

Sols : Reconnaissance et essais

Essai de pénétration statique

E : Soil : investigation and testing — Cone penetration test
D : Boden : Erkundung und Prüfungen — Penetrometerversuch

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 5 septembre 1996 pour prendre effet le 5 octobre 1996.

Remplace la norme homologuée NF P 94-113, d'octobre 1989.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il existe en préparation des travaux européens traitant du même sujet. Il n'existe pas de travaux internationaux traitant du même sujet.

Analyse

Le présent document définit la terminologie, spécifie les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire à suivre pour pratiquer l'essai de pénétration statique et précise les résultats à présenter.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : sol, essai, essai en place, essai de pénétration, appareillage, instrument de mesure, mode opératoire, vérification, étalonnage.

Modifications

Par rapport à la précédente édition, la terminologie a été précisée. Certaines caractéristiques de l'appareillage ont été modifiées pour tenir compte du fait que la mesure de la pression interstitielle en pointe est traitée dans la norme NF P 94-119. Le pas de saisie des données a été porté à une valeur inférieure ou égale à 10 cm.

Corrections



Membres de la commission de normalisation

Président : M PAREZ

Secrétariat : M BIGOT — LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE L'EST PARISIEN —
DREIF

M	AMAR	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	BARNOUD	UNION SYNDICALE GEOTECHNIQUE
M	BLONDEAU	COMITE PROFESSIONNEL DE LA PREVENTION ET DU CONTROLE TECHNIQUE
M	CASSAN	FONDASOL
M	CHAILLOT	SNCF — DIRECTION DE L'EQUIPEMENT
M	DORÉ	MECASOL
MME	FERNANDEZ	AFNOR
M	GONIN	SIMECSOL
M	LEGENDRE	SONDAGE, FORAGE ET FONDATIONS SPECIALES — SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
M	MALATERRE	EDF — TEGG — DGG
M	PAREZ	SOL — ESSAIS
M	RINCENT	RINCENT BTP SERVICES
M	ZERHOUNI	SOPENA

Sommaire

		Page
1	Domaine d'application	4
2	Définition — Terminologie	4
2.1	Généralités	4
2.2	Terminologie — Symboles	4
3	Principe de l'essai	5
4	Appareillage et instruments de mesure	6
4.1	Appareillage	6
4.2	Instruments de mesure	9
5	Mode opératoire de l'essai	10
5.1	Contrôles à réaliser	10
5.2	Périodicité des mesures au cours du fonçage	10
5.3	Incertitude des mesures	11
6	Procès-verbal d'essai	11
7	Bibliographie	11
Annexe A	(normative) Étalonnage — Vérification	12
Annexe B	(normative) Caractéristiques dimensionnelles principales du pénétromètre statique	14
Annexe C	(informative) Exemple de présentation des résultats	15

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique à l'essai de pénétration statique réalisé dans tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 20 mm.

2 Définition — Terminologie

2.1 Généralités

Pour les besoins du présent document, la définition suivante s'applique :

essai de pénétration statique : Essai géotechnique réalisé en place en vue d'obtenir les paramètres de sol suivants :

- la résistance à la pénétration d'un cône normalisé ;
- éventuellement le frottement latéral mobilisé sur un manchon cylindrique.

À partir des paramètres mesurés, l'essai de pénétration statique permet d'apprécier entre autres :

- la succession des différentes couches de terrain, et éventuellement leur nature ;
- l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies ;
- certaines caractéristiques des sols traversés.

2.2 Terminologie — Symboles

2.2.1 Effort total de pénétration Q_t

La force totale nécessaire pour enfoncer dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, un train de tiges ayant à la base une pointe terminée par un cône est exprimée en kilonewtons.

L'effort total est donné pour la profondeur atteinte par la base du cône.

2.2.2 Effort total apparent sur le cône Q_c et résistance apparente à la pénétration du cône q_c

L'effort total apparent sur le cône Q_c est la force nécessaire pour enfoncer dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, le cône seul de la pointe pénétrométrique.

La résistance apparente à la pénétration du cône q_c est obtenue en divisant l'effort total apparent Q_c sur le cône par la surface A_c de la base du cône :

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$$

La valeur de q_c est exprimée en mégapascals et est affectée à la profondeur atteinte par la base du cône.

2.2.3 Effort total de frottement latéral Q_{st}

C'est la force obtenue par différence entre l'effort total de pénétration du train de tiges Q_t et l'effort total apparent Q_c sur le cône seul :

$$Q_{st} = Q_t - Q_c$$

Q_{st} , Q_t , Q_c sont exprimés en kilonewtons.

Ces valeurs sont affectées à la profondeur atteinte par la base du cône.

2.2.4 Effort de frottement latéral local Q_s et frottement latéral unitaire local f_s

Le frottement latéral unitaire local f_s est obtenu conventionnellement en divisant la force Q_s nécessaire à l'enfoncement du manchon de frottement par sa surface latérale A_s :

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s}$$

Le frottement latéral unitaire f_s est exprimé en kilopascals ou en mégapascals.

Cette valeur est attribuée à la profondeur correspondant au milieu du manchon de frottement.

2.2.5 Rapport de frottement R_f

Le rapport de frottement R_f est le quotient du frottement latéral unitaire local f_s par la résistance apparente à la pénétration du cône q_c mesurés à la même profondeur (et non au même instant) :

$$R_f = \frac{f_s}{q_c}$$

R_f est exprimé en pourcentage.

2.2.6 Indice de frottement I_f

I_f est le quotient de la résistance apparente à la pénétration du cône q_c par le frottement latéral unitaire local f_s mesurés à la même profondeur (et non au même instant) :

$$I_f = \frac{q_c}{f_s}$$

3 Principe de l'essai

L'essai de pénétration statique consiste à enfoncer verticalement dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, à vitesse constante imposée, une pointe munie d'un cône en partie inférieure par l'intermédiaire d'un train de tiges qui lui est solidaire et à mesurer la résistance à la pénétration de ce cône.

On peut mesurer l'effort total de pénétration, ainsi que l'effort de frottement latéral local sur un manchon de frottement situé immédiatement au-dessus du cône.

4 Appareillage et instruments de mesure

4.1 Appareillage

4.1.1 Présentation du pénétromètre statique

La figure 1 montre les différents éléments par fonction dans leur environnement.

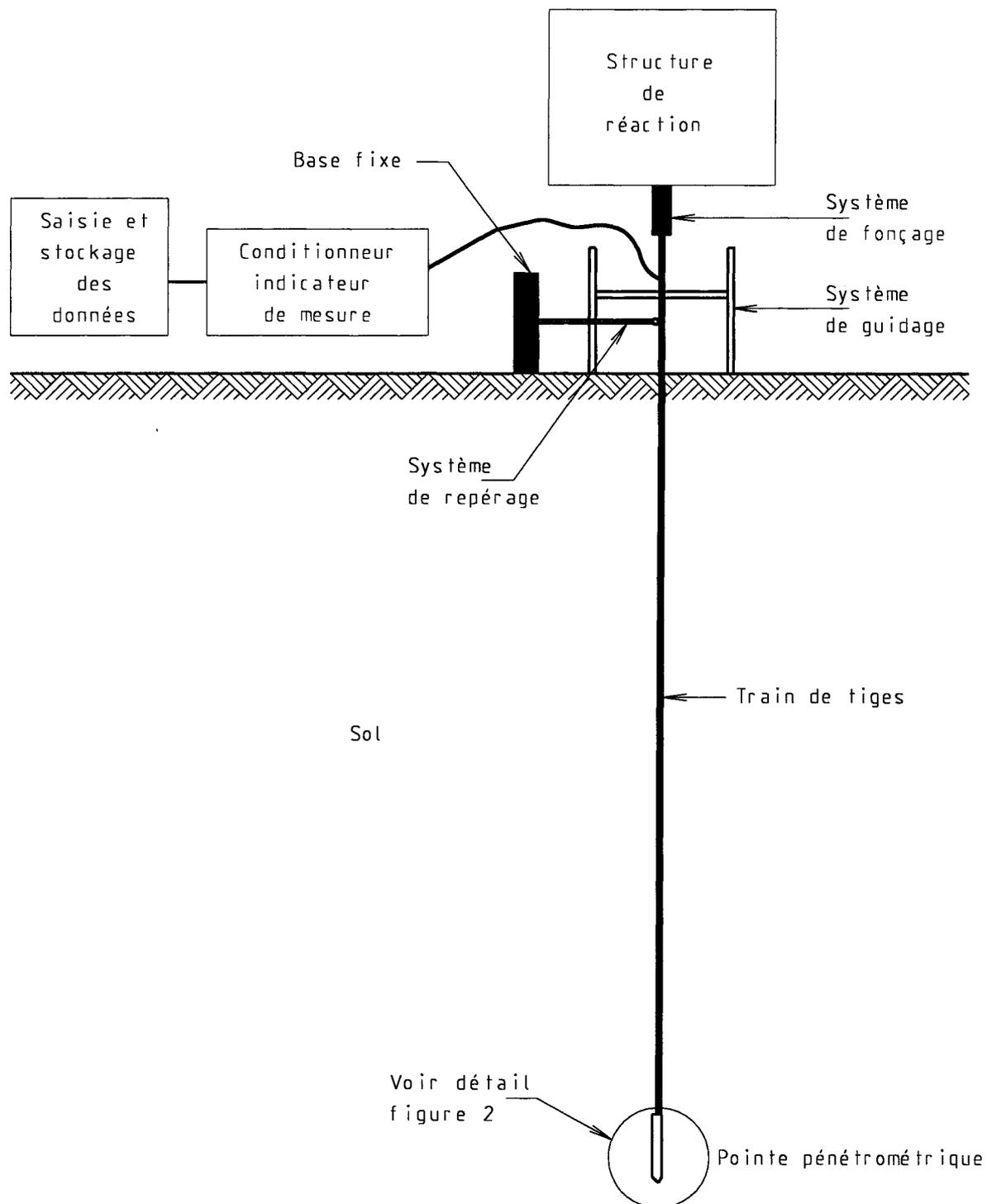


Figure 1 : Schéma du pénétromètre statique

4.1.2 Description

Le pénétromètre statique se compose d'une structure de réaction, de tiges, d'un système de fonçage et de guidage des tiges, d'une pointe, d'un conditionneur-indicateur de mesure incluant un système de mesure de la longueur des tiges par rapport à un repère fixe et d'un dispositif de saisie et de stockage des données. Les caractéristiques de ces différents constituants sont indiquées ci-après.

4.1.2.1 Structure de réaction

Le dispositif qui permet de transmettre, au train de tiges, l'effort de fonçage, doit être stabilisé de telle sorte qu'il ne puisse se déplacer de manière sensible, par rapport au sol, lors du fonçage.

4.1.2.2 Système de fonçage

C'est l'appareillage qui permet d'enfoncer le train de tiges à vitesse sensiblement constante sans choc ni vibration, ni rotation, dans un même mouvement vertical descendant pour l'ensemble tiges et pointe conique.

4.1.2.3 Train de tiges et système de guidage

Les tiges de diamètre (d_t) doivent être assemblées fermement pour constituer un train de tiges rigidement liées selon un axe rectiligne et continu.

Afin d'éviter le flambement des tiges, un système de guidage doit être prévu dans la partie hors du sol.

4.1.2.4 Pointe (figure 2)

Placée à l'extrémité inférieure du train de tiges, la pointe est constituée d'un cône et d'un corps de même axe que le train de tiges.

Le corps de pointe qui sert de tube de garde au cône peut comporter éventuellement un manchon de frottement, placé alors, immédiatement au-dessus du cône, ainsi qu'un inclinomètre.

Tous ces éléments : cône, manchon de frottement, tube de garde, sont séparés par des intervalles munis de joints de protection destinés à s'opposer à l'entrée des particules solides.

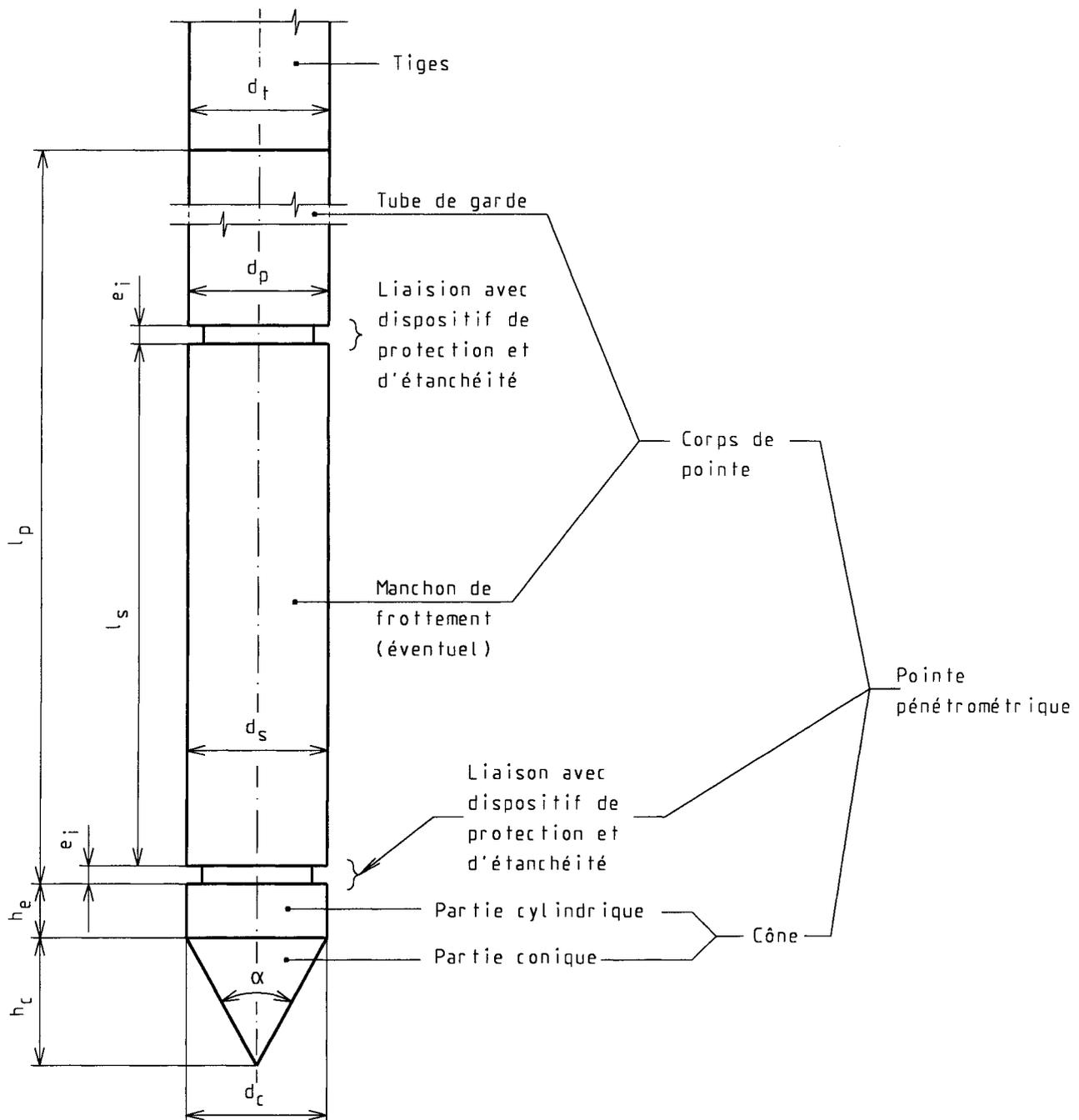


Figure 2 : Schéma de la pointe pénétrométrique

Les caractéristiques géométriques de la pointe sont données dans le tableau B.1 de l'annexe B :

a) le cône

Il comprend une partie conique d'angle au sommet environ 60° et une partie cylindrique ;

b) le corps de pointe

Le corps de pointe est constitué d'un tube de garde et éventuellement d'un manchon de frottement avec une liaison entre les deux munie d'un dispositif de protection et d'étanchéité ;

c) les logements pour les joints de protection entre les éléments de la pointe (figure 3)

L'aire de la section suivant un plan axial de l'intervalle e_i entre les éléments de la pointe, déduction faite de l'aire de la section du joint de protection (I_j) a pour valeur :

$$A_i = (d_s - d_i)e_i - I_j$$

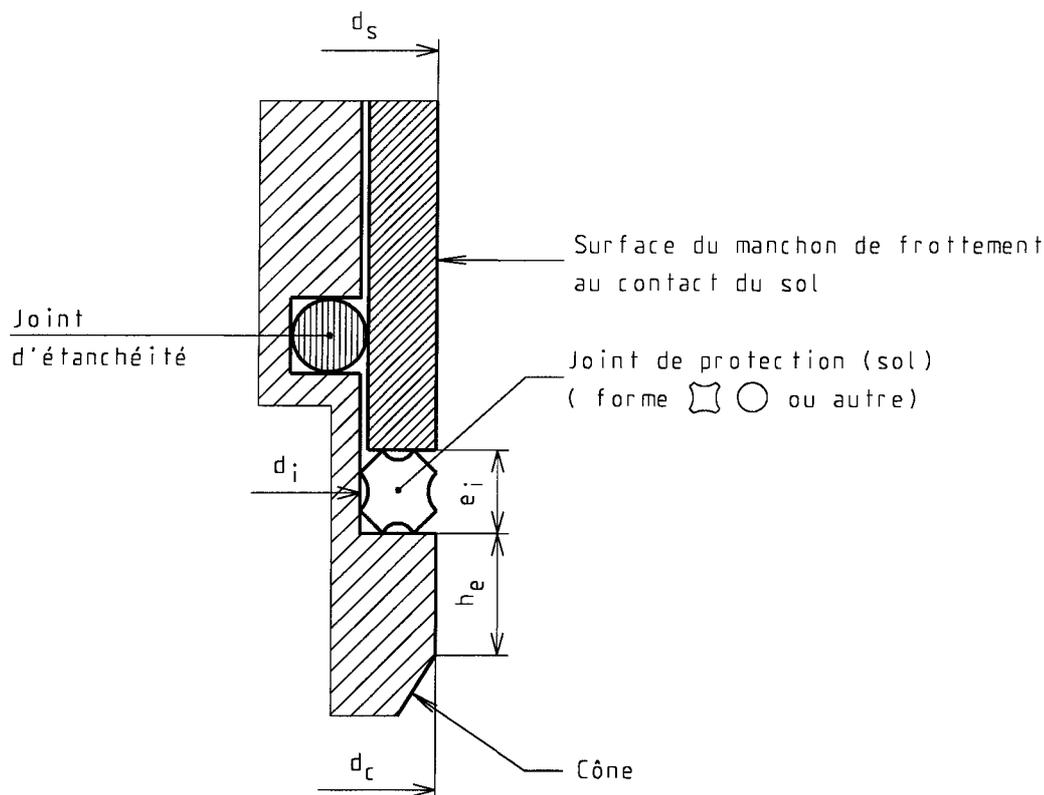


Figure 3 : Schéma de l'intervalle entre les éléments de la pointe

d) le joint de protection

Les dimensions et la déformabilité du joint doivent être telles qu'après une diminution de l'espace de logement du joint de 0,5 mm, le diamètre extérieur du joint reste inférieur au diamètre du cône.

La déformabilité du joint doit être telle qu'elle n'influence pas la mesure de la force sur le manchon de frottement.

4.2 Instruments de mesure

Les appareils de mesure sont adaptés en fonction des informations à recueillir pour :

— la longueur de pénétration

La mesure est faite par rapport à un repère fixe. La profondeur atteinte par le cône peut être différente de la longueur de pénétration lorsque le train de tiges a dévié par rapport à la verticale ;

— la résistance à la pénétration du cône

Le dispositif de mesure de la résistance à la pénétration du cône seul doit être solidaire de celui-ci. Le capteur électrique ou hydraulique et la chaîne de mesure doivent être compensés pour des variations de température de -10 °C à $+40\text{ °C}$;

— le frottement latéral local (éventuel)

La mesure se fait à partir d'un dispositif relié au manchon de frottement ;

— l'inclinaison de la pointe (éventuelle)

Un capteur inclinométrique éventuel solidaire du corps de pointe donne l'inclinaison de la pointe.

Les signaux issus des différents capteurs sont transmis à un système de saisie rapide des données en fonction de la profondeur atteinte par le cône de pointe. Quel que soit le matériel utilisé, l'opérateur doit disposer d'une visualisation simultanée des grandeurs mesurées.

5 Mode opératoire de l'essai

5.1 Contrôles à réaliser

On distingue les opérations et contrôles qui sont à effectuer préalablement à l'essai et ceux à réaliser au cours du fonçage.

5.1.1 Avant essai

Il faut procéder aux différentes opérations successives suivantes :

5.1.1.1 *Repérage sur un plan de situation et identification de l'essai pénétrométrique sur un plan coté*

NOTE : Sur un site où un grand nombre de sondages de nature différente sont effectués, l'ordre chronologique doit être indiqué. On rappelle que l'influence d'un forage non tubé et non rebouché peut affecter le sol sur un rayon pouvant atteindre 25 fois le diamètre du forage.

5.1.1.2 *Vérifications et étalonnages périodiques*

Les vérifications et étalonnages périodiques à effectuer sont énoncés dans l'annexe A.

5.1.1.3 *Examen des joints de protection de la pointe*

Un examen soigné de la pointe est préalablement effectué afin d'éliminer les particules de sol ou éléments pouvant gêner le bon fonctionnement de la pointe.

Lorsque les appareils de mesure placés dans la pointe sont reliés à la surface par des câbles électriques, s'assurer que ceux-ci sont continus et qu'en conséquence ils ont été enfilés préalablement dans un nombre suffisant de tiges de fonçage. Si l'on emploie un dispositif de réduction du frottement sur les tiges, il doit être situé au-dessus de la pointe, c'est-à-dire au moins 1 m au-dessus de la base du cône.

Pour une mesure du frottement latéral local, il faut vérifier que le diamètre du manchon (d_s) est supérieur ou égal au diamètre de la partie cylindrique du cône (d_c).

5.1.2 Pendant l'essai

Il faut effectuer un ensemble de manœuvres souvent simultanées qui sont :

- faire coïncider l'axe du train de tiges avec celui de l'effort de fonçage ;
- enfoncer les tiges et la pointe verticalement. L'inclinaison maximale tolérée en surface est de 2 % par rapport à la verticale ;
- s'assurer que la structure de réaction reste stable ;
- vérifier que la vitesse de pénétration reste constante sur une longueur minimale de 0,8 m durant le déplacement de la pointe avec les tolérances données dans le tableau B.1 de l'annexe B.

5.2 Périodicité des mesures au cours du fonçage

Une lecture continue de l'ensemble des données est recommandée. L'intervalle de profondeur entre deux ensembles de saisie consécutifs ne doit en aucun cas être supérieur à 10 cm.

Les lectures et leur saisie comprennent :

- **obligatoirement**
 - la profondeur ;
 - l'effort total apparent sur le cône seul Q_c ;

— éventuellement

- l'effort total de pénétration du train de tiges Q_t ;
- l'effort de frottement latéral local Q_s ;
- l'inclinaison de la pointe.

5.3 Incertitude des mesures

On distingue l'incertitude sur la longueur de pénétration et celle sur les autres paramètres.

5.3.1 Incertitude sur la longueur de pénétration

Elle ne doit pas excéder 1/100.

5.3.2 Incertitude maximale sur les autres mesures

L'incertitude maximale tolérée est la plus petite des valeurs suivantes :

- 5 % de la valeur mesurée ;
- 1 % de la valeur maximale du domaine de mesure.

6 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit comporter les informations minimales suivantes :

- a) la référence au présent document, NF P 94-113 ;
- b) le nom de l'organisme qui a effectué l'essai ;
- c) l'identification de l'essai, la date et la référence du plan d'implantation, éventuellement les coordonnées planimétriques ;
- d) le niveau du début de l'essai de pénétration statique par rapport à la surface du sol, et la cote altimétrique du sol par rapport à un système de référence précisé ;
- e) la profondeur de l'eau dans le trou de pénétration aussitôt après l'arrachage des tiges ;
- f) le niveau de la nappe s'il est connu par ailleurs ;
- g) la profondeur d'un éboulement (éventuel) du trou de pénétration ;
- h) les différents résultats présentés sous forme graphique avec échelle arithmétique ;
- i) les observations liées à la réalisation de l'essai ainsi que les incidents et les détails opératoires non prévus dans ce document et susceptibles d'avoir une influence sur le résultat.

Un exemple de procès-verbal d'essai est donné dans l'annexe C.

7 Bibliographie

ISSMFE (1989) Report of the Technical Committee on Penetration Testing of Soils — TC16 with Reference Test Procedures C.P.T — S.P.T — DP — WST- International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) S.G.I, 50 pages.

Annexe A

(normative)

Étalonnage — Vérification

A.1 Étalonnage du matériel — Périodicité de raccordement aux étalons

Les instruments et moyens de mesure sont gérés conformément aux prescriptions établies par le Bureau National de Métrologie (B.N.M.).

L'usage de manomètres implique leur raccordement à un étalon au plus tous les six mois. Le certificat doit comporter la date du dernier raccordement et l'organisme qui l'a effectué.

Les pesons, capteurs et anneaux dynamométriques doivent être raccordés à un étalon tous les 3 000 m de sondage ou au plus tous les six mois. Le certificat doit comporter la date du dernier raccordement à un étalon et l'organisme qui l'a effectué.

Si l'examen des résultats prouvait en particulier la stabilité dans le temps, la périodicité pourrait être portée à un an après accord de l'organisme vérificateur. Tous les systèmes de mesure d'efforts et de résistance à la pénétration de la pointe doivent être compensés pour les variations de température qui se produisent entre le moment de l'étalonnage, le début et la fin du fonçage.

L'étalonnage permettant de vérifier l'incertitude maximale (voir 5.3.2) doit être fait sur la pointe assemblée avec son conditionneur-indicateur.

A.2 Vérifications

Des contrôles sont à effectuer pour les différents constituants et pour le matériel de mesure.

A.2.1 Manomètres

Lorsque des manomètres sont utilisés pour l'essai de pénétration statique, il faut disposer d'au moins deux exemplaires de chaque type de manomètre, chacun avec son propre étalonnage. On doit vérifier à intervalles réguliers le manomètre utilisé pour les essais avec un manomètre identique de réserve.

A.2.2 Pointe

Un contrôle régulier doit être effectué avec un appareillage approprié.

Lors des étalonnages, on s'assure en particulier que :

- le dispositif utilisé pour la détermination du frottement latéral local est insensible à des variations de contrainte normale sur le manchon de frottement n'excédant pas 200 kPa ;
- le dispositif adopté pour la mesure de la résistance à la pénétration du cône seul est solidaire du cône et conçu de telle sorte qu'une excentricité de la force appliquée n'ait aucune influence sur le paramètre mesuré.

A.2.3 Tiges

On procède à une vérification et à un tri des tiges de telle sorte que la déviation maximale d'un point de la surface d'une tige de 1 m, par rapport à une droite joignant ses extrémités, n'excède pas 0,5 mm pour les cinq tiges inférieures et 1 mm pour les autres. Ces conditions de déviation sont également imposées aux jonctions de deux tiges consécutives.

A.2.4 Cône

L'usure et l'asymétrie du cône doivent être appréciées visuellement et les dimensions doivent être comparées aux tolérances.

A.2.5 Manchon de frottement

Avant chaque emploi du manchon de frottement, on doit s'assurer que le diamètre du manchon de frottement est supérieur ou égal à celui du cône utilisé au cours du même fonçage.

Annexe B

(normative)

Caractéristiques dimensionnelles principales du pénétrömètre statique

Les valeurs données dans ce tableau correspondent :

- pour le cône, à un angle au sommet à l'état neuf α de 60° et à une surface de base A_c de 10 cm² ;
- pour le manchon de frottement, à une surface latérale de 150 cm².

À la fabrication, la rugosité longitudinale du cône doit être inférieure à 2 μ m et celle du manchon de frottement doit être comprise entre 0,5 μ m et 1 μ m.

Tableau B.1 : Caractéristiques du pénétrömètre statique

Désignation		Symbole	Unité	Valeur	Tolérance d'utilisation	
Système de fonçage de la pointe		v	mm/s	20	± 5	
Pointe	Corps de pointe	Longueur	l_p	m	$\geq 1,0$	—
		Diamètre	d_p	mm	$d_p \leq d_c$	—
	Cône	Diamètre	d_c	mm	35,7	$\pm 0,3$
		Hauteur de l'élément conique	h_c	mm	31,0	- 2 + 0,3
		Hauteur de la partie cylindrique	h_e	mm	$7 \leq h_e \leq 10$	—
	Manchon de frottement	Diamètre	d_s	mm	$d_c \leq d_s \leq 36,5$	—
		Longueur	l_s	mm	133,7	0 + 1
	Liaison avec dispositif d'étanchéité et de protection		e_i	mm	≤ 5	—
			A_i	mm ²	< 10	—

Annexe C

(informative)

Exemple de présentation des résultats

C.1 Procès-verbal d'essai

Il comporte une représentation graphique des résultats dont un exemple est donné sur la figure C.1.

PROCÈS-VERBAL D'ESSAI ESSAI DE PÉNÉTRATION STATIQUE Effectué conformément à la norme NF P 94-113		SITE	ESSAI
Plan d'implantation	X : Y : Z :	Niveau d'eau :	Date :

Cote :

— q_c (MPa) résistance apparente à la pénétration

0 2 5 10 15 20 25 30

--- f_s (kPa) frottement latéral unitaire local

0 50 100 200 300 400

— R_f % Rapport de frottement

0 2 8

Profondeur en mètres

Observations, incidents et détails opératoires particuliers :

Établi par : Dossier n°

Organisme :

Figure C.1 : Procès-verbal d'essai de pénétration statique — Exemple

C.2 Échelles graphiques

Les échelles arithmétiques suivantes sont proposées, avec une unité de longueur graphique choisie :

- verticalement :
 - profondeur en mètres : une unité pour 1 m ;
- horizontalement :
 - résistance apparente à la pénétration du cône q_c : une unité pour 2 MPa (ou 1 MPa si la résistance des sols est faible) ;
 - frottement latéral unitaire local f_s : une unité pour 50 kPa ;
 - effort total de pénétration Q_t : une unité pour 5 kN ;
 - effort total de frottement latéral Q_{st} : une unité pour 5 kN ;
 - rapport de frottement R_f : une unité pour 2 %.

Pour une même opération, il convient d'adopter une convention unique d'échelles adaptées aux sols rencontrés.