

CHAPITRE 8

ESSAIS ET MESURES IN SITU

- 8.1 Introduction
- 8.2 Sondages et prélèvements d'échantillons
- 8.3 Les essais in situ
- 8.4 Les appareils de mesure in situ
- 8.5 Application

8.1 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.

Dans ce chapitre, on fait abstraction des reconnaissances électriques, sismiques, ou autres, telle que la mesure électrique (ou aux rayons gamma) de la densité. On pourra se référer à Costet [2], pour avoir une idée plus complète sur ce genre de reconnaissance ou d'identification d'un sol nécessite le prélèvement d'échantillons.

8.2 Sondages et prélèvements d'échantillons

Définition : Un sondage consiste à forer un trou dans le sol, les échantillons peuvent être extraits de deux façons :

* Sans précaution, dans ce cas le forage du trou est fait à l'aide d'une tarière : tube cylindrique avec une paroi extérieure hélicoïdale (figure 1) 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. Les échantillons extraits sont dits remaniés, ils servent pour réaliser des essais d'identification de sol.

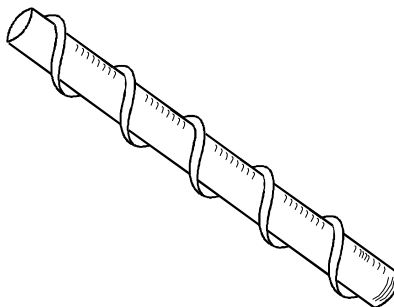


Figure 1 : Un élément de tarière

**** Avec précaution,** dans ce cas le forage du trou est réalisé 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.

- En réalisant une fouille dans le sol avec une pelle utilisée. L'échantillon est prélevé en enfouissant 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.

Dans les deux cas les échantillons obtenus sont dits intacts. Ils servent le plus souvent à faire des essais de résistance, comme ils peuvent servir pour faire des essais d'identification.

Remarques

- Le prélèvement d'échantillons intacts et leur transport sont des opérations délicates, où on doit éviter les chocs qui provoqueraient leur liquéfaction (déstabilisation de la texture du sol).

- Lors d'une campagne de reconnaissance géotechnique, le nombre et la profondeur des sondages à exécuter dépendent de plusieurs facteurs, parmi lesquels on cite : la nature du sol, la diversité des couches, l'hétérogénéité du terrain, le niveau du substratum, et le type de l'ouvrage.

- Dans tout projet, il faut respecter le principe essentiel suivant : refuser de procéder par simple analogie et extrapolation des résultats obtenus sur un chantier voisin. En effet même dans une zone dite homogène des anomalies locales sont à craindre.

- La distance à ne pas dépasser entre deux sondages, dans deux directions perpendiculaires, est d'après {2} : de 15 m pour les bâtiments, et de 30 m à 70 m pour les grands ouvrages tels que les barrages, les autoroutes, etc...

- On réalise aussi des essais in situ pour compléter les résultats déterminés à partir d'essais faits au laboratoire.

8.3 Les essais in situ

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

8.3.1 Le scissomètre (vane test)

Utilisation : Déterminer la cohésion non drainée pour les sols mous purement cohérents (vase, tourbe), pour lesquels on a souvent : $C_u \leq 40 - 50 \text{ Kpa}$

Description : L'appareil est constitué d'une tige munie à son extrémité de deux palettes verticales de mêmes dimensions et perpendiculaires entre elles (figure 2a).

Principe : Enfoncer l'appareil par un vérin à la profondeur voulue, puis 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 (figure 2b), 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 θ en fonction du moment M (figure 2c) .

Détermination de la cohésion non drainée : On suppose que la rupture se produit lorsque la contrainte de cisaillement atteint la valeur maximale C_u supposée homogène en tout point de la surface latérale du cylindre (y compris ses bases). Le moment de torsion M est déterminé par l'expression suivante :

$$M = 2\pi r_0 H C_u r_0 + 2 \left(2\pi \int_0^{r_0} C_u r^2 dr \right)$$

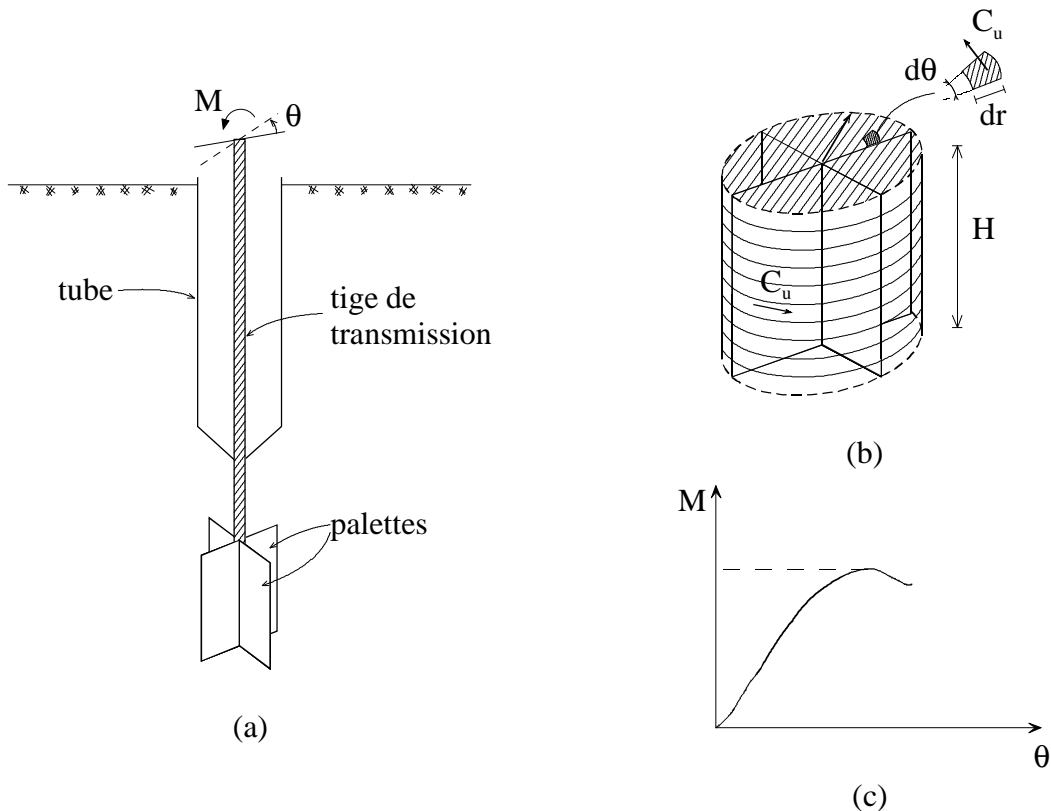


Figure 2 : Coupe schématique d'un scissomètre.

D'où on obtient :

$$C_u = \frac{M}{2\pi r_0^2 \left(H + 2 \frac{r_0}{3} \right)}$$

Remarques

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

8.3.2 Le pénétromètre

Utilisation : Il permet de réaliser un essai de battage dans le sol. Il 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. Il existe deux types d'appareil, le pénétromètre statique et le pénétromètre dynamique. Il existe aussi le pénétromètre de poche.

8.3.2.1 Le phénomène statique

Description : Il consiste en un tube extérieur de 5 cm à 10 cm de diamètre, à l'intérieur duquel peut coulisser une tige terminée par un cône (figure 3).

Principe : On enfonce lentement l'appareil dans le sol à une vitesse constante (3mm/sec); et on mesure d'une manière séparée lors de l'enfoncement :

- La charge due au frottement du tube sur le sol, on détermine alors le frottement latéral P_{lat} . Si on désigne par S_{lat} la surface latérale extérieure du tube dans le sol on définit le frottement latéral moyen par unité de surface :

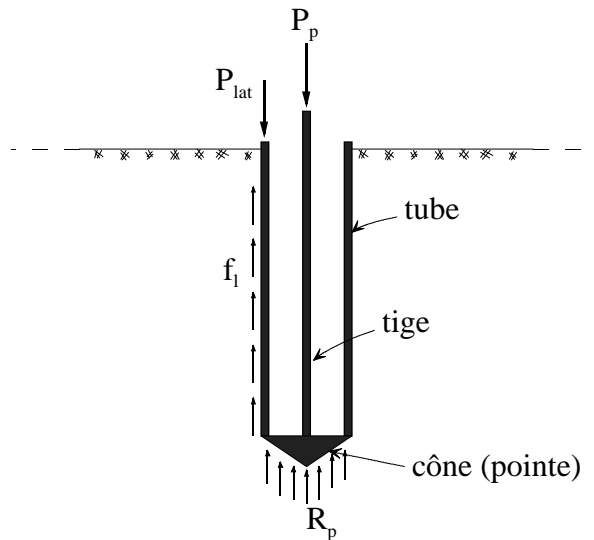


Figure 3 : Coupe schématique d'un pénétromètre statique.

- La charge appliquée sur la tige qui donne l'effort de pointe R_p , on définit alors la pression de pointe P_p par :

$$P_p = \frac{R_p}{S_p}$$

Où S_p désigne la section maximale du cône.

Les résultats de l'essai sont traduits sous forme d'un pénétrogramme (figure 4), qui donne en fonction de la profondeur :

- La valeur de la résistance de pointe : R_p ;
- L'effort de frottement latéral : f_{lat} ;

La courbe donnant l'évolution de R_p en fonction de la profondeur donne une idée sur la présence d'hétérogénéités locales dans le sol.

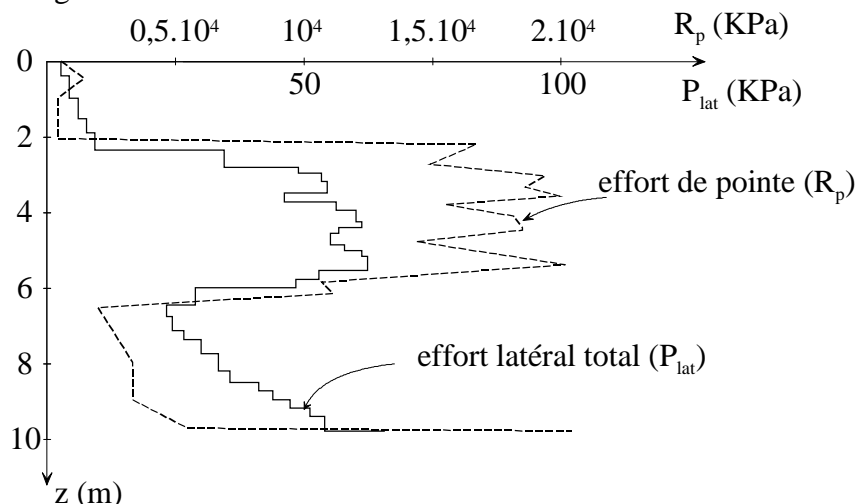


Figure 4 : Un exemple de pénétrogramme statique

8.3.2.2 Le pénétromètre dynamique

Il est enfoncé dans le sol par battage, on détermine à l'aide de cet appareil le nombre de coups N nécessaire pour l'enfoncer sur une profondeur donnée (10 cm à 20 cm) . Il est utilisé en vue d'une exploration rapide du sol. A partir des résultats de cet essai on estime la résistance dynamique qui peut servir pour déterminer la capacité portante du sol ; par ailleurs on peut estimer par le biais de corrélations l'angle de frottement (pour les sols pulvérulents) en fonction du nombre de coups N .

Cet essai est équivalent à l'essai "Standard Penetration Test" (S.P.T) qui est couramment utilisé dans les pays anglosaxons {2}.

8.3.2.3 Utilisation combinée du scissomètre et du pénétromètre

On peut réaliser un essai de cisaillement au scissomètre à proximité d'un essai de pénétration {2}. Soient C_u et P_p les valeurs obtenues respectivement avec ces deux appareils à une profondeur donnée . On montre sur la figure 5 la possibilité de déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne du sol à partir de ces valeurs. Le cercle (1) correspond à la valeur mesurée de C_u par le scissomètre, le cercle (2) correspond à la valeur mesurée de P_p par le pénétromètre.

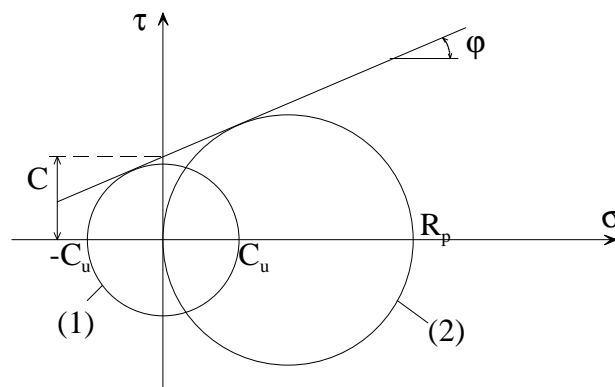


Figure 5 : Détermination des caractéristiques mécaniques à partir d'essais au scissomètre et au pénétromètre

8.3.3 Le pressiomètre

Utilisation : Les résultats de l'essai pressiométrique sont utilisés pour les calculs de la capacité portante et du tassement des fondations.

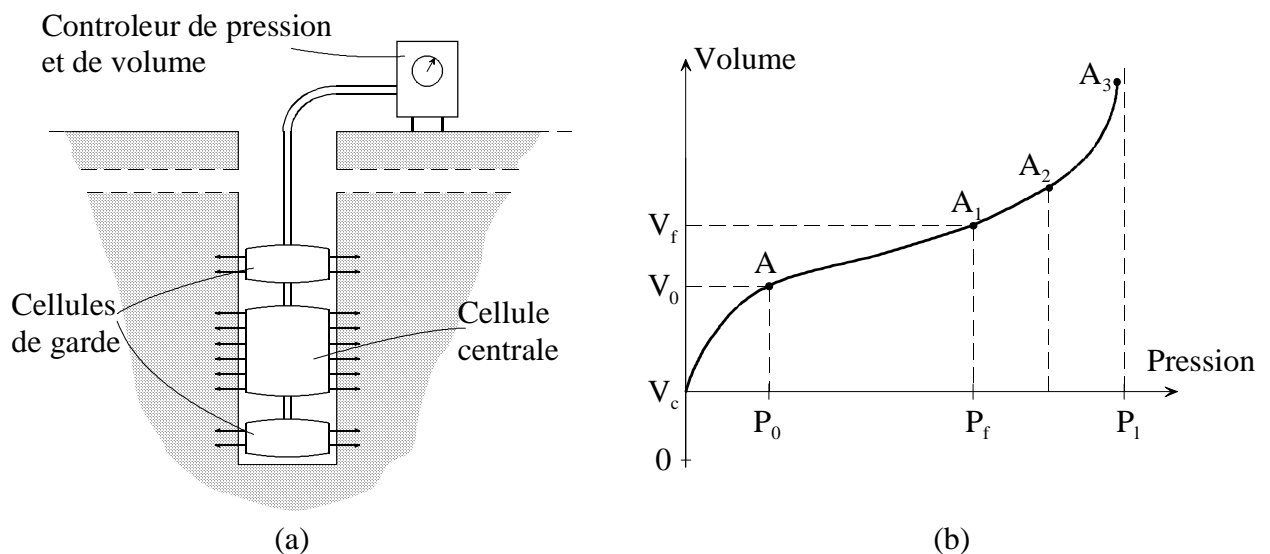


Figure 6 : Le pressiomètre : appareillage et résultats de l'essai.

Description : L'appareil comprend (figure 6a) :

- Une cellule centrale de mesure déformable latéralement grâce à une paroi en caoutchouc (membrane) qui se dilate par injection d'eau sous pression contrôlée ;
- Deux cellules de garde situées de part et d'autre de la cellule centrale, elles assurent une répartition cylindrique uniforme des contraintes et des déformations au droit de la cellule de mesure.

Principe : On effectue un forage dont les parois sont soutenues par la bentonite (sans qu'elle pénètre dans le sol avoisinant). On introduit la sonde pressiométrique à la profondeur voulue par battage ou par vibrofonçage, pour le mode d'introduction de la sonde voir {12}. Ensuite, on gonfle par paliers de pression (en fonction de la nature du sol) les cellules en mesurant la pression et le volume d'eau injecté dans la cellule centrale.

On établit la courbe pressiométrique qui traduit la variation de volume en fonction de la pression (figure 6b) ; cette courbe comprend quatre phases :

- OA : La phase de recompaction ou de remise sous état de contrainte initial, avec P_0 la pression latérale des terres au point de l'essai ;
- A A₁ : La phase pseudo-élastique où la variation de la pression en fonction du volume est quasi-linéaire entre et la pression de fluage p_f qui marque la fin de cette phase ;
- A₁A₂ : La phase plastique où des déformations permanentes apparaissent dans le sol avec formation de surfaces de rupture ;
- A₂A₃ : La phase de rupture où de grandes déformations se produisent dans le sol, la pression tend vers une valeur limite p_r et le volume augmente considérablement.

Détermination du module pressiométrique E_M : Elle se fait à partir des mesures obtenues dans la phase pseudo-élastique. Au cours de cette phase, et par analogie avec l'expansion radiale d'une cavité cylindrique dans un milieu élastique, on écrit d'après l'équation de Lamé :

où :

$$G_M = V_m \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

$$V_m = V_c + \frac{V_0 + V_f}{2}$$

G_M est le module de cisaillement ;

V est le volume de la cavité ;

ΔV et Δp sont respectivement la variation de volume et la variation de la pression appliquée qui en résulte dans la cellule de mesure.

On détermine le module pressiométrique E_M en fonction de G_M et le coefficient de Poisson ν (pour les sols on prend généralement $\nu = 0,33$), on a :

$$E_M = 2(1 + \nu)G_M$$

Le module E_M est utilisé pour le calcul du tassement par la méthode pressiométrique qui tient compte du déplacement latéral du sol.

A partir des résultats de l'essai pressiométrique des corrélations ont été établies, par exemple celle permettant de calculer la cohésion non drainée à partir de la pression limite p_l et de la pression due au poids des terres {9}, {1}.

Remarques

- La mise au point d'un pressiomètre autoforeur du trou afin d'éviter tout remaniement du sol qui aurait une influence sur les résultats. Cet appareil est convenable pour les sols à granulométrie fine tels que les argiles, et les limons.
- L'essai pressiométrique est réalisé en contraintes totales, par conséquent l'évolution de la pression interstitielle dans le sol au cours de l'essai n'est pas connue. Ainsi pour les sols fins les conditions de l'essai pressiométrique correspondent seulement au comportement à court terme.

8.4 Les appareils de mesure in situ

Afin de valider les résultats obtenus à partir des différentes théories et hypothèses utilisées en Mécanique des Sols, on est amené à suivre l'évolution des pressions interstitielles, du tassement, et des contraintes lors, ou après, la construction d'un ouvrage. Ceci peut être réalisé par des appareils de mesure in situ.

8.4.1 Le piézomètre

Définition : C'est un appareil conçu pour la mesure de la pression interstitielle à un endroit donné du sol, il existe deux types d'appareils : le tube crépiné et le piézomètre à volume constant.

8.4.1.1 Le tube crépiné

C'est un tube percé de trous à son extrémité. Dans un forage la partie crépinée est placée au fond du trou, et sur laquelle on place un bouchon d'argile (figure 7a). Le niveau d'eau monte dans le tube jusqu'à une hauteur H , la pression interstitielle à cet endroit est alors $u = \gamma_w H$

Remarque : Si on veut déterminer uniquement le niveau de la nappe phréatique, il n'est pas nécessaire de placer le bouchon d'argile.

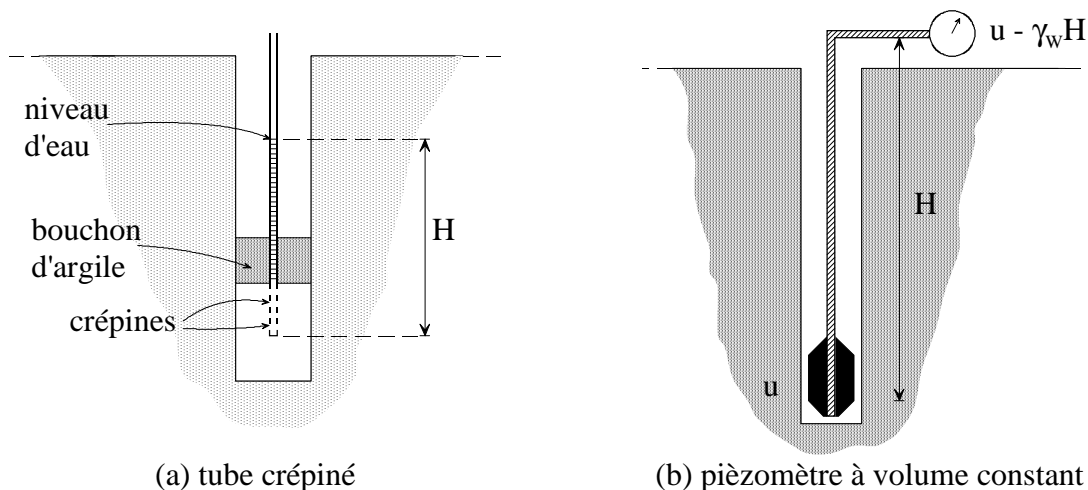


Figure 7 : Type de piézomètre

Dans les sols peu perméables, le niveau d'eau met un temps assez long pour se stabiliser dans le tube, ce temps s'appelle temps de réponse du piézomètre. Pour de tels sols on utilise plutôt le piézomètre à volume constant.

8.4.1.2 Le piézomètre à volume constant

Pour cet appareil, la partie crépinée est remplacée par une pierre poreuse en bronze fritté. Il est muni d'un manomètre à son extrémité supérieure. Le tube est rempli d'eau après la mise en place du piézomètre qui se fait par battage ou fonçage. Le temps de réponse est très court car l'eau est incompressible. Si u désigne la pression interstitielle à la profondeur H , on lit sur le manomètre la pression ($u = \gamma_w H$), H étant la dénivellation entre la partie inférieure du tube et la surface du sol.

8.4.2 Le tassomètre

C'est un appareil destiné pour la mesure du tassement.

Description : Elle correspond à un modèle du L.C.P.C (France), d'après {9}. L'appareil est composé de deux parties (figure 8) :

- Une cellule de prise de niveau placée sous l'ouvrage pour lequel on suit le tassement, elle est constituée d'une boîte cylindrique (de diamètre égal à 20 cm, et de hauteur égale à 5 cm) à moitié remplie d'eau ;
- Un panneau de mesure comportant un dispositif de mise en pression réglable, un manomètre de mercure pour contrôler la pression injectée, et un tube gradué.

Principe : Le panneau de mesure est placé sur une borne repère située hors de la zone de tassement. On injecte, avant qu'il n'y ait tassement, une pression quelconque p_c de gaz carbonique dans la cellule au-dessus du liquide de façon à le déplacer dans le tube gradué jusqu'à une lecture située dans la partie supérieure : H_0 .

Pour mesurer le tassement au niveau de la cellule après un certain temps, on réinjecte la même pression p_c et on lit le niveau d'eau dans le tube, soit H_1 . Le tassement de la cellule est alors :

$$s = (H_0 - H_1)$$

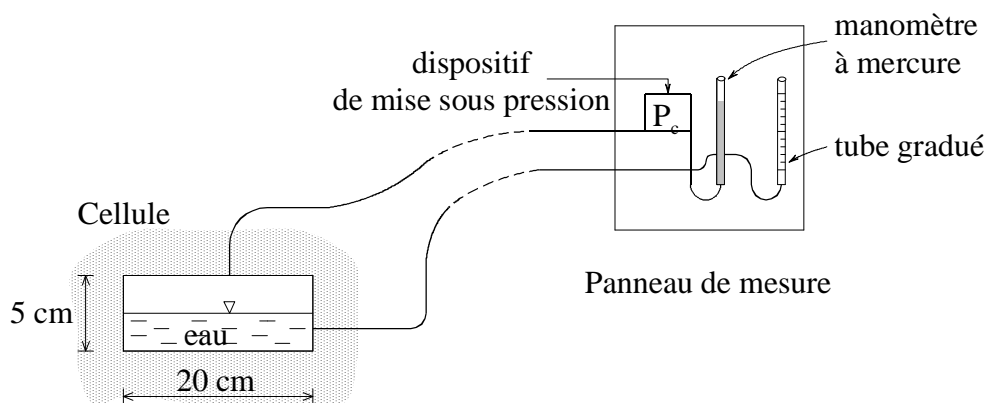


Figure 8: Le tassomètre.

8.4.3 L'inclinomètre

Cet appareil est destiné pour la mesure du déplacement horizontal du sol à une profondeur donnée. Son usage est intéressant pour suivre le mouvement de terrains (pentes de talus, appuis d'ouvrages d'art, etc...) en cours de glissement.

8.4.4 Le capteur de contrainte (type Glotz)

Utilisation : Il est destiné pour mesurer, dans un sol, la contrainte totale appliquée sur un plan donné.

Description : Il est constitué d'une cellule très plate remplie d'huile à parois très flexibles (figure 9a), reliée à un système de membrane. Si une contrainte est appliquée sur la cellule l'huile se transmet sous l'effet de la pression, et la membrane se déforme (figure 9b) en obturant l'arrivée d'un tuyau d'amenée d'huile sous pression. En mesurant la pression d'huile nécessaire pour décoller la membrane, on mesure la pression dans la cellule, et par suite la contrainte appliquée sur le plan de la cellule.

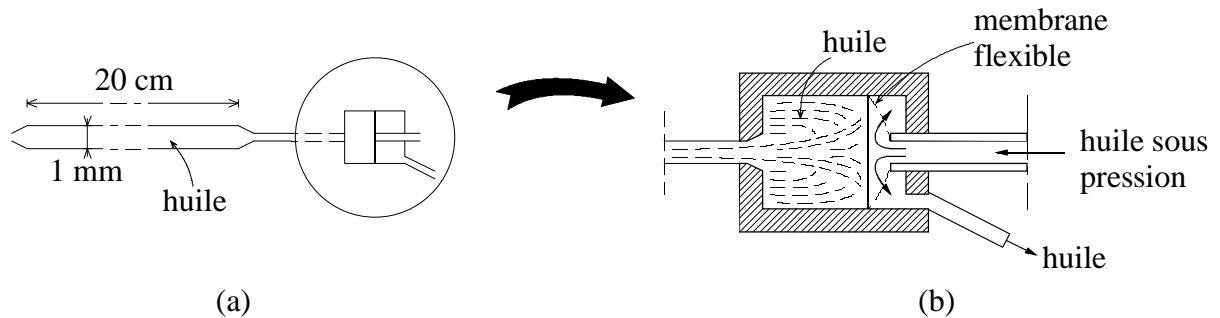


Figure 9 : Le système du capteur de contrainte type Glotz, d'après Schlosser {9}.

8.5 Application

Déterminer la force due au frottement latéral obtenu à l'aide d'un pénétromètre de diamètre D enfoncé sur une profondeur H , sachant que l'angle de frottement entre le tube extérieur et le sol a une valeur constante δ . On suppose qu'au voisinage du tube, la contrainte qui s'exerce dans le sol sur un plan horizontal a pour composante normale : γH , celle qui s'exerce sur un plan vertical a pour composante normale : $K_0 \gamma h$.

Réponse : La force de frottement est la résultante de la répartition de la contrainte tangente à la section du tube sur la hauteur H . La contrainte tangente s'écrit à la profondeur z :

$$\tau(z) = K_0 \gamma z \operatorname{tg} \delta$$

La force résultante de cette répartition sur la paroi latérale du tube de diamètre D s'écrit :

d'où on obtient :

$$P_{\text{lat}} = \pi D \int_0^H K_0 \gamma z \operatorname{tg} \delta \, dz$$

$$P_{\text{lat}} = \pi D K_0 \gamma \frac{H^2}{2} \operatorname{tg} \delta$$