

## ESSAIS ET MESURES IN-SITU

### 1 INTRODUCTION

La détermination des caractéristiques d'un sol nécessite la réalisation d'essais. Certains essais (relatifs au comportement à court terme), peuvent être effectués de deux façons :

- Au laboratoire après prélèvement d'échantillons intacts (ou non remaniés) ;
- Au sein du massif de sol, par un essai en place ou in situ.

Les essais permettant la détermination des caractéristiques à long terme sont réalisés au laboratoire sur des échantillons de sol intacts.

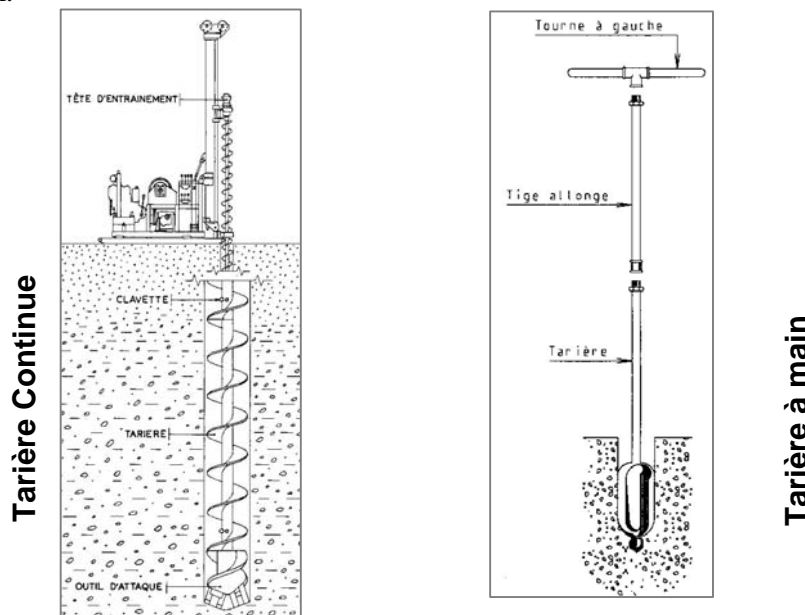
Les avantages de l'essai in situ sont les suivants :

- Son exécution est rapide, donc on peut le multiplier pour permettre une meilleure reconnaissance du sol ;
- Il est parfois le seul à réaliser lorsqu'on ne peut pas extraire des échantillons intacts ;
- Il donne des résultats globaux par rapport aux essais de laboratoire qui donnent des résultats discontinus.

### 2 PRELEVEMENTS DES SOLS

On distingue traditionnellement parmi les procédures de prélèvement d'échantillons de sols celles qui donnent des échantillons intacts (ou non remaniés) et celles qui fournissent des échantillons de sols remaniés, c'est à dire qui ont perdu tout ou partie de leurs propriétés mécaniques et même de leurs constituants.

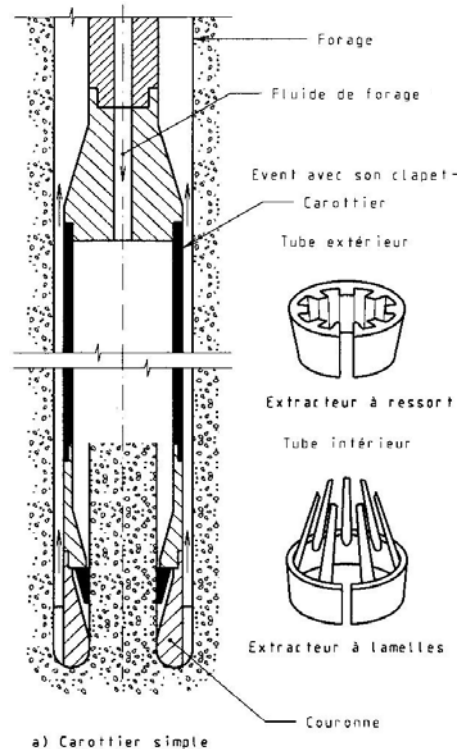
On obtient des échantillons remaniés lorsque le forage est fait à l'aide d'une tarière : tube cylindrique avec une paroi extérieure hélicoïdale lorsqu'on opère avec un camion de sondage, il existe aussi la tarière manuelle dont l'utilisation est limitée à une profondeur de 3 m.



Eléments de tarière

Pour récupérer des échantillons intacts on réalise un forage selon l'une des deux façons suivantes :

- Avec une sondeuse munie d'un carottier à prise d'échantillons ; le carottage est fait d'une manière continue. Le prélèvement est réalisé d'une manière continue ou par endroits. L'échantillon de sol prélevé est immédiatement recouvert d'une couche de paraffine pour éviter les pertes de teneur en eau, puis il est mis dans un étui.



a) Carottier simple  
**Coupe schématique d'un carottier**

- En réalisant une fouille dans le sol avec une pelle utilisée. L'échantillon est prélevé en enfonçant dans le sol, et à l'aide d'une masse, une boîte cubique (ou cylindrique). Le prélèvement est fait par endroits à des profondeurs déterminées. L'échantillon est immédiatement recouvert de paraffine et par deux couvercles afin d'éviter les pertes de teneur en eau.

Les échantillons obtenus servent le plus souvent à faire des essais de résistance, comme ils peuvent servir pour faire des essais d'identification.

### 3 ESSAIS IN-SITU

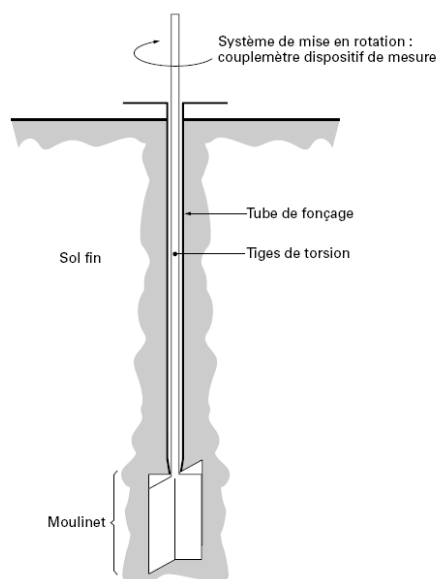
Il y en a plusieurs, on décrira quelques uns qui sont les plus utilisées en pratique.

#### 3.1 LE SCISSOMETRE (VANE TEST)

Le scissomètre est utilisé pour déterminer la cohésion non drainée pour les sols mous purement cohérents (vase, tourbe, argile molle). L'appareil est constitué d'une tige munie à son extrémité de deux palettes verticales de mêmes dimensions et perpendiculaires entre elles. L'essai consiste à enfoncer l'appareil par un vérin à la profondeur voulue, puis à appliquer un moment de torsion  $M$  sur la tige. Un cisaillement cylindrique se produit dans le sol le long de la directrice du cylindre de rayon  $r_0$ , analogue au cisaillement rectiligne obtenu (suivant un plan) par la boîte de cisaillement. Au cours de cet essai on suit l'évolution de l'angle de rotation  $\theta$  en fonction du moment  $M$ .

Remarques :

1. Le scissomètre est un appareil d'utilisation courante.
2.  $C_u$  est une fonction de la contrainte de consolidation, on peut donc déterminer la variation de  $C_u$  avec la profondeur.
3. Il existe deux autres formes de cet appareil : le scissomètre de laboratoire, et le scissomètre de poche.



Coupe schématique d'un scissomètre.

#### 3.2 PENETROMETRE DYNAMIQUE (SPT)

Un pénétromètre dynamique est un appareil constitué essentiellement par un train de tiges, à l'extrémité inférieure duquel est placée une pointe conique d'un diamètre supérieur à celui du train de tiges.

L'essai au pénétromètre dynamique consiste à enfoncer dans le terrain par battage un carottier de conception et de dimension normalisées. On compte le nombre de coups de mouton nécessaires pour enfoncer le carottier sur une certaine profondeur. Une fois plein, le carottier est remonté à la surface, vidé de sa carotte puis redescendu au fond du forage. L'opération est répétée sur toute la hauteur du profil à tester. L'essai permet, d'une part, de tracer un profil de pénétration et, d'autre part, de fournir des échantillons de sol remaniés qui peuvent servir à la reconnaissance des horizons traversés et sur lesquels on peut pratiquer les essais d'identification classiques (granulométrie, limites d'Atterberg et teneur en eau). L'essai est d'utilisation courante dans les pays anglo-saxons et notamment aux USA, où il a été mis au point dans les années 1930. Dans ces pays, il est connu sous le nom de Standard Penetration Test (SPT).

Cet essai est conçu essentiellement pour déterminer la capacité portante d'un pieu (élément de fondation profonde), et peut servir pour estimer la capacité portante d'une fondation superficielle. Lors de la reconnaissance des sols il donne aussi une idée sur la nature des couches traversées.

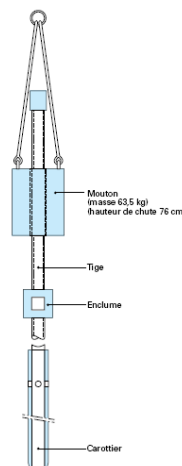


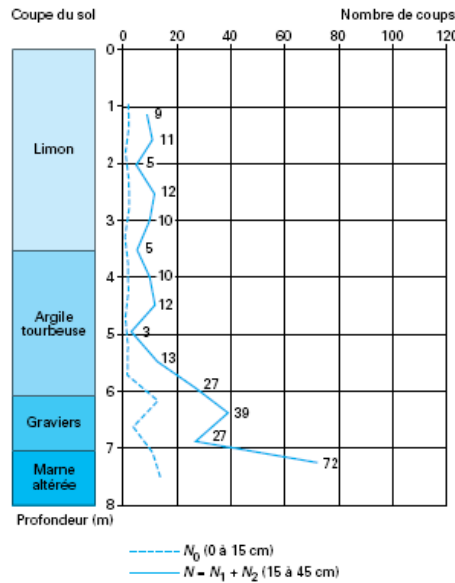
Schéma de principe d'un pénétromètre dynamique (SPT)

Le carottier est battu par l'intermédiaire d'un train de tiges. Le battage s'effectue par passes successives à l'aide d'un marteau de 63,5 kg qui tombe en chute libre d'une hauteur de 76 cm sur la tête du train de tiges. La profondeur de chaque passe de pénétration est de 45 cm. Durant le battage, on note trois enfoncements successifs :

- l'enfoncement de mise en place : c'est l'enfoncement du carottier sous son propre poids et sous celui du train de tiges et du dispositif de battage ; la pénétration est poursuivie immédiatement si ce premier enfoncement dépasse 45 cm ;
- l'enfoncement d'amorçage : le carottier est enfoncé de 15 cm sous l'effet de  $N_0$  coups de mouton ;
- l'enfoncement d'essai : le carottier est enfoncé de deux fois 15 cm sous l'effet de  $N_1$  puis  $N_2$  coups de mouton.

Le nombre  $N = N_1 + N_2$  est appelé résistance à la pénétration (au carottier standard). Les résultats sont présentés sous forme de tableau, comme indiqué par la norme, et éventuellement sous forme d'une courbe de variation de  $N$  en fonction de la profondeur.

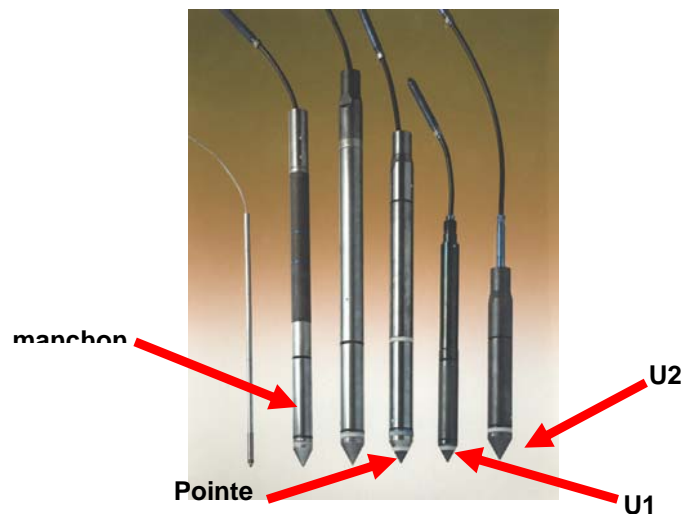
La norme précise que l'essai ne s'applique qu'aux sols dont la dimension des plus gros éléments ne dépasse pas 20 mm, dont la Valeur  $N$  est comprise entre 0 et 50 et pour des profondeurs d'investigation ne dépassant pas 50 m.



Profil de pénétration au SPT

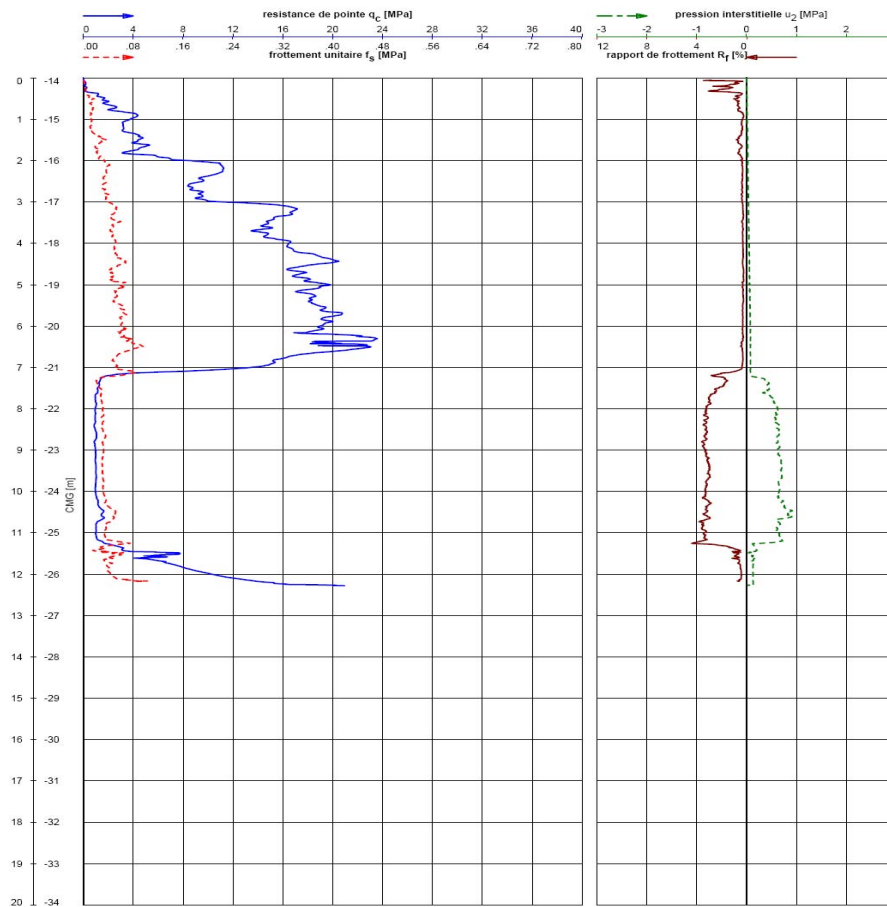
### 3.3 PENETROMETRE STATIQUE

L'essai au pénétromètre statique consiste à fonder verticalement dans le terrain, à vitesse lente et constante, un train de tiges terminé à sa base par une pointe conique généralement de même diamètre que les tiges.



Par un procédé quelconque, mécanique, électrique ou hydraulique, on mesure suivant un pas de profondeur donné, la résistance opposée par le sol à la pénétration de cette pointe, appelée en conséquence résistance de pointe statique (ou résistance de cône) et notée  $q_c$ .

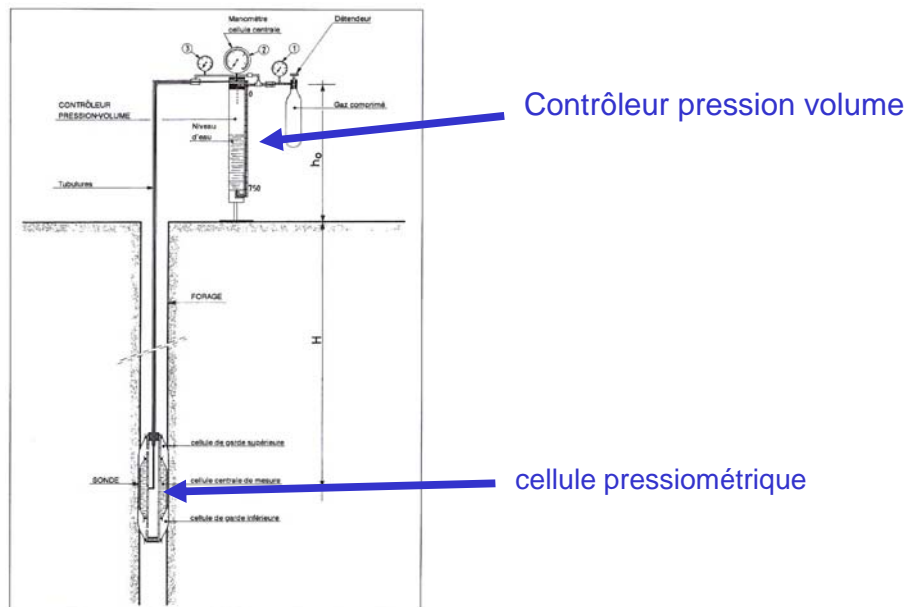
Simultanément, on mesure l'effort opposé à l'enfoncement de l'ensemble pointe et tiges. Cet effort est appelé effort total et noté  $q_t$ . Il comprend d'une part l'effort de pointe et d'autre part l'effort de frottement latéral, qui s'exerce sur toute la hauteur du train de tiges. Le pénétromètre statique a été développé initialement en Hollande, où l'on trouve des formations meubles de sols fins de forte épaisseur (plusieurs dizaines de mètres) pour l'étude desquelles ce type d'appareil est particulièrement bien adapté.



### 3.4 PRESSIOMETRE MENARD

Cet essai consiste à dilater radialement une cellule cylindrique placée dans un forage préalable.

Le pressiomètre Ménard comprend deux parties principales : la sonde et l'unité de contrôle, dite « contrôleur pression-volume », en abrégé CPV. Ces deux parties sont reliées par des tubulures semirigides de plastique.

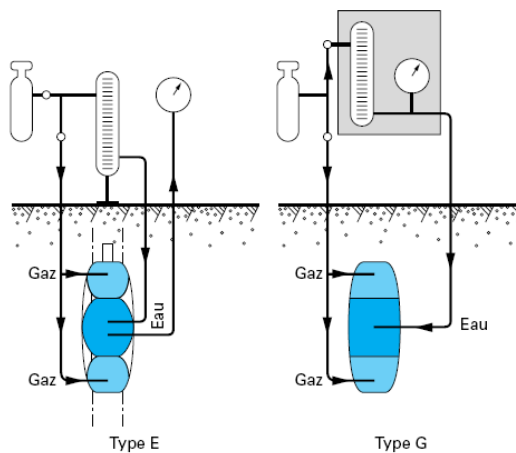


La sonde se compose de trois cellules indépendantes, montées autour d'une âme métallique :

- la cellule centrale, dite cellule de mesure, qui contient de l'eau et dont la mise en pression en cours d'essai provoque la variation de volume ;
- les cellules de garde, qui contiennent du gaz et qui encadrent la cellule de mesure ; la mise en pression des cellules de garde en cours d'essai est réalisée simultanément à celle de la cellule de mesure, de manière à maintenir la forme globalement cylindrique de la sonde ; ainsi, la déformation de la cellule de mesure est uniquement radiale et l'essai pressiométrique est un essai en déformation plane.

D'après leur conception technologique, on distingue deux principaux types de sondes, qui sont :

- les sondes à cellules superposées, connues commercialement sous le nom de sondes E ;
- les sondes à cellules emboîtées, connues commercialement sous le nom de sondes G.



Après avoir réalisé le forage, la sonde préalablement étalonnée est descendue dans le forage à la cote prévue pour l'essai, puis elle est mise en pression par l'opérateur par paliers de pression d'incréments égaux, maintenus chacun pendant une minute. Pour chaque palier de pression, l'opérateur note la quantité d'eau qui quitte le CPV, au bout de 15 s, 30 s et 1 min. Cette quantité d'eau est utilisée à la fois pour déformer le terrain (c'est le phénomène que l'on veut mesurer) et pour compenser les effets parasites dus à la dilatation de l'ensemble des conduits du pressiomètre et à la compressibilité de l'eau du système. Le mode opératoire impose que la pression limite du sol soit atteinte au bout de dix paliers de pression (environ). Cela implique que l'opérateur connaisse a priori cette valeur. Il la déduit en pratique des informations sur le terrain obtenues lors de la mise en place de la sonde et de son expérience. Une fois la pression limite atteinte (ou les capacités maximales de pression de l'appareil mobilisées), la sonde est dégonflée et déplacée à la nouvelle cote d'essai dans le forage, et ainsi de suite jusqu'à la profondeur maximale fixée.

Une courbe dite courbe pressiométrique (aussi appelée « courbe d'expansion ») est obtenue en portant en abscisse la pression  $p$  dans la cellule de mesure et en ordonnée la variation de volume  $v$  à la fin du palier de pression correspondant. On appelle « courbe brute » la courbe représentant les valeurs ( $p_m$ ,  $v_m$ ) relevées sur le terrain par l'opérateur (ou enregistrées par l'enregistreur). On appelle « courbe corrigée » la courbe ( $p, v$ ) obtenue après application de corrections diverses à ces valeurs.

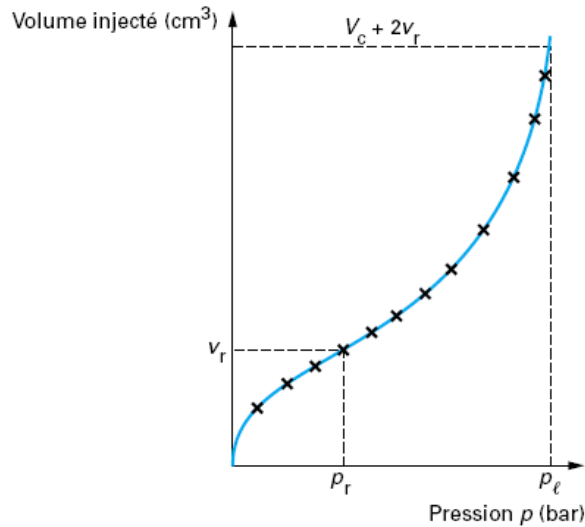
Ces corrections concernent :

- les variations parasites de volume (dilatation du CPV et des canalisations diverses, compressibilité de l'eau) ; elles sont évaluées par étalonnage, en dilatant le système alors que la sonde est placée dans un tube d'acier indéformable ;
- la résistance propre de la sonde ; c'est la résistance que les membranes des cellules opposent à la déformation ; elle est déterminée par dilatation de la sonde à l'air libre ;
- la hauteur piézométrique ; la pression mesurée au niveau du CPV doit être majorée de la pression correspondant au poids de la colonne d'eau entre ce CPV et le milieu de la cellule de mesure.

La courbe pressiométrique (figure ci-dessous) se compose de deux branches, chacune à concavité monotone, se raccordant en un point d'inflexion noté ( $p_r$ ,  $v_r$ ) où  $p_r$  est appelée pression de recompaction :

- la première branche, à concavité tournée vers l'axe des pressions, correspond à la phase où la réponse du massif est gouvernée, pour l'essentiel, par le serrage progressif du terrain au bord du trou (ce terrain a été décomprimé et remanié par l'opération de forage) ;
- la deuxième branche, à concavité tournée vers l'axe des volumes, traduit au contraire une déstructuration progressive du massif en raison de la nature et de l'intensité du champ de contrainte déviatorique qui lui est imposé.





Les résultats expérimentaux relevés par l'opérateur ou enregistrés sont interprétés soit « manuellement », soit le plus souvent par ordinateur. Dans ce dernier cas, le programme calcule la courbe corrigée qu'il présente à l'écran et sur imprimante puis les caractéristiques pressiométriques  $E_M$  et  $p_l$ .

Les valeurs de  $E_M$  et  $p_l$  déterminées sur un forage sont ensuite présentées sur un profil en fonction de la profondeur  $z$ . Ce profil est appelé profil pressiométrique (figure ci-dessous). En plus des caractéristiques pressiométriques, ce profil indique la nature des sols rencontrés ainsi que le niveau éventuel de la nappe d'eau souterraine, ces informations étant obtenues lors du forage préalable nécessaire à la mise en oeuvre de la sonde. L'outil de forage utilisé est également indiqué.

