à la base du pieu est représentée par un amortisseur linéaire et un ressort élasto-plastique.

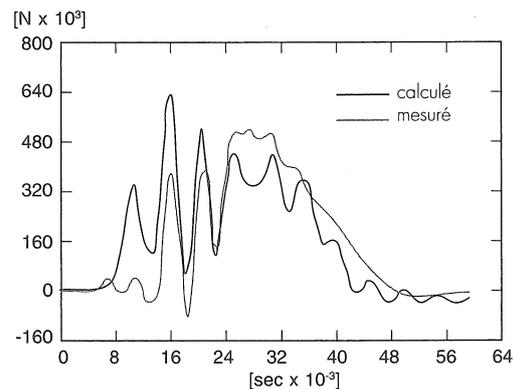
Les forces mesurées en tête de pieu lors d'un impact sont introduites dans le modèle, qui calcule l'onde de force ascendante  $F\uparrow = 1/2.(F-Z.v)$ . Celle-ci est comparée à l'onde de force ascendante  $F\uparrow$  déduite des mesures de la force  $F$  et de la vitesse  $v$ . Le modèle est adapté pas à pas jusqu'à obtenir une bonne correspondance entre valeurs calculées et valeurs mesurées de  $F\uparrow$  (technique de l'ajustement du signal).

En guise de contrôle, l'onde de force descendante calculée  $F\downarrow$  et la vitesse calculée en tête de pieu  $v$  sont comparées aux valeurs mesurées de  $F\downarrow = 1/2.(F+Z.v)$  et de  $v$ . On aboutit ainsi à un modèle de sol qui décrit le comportement du pieu dans les conditions d'essai données. Ce modèle est alors sollicité en charge statique pour fournir la courbe charge-enfoncement du pieu.

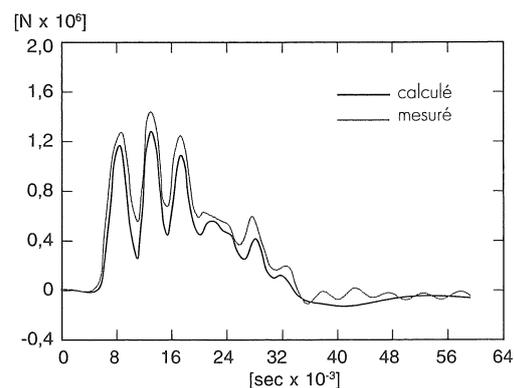
## 6 COMPARAISON DES RESULTATS D'AJUSTEMENT DU SIGNAL ET DES ESSAIS STATIQUES

Dans les figures 9 et 10, les forces mesurées ( $F\uparrow$ ,  $F\downarrow$ ) et les

vitesse sont comparées aux valeurs calculées, après application de la technique du "signal matching".

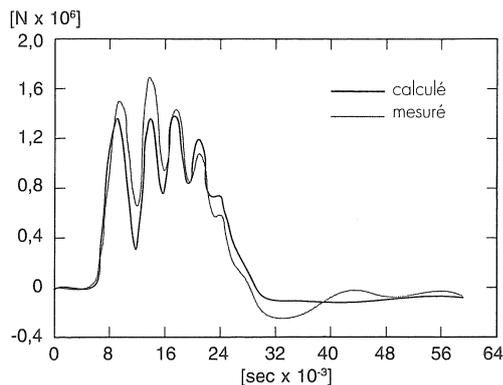
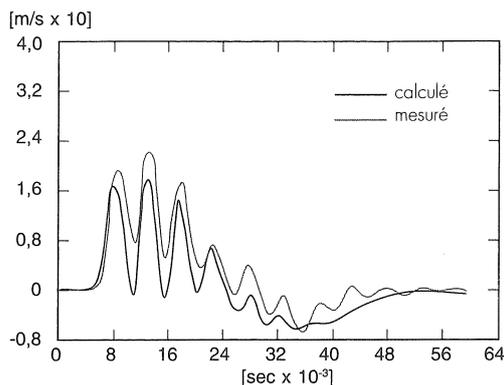


**Fig. 9A** Valeurs mesurées et calculées de  $F\uparrow = 1/2.(F-Z.v)$  pour le pieu 1.



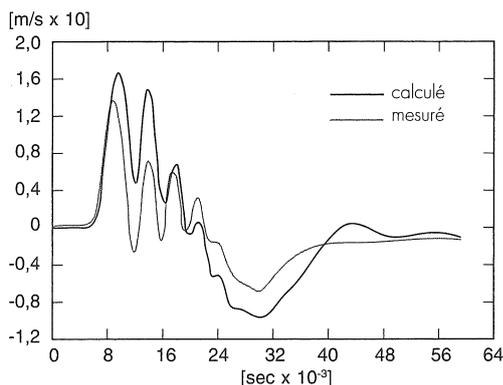
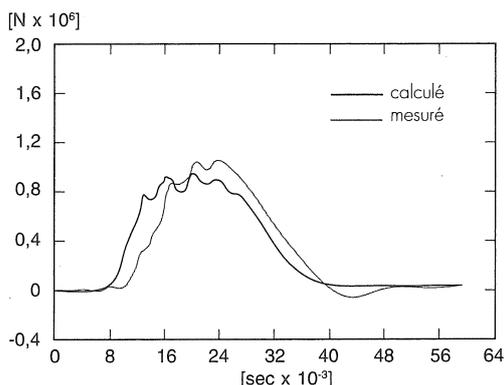
**Fig. 9B** Valeurs mesurées et calculées de  $F\downarrow = 1/2.(F+Z.v)$  pour le pieu 1.

**Fig. 9C** Vitesse calculée et vitesse mesurée en tête du pieu 1.



**Fig. 10B** Valeurs mesurées et calculées de  $F \downarrow = 1/2 \cdot (F + Z \cdot v)$  pour le pieu 5.

**Fig. 10A** Valeurs mesurées et calculées de  $F \uparrow = 1/2 \cdot (F - Z \cdot v)$  pour le pieu 5.



**Fig. 10C** Vitesse calculée et vitesse mesurée en tête du pieu 5.

Comme indiqué ci-avant, le modèle de sol comporte des ressorts et des amortisseurs qui modélisent respectivement les composantes statique et dynamique de la résistance du sol. Etant donné que seule la résistance statique du sol est mobilisée lors d'un essai de mise en charge statique, on ne tiendra compte que des ressorts du modèle pour déterminer le frottement statique le long du fût et la résistance à l'enfoncement.

**Tableau 4** Résistances statiques mobilisées et à la rupture des pieux tubés 1 et 4.

PARAMÈTRE DE CAPACITÉ PORTANTE	PIEU TUBÉ 1		PIEU TUBÉ 4	
	RÉSISTANCE MOBILISÉE À 14,7 mm (ANALYSE TNO)	CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE (cf. tableau 1)	RÉSISTANCE MOBILISÉE MESURÉE À 14,7 mm	CHARGE DE RUPTURE ULTIME MESURÉE
Base	174 kN	526 kN	674 kN	817 kN
Frottement	607 kN	374 kN	326 kN	326 kN
Total	781 kN	936 kN	1000 kN	1143 kN

## 6.1 COMPARAISON DES RÉSISTANCES MOBILISÉES

Dans les tableaux 4 et 5, les résultats d'analyse des essais dynamiques sur les pieux 1 et 5 sont comparés à la résistance mobilisée mesurée lors des essais de mise en charge statique des pieux 4 et 8 et ce, selon les déplacements transitoires maxima enregistrés lors des essais dynamiques. Ces tableaux indiquent en outre les charges de rupture ultimes déterminées, pour les pieux 4 et 8, à partir des essais statiques et, pour les pieux 1 et 5, par voie de calcul (voir également le tableau 2, p. 20).

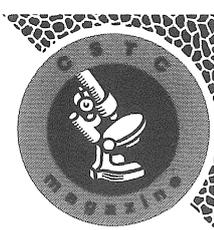
**Tableau 5** Résistances statiques mobilisées et à la rupture des pieux préfabriqués 5 et 8.

PARAMÈTRE DE CAPACITÉ PORTANTE	PIEU PRÉFABRIQUÉ 5		PIEU PRÉFABRIQUÉ 8	
	RÉSISTANCE MOBILISÉE À 7,6 mm (ANALYSE TNO)	CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE (cf. tableau 2)	RÉSISTANCE MOBILISÉE MESURÉE À 7,6 mm	CHARGE DE RUPTURE ULTIME MESURÉE
Base	547 kN	784 kN	640 kN	851 kN
Frottement	779 kN	641 kN	770 kN	901 kN
Total	1326 kN	1425 kN	1410 kN	1752 kN

Etant donné l'hétérogénéité de la couche de sable compact dans laquelle sont fondés les pieux, il existe des différences relativement importantes entre les résistances statiques des pieux de même type (voir aussi tableau 2, p. 20). Il est donc malaisé de comparer les ré-

sistances statiques, obtenues après analyse des essais dynamiques, aux résultats des essais de mise en charge statique.

En revanche, il est possible de comparer le rapport existant entre la résistance mobilisée lors des essais dynamiques, compte tenu d'un tassement du pieu équivalant au déplacement



transitoire maximum, et la charge de rupture ultime. Ainsi, par exemple, pour la résistance totale du pieu 8 soumis à un essai statique, ce rapport équivalait à :

$$\frac{1410 \text{ kN}}{1752 \text{ kN}} = 80 \%, \text{ avec}$$

1410 kN : la résistance totale mobilisée du pieu préfabriqué 8, pour un tassement de 7,6 mm (déplacement transitoire maximum lors de l'essai dynamique du pieu préfabriqué 5)

1752 kN : la charge de rupture totale du pieu préfabriqué 8.

On peut comparer ce rapport avec celui obtenu pour le pieu préfabriqué 5 soumis aux essais dynamiques, soit :

$$\frac{1326 \text{ kN}}{1425 \text{ kN}} = 93 \%, \text{ avec}$$

1326 kN : la résistance statique déduite de l'essai dynamique (analyse TNO), compte tenu d'un déplacement transitoire maximum de 7,6 mm lors de l'essai

1425 kN : la charge de rupture ultime calculée pour le pieu 5.

Ces rapports sont exprimés en pourcentages dans les tableaux 6 et 7.

Sur la base de l'analyse des essais dynamiques, on obtient – comparativement aux pieux soumis aux essais statiques – une approximation satisfaisante de la résistance totale mobilisée pour un tassement transitoire maximum, tant avec le pieu préfabriqué qu'avec le pieu tubé.

Pour le pieu préfabriqué, on arrive à un compromis acceptable en ce qui concerne la résistance à la base, alors que le frottement mobilisé le long du fût est surestimé par rapport à l'essai statique.

Pour le pieu tubé, on aboutit à un bon compromis si l'on considère la résistance totale, mais la résistance à la base est sous-estimée et le frottement le long du fût surestimé, ce qui peut éventuellement s'expliquer à l'aide du diagramme de résistance au battage établi pour le pieu 1 (voir figure 2, p. 19).

## 6.2 COMPARAISON DES DIAGRAMMES DE CHARGE/TASSEMENT

Les courbes de charge/tassement des pieux ont été calculées à l'aide du module TNOSTAT du programme TNOWAVE.

Il n'est pas possible de comparer directement, pour les pieux 1 et 5, le diagramme de charge/tassement issu de l'essai dynamique et celui résultant de l'essai de mise en charge statique. On a donc comparé de façon indirecte le diagramme obtenu par analyse de l'essai dynamique sur le pieu tubé 1 à celui du pieu tubé 4 soumis à une charge statique (voir figure 11, p. 26). On a comparé les diagrammes de charge/tassement des pieux préfabriqués 5 et 8 de manière analogue (figure 12).

Les charges de rupture à considérer sont les suivantes (pour les pieux 4 et 8, ces charges sont déduites des essais de mise en charge statique; pour les pieux 1 et 5, elles ont été calculées à l'aide des coefficients de mise en œuvre déterminés à partir des essais statiques) :

- ◆ pieu tubé 4 : 1143 kN (pieu tubé 1 : 936 kN)
- ◆ pieu préfabriqué 8 : 1752 kN (pieu préfabriqué 5 : 1425 kN).

Comme les graphiques des figures 11 et 12 concernent des pieux de même type enfoncés dans un sol de nature identique, mais caractérisés par une charge de rupture différente, la comparaison n'est représentative que pour la

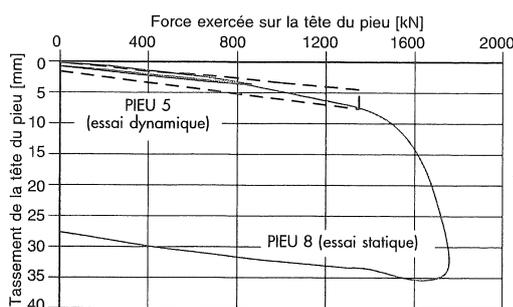
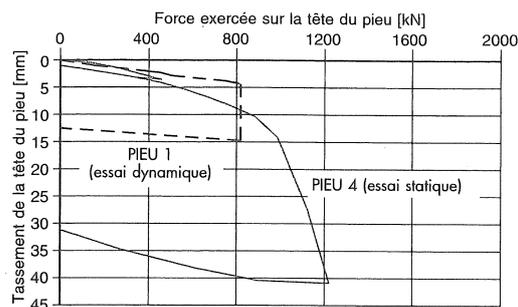
**Tableau 6** Rapport entre la résistance statique mobilisée, pour un tassement du pieu équivalant au déplacement transitoire maximum atteint lors de l'essai dynamique, et la charge de rupture totale.

PARAMÈTRE DE CAPACITÉ PORTANTE	PIEU TUBÉ 1	PIEU TUBÉ 4
		RÉSISTANCE MOBILISÉE POUR UN TASSEMENT DE 14,7 mm (ANALYSE TNO) PAR RAPPORT À LA CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE
Base	33 %	82 %
Frottement	162 %	100 %
Total	83 %	87 %

**Tableau 7** Rapport entre la résistance statique mobilisée, pour un tassement du pieu équivalant au déplacement transitoire maximum atteint lors de l'essai dynamique, et la charge de rupture totale.

PARAMÈTRE DE CAPACITÉ PORTANTE	PIEU PRÉFABRIQUÉ 5	PIEU PRÉFABRIQUÉ 8
		RÉSISTANCE MOBILISÉE POUR UN TASSEMENT DE 7,6 mm (ANALYSE TNO) PAR RAPPORT À LA CHARGE DE RUPTURE ULTIME CALCULÉE
Base	70 %	75 %
Frottement	121 %	85 %
Total	93 %	80 %

**Fig. 11**  
Courbes de charge-tassement établies à partir des essais statiques et dynamiques sur les pieux tubés.



**Fig. 12**  
Courbes de charge-tassement établies à partir des essais statiques et dynamiques sur les pieux préfabriqués.

première partie des courbes. On remarque que, dans la zone située sous la charge de service, on arrive à une très bonne concordance entre les deux courbes.

## CONCLUSION

La charge de rupture des pieux 1 et 5 a été calculée à partir du CPT le plus proche (3), en utilisant les coefficients de mise en œuvre déterminés sur la base des essais de mise en charge statique des pieux 4 et 8.

Au cours des essais dynamiques réalisés sur les pieux 1 et 5, on a mesuré des déplacements transitoires maxima de 14,7 mm et 7,6 mm respectivement. Par conséquent, l'analyse des essais dynamiques permet de déduire non pas les charges de rupture ultimes, mais les résistances mobilisées compte tenu de ces déplacements transitoires maxima.

Etant donné l'hétérogénéité de la couche de sable compact où se situe la base des pieux, il s'avère également difficile de comparer les résistances statiques, déduites des essais dynamiques, avec les résistances mobilisées des pieux 4 et 8 de même type soumis aux charges statiques.

C'est la raison pour laquelle la comparaison est basée sur le rapport entre la résistance mobilisée et la charge de rupture ultime (voir tableaux 6 et 7, p. 25), ce qui permet de conclure que l'on arrive à une bonne approximation des essais de mise en charge statique pour ce qui concerne la résistance mobilisée totale et la courbe de charge/tassement dans la zone située sous la charge de service.

Si on subdivise la résistance mobilisée totale en résistance à la base et en résistance au frottement, il apparaît que l'analyse dynamique des mesures effectuées sur le pieu préfabriqué donne des résultats acceptables, malgré une légère surestimation du frottement.

Pour le pieu tubé, l'écart est plus important, la résistance à la base et la résistance au frottement étant respectivement sous-estimée et sur-estimée. Le diagramme de résistance au battage du pieu 1 explique partiellement ce phénomène (figure 2, p. 19). La diminution illustrée dans ce diagramme révèle en effet que la base du pieu 1 se trouve dans la partie inférieure de la couche de sable compact, où la résistance au cône diminue à nouveau, juste au-dessus d'une zone moins compacte. Comme c'est l'impact 11 qui est analysé, le pieu s'est déjà enfoncé d'environ 5 cm du fait des 10 impacts précédents, de sorte que sa base se situe précisément dans cette zone moins résistante, ce qui peut expliquer la relative faiblesse de la résistance mobilisée à l'enfoncement.

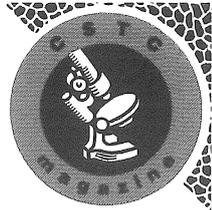
D'autres facteurs peuvent jouer un rôle :

- contrairement à la charge de rupture totale, déterminée avec grande précision (dynamomètre étalonné), il faut tenir compte, lors de la répartition entre résistance à l'enfoncement et frottement du fût, d'une variabilité des résultats due à la variation du module d'élasticité du matériau constitutif du pieu
- l'influence de l'effet de dalle lors des essais dynamiques.

Le calcul de la capacité portante statique à partir des essais dynamiques se complique en outre par les phénomènes suivants :

- ◆ l'inertie dépend de la fréquence et les ondes de choc radiales s'amortissent dans le sol environnant
- ◆ les schémas de déformation le long du fût et à la base sont différents selon qu'il s'agit d'essais dynamiques ou d'essais statiques
- ◆ des surpressions de l'eau interstitielle se produisent et se dissipent plus ou moins lentement
- ◆ les modules de compression et de contrainte de cisaillement du sol sont dépendants de la vitesse.

Enfin, le modèle d'interaction pieu-sol joue un rôle important dans l'analyse des résultats de



mesures. La technique du "signal matching" permet d'obtenir un modèle de sol relativement précis, à condition de disposer de résultats de bonne qualité.

D'une manière générale, on peut conclure que, lors d'essais de mise en charge dynamique, les déplacements des pieux sont le plus souvent insuffisants pour pouvoir déterminer les charges de rupture ultimes telles que déduites des essais statiques réalisés jusqu'à rupture du sol (essais à des fins de recherche ou essais en phase de conception).

Les déplacements sont toutefois du même ordre de grandeur que ceux occasionnés par les essais statiques de contrôle, où le pieu est soumis à une charge équivalant à 1,5 à 2 fois la capacité portante utile. Comme le révèlent également les résultats, l'essai dynamique peut fournir de la sorte des informations fort utiles dans le cadre du contrôle de la capacité portante. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- 1** American Society for Testing and Materials  
ASTM D-4945-89 Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles. Philadelphie, Annual Book of American Society for Testing and Materials, volume 4.09 (7 p.), 1994.
- 2** Holeyman A.  
Pile dynamic testing, driving formulae, monitoring and quality control : Background for discussion. Bruxelles, compte rendu du séminaire ERTC 3, 1997.
- 3** Holeyman A.  
Technology of Pile Dynamic Testing, Keynote Lecture. La Haye, compte rendu du 4<sup>e</sup> Congrès international "Application of Stress Wave Theory to Piles", pp. 403-410, 1992.
- 4** Holeyman A.  
Théorie des essais dynamiques (Capacité portante). Bruxelles, compte rendu du Symposium belge "Pile Dynamic Testing-Integrity and Bearing Capacity", Groupement belge de la Société internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, pp. II.50-II.103, 1987.
- 5** Huybrecht N., Legrand Chr. & De Cock F.  
Essais de mise en charge de pieux battus. 1<sup>re</sup> partie : essais statiques. Bruxelles, CSTC-Magazine, hiver 1997.
- 6** Middendorp P. & Bielefeld M.W.  
Dynamic Load Test Signal Matching, Users Manual (version 1.1). Delft, TNO Building and Construction Research, 1991
- 7** Vyncke J. & Van Nieuwenburg D.  
Theorie van de dynamische proeven. Deel A Integriteit. Bruxelles, compte rendu du Symposium belge "Pile Dynamic Testing-Integrity and Bearing Capacity", Groupement belge de la Société internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, pp. II.1-II.49, 1987.