

## Normalisation

### Les essais et sondages de pénétration

Gérard BIGOT

Secrétaire de la Commission de normalisation  
Sols : reconnaissance et essais

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien - Melun

Aussi, si l'on veut par exemple comparer les résultats de mesure d'un sondage à un autre et avoir en particulier une référence lors de l'établissement de corrélations entre paramètres géotechniques, la normalisation du matériel d'essai et de la procédure de réalisation des sondages pénétrométriques s'impose.

Une orientation en ce sens avait été donnée par la Société internationale de Mécanique des sols et des travaux de fondations en 1988.

La reconnaissance des sols dans le cadre des projets géotechniques s'appuie sur une panoplie de moyens qui doivent être judicieusement associés afin de recueillir le maximum d'information, au coût optimal, pour un objectif fixé :

- exploitation des données géologiques et géotechniques bibliographiques ;
- sondages avec prélèvements d'échantillons (voir **XP P 94-202**) pour analyse et essais en laboratoire ;
- mesures géophysiques effectuées à la surface du sol ;
- diagraphies dans des forages pour déduire des paramètres physiques (résistivité, vitesse des ondes...) ;
- sondages avec essais sur le sol en place.

Cette note a pour objet, dans ce contexte, de présenter les sondages avec des pénétromètres statiques et dynamiques qui ont donné lieu à la publication d'un document normatif :

- **NF P 94-113** Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration statique. Octobre 1996 (seize pages).
- **NF P 94-114** Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration dynamique type A. Décembre 1990 (douze pages).
- **NF P 94-115** Sols : reconnaissance et essais - Sondage au pénétromètre dynamique type B. Décembre 1990 (onze pages).
- **NF P 94-116** Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration au carottier. Octobre 1991 (douze pages).

➤ **NF P 94-119** Sols : reconnaissance et essais - Essai au piézocône. Décembre 1995 (vingt-deux pages).

#### Nécessité de la normalisation

L'expérience a mis en évidence que :

- le mode d'investigation : pénétration par fonçage ou par battage,
- la mise en œuvre : vitesse de fonçage ou de battage,
- les caractéristiques géométriques de la sonde introduite dans le sol,

ont une influence sur le paramètre mesuré.

Nous citerons par exemple :

- Les essais réalisés au pénétromètre statique qui montrent que la vitesse de fonçage a une influence qui dépend de la nature (argile ou sable) du sol. Les pénétromètres statiques - Influence du mode d'emploi sur la résistance de pointe par J.-F. Jézéquel, *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, 36, pp. 151 à 160, janv.-fév. 1969 ;
- Les mesures de la pression interstitielle effectuées sur le sol en place au piézocône, qui sont influencées par la vitesse de fonçage (fig. 1 extraite de : Le piézocône - Améliorations apportées à la reconnaissance des sols par L. Parez et R. Frank, *Revue française de géotechnique*, 44, pp. 13 à 27, juil. 1988).

Et dans l'état actuel des recherches, il n'est pas possible de quantifier l'incidence des divers paramètres indiqués ci-dessus.

#### Les normes

Les tableaux I et II synthétisent les principales caractéristiques des sondages et essais de pénétration statique (**NF P 94-113**, **NF P 94-119**) et dynamique (**NF P 94-114**, **NF P 94-115**) qui fournissent une information en profondeur avec un pas toujours inférieur à 20 cm et le plus souvent inférieur à 5 cm.

L'essai de pénétration au carottier (plus connu sous le nom de SPT - *Standard Penetration Test*) (**NF P 94-116**) donne une information avec un espacement toujours supérieur à 0,5 m, mais il permet de prélever, grâce à son carottier, un échantillon de 35 mm de diamètre (classe de prélèvement 4 selon la norme **XP P 94-202**).

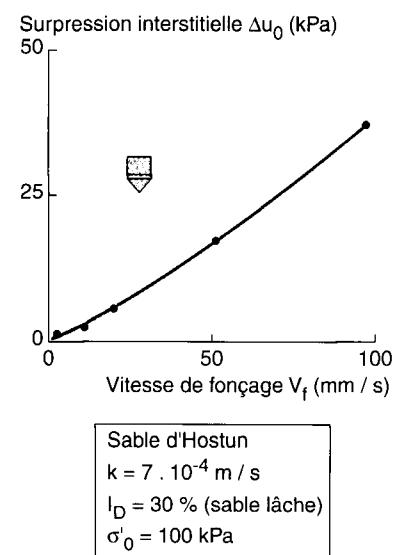
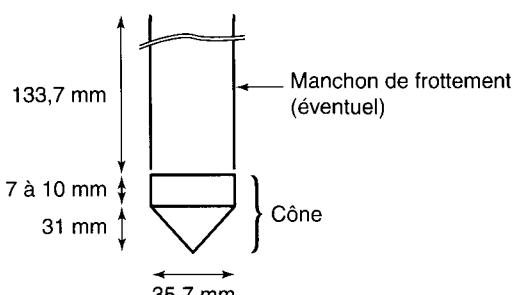
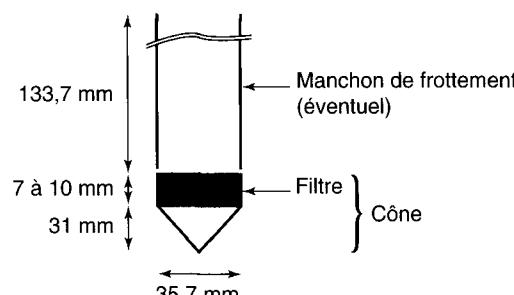
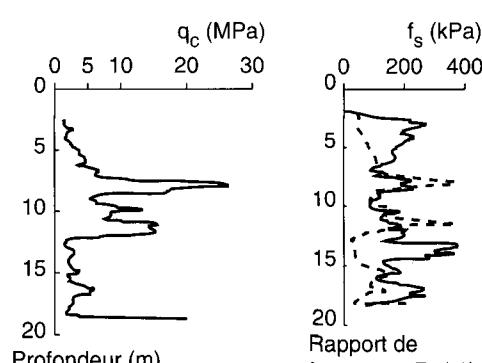
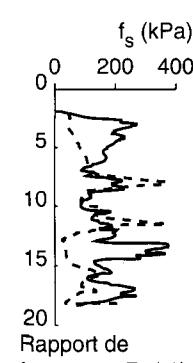
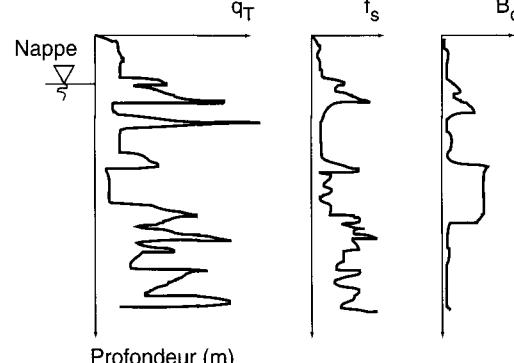
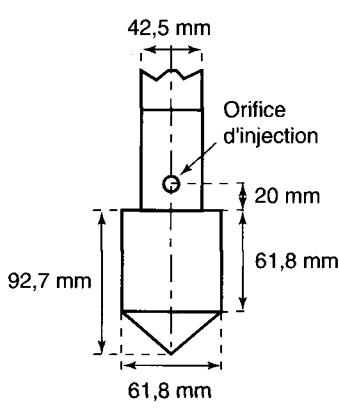
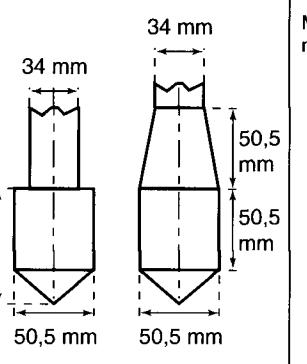
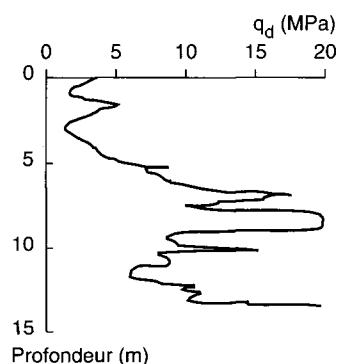
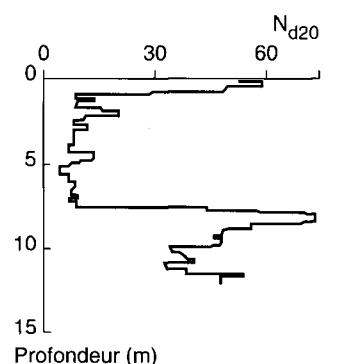


Fig. 1 - Influence de la vitesse de fonçage sur la surpression interstitielle mesurée au piézocône (Parez et Frank, 1988).

**TABLEAU I**  
**SONDAGE ET ESSAIS DE PÉNÉTRATION STATIQUE**

Référence normative	Essai de pénétration statique NF P 94-113 de octobre 1996	Essai au piézocône NF P 94-119 de décembre 1995
Principe	Enfoncement dans le terrain, sans choc, ni vibration, ni rotation, à vitesse constante (2 cm/s) d'un train de tiges ayant à sa base une pointe terminée par un cône de 10 cm <sup>2</sup> d'aire de section transversale.	
Appareillage	<p>Cône</p>  <p>133,7 mm</p> <p>Manchon de frottement (éventuel)</p> <p>7 à 10 mm</p> <p>31 mm</p> <p>35,7 mm</p> <p>Cône</p>	<p>Piezocône</p>  <p>133,7 mm</p> <p>Manchon de frottement (éventuel)</p> <p>7 à 10 mm</p> <p>31 mm</p> <p>35,7 mm</p> <p>Filtre</p> <p>Cône</p>
Mesures	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Force d'enfoncement du cône</li> <li>- Profondeur de la base du cône</li> <li>- Éventuellement : <ul style="list-style-type: none"> <li>. force d'enfoncement du train de tiges</li> <li>. force de frottement sur le manchon</li> </ul> </li> <li>- Pas de la mesure <math>\leq 10</math> cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Force d'enfoncement du cône</li> <li>- Pression interstitielle à la base du cône</li> <li>- Profondeur de la base du cône</li> <li>- Éventuellement : <ul style="list-style-type: none"> <li>. force d'enfoncement du train de tiges</li> <li>. force de frottement sur le manchon</li> </ul> </li> <li>- Pas de la mesure <math>\leq 5</math> cm</li> </ul> <p><i>NB:</i> À l'arrêt, mesure possible de la pression interstitielle en fonction du temps.</p>
Information recueillie	<p>➤ <math>q_c</math> : résistance apparente à la pénétration à la base du cône</p> <p>➤ Éventuellement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <math>Q_T</math> : effort total de pénétration</li> <li>. <math>f_s</math> : frottement latéral unitaire</li> <li>. <math>R_f = f_s/q_c</math> : rapport de frottement</li> <li>. <math>I_f = q_c/f_s</math> : indice de frottement</li> </ul>	<p>➤ <math>q_c</math> : résistance apparente à la pénétration à la base du cône</p> <p>➤ <math>u</math> : pression interstitielle au niveau du cône</p> <p>➤ <math>q_T</math> : résistance totale à la pénétration à la base du cône</p> <p>➤ Si avant l'essai, <math>u_0</math> la pression interstitielle dans le terrain et <math>\sigma_{vo}</math> la contrainte totale verticale sont connues :</p> $B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{vo}}$ <p>Éventuellement :</p> <p>➤ <math>f_s</math> : frottement latéral unitaire</p>
Domaine d'emploi	<p>Sols fins et sols grenus dont la plus grande dimension des éléments ne dépasse pas 20 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sous et hors nappe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sous le niveau de la nappe</li> </ul>
Résultats	<p>Résistance à la pénétration</p>  <p><math>q_c</math> (MPa)</p> <p>0 5 10 20 30</p> <p>0 5 10 15 20</p> <p>Profondeur (m)</p> <p>Frottement latéral unitaire local</p>  <p><math>f_s</math> (kPa)</p> <p>0 200 400</p> <p>0 5 10 15 20</p> <p>Rapport de frottement <math>R_f</math> (%)</p> <p>Profondeur (m)</p>	<p>Résistance à la pénétration</p>  <p><math>q_T</math></p> <p>Nappe</p> <p><math>f_s</math></p> <p><math>B_q</math></p> <p>Profondeur (m)</p>
Remarque	<p>Peuvent être également incorporées à la pointe pénétrométrique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- une sonde inclinométrique donnant l'inclinaison par rapport à la verticale ;</li> <li>- une sonde diffusant un rayonnement gamma permettant d'estimer la masse volumique du sol en place.</li> </ul>	

**TABLEAU II**  
**SONDAGE ET ESSAIS DE PÉNÉTRATION DYNAMIQUE**

Référence normative	Essai de pénétration dynamique type A NF P 94-114 - déc. 1990	Sondage au pénétromètre dynamique type B NF P 94-115 - déc. 1990	Essai de pénétration au carottier NF P 94-116 - oct. 1991																			
<b>Principe</b>	Enfoncement par battage d'un train de tiges terminé par une pointe débordante		Enfoncement par battage d'un carottier à partir du fond d'un forage tubé de diamètre $\leq 130$ mm																			
<b>Appareillage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pointe perdue de 61,8 mm de diamètre</li> <li>Masse du mouton de battage : 64 kg (éventuellement 32 kg et 128 kg)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pointe perdue ou récupérable de 50,5 mm de diamètre</li> <li>Masse du mouton de battage : 64 kg</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carottier : <ul style="list-style-type: none"> <li>diamètre intérieur 35 mm</li> <li>diamètre extérieur 51 mm</li> <li>longueur <math>\geq 526</math> mm</li> </ul> </li> <li>Tiges : masse : 4 kg/m</li> <li>Mouton de battage : masse de 64 kg</li> </ul>																			
<b>Mode opératoire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Injection de boue entre la paroi du forage et les tiges pendant le battage</li> <li>Hauteur de chute du mouton : 0,75 m</li> <li>Cadence de battage 15 à 30 coups/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'injection de fluide entre la paroi du forage et les tiges</li> <li>Hauteur de chute du mouton : 0,75 m</li> <li>Cadence de battage 15 à 30 coups/min</li> <li>Contrôle des efforts parasites sur les tiges</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enfoncement d'amorçage <math>N_0</math> coups pour 15 cm</li> <li>Enfoncement d'essai <math>N_1</math> coups pour 15 cm</li> <li><math>N_2</math> coups pour 15 cm</li> <li>Hauteur de chute du mouton 0,75 m</li> <li>Cadence 15 à 30 coups/min</li> </ul>																			
<b>Mesures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre de coups <math>N</math> pour un enfoncement de la pointe de 10 cm</li> <li>Profondeur de la pointe</li> <li>Masse frappée (enclume, tiges, pointe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre de coups pour un enfoncement de 20 cm</li> <li>Profondeur de la pointe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre de coups : <math>N = N_1 + N_2</math></li> <li>Profondeur du carottier</li> </ul>																			
<b>Information recueillie</b>	$q_d$ = résistance dynamique de pointe $e$ = enfoncement moyen par coup	$N_{d20}$ = nombre de coups pour un enfoncement de la pointe de 20 cm	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>N</math> (<math>N_0</math>, <math>N_1</math>, <math>N_2</math>) nombre de coups</li> <li>Longueur de carottage</li> <li>Nature du sol carotté</li> </ul>																			
<b>Domaine d'emploi</b>	Sols fins et sols grenus dont la dimension des plus gros éléments ne dépasse pas 60 mm		Sols fins et sols grenus dont la dimension maximale ne dépasse pas 20 mm																			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profondeur maximale : 30 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profondeur maximale : 15 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profondeur maximale : 50 m</li> </ul>																			
<b>Résultats</b>	<p>Résistance dynamique de pointe</p> 	<p>Nombre de coups</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Description du sol</th> <th colspan="4">Nombre de coups</th> </tr> <tr> <th><math>N_0</math></th> <th><math>N_1</math></th> <th><math>N_2</math></th> <th><math>N</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nappe</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Profondeur (m)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Description du sol	Nombre de coups				$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N$	Nappe					Profondeur (m)				
Description du sol	Nombre de coups																					
	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N$																		
Nappe																						
Profondeur (m)																						

## Commentaires

### **Sondage et essais de pénétration statique et dynamique**

Les sondages avec les pénétmètres à pointe sont peu coûteux, fournissent des profils quasi-continus en profondeur et donnent des informations indépendantes de l'opérateur, donc reproductibles.

L'essai de pénétration au carotier (SPT) fournit des informations plus espacées en profondeur et le résultat est fonction du matériel de battage ainsi que de l'expérience du sondeur.

Lors de l'établissement de corrélations entre essais géotechni-

ques, il convient dans ces conditions non seulement d'utiliser des appareils et des modes opératoires normalisés, mais également d'identifier les terrains :

- s'ils sont argileux, par leur limite de liquidité, leur indice de plasticité, leur masse volumique sèche et leur degré de saturation, leur teneur en eau, etc.,
- s'ils sont sableux, par leur masse volumique sèche, leur degré de saturation, leur indice de compacité.

### **Essai au piézocône**

Cet essai, qui permet de mesurer la pression interstitielle au cours du fonçage de la pointe pénétrométrique, offre un avantage supplémentaire. Il ouvre la voie à

l'obtention de paramètres en contraintes effectives. Il est aussi un moyen, par exemple, de détection de minces couches de nature différente ou de perméabilités contrastées. Mais, si la norme fixe bien la position du filtre, ses dimensions, les caractéristiques du capteur, l'essai reste pour la mesure de la pression interstitielle dépendant de l'opérateur lors de la phase de saturation des circuits (filtre et capteur) et lors de la mise en place du piézocône dans le sol. Pour que les résultats soient fiables, cette opération doit donc être contrôlée avec soin.

