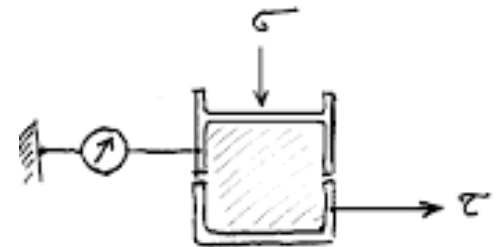
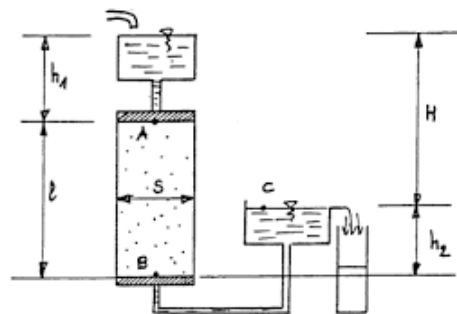
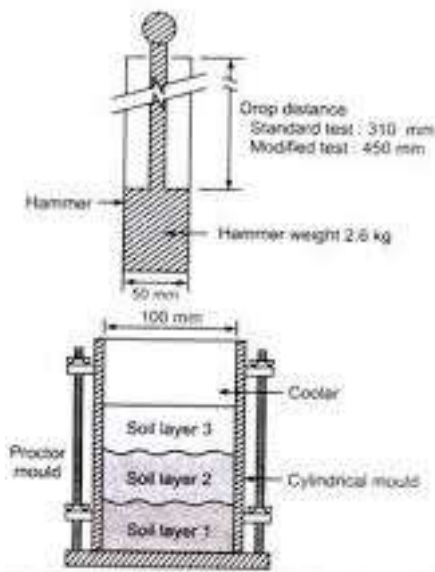


## Institut Universitaire de Technologie



### Département Génie Civil Semestre C - Matériaux et Géotechnique



## Travaux Pratiques de Géotechnique

Modules :      MXG4 – Proctor  
                      MXG4 – Perméabilité  
                      MXG5 – Cisaillement direct

Frédéric JAMIN



# Sommaire

<b>Préambule .....</b>	<b>5</b>
Organisation des séances de Travaux Pratiques de Géotechnique.....	5
Consignes.....	5
Rapport.....	5
Compte rendu et notation .....	6
Normes.....	6
<b>Rappel sur les incertitudes.....</b>	<b>7</b>
Incertitude : cas général.....	7
Incertitude absolue : la fonction $f$ est une somme algébrique.....	7
Incertitude relative : la fonction $f$ est un produit.....	7
Cas particulier : la fonction $f$ est dépendante de plusieurs fonctions.....	8
<b>Rappel des notions de base en géotechnique .....</b>	<b>9</b>
Notations à respecter.....	9
Définitions.....	10
Diagramme des phases.....	10
<b>Mesure de teneur en eau .....</b>	<b>11</b>
Normes de référence.....	11
Matériels.....	11
Manipulation.....	11
Normes.....	12
<b>TP Essai Proctor.....</b>	<b>21</b>
Matériel et matériau.....	21
Manipulation.....	22
Résultats.....	23
Analyses.....	23
Feuille d'essai selon NF P 94-093.....	25
Norme NF P 94-093.....	27
<b>TP Essai de perméabilité des sols .....</b>	<b>37</b>
Matériel et matériau.....	37
Manipulation.....	38
Résultats.....	41
Analyses.....	41
Feuille d'essai à charge constante.....	42
Feuille d'essai à charge variable.....	43
Norme NF X 30-441.....	44
<b>TP Essai de cisaillement direct .....</b>	<b>57</b>
Matériel et matériau.....	57
Manipulation.....	58
Résultats.....	59
Analyses.....	59
Feuille d'essai cisaillement direct.....	60
Feuille d'essai cisaillement direct.....	61
Feuille d'essai cisaillement direct.....	62
Norme NF P 94-071-1.....	64



# Préambule

## Organisation des séances de Travaux Pratiques de Géotechnique

Les TP seront effectués par les étudiants, partagés en trois sous-groupes, par rotations sur trois séances.

Sous-groupe	A	B	C
Séance 0	Présentation des TP		
Séance 1	Proctor	Perméabilité des sols	Cisaillement direct
Séance 2	Perméabilité des sols	Cisaillement direct	Proctor
Séance 3	Cisaillement direct	Proctor	Perméabilité des sols

## Consignes

Chaussures de sécurité obligatoire sinon exclusion avec Absence Non Justifiée,  
Préparation des TP avant la séance (travail en autonomie),  
Respect du matériel à disposition (sinon exclusion),  
Tamisage du sol à l'extérieur,  
Rangement du matériel après chaque séance,  
Nettoyage exigé (balances, tables, sol, etc.).

**Aucun départ avant que l'enseignant ait vérifié l'état de propreté des lieux**

## Rapport

Respecter les cours de MTU :

- Mettre les unités pour chaque variable,
- Respecter les codes ( $\text{kg/m}^3$  et non  $\text{kg/m3}$ ,  $\text{kN}$  et non  $\text{KN}$ ),
- Donner les incertitudes de mesure.

Format du rapport (4 feuilles A4 maximum) :

- Page de garde feuille A4 : Noms, Prénoms, Groupe, Titre, logos, etc.,
- 5 parties : objectif, principe, résultats, analyses, conclusion,
- Corps du rapport : 6 pages (3 feuilles A4 recto-verso) maximum,
- Pas d'annexe au rapport.

Présentation des résultats :

- Indiquer les formules utilisées,
- Regrouper les résultats dans des tableaux clairs et simples,
- Réaliser des graphiques comprenant titres des axes et légende.

Remise du rapport :

- Délai : 7 jours après la séance de TP,
- Format : fichier pdf avec nom fichier Groupe\_Nom TP\_responsable,
- Où : Moodle via l'ENT.

## **Compte rendu et notation**

Participation et respect des consignes – 4 pts

Objectif – 1 pt

Principe – 3 pts

Résultats – 5 pts

Analyses – 4 pts

Conclusion – 3 pts

## **Normes**

Ce document contient les normes en vigueur à savoir :

- NF P 94-050 – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux (Méthode par étuvage)
- NF P 94-049-1 – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux (Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes)
- NF P 94-093 – Détermination des références de compactage d'un matériau (Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié),
- NF X 30-441 – Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau (Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable),
- NF P 94-071-1 – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (Partie 1 : Cisaillement direct),

Il est bien sûr nécessaire de se rendre dans ces documents pour bien effectuer toutes les manipulations et présenter correctement les résultats dans le rapport.

# Rappel sur les incertitudes

## Incertitude : cas général

Pour certaines grandeurs, l'appareil de mesure n'existe pas, donc la mesure directe n'existe pas. Ces grandeurs font alors l'objet d'un calcul par l'intermédiaire d'une relation qui fait intervenir une ou plusieurs grandeurs qui sont, elles, mesurables directement ( $x, y, z, t$ , etc.).

$$f = f(x, y, z, t, \dots)$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$  sont les incertitudes sur les grandeurs  $x, y, z, t$  supposées connues et indépendantes car **évaluées par l'expérimentateur ou fournies dans les normes**.

L'incertitude  $\Delta f$  de la fonction  $f(x, y, z, t, \dots)$  peut être exprimée par :

$$\Delta f = \Delta f(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t, \dots)$$

## Incertitude absolue : la fonction $f$ est une somme algébrique

Le principe consiste à écrire la différentielle de la fonction  $f(x, y, z, t, \dots)$  en fonction des dérivées partielles par rapport à chacune des variables  $x, y, z, t, \dots$

$$f = \alpha x + \beta y + \gamma z + \delta t + \dots \rightarrow df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial t} dt + \dots$$

avec  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  des constantes indépendantes de  $x, y, z, t$ . On approxime  $df \approx \Delta f$  et on majore la valeur de  $\Delta f$  par la somme des valeurs absolues (inégalité triangulaire) :

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \left| \frac{\partial f}{\partial t} \right| \Delta t + \dots$$

Soit dans le cas d'une somme algébrique :

$$\Delta f = |\alpha| \Delta x + |\beta| \Delta y + |\gamma| \Delta z + |\delta| \Delta t + \dots$$

## Incertitude relative : la fonction $f$ est un produit

Le principe consiste à écrire la différentielle logarithmique de la fonction  $f(x, y, z, t, \dots)$  en fonction des dérivées partielles par rapport à chacune des variables  $x, y, z, t, \dots$

$$f = a \times x^\alpha \times y^\beta \times z^\gamma \times t^\delta \times \dots \rightarrow d(\ln f) = \frac{df}{f}$$

avec  $a, \alpha, \beta, \gamma, \delta$  des constantes indépendantes de  $x, y, z, t$ . On obtient grâce aux propriétés du logarithme népérien :

$$\ln f = \ln(a \times x^\alpha \times y^\beta \times z^\gamma \times t^\delta) = \ln(a) + \alpha \ln(x) + \beta \ln(y) + \gamma \ln(z) + \delta \ln(t)$$

En dérivant la fonction  $\ln(f(x, y, z, t, \dots))$ , on a :

$$\frac{df}{f} = \alpha \frac{dx}{x} + \beta \frac{dy}{y} + \gamma \frac{dz}{z} + \delta \frac{dt}{t}$$

On approxime  $df \approx \Delta f$  et on majore la valeur de  $\Delta f$  par la somme des valeurs absolues (inégalité triangulaire) :

$$\frac{\Delta f}{f} = |\alpha| \frac{\Delta x}{x} + |\beta| \frac{\Delta y}{y} + |\gamma| \frac{\Delta z}{z} + |\delta| \frac{\Delta t}{t}$$

## Cas particulier : la fonction $f$ est dépendante de plusieurs fonctions

Le principe reste le même qu'il faut appliquer deux fois.

$$f = ag(x)h(y)k(z)l(t) \rightarrow d(\ln f) = \frac{df}{f}$$

avec  $a$  une constante indépendante de  $x, y, z, t$ . On obtient grâce aux propriétés du logarithme népérien :

$$\ln f = \ln(ag(x)h(y)k(z)l(t)) = \ln(a) + \ln(g(x)) + \ln(h(y)) + \ln(k(z)) + \ln(l(t))$$

En dérivant la fonction  $\ln(f(x, y, z, t, \dots))$ , on a :

$$\frac{df}{f} = \frac{dg}{g} + \frac{dh}{h} + \frac{dk}{k} + \frac{dl}{l}$$

Ensuite on applique les principes des incertitudes absolue ou relative suivant la forme des fonctions  $g(x), h(y), k(z)$  ou  $l(t)$ .

Exemple - coefficient de perméabilité dans le cas d'un essai à charge variable est égale à :

$$k = \frac{h \times s}{t \times S} \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)$$

Les incertitudes à estimer par l'expérimentateur sont  $\Delta h, \Delta s, \Delta t, \Delta S, \Delta H_0$  et  $\Delta H_1$  mais l'équation présente la fonction logarithme népérien. Il s'agit d'un produit donc :

$$\frac{dk}{k} = |1| \frac{dh}{h} + |1| \frac{ds}{s} + |-1| \frac{dt}{t} + |-1| \frac{dS}{S} + \frac{d\left(\ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)}$$

Comme nous le savons, la dérivée du logarithme népérien est :

$$d(\ln X) = \frac{dX}{X}$$

avec  $X = \frac{H_0}{H_1}$ . Par conséquent, on obtient :

$$\frac{dk}{k} = \frac{dh}{h} + \frac{ds}{s} + \frac{dt}{t} + \frac{dS}{S} + \frac{d\left(\frac{H_0}{H_1}\right)}{\frac{H_0}{H_1} \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)}$$

Ensuite :

$$d\left(\frac{H_0}{H_1}\right) = |1| \frac{dH_0}{H_0} + |-1| \frac{dH_1}{H_1} = \frac{dH_0}{H_0} - \frac{dH_1}{H_1}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{dk}{k} &= \frac{dh}{h} + \frac{ds}{s} + \frac{dt}{t} + \frac{dS}{S} + \frac{\frac{dH_0}{H_0} - \frac{dH_1}{H_1}}{\frac{H_0}{H_1} \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)} \\ \frac{dk}{k} &= \frac{dh}{h} + \frac{ds}{s} + \frac{dt}{t} + \frac{dS}{S} + \frac{H_1 dH_0}{H_0^2 \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)} - \frac{dH_1}{H_0 \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)} \end{aligned}$$

Soit :

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{H_1}{H_0^2 \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)} \Delta H_0 - \frac{1}{H_0 \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right)} \Delta H_1$$



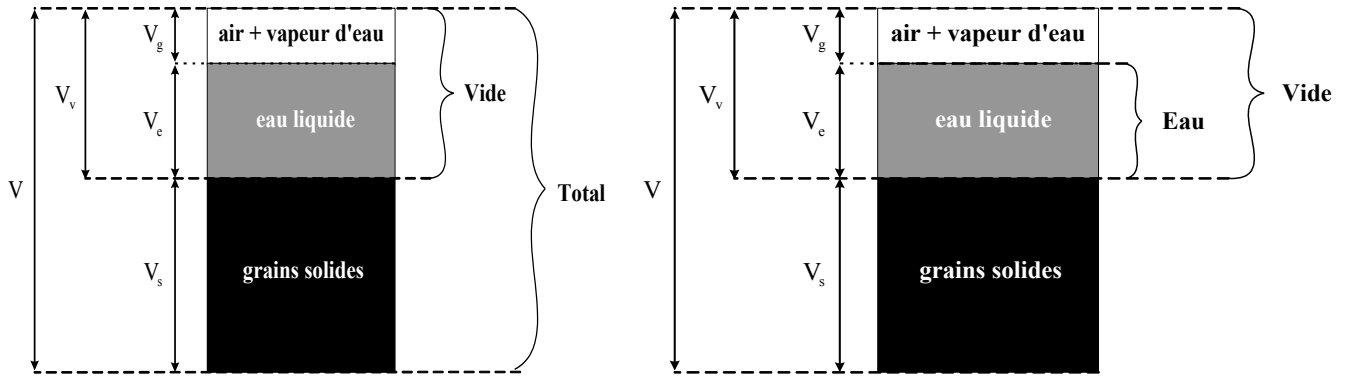
# Rappel des notions de base en géotechnique

## Notations à respecter

Symbole	Unité	Grandeur
$t$	$s$	Temps
$\Theta$	$K$	Température
$L$ ou $\ell$	$m$	Longueur, largeur
$h$	$m$	Hauteur
$d$ ou $D$	$m$	Diamètre
$s$ ou $S$	$m^2$	Surface
$V$	$m^3$	Volume
$m$	$kg$	Masse
$P$	$N$	Poids
$g$	$m/s^2$	Accélération de la pesanteur ( $\approx 10 m/s^2$ )
$\rho$	$kg/m^3$	Masse Volumique
$\gamma$	$kN/m^3$	Poids Volumique
$\rho_w$	$kg/m^3$	Masse volumique <b>spécifique</b> de l'eau ( $1 g/cm^3$ )
$\rho_s$	$kg/m^3$	Masse volumique <b>spécifique</b> des grains solides ( $\approx 2,7 g/cm^3$ )
$\gamma_w$	$kN/m^3$	Poids volumique <b>spécifique</b> de l'eau ( $\approx 10 kN/m^3$ )
$\gamma_s$	$kN/m^3$	Poids volumique <b>spécifique</b> des grains solides ( $\approx 27 kN/m^3$ )
$\rho_d$	$kg/m^3$	Masse volumique <b>apparente</b> sèche
$\rho_h$	$kg/m^3$	Masse volumique <b>apparente</b> humide
$\rho_{sat}$	$kg/m^3$	Masse volumique <b>apparente</b> saturé
$\gamma_d$	$kN/m^3$	Poids volumique <b>apparent</b> sec
$\gamma_h$	$kN/m^3$	Poids volumique <b>apparent</b> humide
$\gamma_{sat}$	$kN/m^3$	Poids volumique <b>apparent</b> saturé
$e$	...	Indices des vides
$n$	%	Porosité
$c$	%	Compacité
$w$	%	Teneur en eau massique
$\theta$	%	Teneur en eau volumique
$S_r$	%	Degré de Saturation
$H$	$m$	Charge hydraulique
$Q$	$m^3/s$	Débit volumique
$i$	...	Gradient hydraulique
$k$	$m/s$	Perméabilité
$\nu$	$m^2/s$	Viscosité cinématique
$N$	$kN$	Force normale
$T$	$kN$	Force de cisaillement
$\sigma$	$kPa$	Contrainte normale
$\tau$	$kPa$	Contrainte tangentielle
$C$	$kPa$	Cohésion
$\phi$	$^\circ$	Angle de frottement interne

# Définitions

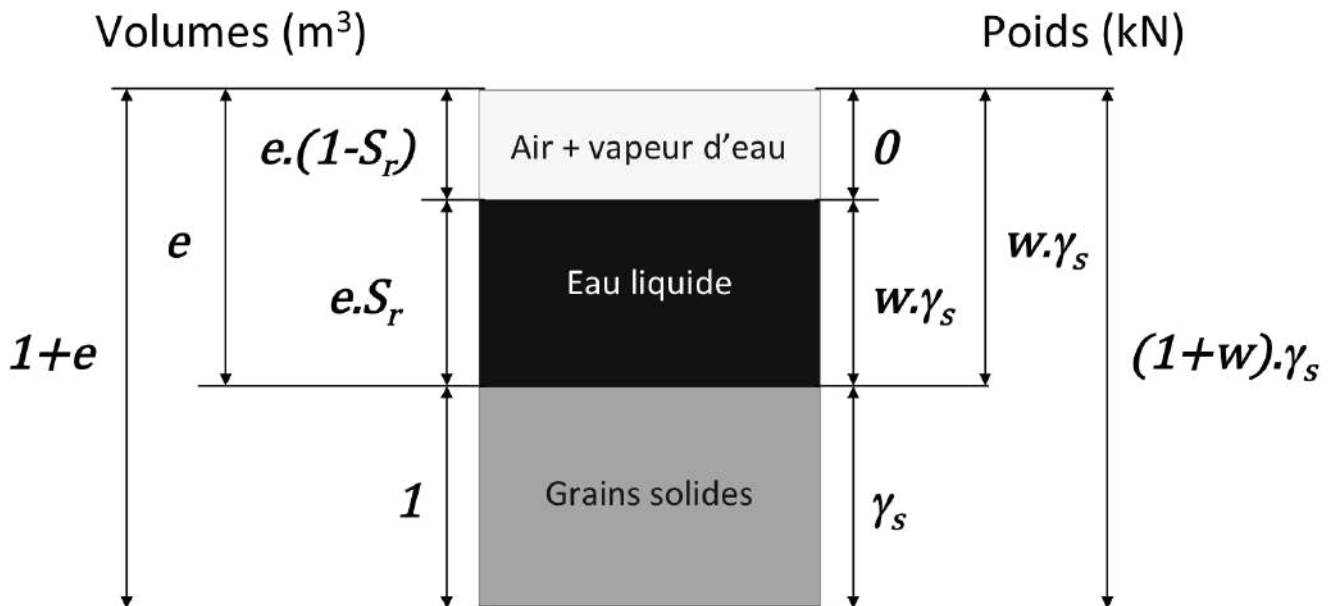
Masse volumique		Poids volumique	
Apparent	Spécifique	Apparent	Spécifique
$\rho_i = \frac{m_i}{V}$	$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$	$\gamma_i = \frac{m_i \times g}{V}$	$\gamma_i = \frac{m_i \times g}{V_i}$
$i = d, h \text{ ou } sat$	$i = s \text{ ou } w$	$i = d, h \text{ ou } sat$	$i = s \text{ ou } w$



Teneur en eau massique	Teneur en eau volumique	Degré de saturation
$w = \frac{m_e}{m_s}$	$\theta = \frac{V_e}{V}$	$S_r = \frac{V_e}{V_v}$

Indice des vides	Compacité	Porosité
$e = \frac{V_v}{V_s}$	$c = \frac{V_s}{V}$	$n = \frac{V_v}{V}$

## Diagramme des phases



# Mesure de teneur en eau

## Normes de référence

- NF P 94-050 – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux (Méthode par étuvage)
- NF P 94-049-1 – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux (Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes)

## Matériels

Le matériel comprend :

- Une **étuve** de dessiccation réglée à 105°C et un **micro-ondes**,
- Une **balance** telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la masse du matériau,
- Des **coupelles** non altérables à l'humidité et à la chaleur.

## Manipulation

Pour l'utilisation de l'étuve :

1. Peser une coupelle numérotée ( $m_c$ ),
2. Mettre le sol humide dans la coupelle,
3. Peser la masse du sol humique avec la coupelle ( $m_h$ ),
4. Mettre dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures,
5. Peser la masse du sol sec avec la coupelle ( $m_s$ ),
6. Calculer la teneur en eau :

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s - m_c}$$

Pour l'utilisation du micro-ondes :

1. Peser une coupelle numérotée ( $m_c$ ),
2. Peser la masse du sol humique dans la coupelle ( $m_h$ ),
3. Mettre dans le micro-ondes pendant 2 minutes,
4. Peser la masse du sol sec dans la coupelle ( $m_{s1}$ ),
5. Remettre dans le micro-ondes pendant 2 minutes,
6. Peser la masse du sol sec dans la coupelle ( $m_{s2}$ ),
7. Si  $m_{s2} \leq (1 \pm 0,2\%)m_{s1}$ , calculer la teneur en eau :

$$w = \frac{m_h - m_{s2}}{m_{s2} - m_c}$$

8. Sinon recommencer les étapes 5 à 7.

Sols : reconnaissance et essais

**Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux****Méthode par étuvage**

E : Soils : investigation and testing — Determination of moisture content — Oven drying method  
 D : Boden : Erkundung und Prüfungen — Bestimmung des Wassergehalts von Böden durch Ofentrocknung

**Norme française homologuée**

par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 20 août 1995 pour prendre effet le 20 septembre 1995.

Remplace la norme homologuée de même indice, d'octobre 1991.

**Correspondance**

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

**Analyse**

Le présent document concerne la détermination par étuvage de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de sol ou de matériau. Il définit les termes employés et les paramètres mesurés, spécifie les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire et précise les résultats à présenter.

**Descripteurs**

**Thésaurus international Technique** : sol, échantillon, analyse chimique, dosage, eau, essai à l'étuve.

**Modifications**

Par rapport à la précédente édition, le domaine d'application est étendu aux matériaux concernés par la norme NF P 11-300 et la masse de matériau soumise à l'essai est précisée.

**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	CHAILLLOT	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



**Avant-propos**

Trois normes traitent de la détermination de la teneur en eau avec des domaines d'application différenciés. Ce sont :

- NF P 94-049-1 *Détermination de la teneur en eau pondérale des sols — Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.*
- NF P 94-049-2 *Détermination de la teneur en eau pondérale des sols — Partie 2 : Méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.*
- NF P 94-050 *Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Méthode par étuvage.*

**Sommaire**

	Page
<b>Avant-propos</b> .....	4
<b>1 Domaine d'application</b> .....	4
<b>2 Références normatives</b> .....	4
<b>3 Généralités</b> .....	4
3.1 Définitions — Terminologie .....	4
3.2 Principe de la détermination de la teneur en eau .....	5
3.3 Méthode de détermination de la teneur en eau .....	5
<b>4 Appareillage</b> .....	5
<b>5 Mode opératoire</b> .....	5
5.1 Masse d'échantillon à soumettre à l'essai .....	5
5.2 Procédure d'essai .....	6
<b>6 Expression des résultats</b> .....	6
<b>7 Procès-verbal d'essai</b> .....	7
<b>8 Vérifications des appareils et des instruments de mesure</b> .....	7

**1 Domaine d'application**

Le présent document s'applique à la détermination de la teneur en eau pondérale effectuée à partir d'un échantillon intact, remanié ou reconstitué, de tous les sols et de tous les matériaux cités de la NF P 11-300. La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin.

**2 Références normatives**

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

- NF P 11-300 Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- NF X 07-001 Normes fondamentales — Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
- X 15-016 Encointes et conditions d'essais — Encointes à régulation automatique de la température et de l'humidité.

**3 Généralités**

**3.1 Définitions — Terminologie**

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

**teneur en eau pondérale d'un matériau (w)** : Rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage ( $m_w$ ) sur la masse des grains solides ( $m_d$ ), exprimé en pourcentage :

$$w = m_w / m_d$$

**teneur en eau naturelle ( $w_{nat}$ ) d'un matériau** : Teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

**3.2 Principe de la détermination de la teneur en eau**

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

**3.3 Méthode de détermination de la teneur en eau**

L'échantillon de matériau est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée.

**4 Appareillage**

Le matériel suivant est nécessaire :

- une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 105 °C de classe d'exactitude C, comme défini à l'annexe A de la norme X 15-016, pour ce qui concerne la température uniquement;
- balances de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la masse de matériau;
- des coupelles, des boîtes de pétri, des vases à peser ou des bacs en matériau non altérable à l'humidité et à la chaleur, permettant les pesées des échantillons dont les masses sont définies à l'article 5 ;
- un dessiccateur.

**5 Mode opératoire**

**5.1 Masse d'échantillon à soumettre à l'essai**

La masse (m) du matériau sur laquelle est déterminée la teneur en eau est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient. Elle doit être supérieure ou égale aux valeurs du tableau 1.

Toutefois, dans certains essais (limites d'Atterberg, etc.) où la prise d'essai sur des éléments inférieurs à 400 µm n'atteint pas la masse minimale du tableau 1, la teneur en eau est alors déterminée sur la totalité de cette prise d'essai.

**Tableau 1 : Masse minimale de matériau nécessaire pour déterminer la teneur en eau en fonction de la dimension des éléments passant à travers le tamis à maille carrée d'ouverture  $d_m$**

$d_m$ (mm)	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	$d_m > 80$ mm	
Masse (kg)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	$m = 6 \cdot 10^{-6} \cdot d_m^{3,66}$

**5.2 Procédure d'essai**

Tout d'abord, il faut s'assurer de la provenance et de la nature minéralogique ou origine géologique des matériaux et procéder à une identification visuelle, afin de savoir si, par exemple, les matériaux sont gypsifères, latéritiques ou s'ils contiennent des matières organiques. Les matériaux énumérés sont des matériaux susceptibles d'être modifiés sous l'action de la chaleur. En cas de doute, le matériau est traité comme s'il était susceptible d'être modifié par la chaleur.

Une masse (m) de matériau est placée dans une coupelle ou un bac propre et sec de masse connue ( $m_1$ ). La prise d'essai et son contenant sont pesés immédiatement ( $m_2 = m + m_1$ ). Puis, ils sont introduits dans une étuve à 105 °C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 50 °C pour les matériaux sensibles à la chaleur.

Deux pesées, séparées par un étuvage d'un intervalle de temps t, sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve. Conventiennellement l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse ( $m_D$ ) de la prise d'essai n'a pas varié de plus de 2/1 000 entre ces deux pesées.

L'intervalle t est au minimum :

- de 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C ;
- de 8 h dans le cas d'un étuvage à 50 °C.

La durée totale du séchage peut donc varier de quelques heures à plusieurs jours.

Dans le cas d'un essai sur un échantillon ne contenant que des éléments passant au tamis de 400 µm, la pesée se fait après refroidissement en présence d'un matériau dessiccateur (l'air est maintenu sec au moyen d'un gel de silice ou de tout autre absorbant).

**6 Expression des résultats**

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$w = m_w/m_D$$

avec :

$$m_w = m_2 - m_3$$

$$m_D = m_3 - m_1$$

où :

$m_w$  est la masse d'eau ;

$m_D$  est la masse de matériau sec ;

$m_2$  est la masse de la prise d'essai et de son contenant avant le passage à l'étuve ;

$m_1$  est la masse du contenant ;

$m_3$  est la masse de la prise d'essai et de son contenant après le passage à l'étuve.

Conventionnellement, aucune correction n'est appliquée pour tenir compte de la minéralisation de l'eau interstitielle.

La valeur de la teneur en eau est exprimée en pourcentage et l'intervalle d'arrondissement est de 0,1.

## 7 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai de détermination de la teneur en eau pondérale doit faire apparaître :

- a) la référence au présent document NF P 94-050 ;
- b) la provenance de l'échantillon : site, sondage, profondeur, date et mode de prélèvement, conditions de conservation ;
- c) le nom de l'organisme qui a réalisé l'essai, le numéro du dossier et la date de l'essai ;
- d) la température d'étuvage de la prise d'essai ;
- e) la valeur de la teneur en eau, w, en pour-cent ;
- f) les observations liées à la réalisation des essais ainsi que les incidents et détails opératoires non prévus dans le présent document et susceptibles d'avoir une influence sur les résultats.

## 8 Vérifications des appareils et des instruments de mesure

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

Le procès-verbal de vérification doit comporter :

- a) la date du dernier raccordement à l'étalon ;
- b) l'identification de l'appareil et son emplacement d'utilisation ;
- c) la température à laquelle la vérification a été effectuée ;
- d) le nom de l'organisme vérificateur ;
- e) la date limite de validité fixée par l'organisme habilité.

L'étuve doit être vérifiée au moins une fois tous les deux ans.

Pour la balance, l'intervalle entre deux raccordements à l'étalon est déterminé en accord avec l'organisme vérificateur habilité ; il ne doit jamais excéder deux ans.

ICS : 93.020

Sols : Reconnaissance et essais

**Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux****Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes**

E : Soil : Survey and testing — Determination of water content on a mass basis  
— Part 1 : Microwave oven drying method  
D : Boden : Erkundung und Prüfung — Bestimmung des Bodenwassergehalts  
in Masse — Teil 1 : Mikrowellenofentrockenmethode

**Norme française homologuée**

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

**Correspondance** À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux européens ou internationaux traitant du même sujet.

**Analyse**

Le présent document concerne la détermination par la méthode de la dessiccation au four à micro-ondes de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de matériau. Il définit les termes employés et les paramètres mesurés, spécifie les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire et précise les résultats à présenter.

**Descripteurs**

**Thésaurus International Technique** : sol, essai, dosage, eau, méthode par dessiccation, four à micro-ondes, mode opératoire.

**Modifications****Corrections**

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris-La Défense Cedex — Tél. : (1) 42 91 55 55

© AFNOR 1996

AFNOR 1996

1<sup>er</sup> tirage 96-02-F**Membres de la commission de normalisation**

Président : M BOLLE

Secrétariat : M JOUBERT — BNSR

M	ABDO	SYNDICAT NATIONAL DES FABRICANTS DE CEMENTS ET CHAUX
M	BERRAUD	BOUYGUES
M	BETOUX	RAZEL
M	BOLLE	
M	GIRAUD	EDF — TEGG
M	IRASTORZA	USIRF
MME	LEROY	SERVICE TECHNIQUE VILLE DE PARIS
M	MANOJLOVIC	CEMAGREF
M	MICHAUT	COLAS
M	MUDET	SNCF
M	PUECH	SCETAURROUTE
M	RINCENT	RINCENT BTP SERVICES
M	SAINTON	BEUGNET
M	SCHAEFFNER	LCPC
M	SIGAL	BEC FRERES
M	SMERECKI	AFNOR
M	VOEGELI	DTP TERRASSEMENT





**Avant-propos**

Trois normes traitent de la détermination de la teneur en eau avec des domaines d'application différenciés. Ce sont :

- NF P 94-049-1 Soils : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.
- NF P 94-049-2 Soils : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Partie 2 : Méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.
- NF P 94-050 Soils : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

**Sommaire**

	Page
Avant-propos .....	4
1 Domaine d'application .....	4
2 Références normatives .....	5
3 Définition — Abréviation — Symboles .....	5
4 Appareillage .....	5
5 Mode opératoire .....	6
5.1 Préparation de l'échantillon .....	6
5.2 Mode opératoire .....	6
6 Expression des résultats .....	7
7 Procès-verbal d'essai .....	7
Annexe A (normative) Procédure d'étalonnage de la méthode de mesure de la teneur en eau au four à micro-ondes par référence à la méthode de séchage à l'étuve .....	8

**1 Domaine d'application**

Le présent document a pour objet la détermination de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de matériaux par séchage dans un four à micro-ondes.

Ce document définit les termes employés et les paramètres mesurés, précise le matériel nécessaire, fixe le mode opératoire et donne les indications nécessaires au calcul et à la présentation des résultats.

Il s'applique aux classes de matériaux suivantes identifiées par ailleurs (voir norme NF P 11-300) :

- A1 ;
- B1, B2, B3, B4, B5 ;
- C (toutes les sous-classes dont la fraction 0/50 est un sol des classes A et B citées ci-dessus) ;
- D1, D2, D3 ;
- R1, R2, R31, R4, R6 ;
- F2, F3, F8.

Il s'applique également aux classes suivantes, sous réserve d'avoir établi au préalable un étalonnage avec la teneur en eau déterminée selon la norme NF P 94-050, sur le même matériau :

- A2, A3 ;
- B6 ;
- C1 A2, C1 A3, C1 B6 ;
- C2 A2, C2 A3, C2 B6 ;
- R32, R33, R34 ;
- F4.

(Voir en annexe A, la procédure d'étalonnage.)

Il n'est pas applicable aux matériaux gypsifères, organiques ou très plastiques des classes suivantes :

- A4 ;
- R5 ;
- F1, F5, F6, F7.

## 2 Références normatives

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

- NF P 11-300 Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- NF P 94-050 Sols : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Méthode par étuvage.

## 3 Définition — Abréviation — Symboles

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

**La teneur en eau pondérale** d'un sol ( $w$ ), appelée généralement **teneur en eau**, est le rapport de la masse d'eau ( $m_w$ ) évaporée par séchage, par la masse du sol sec ( $m_d$ ).

En appelant :

- $m$  Masse de sol humide ;
- $m_w$  Masse d'eau évaporée ;
- $m_d$  Masse de sol sec ;
- $w_{M.O.}$  Teneur en eau déterminée par la méthode du four à micro-ondes ;
- $d_m$  Dimension des éléments passant à travers le tamis à maille carrée d'ouverture  $d_m$  ;

$$w_{M.O.} = \frac{m_w}{m_d} \times 100 = \frac{m - m_d}{m_d} \times 100$$

$w_{M.O.}$  est exprimée en pourcentage (%).

## 4 Appareillage

Le matériel suivant est nécessaire :

- **Four à micro-ondes** conforme aux exigences de sécurité.
- La puissance restituée doit être de 1,5 kW minimum. Le four doit être conçu de manière à assurer une répartition uniforme des micro-ondes ; il doit être équipé aussi d'un tableau de commandes comprenant :
  - un interrupteur de mise en service ;
  - une minuterie réglant le temps d'exposition par séquences d'une minute minimum.
- **Balances** : les balances doivent avoir une incertitude maximale de 1/1000 de la valeur mesurée.
- **Batterie de récipients** de différents volumes, de dimensions compatibles avec le four, non métalliques, inaltérables à l'humidité et résistant à des températures pouvant aller jusqu'à 200 °C. Les récipients sont identifiés et tarés.
- **Chronomètre** indiquant la seconde.
- **Petit matériel** : couteaux, spatules, petites pelles, etc.

## 5 Mode opératoire

### 5.1 Préparation de l'échantillon

La masse ( $m$ ) du matériau sur laquelle est déterminée la teneur en eau est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient ; elle doit être supérieure ou égale aux valeurs du tableau 1.

La masse ( $m$ ) à introduire dans le four doit être telle que :

$$m \text{ (kg)} \leq \frac{V}{5} \left( d_m^3 \right)$$

où :

$V$  est le volume du four.

Toutefois, dans certains essais la prise d'essai, pour la teneur en eau, de matériaux d'éléments inférieurs à 400  $\mu\text{m}$  n'atteint pas la masse minimale du tableau 1. La teneur en eau est alors déterminée sur la totalité de la prise d'essai.

**Tableau 1 : Masse minimale de matériau nécessaire pour déterminer la teneur en eau en fonction de la dimension des éléments passant à travers le tamis à maille carrée d'ouverture  $d_m$**

$d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	400	500	630	800
Masse (g)	20	50	100	150

$d_m$ (mm)	1	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	$d_m > 80$ mm
Masse (kg)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	$m = 6 \cdot 10^{-6} \cdot d_m^{3,66}$

### 5.2 Mode opératoire

Le matériau prélevé ( $m$ ) est placé dans un récipient de masse connue  $m_1$ .

L'ensemble est immédiatement pesé, soit :

$$m_2 = m + m_1$$

Foisonner l'échantillon. Dans le cas de matériaux argileux, il ne doit pas subsister de mottes de dimension supérieure à 10 mm.

Introduire l'échantillon dans le four à micro-ondes et afficher un temps de chauffe minimal adapté à la masse de l'échantillon humide et à sa teneur en eau présumée, avec un minimum de 2 min, à 1 min près.

Peser l'échantillon une fois ce temps écoulé, soit :

$$m_3 = m_d + m_1$$

Introduire à nouveau l'échantillon dans le four et afficher un temps de chauffe d'une durée égale au dixième du temps de la première chauffe, à 1 min près, sans être toutefois inférieure à 2 min.

Une fois ce temps écoulé, procéder à une nouvelle pesée.

**Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse  $m_d$  n'a pas varié de plus de 0,2 % entre les deux dernières pesées.**

## 6 Expression des résultats

La teneur en eau pondérale est déterminée par la formule suivante :

$$w_{M.O.} = \frac{m_w}{m_d} \times 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 (\%)$$

où :

- $m_1$  est la masse du récipient (tare).
- $m_2$  est la masse de la prise d'essai et du récipient avant séchage.
- $m_3$  est la masse de la prise d'essai et du récipient après séchage.
- $m_w$  est la masse d'eau évaporée.
- $m_d$  est la masse de sol sec.

La valeur de la teneur en eau est exprimée en pourcentage.

L'intervalle d'arrondissement est de 0,1.

## 7 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal de détermination de la teneur en eau doit faire apparaître :

- la référence au présent document, NF P 94-049-1 ;
- la provenance de l'échantillon : site, sondage, profondeur, date et mode de prélèvement, conditions de conservation ;
- la classification selon la norme NF P 11-300 ;
- le nom de l'organisme qui a réalisé l'essai, le numéro du dossier, la date et le mode de prélèvement de la prise d'essai ainsi que la date de la mesure ;
- la fraction granululaire (visuelle ou mesurée) sur laquelle a été réalisé l'essai ;
- la valeur de la teneur en eau ;
- il doit, en outre, mentionner tous les détails opératoires non prévus par le présent document ou factuels, ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur les résultats.

## Annexe A

(normative)

### Procédure d'étalonnage de la méthode de mesure de la teneur en eau au four à micro-ondes par référence à la méthode de séchage à l'étuve

#### A.1 Domaine d'application

La procédure décrite ci-après s'applique aux matériaux des classes :

- A2, A3, B6 ;
- C (pour les sous-classes Ci A2, Ci A3, Ci B6) ;
- R32, R33, R34 ;
- F4.

#### A.2 Principe

La méthodologie de la procédure d'étalonnage consiste à humidifier le matériau concerné à différentes teneurs en eau choisies dans la plage représentative des teneurs en eau dans laquelle il risque de se trouver et à mesurer les teneurs en eau de chaque échantillon ainsi préparé par la méthode de séchage au four à micro-ondes d'une part et par la méthode de séchage à l'étuve selon la norme NF P 94-050 d'autre part.

Les valeurs des teneurs en eau de chaque échantillon sont comparées et on calcule l'écart relatif :

$$\frac{w_{M.O.} - w}{w}$$

où :

$w_{M.O.}$  est la teneur en eau mesurée au four à micro-ondes ;

$w$  est la teneur en eau mesurée à l'étuve.

#### A.3 Mode opératoire

##### A.3.1 Choix de la plage de teneurs en eau à considérer

Le choix dépend du problème posé. On considérera généralement les valeurs extrêmes des teneurs en eau raisonnablement prévisibles sur le matériau considéré. Lorsqu'on envisage d'utiliser le four à micro-ondes pour mesurer des teneurs en eau autres que naturelles, il sera souvent judicieux de considérer deux plages de teneurs en eau, chacune d'elles étant choisie en fonction du but recherché.

##### A.3.2 Nombre de mesures nécessaires à l'établissement de l'étalonnage

La procédure d'étalonnage doit comporter au minimum cinq valeurs de teneurs en eau. Les incréments de teneurs en eau à appliquer aux différents échantillons lors de l'opération d'humidification doivent être les mêmes à  $\pm 15$  % près (en valeur relative).

### A.3.3 Modalités de préparation des échantillons

Après homogénéisation du matériau humidifié, on prélève deux échantillons dont les masses doivent être les mêmes à  $\pm 5\%$  près (paragraphe 5.1). Les valeurs à considérer doivent satisfaire les règles en fonction du  $d_m$  indiqué dans le tableau 1 du paragraphe 5.1.

L'état de foisonnement des prises d'essai doit être tel que le mortier (fraction  $< 400 \mu\text{m}$ ) se présente de façon à ce qu'il ne subsiste pas de motte supérieure à 10 mm.

#### Règles d'acceptation de la méthode de mesure de la teneur en eau au four à micro-ondes :

On considérera que, pour le matériau envisagé, les méthodes de mesure de la teneur en eau au four à micro-ondes et à l'étuve sont équivalentes si :

$$w_{M.O.} - w \leq 0,05 w$$

# TP Essai Proctor

## Matériel et matériau

Le matériel comprend :

- Un **socle de compactage** constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm x 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm,
- Un **moule Proctor fendu** constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable (acier cadmié) de 101,5 mm de diamètre intérieur et 116,5 mm de hauteur, pourvu d'une embase et d'une rehausse métallique amovible.
- Une dame dite « **dame Proctor normal** » constituée par un mouton cylindrique de 51 mm de diamètre, dont la masse est de 2 490 g et la hauteur de chute est de 305 mm.
- Une **règle à araser** constituée par une lame en acier d'environ 30 x 200 mm biseautée sur un de ses grands cotés.
- Une **balance** sensible au gramme d'une portée maximale au moins égale à 20 kg et une balance de précision sensible à 5 centigrammes au moins.
- Un **tamis** d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm.
- Des bacs, des truelles et des spatules pour le malaxage.
- Des maillets, burins, couteaux, etc...

**Veiller à la propreté constante :**

- **des balances et de leur environnement,**
- **du matériel et notamment moule et dame Proctor,**
- **de la place que vous occupez.**

Le matériau est un limon brun de type I qui a été préalablement tamisé pour avoir des éléments inférieurs à 5 mm et séché naturellement à l'air libre (teneur en eau initial inférieur à  $w_{OPN}$  teneur en eau optimale recherchée).

## Manipulation

La préparation du sol est la suivante :

1. Prendre une masse de 2 500 g de sol séché à l'air libre.
2. Répandre le sol dans le bac de malaxage prévu à cet effet.
3. Enlever tous les éléments de nature végétale.
4. Humidifier uniformément le sol par incrément de teneur en eau de  $\Delta w = 2\%$  jusqu'à pouvoir faire des mottes ayant assez de cohésion pour ne pas se briser lors d'une chute de 20 cm.

Lorsque la motte de sol ne se brise pas, cela coïncide avec la première teneur en eau de l'essai.

La manipulation est la suivante :

1. Huiler modérément l'intérieur du moule (le démoulage de l'échantillon en sera facilité).
2. Prendre la masse du moule Proctor normal vide avec l'embase sans la rehausse.
3. Mettre la rehausse sur le moule Proctor.
4. Séparer le sol préparé en trois parts « égales » dans le bac de malaxage.
5. Mettre la première part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
6. Scarifier au couteau la surface de la première couche de sol compactée.
7. Mettre la deuxième part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
8. Scarifier au couteau la surface de la deuxième couche de sol compactée.
9. Mettre la troisième part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
10. Enlever la rehausse en cisillant le sol. Si besoin, utiliser le couteau.
11. Utiliser la règle à araser pour aplanir la surface du sol au niveau du moule.
12. Prendre la masse du moule Proctor normal avec le sol humide.
13. Enlever le sol du moule Proctor et prélever deux échantillons de sol (une en haut et une en bas) pour réaliser les mesures de teneur en eau réelle.
14. Remettre le sol restant dans le bac de malaxage.
15. Humidifier uniformément le sol par un incrément de teneur en eau  $\Delta w = 2\%$  (respecter le mieux possible cet écart maximum de 2 % d'eau entre chaque point).
16. Bien malaxer pour uniformiser la présence d'eau dans tout le sol.
17. Recommencer les étapes 1 à 17 afin d'obtenir 5 points (2 sur le versant sec, 2 sur le versant mouillé, 1 près de l'optimum).

**N'HESITER PAS A REFAIRE VOTRE COMPACTAGE** si les conditions de remplissage ne sont pas correctes (épaisseur des couches, dépassement de la 3<sup>ème</sup> couche, etc.)

Au cours de votre manipulation, ne vous fiez pas aux augmentations ou diminutions de masse de vos moulages. Tracer plutôt au fur et à mesure de l'avancement de votre essai la courbe  $\rho_d = f(\Delta w)$ .

## Résultats

1. Présenter les résultats obtenus sous forme de tableau (voir exemple fourni) en précisant les masses spécifiques des grains solides  $\rho_s$  et de l'eau  $\rho_w$  prises en compte pour les calculs.
2. Estimer les incertitudes de mesure sur la masse volumique apparente sèche  $\rho_d$  et la teneur en eau  $w$  pour chaque essai en donnant les formules utilisées ( $\Delta\rho_d$  et  $\Delta w$ ) et en regroupant les valeurs dans un tableau.
3. Tracer la courbe  $\rho_d = f(w)$  conformément à la NF P 94-093 où  $\rho_d$  est la masse volumique apparente sèche et  $w$  est la teneur en eau mesurée à l'étuve ou au four micro-ondes.
4. Tracer sur le même graphique les courbes de saturation pour  $S_r = 80\%$  et  $S_r = 100\%$ .
5. En déduire la masse volumique apparente sèche  $\rho_{d\_OPN}$ , la teneur en eau  $w_{OPN}$  et le degré de saturation  $S_{r\_OPN}$  à l'optimum Proctor.

## Analyses

1. Le choix du type de moule est-il approprié à notre sol d'étude ? Expliquer.
2. L'exécution de l'essai comme proposée dans ce TP respecte t'elle la norme NF P 94-093 ? Expliquer.
3. Parmi vos 5 essais (à teneurs en eau différentes), est-ce que moins 3 essais au moins et 4 essais au plus se situent dans l'intervalle de teneur en eau  $0,8 w_{OPN} < w < 1,2 w_{OPN}$  ?
4. Calculer l'énergie de compactage (en  $kN.m/m^3$ ) mise en œuvre dans les conditions de l'essai.
5. Ce matériau est utilisé comme remblai routier. Le contrôle du compactage a donné un poids volumique apparent humide  $\gamma_h = 17 kN/m^3$  et un poids volumique apparent sec  $\gamma_d = 16 kN/m^3$ . Déterminer le volume d'eau à ajouter par  $m^3$  de sol compacté pour être à l'optimum Proctor.





# Feuille d'essai selon NF P 94-093

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

MOULE	PROCTOR <input type="checkbox"/>	CBR <input type="checkbox"/>
ENERGIE	NORMAL <input type="checkbox"/>	MODIFIE <input type="checkbox"/>
$\rho_s =$ $kg/m^3$	ESTIMEE <input type="checkbox"/>	MESUREE <input type="checkbox"/>
$w_{opt} =$ $\rho_{d_{opt}} =$	$\%$ $kg/m^3$	$\%$ $kg/m^3$

N° de l'essai	1		2		3		4		5	
Eau ajoutée (%)										
Masse du moule (g)										
Masse du moule + sol humide (g)										
Masse du sol humide (g)										
Masse du sol sec (g)										
Volume du moule (m <sup>3</sup> )										
Masse vol. humide (kg/m <sup>3</sup> )										
Masse vol. sèche (kg/m <sup>3</sup> )										
N° de la tare										
Masse de la tare (g)										
Masse totale humide (g)										
Masse totale sèche (g)										
Masse de l'eau (g)										
Masse du sol sec (g)										
Teneur en eau (%)										
Teneur en eau moyenne (%)										



# norme française

**NF P 94-093**  
Octobre 1999

Indice de classement : P 94-093

**Chaussées terrassements :  
Exécution des terrassements**

**BNSR CTT**

ICS : 93.020

Soils : Reconnaissance et essais

## Détermination des références de compactage d'un matériau

**Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié**

E. : Soils : Investigation and testing — Determination of the compaction characteristics of a soil — Standard Proctor test — Modified Proctor test  
D : Baugrund : Erkundung und Prüfungen — Bestimmung der Verdichtungsreferenzen für ein Material — Übliche Proctorprüfung — Modifizierte Proctorprüfung

### Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 septembre 1999 pour prendre effet le 5 octobre 1999.

Remplace la norme homologuée NF P 94-093, de septembre 1997.

### Correspondance

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

### Analyse

Le présent document détermine les caractéristiques de compactage d'un matériel : teneur en eau et masse volumique optimum Proctor normal et optimum Proctor modifié.

### Descripteurs

**Thésaurus International Technique** : sol, matériau, identification, détermination, caractéristique, compactage, dosage, eau, masse volumique, préparation de spécimen d'essai, essai.

### Modifications

Par rapport au document remplacé :

- les dimensions des appareils ont été modifiées,
- le volume réel du moule utilisé est déterminé à partir de mesures géométriques qui sont assorties d'une tolérance.

### Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex  
Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55

### Membres de la commission de normalisation

Président : M BOLLE

Secrétaire : M JOUBERT — BNSR-SETRA

M	ABDO	CIMBETON
M	BERRAUD	BOLYGLUES
M	BOLLE	
M	BUFALO	VALERIAN
M	GANDILLE	GUINTOLI
M	GUIMONT	BNSR-SETRA
M	LAVEAU	SNCF
M	MANJULOWIC	CEMAGREF
M	MICHAUT	COLAS
M	POILPRE	RAZEL
M	PREL	EDF-TEBG
M	PUECH	SOCETAUROUTE
M	PUJATTI	LHOIST
M	RAYNAUD	AEROPORTS DE PARIS
M	RINCENT	RINCENT BTP SERVICES
M	SCHAEFFNER	LOPC
M	SMEHECKI	AFNOR
M	VERHEE	USIRF



**Sommaire**

	Page
<b>1</b>	<b>Domaine d'application</b> .....
<b>2</b>	<b>Références normatives</b> .....
<b>3</b>	<b>Définitions et symboles</b> .....
<b>4</b>	<b>Principe de l'essai</b> .....
<b>5</b>	<b>Appareillage</b> .....
<b>5.1</b>	Appareillage spécifique .....
<b>5.2</b>	Appareillage d'usage courant .....
<b>6</b>	<b>Préparation des échantillons soumis à l'essai</b> .....
<b>6.1</b>	Prise d'échantillon .....
<b>6.2</b>	Préparation des éprouvettes .....
<b>7</b>	<b>Mode opératoire</b> .....
<b>7.1</b>	Choix du type de moule .....
<b>7.2</b>	Exécution de l'essai .....
<b>8</b>	<b>Expression des résultats</b> .....
<b>9</b>	<b>Procès-verbal d'essai</b> .....
<b>10</b>	<b>Vérifications — Matériels spécifiques</b> .....
<b>Annexe A</b>	<b>(normative) Corrections pour les matériaux comportant moins de 30 % d'éléments de dimension supérieure à 20 mm</b> .....
<b>A.1</b>	Hypothèses .....
<b>A.2</b>	Formules de correction .....
<b>Annexe B</b>	<b>(informative) Exemple de malaxeur à cisaillement rapide utilisé pour la préparation des matériaux argileux</b> .....

**1 Domaine d'application**

Le présent document concerne l'essai permettant de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau.

Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié qui conduisent à des couples de valeurs différents.

Le présent document s'applique aux matériaux définis dans la classification NF P 11-300, dont la dimension des plus gros éléments ( $D_{max}$ ) ne dépasse pas 20 mm, qu'ils soient naturels ou traités avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.

Lorsque ces matériaux comportent une proportion inférieure ou égale à 30 % d'éléments excédant 20 mm, il est encore possible de déterminer leurs caractéristiques de compactage moyennant l'application d'une correction apportée aux caractéristiques mesurées sur la fraction 0/20. Les modalités de cette correction sont précisées en annexe A du présent document.

Lorsque la proportion des éléments > 20 mm dépasse 30 %, l'essai peut être réalisé sur la fraction 0/20, mais son interprétation est alors limitée à l'évaluation de son état hydrique.

Le document est par ailleurs complété par la norme NF P 98-231-1 pour ce qui concerne les matériaux d'assises de chaussées et les matériaux drainants.

NOTE : Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres très utilisés pour identifier les matériaux (en particulier selon la classification de la norme NF P 11-300) et pour définir les spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais et des couches de forme.

Ces caractéristiques peuvent perdre tout ou partie de leur signification lorsqu'elles sont déterminées sur des matériaux friables tels que craies, marnes, schistes, grès et calcaires tendres etc. en raison de la modification granulométrique inhérente au processus de compactage propre à l'essai. Dans ce cas, l'essai nécessite une interprétation spécifique.

**2 Références normatives**

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

NF P 11-300	Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
NF P 94-078	Sols : Reconnaissance et essais — Indice CBR après immersion — Indice CBR immédiat — Indice Portant Immédiat — Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
NF P 98-231-1	Essais relatifs aux chaussées — Comportement au compactage des matériaux autres que sables utilisés en assises de chaussées.
NF P 94-049-1	Sols : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.
NF P 94-049-2	Sols : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Partie 2 : Méthode de la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.
NF P 94-050	Sols : Reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Méthode par étuvage.



### 3 Définitions et symboles

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

- w est la teneur en eau, exprimée en pourcentage ;  
 P<sub>s</sub> est la masse volumique des particules solides du sol, exprimée en tonnes par mètre cube ;  
 P<sub>d</sub> est la masse volumique du sol sec, exprimée en tonnes par mètre cube ;  
 P<sub>w</sub> est la masse volumique de l'eau, exprimée en tonnes par mètre cube égale conventionnellement à une tonne par mètre cube ;  
 S<sub>r</sub> est le degré de saturation exprimé en pourcentage :

$$S_r(\%) = \frac{w}{P_w} \left( \frac{1}{P_d} - \frac{1}{P_s} \right)$$

I, CBR est l'indice portant CBR après immersion, exprimé en pourcentage ;

IPI est l'indice portant immédiat, exprimé en pourcentage ;

D<sub>max</sub> est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. La présence d'un ou quelques gros éléments épars ne doit pas conduire à considérer leurs dimensions comme le D<sub>max</sub> du sol ;

$$\text{«Énergie» de compactage (exprimée en kNm/m}^3\text{)} = \frac{N \times H \times m \times g}{V}$$

où :

- N est le nombre total de coups ;  
 H est la hauteur de chute de la dame ;  
 m est la masse de la dame ;  
 g est l'accélération de la pesanteur ;  
 V est le volume du matériau compacté dans le moule.

### 4 Principe de l'essai

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifiées suivant l'essai réalisé.

NOTE 1 : Le présent document envisage plus particulièrement la détermination de la courbe Proctor en cinq points. Il s'agit d'un nombre minimal et tout essai aboutissant à la détermination de cette courbe en davantage de points est évidemment conforme au document.

NOTE 2 : Il est souvent avantageux d'exécuter les essais de détermination des indices CBR immédiat et/ou après immersion et/ou de l'indice Portant Immédiat en concomitance avec les essais Proctor étant donné que ces essais se pratiquent sur des éprouvettes moulées et compactées conformément au mode opératoire décrit dans le présent document (voir norme NF P 94-078).

### 5 Appareillage

#### 5.1 Appareillage spécifique

L'appareillage spécifique comporte :

— un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm x 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm ;

— deux modèles de moules :

- moule Proctor ;
- moule CBR.

Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu. Les formes et les dimensions fonctionnelles de ces éléments doivent être conformes aux indications portées sur la figure 1.

Le moule CBR comporte en plus un disque d'espacement dont la forme et les dimensions sont conformes à la figure 1.

— deux modèles de dames de compactage manuelles :

- la dame dite «dame Proctor normal» est constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm ± 1 mm de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de 305 mm ± 2 mm. La masse de l'équipage mobile est de 2 490 g ± 2,5 g. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la figure 1 ;

- la dame dite «dame Proctor modifiée» est de conception analogue à la «dame Proctor normal» mais la hauteur de chute est de 457 mm ± 2 mm et la masse de l'équipage mobile de 4 535 g ± 5 g. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la figure 1 ;

— une règle à araser constituée par une lame en acier dont les formes et les dimensions doivent être conformes aux indications portées sur la figure 1 ;

— les machines à compacter mécanisées peuvent avantageusement être utilisées si elles répondent aux conditions suivantes :

- 1) les masse, diamètre, hauteur de chute du mouton, épaisseur du fourreau lorsque la machine en comporte un, sont tels que définis sur la figure 1 ;
- 2) le mode de répartition des coups, précisé au paragraphe 7.2, est respecté ;
- 3) la cinématique du mécanisme permet au porte-moule d'être en appui direct sur le bâti de la machine au moment de l'impact de la dame ; si ce n'est pas le cas, il convient de vérifier pour chaque matériau que les écarts de mesure de la masse volumique maximale entre la machine et le mode manuel n'excèdent pas 1% ;
- 4) la machine est rendue solidaire d'un socle en béton dont l'épaisseur minimale est de 30 cm.

Dimensions en millimètres

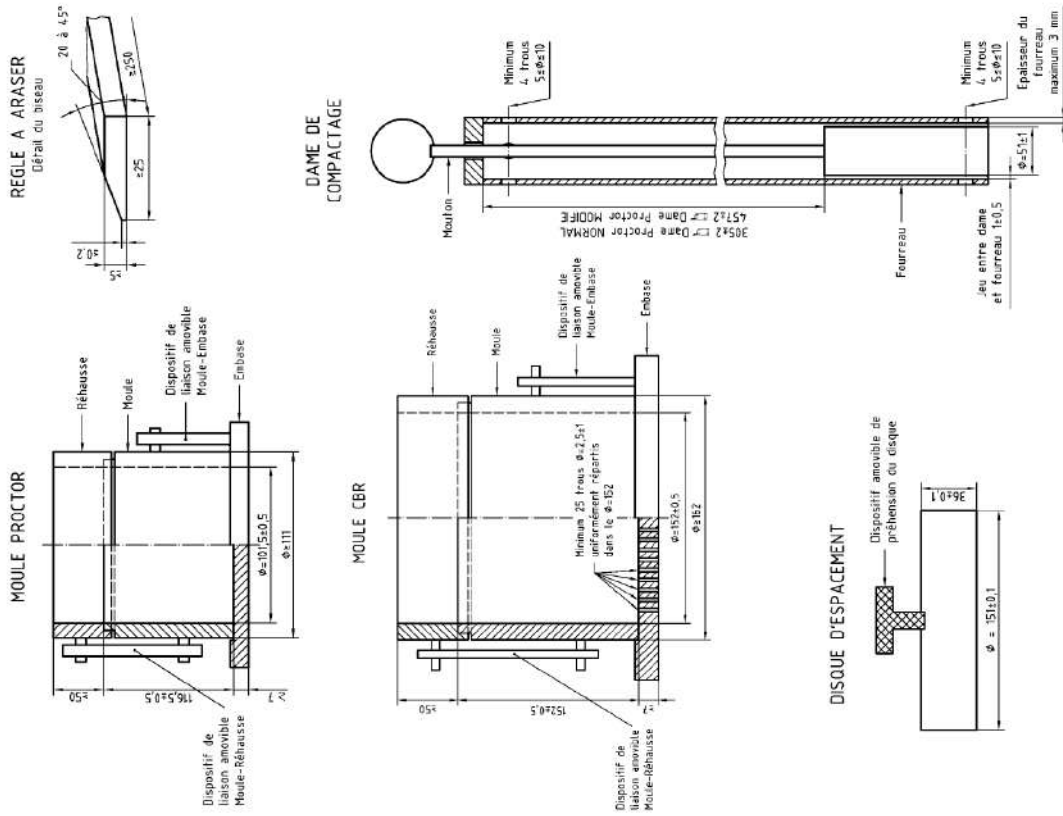


Figure 1 : Appareillage spécifique

## 5.2 Appareillage d'usage courant

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;
- balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- une enceinte thermique ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux selon une méthode normalisée (NF P 94-049-1, NF P 94-049-2, NF P 94-050) ;
- des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
- un pulvérisateur à eau ;
- éventuellement un malaxeur-désagrégateur mécanique dont le volume de la cuve est d'au moins  $10 \text{ dm}^3$  (voir exemple annexe B) ;
- un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule (dans le cas d'un corps de moule monobloc) ;
- matériels et outillages divers.

## 6 Préparation des échantillons soumis à l'essai

### 6.1 Prise d'échantillon

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau et suivant que l'on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son indice CBR après immersion et/ou de son indice Portant Immédiat. Le diagramme représenté sur la figure 2 précise ces masses. Il s'agit de quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.



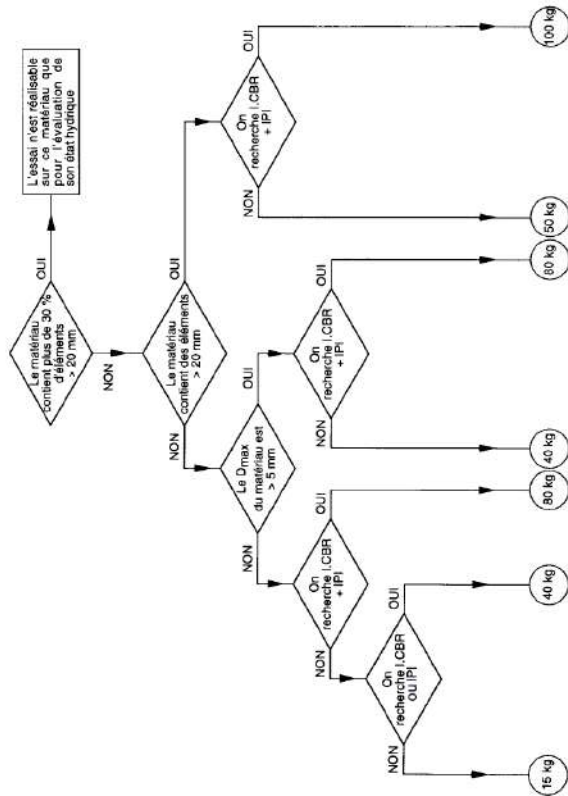


Figure 2 : Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai

6.2 Préparation des éprouvettes

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50 °C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.

Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisat est conservé pour l'exécution de l'essai. Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.

Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre :

- 0,8 wOPN (ou OPM) et 1,2 wOPN (ou OPM)

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour permettre la diffusion de l'eau. C'est à partir de chacune de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor (et le cas échéant la détermination de l'Indice Portant Immédiat et l'Indice CBR Immédiat ou après immersion des éprouvettes aux teneurs en eau considérées).

NOTE : L'humidification de chacune des parts du matériau constitue la phase la plus délicate de l'essai.

La première difficulté est celle du choix des teneurs en eau à attribuer à chaque part étant donné que l'on ne connaît pas la wOPN ou wOPM du matériau. L'opérateur doit donc estimer une valeur approchée. Pour cela, il a recours à des tests tactiles et visuels et son expérience est déterminante dans la justesse de cette estimation.

À défaut d'une expérience suffisante, l'opérateur doit envisager une détermination de la courbe Proctor en plus de cinq points et préparer les quantités de matériaux et le nombre de parts en conséquence.

Une seconde difficulté réside dans les modalités d'incorporation de l'eau au sein du matériau qui dans tous les cas doit se faire lentement, de manière bien répartie à la surface du matériau et dans toute la mesure du possible à l'aide d'un pulvérisateur, en maintenant le malaxage pendant l'introduction de l'eau.

En outre, ces modalités dépendent de l'argilosité des matériaux (définie selon la norme NF P 11-300) :

- dans le cas des matériaux sableux et graveleux, le malaxage peut se faire manuellement ou à l'aide de n'importe quel type de malaxeur. L'observation d'une durée de conservation pour homogénéisation de 15 min en boîtes ou sacs hermétiques est suffisante ;
- dans le cas des matériaux limoneux et sablo-limoneux, les modes de malaxage indiqués pour les matériaux sableux et graveleux sont conservés mais le temps de conservation en boîtes ou sacs étanches doit être porté à 2 h ou 3 h ;
- dans le cas des matériaux argileux, il convient d'abord de les réduire en une mouture 0/2 (évaluée de visu). L'exécution manuelle de cette opération est le plus souvent fastidieuse, elle peut être grandement facilitée par l'emploi d'un malaxeur-désagrégateur.

Le matériau réduit est ensuite humidifié à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage. Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide du malaxeur-désagrégateur.

Après introduction de l'eau et constatation visuelle d'une stabilisation du comportement du matériau sous l'action du malaxage, il est introduit dans des boîtes ou sacs hermétiques et conservé entre 24 h et 48 h selon l'argilosité.

7 Mode opératoire

7.1 Choix du type de moule

Il est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme (figure 3).

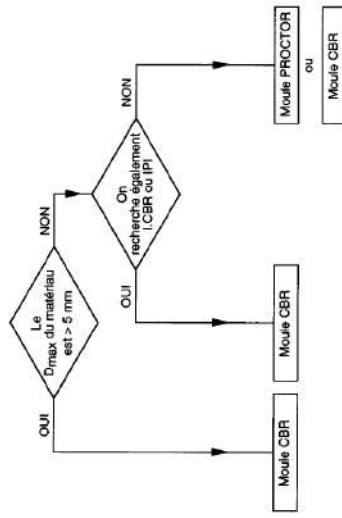






Figure 3 : Choix du type de moule

### 7.2 Exécution de l'essai

Les choix du type de moule et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées comme indiqué en 6.2 en respectant les modalités indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif	
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	3 couches, à raison de :	
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	25 coups par couche	56 coups par couche
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm		
	Nombre de couches	3	3	Moule Proctor	Moule CBR
	Nombre de coups par couche	25	56	Dame Proctor normal	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	5 couches, à raison de :	
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	25 coups par couche	56 coups par couche
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm		
	Nombre de couches	5	5	Moule Proctor	Moule CBR
	Nombre de coups par couche	25	56	Dame Proctor modifié	

Avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :

- solidariser : moule, embase et rehausse ;
- lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
- placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage.

Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié.

Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 coups ou 56 coups par couche suivant le schéma suivant, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.

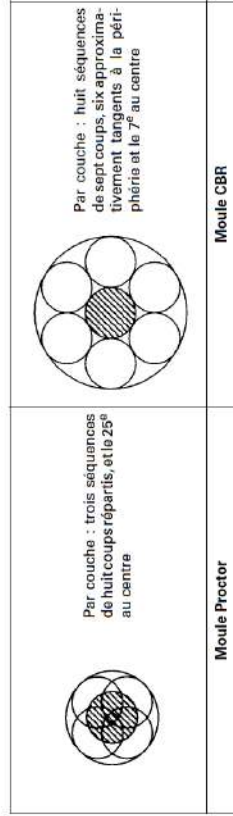


Figure 4 : Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser.

Peser l'ensemble du moule avec le matériau :

— s'il n'est pas prévu de poursuivre l'essai par la détermination des indices CBR et/ou de l'indice Portant immédiat, on procède au démoulage de l'éprouvette. En extraire, ensuite, un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau ;

— si à l'inverse, on prévoit la détermination concomitante de l'indice Portant immédiat, on procède immédiatement après le compactage au poinçonnement de l'éprouvette (conformément à la norme NF P 94-078) puis à son démoulage et à sa dessiccation pour mesure de sa teneur en eau ;

— si on prévoit la détermination concomitante de l'indice Portant immédiat et de l'indice CBR après immersion, il convient de compacter deux éprouvettes identiques, la première servant à la détermination de l'IP et à la teneur en eau, la seconde étant mise en immersion 4 jours puis poinçonnée conformément à la norme NF P 94-078 ;

— enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'indice CBR après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage (voir norme NF P 94-078). La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau préhumidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

Ces opérations sont répétées sur chacune des parts de matériau préhumidifié dans les conditions décrites en 6.2.

#### Particularités applicables aux matériaux traités avec de la chaux et/ou un liant hydraulique

Pour déterminer les références de compactage d'un matériau traité avec de la chaux et/ou un liant hydraulique, préparer à partir de la prise d'essai du matériau non traité, des parts préhumidifiées comme décrit au paragraphe 6.2 et exécuter sur chacune d'elles les opérations suivantes :

- dans le cas du traitement à la chaux seule :
  - introduire la quantité de chaux correspondant au dosage visé et malaxer le mélange manuellement, ou plus avantageusement à l'aide d'un malaxeur-désagréateur (voir annexe B), jusqu'à constatation visuelle de l'obtention d'une mouture dont la granulométrie est stabilisée et dont la teinte est homogène ;
  - conserver le mélange ainsi obtenu dans un conteneur (sac ou boîte) hermétique durant 1 h ± 10 min et à une température comprise entre 5 °C et 30 °C ;
  - à l'expiration de ce délai et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal ou Proctor modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe.
- dans le cas du traitement avec un liant hydraulique seul :
  - exécuter les mêmes opérations que pour le traitement à la chaux seule, à l'exception du délai de conservation qui est ramené à 15 min maximum.



- dans le cas d'un traitement mixte chaux plus liant hydraulique :
  - procéder tout d'abord à la fabrication et à la conservation du mélange matériau-chaux, comme décrit pour le traitement à la chaux seule, puis reprendre ce mélange pour le traiter avec le liant hydraulique, comme décrit pour le traitement avec un liant hydraulique seul ;
  - à l'expiration du délai de conservation avec le liant hydraulique de 15 min maximum et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal et Proctor modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe.

**8 Expression des résultats**

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- la teneur en eau ;
  - la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
  - la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à 0,1 mm près.
- Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique  $\rho_d = f(w, \%)$  tel que celui présenté sur la figure 5. Le rapport des échelles est de 2 % de teneur en eau pour 0,1 t/m<sup>3</sup> de masse volumique.

On trace ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux. Sauf dans le cas des matériaux très perméables, cette courbe présente un maximum dont les coordonnées sont dénommées respectivement masse volumique sèche optimum et teneur en eau Optimum Proctor Normal (ou Proctor Modifié suivant l'essai réalisé). Ce résultat est exprimé à 0,01 t/m<sup>3</sup> près pour la masse volumique et à 0,1 point près pour la teneur en eau (exprimée en pourcentage).

Il convient de faire figurer également sur le graphique  $\rho_d = f(w, \%)$  les courbes d'équation :

$$\rho_d = \frac{S_r \rho_s}{S_r + w \frac{\rho_s}{\rho_w}} \text{ avec } \rho_w = 1 \text{ t/m}^3$$

établies pour :

$S_r = 100$  et 80 %/m<sup>3</sup>

et pour :

$\rho_s = 2,70 \text{ t/m}^3$

si l'on dispose de la valeur mesurée de  $\rho_s$  du matériau considéré, celle-ci sera utilisée pour l'établissement de ces deux courbes.

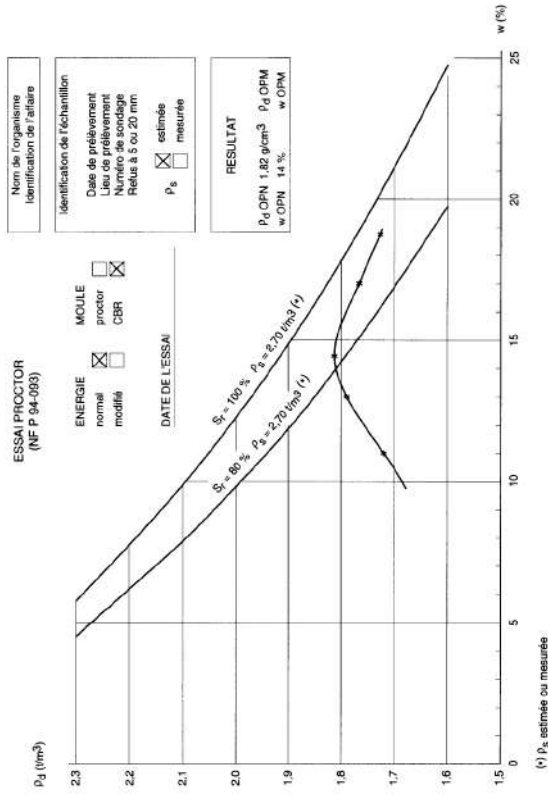


Figure 5 : Exemple de procès-verbal d'essai

## 9 Procès-verbal d'essai

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

- le nom de l'organisme qui a réalisé l'essai ;
- la référence au présent document ;
- l'identification de l'affaire (titre, numéro d'affaire ou référence,...) ;
- l'identification de l'échantillon (date et lieu de prélèvement, numéro de sondage(s) et profond-  
deur(s),...) et du liant éventuellement ajouté (nature, origine, dosage, formule,...) ;
- la date de début de l'essai ;
- le type d'essai réalisé «PROCTOR normal» ou «PROCTOR modifié» ;
- le type de moule utilisé, moule PROCTOR ou moule CBR ;
- la méthode utilisée pour la détermination des teneurs en eau ;
- le graphique de la masse volumique sèche en fonction des teneurs en eau ainsi que les points expé-  
rimentaux (hors corrections granulométriques) ;
- les courbes de saturation 80 % et 100 % et la valeur  $p_s$  retenue ;
- le pourcentage de refus éventuel à 20 mm ou à 5 mm ;
- les valeurs :
  - masse volumique sèche  $p_d$ OPN ou  $p_d$ OPM ;
  - teneur en eau optimale correspondante  $w$ OPN ou  $w$ OPM.

## 10 Vérifications — Matériels spécifiques

Les masses des dames de compactage manuelles et les dimensions des moules de compactage doivent être vérifiées au moins tous les deux ans.

Le volume de chaque moule est déterminé en prenant leurs dimensions (diamètre et hauteur). La hauteur est la moyenne des mesures réalisées selon trois génératrices disposées à 120°. Le diamètre est la moyenne de trois mesures également disposées à 120°, en haut et en bas du moule.

En cas d'emploi de machine à compacter, la verticalité du tube-guide et de la dame, la masse de celle-ci, la hauteur de chute, le nombre de coups et le dispositif de comptage de nombre de coups doivent être contrôlés également au moins tous les deux ans.

## Annexe A (normative)

### Corrections pour les matériaux comportant moins de 30 % d'éléments de dimension supérieure à 20 mm

Lorsque le sol comporte une proportion d'éléments de plus de 20 mm de diamètre, inférieure ou égale à 30 % on détermine ses caractéristiques Proctor moyennant une correction des valeurs  $p_d$  et  $w$  % détermi-  
nées sur la fraction 0/20 du matériau soumise à l'essai.

#### A.1 Hypothèses

Les formules de correction ci-après supposent que les éléments 20/D écrits :

- ne retiennent pas d'eau ;
- occupent un volume  $V = \frac{M}{p_s}$  ( $M$  étant leur masse et  $p_s$  la masse volumique des particules solides élé-  
mentaires considérée généralement égale à  $2,70 \text{ t/m}^3$ ) ;
- «flottent» dans la fraction fine du matériau.

Les deux premières conditions peuvent être considérées comme satisfaites dans la mesure où ces élé-  
ments sont constitués de fragments de roches de faible porosité :

$$n = \frac{p_s - p_d}{p_s} \leq 5 \%$$

et qu'ils ont bien été débarrassés, au moment de l'écrêtage, des éléments fins  $y$  adhérant éventuellement.  
La troisième condition justifie la valeur de 30 % comme valeur maximale de la proportion d'éléments 20/D  
en deçà de laquelle les formules de correction sont applicables.

#### A.2 Formules de correction

Ces formules sont les suivantes :

— pour la teneur en eau :

$$w' = w - \Delta w$$

$$\Delta w = \frac{m}{100} w$$

où :

$w'$  est la teneur en eau OPN cherchée du matériau 0/D, exprimée en pourcentage ;

$w$  est la teneur en eau OPN déterminée sur la fraction 0/20, exprimée en pourcentage ;

$m$  est la proportion de la fraction 20/D dans le matériau, exprimée en pourcentage ;

— pour la masse volumique sèche :

$$\rho'_d = \frac{p_d}{1 + \frac{m}{100} \left( \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 \right)}$$

où :

- $\rho'_d$  est la masse volumique sèche OPN (ou OPM) du matériau O/D, exprimée en tonnes par mètre cube ;
- $p_d$  est la masse volumique sèche OPN (ou OPM) déterminée sur la fraction 0/20, exprimée en tonnes par mètre cube ;
- $\rho_s$  est la masse volumique des particules élémentaires du sol, exprimée en tonnes par mètre cube ;
- $m$  est la proportion de la fraction 20/D dans le matériau, exprimée en pourcentage.

## Annexe B (informative)

### Exemple de malaxeur à cisaillement rapide utilisé pour la préparation des matériaux argileux

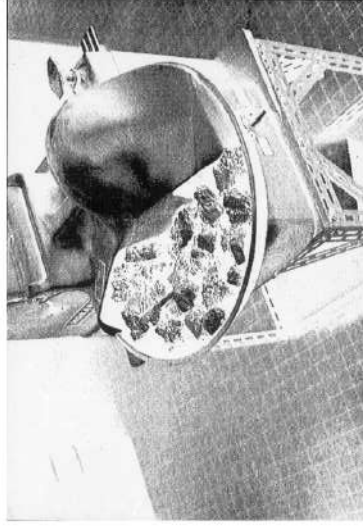


Figure B.1 : Introduction du matériau argileux en mottes dans la cuve

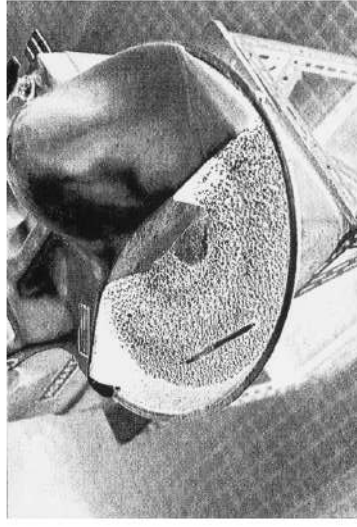


Figure B.2 : État du matériau après quelques secondes d'action du malaxeur



# TP Essai de perméabilité des sols

## Matériel et matériau

Le matériel comprend :

- Un **socle de compactage** constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm x 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm,
- Un **moule Proctor** constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable (fonte d'aluminium) de 101,5 mm de diamètre intérieur et 116,5 mm de hauteur, pourvu d'une embase et d'une rehausse métallique amovible.
- Une dame dite « **dame Proctor normal** » constituée par un mouton cylindrique de 51 mm de diamètre, dont la masse est de 2 490 g et la hauteur de chute est de 305 mm.
- Une **règle à araser** constituée par une lame en acier d'environ 30 x 200 mm biseautée sur un de ses grands cotés.
- Une **balance** sensible au gramme d'une portée maximale au moins égale à 20 kg et une balance de précision sensible à 5 centigrammes au moins.
- Un **tamis** d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 2 mm.
- Deux **embases** contenant des pierres poreuses avec joints toriques.
- Un **bac de saturation**.
- Un **tube de Mariotte**.
- Du petit matériel tels que bacs, des truelles et des spatules pour le malaxage, niveau, règle en bois, thermomètre, papier filtre.

Le matériau est un sable HN31 (voir fiche technique à la fin du fascicule) qui a été préalablement tamisé pour avoir des éléments inférieurs à 2 mm et séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

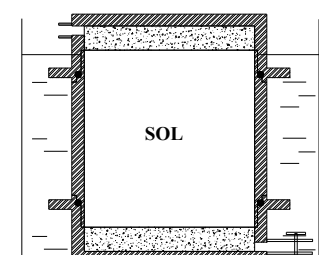
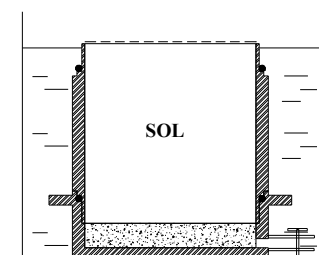
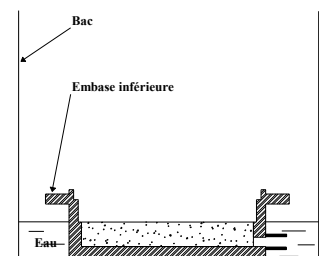
## Manipulation

La préparation du sol dans le moule Proctor est la suivante :

1. Prendre une masse de 2 000 g de sol sec dans l'étuve.
2. Répandre le sol dans le bac de malaxage prévu à cet effet et humidifier uniformément le sol à une teneur en eau de  $w = 6\%$ .
3. Huiler modérément l'intérieur du moule Proctor.
4. Prendre la masse du moule Proctor normal vide avec l'embase sans la rehausse.
5. Mettre la rehausse sur le moule Proctor.
6. Séparer le sol préparé en trois parts « identiques » dans le bac de malaxage.
7. Mettre la première part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
8. Scarifier au couteau la surface de la première couche de sol compactée.
9. Mettre la deuxième part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
10. Scarifier au couteau la surface de la deuxième couche de sol compactée.
11. Mettre la troisième part de sol dans le moule et compacter avec la dame Proctor en 25 coups (24 en périphérie et dernier coup au centre).
12. Enlever la rehausse en cisillant le sol.
13. Utiliser la règle à araser pour aplanir la surface du sol au niveau du moule.
14. Prendre la masse du moule Proctor normal avec le sol humide.
15. Faire une mesure de teneur en eau sur le sol restant.

La manipulation pour mettre en place le perméamètre est la suivante :

1. Saturer l'embase inférieure munie de sa pierre poreuse dans le bac de saturation. Saturer également la pierre poreuse supérieure. L'eau doit effleurer le dessus de chaque pierre poreuse.
2. Mettre en place la cellule Proctor avec le sol en pensant à mettre les joints toriques propres sur l'embase et le chapeau.
3. Disposer un papier filtre sur la face supérieure du sol.
4. Mettre de l'eau dans le bac de saturation jusqu'à environ 5 mm du bord supérieur du moule. Lorsque l'eau effleure et que le papier filtre supérieur est imbibé, l'échantillon est considéré comme saturé.
5. Enlever le papier filtre.
6. Mettre en place de l'embase supérieure munie de sa pierre poreuse et solidariser l'ensemble en vissant les écrous à oreilles.
7. Adapter le système de mesure saturé au bas du perméamètre.
8. Sortir le moule du bac de saturation et effectuer les réglages nécessaires aux mesures (plan de référence).



Opérer conformément à la ou les méthodes données au cours de la séance de présentation.

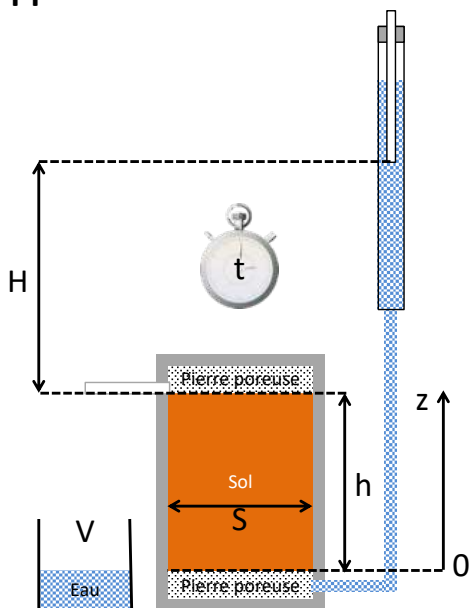
**ATTENTION :**

- L'échantillon de sol est FRAGILE. A manipuler avec délicatesse lorsque vous enlevez le moule de l'embase Proctor pour le disposer sur l'embase du perméamètre (tourner le moule pour décoller l'échantillon puis lever en tournant).
- Ne pas oublier les joints d'étanchéité.
- Lorsque la saturation est terminée, enlever le papier filtre, mettre en place la pierre poreuse supérieure (préalablement saturée) en la centrant au mieux, fermer le moule avec le "chapeau" (faire en sorte que le tube d'entrée d'eau soit à l'opposé du tube de sortie).
- Pas de papier filtre dans le moule.
- Remplir le système de mesure d'eau en éliminant le plus correctement possible les bulles d'air.
- Brancher ce tube à la base du perméamètre (toujours immergé). Pour éviter d'emprisonner des bulles d'air, ouvrir le robinet et le REFERMER dès que le circuit est bien établi.

La méthode de mesure au perméamètre à **charge constante** consiste à effectuer deux mesures de perméabilité par gradient hydraulique avec les paramètres suivants :

Nombre de mesure	2	2	2
Gradient hydraulique $i$	5	7	9
Volume de percolation mini $V$	100 cm <sup>3</sup>	150 cm <sup>3</sup>	200 cm <sup>3</sup>

**Rappel :**



Gradient hydraulique :

$$i = \frac{H}{h} \quad \Delta i =$$

Débit volumique :

$$Q = \frac{V}{t} \quad \Delta Q =$$

Coefficient de perméabilité :

$$k = \frac{Q}{i \times S} \quad \Delta k =$$

Il faut mesurer par conséquent :

- le volume d'eau sortant de l'échantillon  $V$ ,
- le temps  $t$  mis pour recueillir le volume sortant.

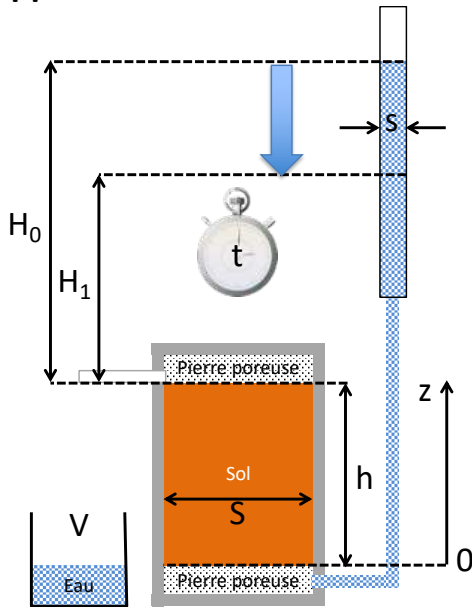
Nota : prendre la température  $\Theta$  de l'eau à la sortie du perméamètre.



La méthode de mesure au perméamètre à **charge variable** consiste à effectuer deux mesures de perméabilité avec les paramètres suivants :

Nombre de mesure	2	2	2
Charge hydraulique initiale $H_0$	1,50 m	1,50 m	1,50 m
Charge hydraulique finale $H_1$	1,20 m	1,10 m	1,00 m

**Rappel :**



Coefficient de perméabilité :

$$k = 2,3 \frac{S \times h}{S \times t} \log \left( \frac{H_0}{H_1} \right)$$

$\Delta k =$

Il faut mesurer par conséquent :

- le temps  $t$  mis pour passer de  $H_0$  à  $H_1$

Nota : prendre la température  $\theta$  de l'eau à la sortie du perméamètre.

A la fin des essais :

- Ouvrir le moule et prélever 1 échantillon pour une mesure de teneur en eau finale (réfléchissez)
- Laisser le sol en place et mettre en place un écoulement avec un gradient hydraulique  $i$  supérieur au gradient hydraulique critique  $i_c$ . Le phénomène de boulangerie devrait apparaître.

**ATTENTION :**

Le temps pour réaliser ce TP est limité et est juste suffisant pour faire toutes les mesures.



## Résultats

1. Compactage et saturation :
  - Déterminer la teneur en eau réelle au compactage  $w$ ,
  - Calculer les poids volumiques apparents sec  $\gamma_d$  et humide  $\gamma_h$ ,
  - En déduire la teneur en eau de saturation théorique  $w_{sat}$  et le poids volumique apparent saturé  $\gamma_{sat}$ .
  
2. Perméamètre à charge constante et à charge variable :
  - Donner toutes les valeurs imposées et mesurées dans les conditions de chaque essai et calculer le coefficient de perméabilité  $k$  à 20°C pour chaque essai et les deux méthodes,
  - Estimer toutes les incertitudes de mesure pour chaque essai et les deux méthodes puis calculer l'incertitude pour chaque essai sur le coefficient de perméabilité  $k$  à 20°C en donnant la formule utilisée.  
Nota : regrouper les valeurs dans des tableaux
  
3. Fin de l'essai :
  - Mesurer la teneur en eau finale  $w_{sat}$  et en déduire le degré de saturation réel  $S_r$ ,
  - Calculer le gradient hydraulique critique  $i_c$  pour cet échantillon.

**Rappel** - le coefficient de perméabilité à 20°C se calcule par la formule suivante :

$$k(20^\circ C) = k(\theta) \frac{\nu(\theta)}{\nu(20^\circ C)}$$

où  $\nu(\theta)$  est la viscosité cinématique de l'eau à la température  $\theta$  (voir tableau dans la norme NF X 30-411)

## Analyses

1. Avez-vous bien mesuré la perméabilité en condition saturée ? Expliquer.
  
2. L'exécution de l'essai comme proposée dans ce TP respecte t'elle la norme NF X 30-411 en termes de gradient hydraulique à imposer pendant la phase de saturation, d'essais à charge constante et d'essais à charge variable ? Expliquer.
  
3. Quelle est l'influence de la charge (constante ou variable) et/ou du volume d'eau de percolation sur la précision de mesure du coefficient de perméabilité ?
  
4. D'après vous, les pierres poreuses modifient-elles le résultat ?
  
5. Dans quelle catégorie placez-vous ce sol ?

# Feuille d'essai à charge constante

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

Hauteur de l'éprouvette  $h$  (mm) :

Diamètre de l'éprouvette  $D$  (mm) :

Surface de l'échantillon  $S$  (mm<sup>2</sup>) :

Teneur en eau d'essai  $w$  (%) :

Degré de saturation  $S_r$  (%) :

Poids volumique apparent sec  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Poids volumique apparent saturé  $\gamma_{sat}$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Température de l'eau  $\Theta$  (°C) :

Viscosité cinématique  $\nu(\Theta)$  (Pa.s) :

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6
Charge hydraulique $H$ (mCE)						
Incertitude $\Delta H$ (mCE)						
Gradient hydraulique $i$ (/)						
Incertitude $\Delta i$ (/)						
Volume d'eau sortant $V$ (m <sup>3</sup> )						
Incertitude $\Delta V$ (m <sup>3</sup> )						
Temps $t$ (s)						
Incertitude $\Delta t$ (s)						
Débit volumique $Q$ (m <sup>3</sup> /s)						
Incertitude $\Delta Q$ (m <sup>3</sup> /s)						
Perméabilité $k(\Theta)$ (m/s)						
Incertitude $\Delta k$ (m/s)						
Perméabilité $k(20^\circ\text{C})$ (m/s)						
Incertitude $\Delta k$ (m/s)						

Commentaire :

# Feuille d'essai à charge variable

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

Hauteur de l'éprouvette  $h$  (mm) :

Diamètre de l'éprouvette  $D$  (mm) :

Surface de l'échantillon  $S$  (mm<sup>2</sup>) :

Diamètre du tube de Mariotte  $d$  (mm) :

Surface du tube  $s$  (mm<sup>2</sup>) :

Teneur en eau d'essai  $w$  (%) :

Degré de saturation  $S_r$  (%) :

Poids volumique apparent sec  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Poids volumique apparent saturé  $\gamma_{sat}$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Température de l'eau  $\theta$  (°C) :

Viscosité cinématique  $\nu(\theta)$  (Pa.s) :

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6
Charge hydraulique $H_0$ (mCE)						
Incertitude $\Delta H_0$ (mCE)						
Charge hydraulique $H_1$ (mCE)						
Incertitude $\Delta H_1$ (mCE)						
Volume d'eau sortant $V$ (m <sup>3</sup> )						
Incertitude $\Delta V$ (m <sup>3</sup> )						
Temps $t$ (s)						
Incertitude $\Delta t$ (s)						
Perméabilité $k(\theta)$ (m/s)						
Incertitude $\Delta k$ (m/s)						
Perméabilité $k(20^\circ\text{C})$ (m/s)						
Incertitude $\Delta k$ (m/s)						

Commentaire :

Indice de classement : X 30-441

ICS : 13.030.01

## Déchets

**Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau****Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable**

E : Waste — Laboratory determination of the permeability coefficient of a saturated material — Permeability tests using a rigid wall permeameter at constant/variable hydraulic head

D : Abfall — Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Sättigungsdurchlässigkeitsbeiwerts eines Werkstoffs — Durchlässigkeitsprüfungen mit Stehwandperméameter mit gleichmäßiger/wechselnder hydraulischer Belastung

**Norme française homologuée**

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 22 octobre 2008 pour prendre effet le 22 novembre 2008.

**Correspondance**

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

**Analyse**

Le présent document s'applique à la détermination, après saturation, du coefficient de perméabilité à l'eau des matériaux naturels ou artificiels, autres que les géosynthétiques, intacts ou reconstitués, traités ou non, dont le coefficient de perméabilité est inférieur à  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Cette détermination est effectuée en laboratoire au moyen d'un perméamètre à paroi rigide (PPR), sous un gradient hydraulique constant ou variable.

La méthode décrite est utilisée en géotechnique de l'environnement pour caractériser le coefficient de perméabilité des matériaux utilisés pour le confinement des déchets ou de sols pollués. Elle est utilisée également dans les domaines du génie civil et de l'hydrogéologie en général.

**Descripteurs**

**Thésaurus International Technique** : déchet, forage, sol, calcul, détermination, perméabilité à l'eau, matériau, essai, essai de laboratoire, infiltration, résultats d'essai, protection de l'environnement, mode opératoire, appareillage, perméamètre, instrument de mesure, mesurage.

**Modifications****Corrections**

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex  
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0) 1 45 17 90 00 — www.afnor.org

**Membres de la commission de normalisation**

Président : M CAZAUX — SOLVAY ELECTROLYSE France

Secrétariat : M LOUIS-ROSE — AFNOR

M	ABDELGHAFOUR	INSAVALOR SA
M	ABRIAK	ECOLE DES MINES DE DOUAI
M	BEGASSAT	ADEME
M	BERTRAND	ANTEA
M	BOUR	INERIS
M	CASAGRANDE	SITA FD
M	CAUCHI	SITA FD
M	CAZAUX	SOLVAY ELECTROLYSE FRANCE
M	COURADIN	INSA LYON — LGCIE
M	DIDIER	INSA LYON — LGCIE
M	DUJENNOI	CEMAGREF
M	GUERBOIS	VEOLIA PROPRETE
M	GUYONNET	BRGM
M	MICHALSKI	ANTEA
M	MOUTHER	INTERCOMPETENCES
M	PECOUEUR	ECOLE DES MINES DE DOUAI
M	PERRIN	FNADE
M	RANGEARD	INSA
M	ROBILLON	SECHE ECO INDUSTRIES
M	ROUVREAU	BRGM
M	SERRATRICE	CETE MEDITERRANEE
M	SOUET	ADEME
M	STRAUSS	DSC RINCENT BTP — AGENCE EST
MME	TOUZE FOLTZ	CEMAGREF
M	VICARD	STRATENE
M	ZENTAR	ECOLE DES MINES DE DOUAI
M	ZERHOUNI	FONDASOL



**Sommaire**

	Page
<b>Introduction</b> .....	4
<b>1 Domaine d'application</b> .....	4
<b>2 Références normatives</b> .....	4
<b>3 Définitions et symboles</b> .....	4
<b>3.1 Termes et Définitions</b> .....	4
<b>3.2 Symboles et unités</b> .....	5
<b>4 Principe de l'essai</b> .....	6
<b>5 Appareillage</b> .....	6
<b>5.1 Descriptif du perméamètre</b> .....	7
<b>5.2 Dispositif de saturation et de mise en écoulement</b> .....	8
<b>5.3 Dispositifs de mesurage</b> .....	9
<b>5.4 Liquide d'essai</b> .....	9
<b>5.5 Local d'essai</b> .....	10
<b>5.6 Matériel complémentaire</b> .....	10
<b>6 Mode opératoire</b> .....	10
<b>6.1 Préparation de l'éprouvette</b> .....	10
<b>6.2 Mise en eau et saturation de l'éprouvette</b> .....	10
<b>6.3 Phase de mesure</b> .....	11
<b>6.4 Critères d'arrêt de l'essai</b> .....	12
<b>6.5 Démontage de l'éprouvette</b> .....	12
<b>7 Expression des résultats</b> .....	13
<b>7.1 Calcul pour les essais à charge constante</b> .....	13
<b>7.2 Calcul pour les essais à charge variable</b> .....	13
<b>7.3 Expression du résultat</b> .....	13
<b>8 Procès verbal d'essai</b> .....	14
<b>Annexe A (normative) Confection de l'éprouvette</b> .....	17
<b>Annexe B (informative) Correction de viscosité</b> .....	20
<b>Annexe C (informative) Produits de collage pour échantillon non remanié</b> .....	22
<b>Annexe D (informative) Contrôle et vérifications de l'appareillage</b> .....	23
<b>Annexe E (informative) Exemples de Contrôleurs Pression-Volume (CPV)</b> .....	24

**Introduction**

La méthode décrite dans le présent document est utilisée en géotechnique de l'environnement pour caractériser le coefficient de perméabilité des matériaux utilisés pour le confinement des déchets ou de sols pollués. Elle est utilisée également dans les domaines du génie civil et de l'hydrogéologie en général.

Ce document définit les termes employés et les paramètres mesurés. Il spécifie les principales caractéristiques de la méthode employée, fixe les modes opératoires relatifs aux différentes techniques de mesure mises en œuvre, et précise la nature et le mode de présentation des résultats.

**1 Domaine d'application**

Le présent document s'applique à la détermination, après saturation, du coefficient de perméabilité à l'eau des matériaux naturels ou artificiels, autres que les géosynthétiques, intacts ou reconstitués, traités ou non, dont le coefficient de perméabilité est inférieur à  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Cette détermination est effectuée en laboratoire au moyen d'un perméamètre à paroi rigide (PPP), sous un gradient hydraulique constant ou variable.

Ce document peut être adapté pour d'autres solutions aqueuses en prenant en compte les caractéristiques de cette solution et plus particulièrement sa masse volumique et sa viscosité.

**2 Références normatives**

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NF P 11-300, *Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.*

NF P 94-050, *Sols, reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux — Méthode par étuvage.*

NF P 94-054, *Sols, reconnaissance et essais — Détermination de la masse volumique des particules solides des sols — Méthode du pycnomètre à eau.*

NF P 94-056, *Sols, reconnaissance et essais — Analyse granulométrique — Méthode par tamisage à sec après lavage.*

NF P 94-093, *Sols, reconnaissance et essais — Détermination des références de compactage d'un matériau — Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.*

XP P 94-202, *Sols, reconnaissance et essais — Prélèvement des sols et des roches — Méthodologie et procédures.*

NF EN ISO 22475-1, *Reconnaissance et essais géotechniques — Méthodes de prélèvement et mesurages piézométriques — Partie 1 : Principes techniques des travaux.*

XP GEN ISO/TS 17892-4, *Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules.*

ISO 554, *Atmosphères normales de conditionnement et/ou d'essai — Spécifications.*

**3 Définitions et symboles**

**3.1 Termes et Définitions**

Pour les besoins du présent document les termes et définitions suivants s'appliquent.

**3.1.1**

**perméabilité à l'eau**  
aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient de potentiel



**3.1.2**

**coefficient de perméabilité**

volume de liquide qui traverse un milieu saturé par unité de temps, sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique unitaire, à travers une surface unitaire orthogonale à la direction du flux

**3.1.3**

**gradient hydraulique**

taux de variation de charge hydraulique par rapport à la longueur d'écoulement. Dans la suite du texte, le gradient est exprimé par le rapport de la différence entre la charge hydraulique à l'entrée et la charge hydraulique à la sortie de l'éprouvette, à la hauteur de cette dernière, dans le cas d'un écoulement vertical.

**3.1.4**

**charge hydraulique (ou potentiel hydraulique)**

somme en un point, pour une faible vitesse d'écoulement, du terme  $P/\rho_w g$ , et de la cote altimétrique ( $z$ ) par rapport à un plan horizontal de référence :  $h = P/\rho_w g + z$ ,  $P$  étant la pression de l'eau de masse volumique  $\rho_w$

**3.1.5**

**contre-pression**

surpression appliquée au liquide interstitiel de l'éprouvette

**3.1.6**

**débit**

volume de liquide traversant par unité de temps la section de l'éprouvette perpendiculairement au sens de l'écoulement

**3.1.7**

**incertitude type**

incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type

**3.2 Symboles et unités**

**3.2.1 Paramètres relatifs au phénomène d'écoulement en milieu saturé**

Symbole	Dénomination	Unité	Dimension
$P$	Pression du liquide	Pa	$M.L^{-1}.T^{-2}$
$k$	Coefficient de perméabilité	$m.s^{-1}$	$L.T^{-1}$
$h$	Charge hydraulique	m	L
$\Delta h$	Différence de charge hydraulique entre les extrémités de l'éprouvette	m	L
$h_{\text{mont}}$	Charge hydraulique à l'amont de l'écoulement	m	L
$h_{\text{aval}}$	Charge hydraulique à l'aval de l'écoulement	m	L
$i$	Gradient hydraulique		
$V_0$	Volume de liquide entrant	$m^3$	$L^3$
$V_s$	Volume de liquide sortant	$m^3$	$L^3$
$Q$	Débit d'écoulement	$m^3.s^{-1}$	$L^3.T^{-1}$
$\eta$	Viscosité dynamique du liquide	Pa.s	$M.L^{-1}.T^{-1}$
$z$	Cote altimétrique	m	L

**3.2.2 Paramètres géométriques et généraux**

Symbole	Dénomination	Unité	Dimension
$A$	Aire de la section transversale de l'éprouvette	$m^2$	$L^2$
$a$	Aire de la section transversale du tube réservoir d'alimentation en eau de l'écoulement (essai à charge variable)	$m^2$	$L^2$
$H$	Hauteur de l'éprouvette	m	L
$t$	Temps	s	T
$T^0$	Température	$^{\circ}C$	—
$U_{cp}$	Contre-pression appliquée à l'éprouvette	Pa	$M.L^{-1}.T^{-1}$
$D$	Diamètre de l'éprouvette	m	L

**3.2.3 Paramètres relatifs à la caractérisation du matériau**

Symbole	Dénomination	Unité	Dimension
$D_{\text{max}}$	Dimension maximale des particules solides	m	L
$w$	Teneur en eau pondérale	%	—
$S_r$	Degré de saturation	%	—
$\rho_d$	Masse volumique du matériau sec	$kg.m^{-3}$	$M.L^{-3}$
$\rho_s$	Masse volumique des particules solides	$kg.m^{-3}$	$M.L^{-3}$
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau	$kg.m^{-3}$	$M.L^{-3}$
$g$	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$	$L.T^{-2}$

**4 Principe de l'essai**

L'essai s'effectue sur une éprouvette représentative du matériau, dont le degré de saturation initial est déterminé, placée dans une bague cylindrique rigide de géométrie adaptée à la nature du matériau étudié. Les embases inférieure et supérieure sont munies de disques drainants. La circulation de liquide est établie par l'application d'une différence de charge hydraulique constante ou variable entre les deux faces de l'éprouvette.

La détermination de la valeur du coefficient de perméabilité s'effectue par application de la Loi de Darcy à l'écoulement, une fois l'éprouvette saturée.

**5 Appareillage**

L'appareillage spécifique à l'essai se compose :

- d'un perméamètre à paroi rigide ;
- d'un dispositif de mise en écoulement d'eau avec possibilité d'application d'une contre-pression ;
- d'un système de mesurage de volume et de pression.

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'utilisation des appareillages courants pour l'extraction de l'échantillon non remanié de son conteneur, ou la reconstitution d'une éprouvette, la taille de l'éprouvette, la détermination de sa teneur en eau et de sa masse volumique.

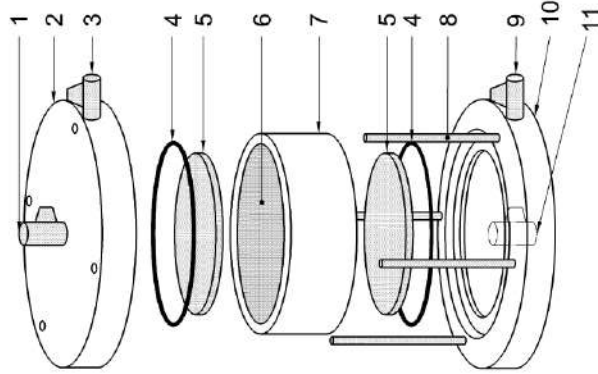
### 5.1 Descriptif du perméamètre

Le perméamètre à paroi rigide est composé des éléments suivants (voir Figure 1)

- une bague cylindrique, non-déformable au regard des pressions appliquées et résistante à la corrosion, de diamètre supérieur ou égal à 65 mm, de hauteur supérieure à 0,4 fois son diamètre intérieur et de dimensions adaptées à la taille des plus gros éléments du matériau (voir 6.1.1) ;

NOTE La bague peut être constituée par le moule PROCTOR ou CBR lorsqu'il s'agit d'un essai sur un matériau reconstitué.

- deux embases qui sont solidaires de la bague ou reliées à celle-ci, permettant d'assurer une étanchéité ;
- deux disques drainants non compressibles, chimiquement neutres, résistants à la corrosion et de perméabilité très supérieure à celle de l'éprouvette, complétés par un papier filtre au contact avec l'éprouvette ;
- un dispositif de purge d'air, disposé sur chacun des circuits d'eau à l'amont et à l'aval.



#### Légende

- |   |                                    |    |                      |
|---|------------------------------------|----|----------------------|
| 1 | Vanne de purge                     | 7  | Bague                |
| 2 | Embase supérieure                  | 8  | Goujons de fixation  |
| 3 | Vanne de sortie                    | 9  | Vanne de purge       |
| 4 | Joint torique                      | 10 | Embase inférieure    |
| 5 | Disque drainant avec papier filtre | 11 | Vanne d'alimentation |
| 6 | Éprouvette                         |    |                      |

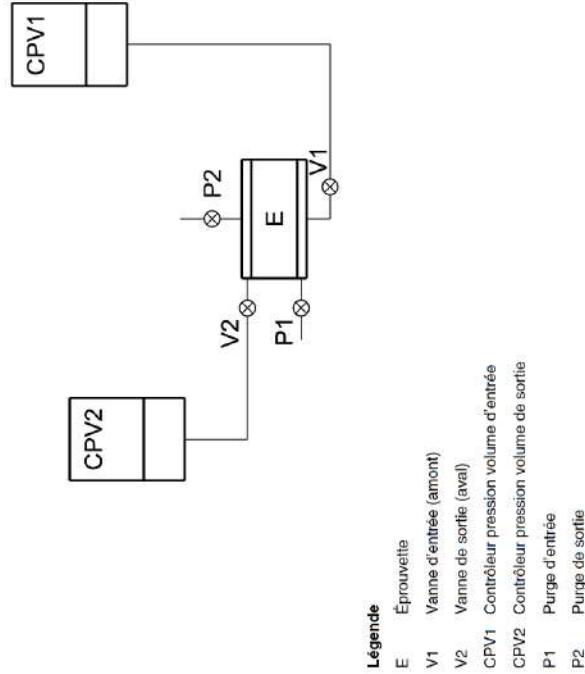
Figure 1 — Schéma des différents éléments constituant le perméamètre à paroi rigide — Exemple

### 5.2 Dispositif de saturation et de mise en écoulement

#### 5.2.1 Charge hydraulique constante

Le dispositif utilisé pour la saturation et la mise en écoulement comprend (voir Figure 2) :

- à l'amont (CPV1) : un réservoir d'alimentation en eau à charge maintenue constante ;
- à l'aval (CPV2) : un réservoir à niveau constant, avec un dispositif d'application de la contre-pression utilisé pendant la phase de saturation.
- Chacun de ces dispositifs assure une stabilité de la charge hydraulique avec un écart inférieur à 1 % de la charge hydraulique.



#### Légende

- |      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| E    | Éprouvette                           |
| V1   | Vanne d'entrée (amont)               |
| V2   | Vanne de sortie (aval)               |
| CPV1 | Contrôleur pression volume d'entrée  |
| CPV2 | Contrôleur pression volume de sortie |
| P1   | Purge d'entrée                       |
| P2   | Purge de sortie                      |

Figure 2 — Schéma de principe du dispositif d'essai

#### 5.2.2 Charge hydraulique variable

Le dispositif utilisé pour la saturation est identique à celui décrit en 5.2.1.

Pour la phase de mise en écoulement, le dispositif comprend :

- à l'amont : un tube réservoir rectiligne vertical de faible section  $a$  par rapport à celle de l'éprouvette  $A$  de diamètre supérieur ou égal à 3 mm, et que l'on peut choisir dans la fourchette de  $0,005 A \leq a \leq 0,01 A$ ,
- à l'aval : un réservoir à niveau constant, avec un dispositif d'application de la contre-pression utilisé pendant la phase de saturation.

Les tubes du dispositif de mesure à charge variable doivent avoir une rigidité suffisante pour que la mesure de volume soit insensible à la variation de pression en cours d'essai. La dilatation volumique des tubulures doit rester inférieure à 1/1000 du volume mesuré.



### 5.3 Dispositifs de mesurage

#### 5.3.1 Masse

La mesure des masses est faite au moyen d'une balance de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser. Les pesées sont effectuées avec une incertitude type inférieure ou égale à 1/3 000 de la valeur mesurée.

#### 5.3.2 Temps

La mesure du temps est faite par un chronomètre donnant au moins la seconde.

#### 5.3.3 Volume

Pendant la phase de circulation, les volumes de liquide entrant et sortant de l'éprouvette sont mesurés par deux dispositifs de variation de volume. L'incertitude type sur la mesure du volume ne doit pas excéder 0,2 cm<sup>3</sup>.

#### 5.3.4 Dimensions de l'éprouvette

Les caractéristiques géométriques de l'éprouvette (diamètre, hauteur) sont mesurées avec une incertitude-type inférieure ou égale à 1/1 000 de la valeur mesurée.

L'aire de la section transversale de l'éprouvette est déterminée par calcul.

#### 5.3.5 Charge hydraulique

La mesure de la différence de charge hydraulique appliquée est faite :

- 1) soit par lecture directe du niveau d'eau en m. La conversion de la pression en une hauteur d'eau par rapport à la cote du capteur se fait par la relation :
- 2) soit par un capteur de pression différentielle branché entre les circuits amont et aval de l'écoulement.

La charge hydraulique est exprimée en une hauteur d'eau en m. La conversion de la pression en une hauteur d'eau par rapport à la cote du capteur se fait par la relation :

$$h = P/\rho \cdot g \cdot w$$

Lorsque la mesure des charges hydrauliques est faite respectivement en amont et en aval d'un dispositif de mesure de la variation de volume, ce dernier ne doit pas affecter la mesure de pression.

NOTE Dans le cas de l'utilisation d'un tube réservoir gradué dans lequel on lit le niveau d'eau, la lecture se fait au bas du ménisque avec une incertitude type inférieure à 0,5 mm.

La variation en fonction du débit des pertes de charges associées à ce dispositif est déterminée par étalonnage. L'ensemble des circuits hydrauliques d'alimentation et d'évacuation ainsi que les disques drainants ne doivent pas induire une perte de charge supérieure à 2 mm pour les débits considérés.

### 5.4 Liquide d'essai

Le liquide d'essai est l'eau potable du réseau (conductivité électrique comprise entre 100 µS/cm et 1 000 µS/cm et pH compris entre 6 et 8). Cette eau, obligatoirement désaérée, est utilisée pour la saturation de l'éprouvette ainsi que pour l'écoulement pendant l'essai. Sa température doit être voisine de celle du local pendant la phase de mesure de perméabilité (écart maximal de température inférieure ou égal à 4 °C).

Sur requête particulière exprimée par le demandeur d'essai, des eaux d'autre nature peuvent également être utilisées : eau prélevée sur le terrain ou solution aqueuse de composition chimique spécifique. Dans tous les cas, la nature et l'origine du liquide utilisé doivent être clairement mentionnées dans le compte rendu de l'essai.

### 5.5 Local d'essai

La température de la salle d'essai est maintenue dans un intervalle de  $\pm 2$  °C pendant la durée de l'essai par rapport à une température moyenne voisine de 20 °C. L'appareillage doit être protégé des courants d'air et de l'ensoleillement direct.

### 5.6 Matériel complémentaire

Il s'agit de :

- un pied à coulisse ;
- un touret ;
- un carottier ;
- du papier filtre ;
- des moules et des accessoires destinés à la confection des éprouvettes reconstituées, selon la NF P 94-093 ;
- un indicateur du pH de l'eau d'essai (papier avec échelle colorimétrique par exemple) ;
- un conductivimètre ;
- un thermomètre ;
- une pompe à vide ou un dispositif équivalent ;
- une balance ;
- un chronomètre.

## 6 Mode opératoire

### 6.1 Préparation de l'éprouvette

Le diamètre  $D$  de l'éprouvette ne doit pas être inférieur à 65 mm. Sa hauteur doit être supérieure ou égale à 0,4 fois son diamètre et au moins à 7 fois la dimension des plus gros éléments du matériau.

L'éprouvette est soit carottée au moyen de la bague du perméamètre, soit taillée avec soin aux dimensions de la bague dans laquelle elle est introduite. Les techniques de préparation de l'éprouvette et la mise en place dans la bague du perméamètre sont décrites en Annexe A.

### 6.2 Mise en eau et saturation de l'éprouvette

#### 6.2.1 Préparation des disques drainants

Avant chaque essai les disques drainants sont débarrassés de toute particule de matériau par un nettoyage sous pression d'eau ou en utilisant un procédé ultrasonique.

Les disques drainants sont saturés soit à la pompe à vide (dépression de 50 kPa au moins) avec l'eau de saturation pendant 30 min, soit en les faisant bouillir dans de l'eau pendant 10 min au moins. Avant de positionner la bague contenant l'éprouvette sur l'embase inférieure, on établit une circulation d'eau afin d'éliminer l'air piégé en faisant apparaître un film d'eau sur toute la surface de la pierre poreuse. On place alors le papier filtre sur le disque drainant inférieur en s'assurant de sa saturation. Après installation de l'éprouvette, on procède à la mise en place successivement du papier filtre, du disque drainant et de l'embase supérieurs.

#### 6.2.2 Montage de l'éprouvette dans le perméamètre

L'éprouvette, dans sa bague, est placée entre les embases et l'ensemble est solidarisé au moyen de goujons.



### 6.2.3 Saturation de l'éprouvette

La saturation des éprouvettes est effectuée avec de l'eau désaérée avant la phase d'écoulement. Une circulation d'eau est établie sous une valeur du gradient hydraulique définie dans le Tableau 1.

**Tableau 1 — Gradient hydraulique recommandé pour la phase de saturation en fonction du coefficient de perméabilité présumé du matériau**

Coefficient de perméabilité (m/s)	Gradient hydraulique recommandé
$10^{-5}$ à $10^{-7}$	2
$10^{-7}$ à $10^{-9}$	10
$< 10^{-9}$	25

La contre pression est appliquée par paliers croissants de valeurs indicatives suivantes exprimées en kPa : 50 — 100 — 200 — 400. Les quantités d'eau absorbées ou expulsées sont notées. La fin de chaque palier est atteinte lorsque la variation de volume d'eau absorbé ou expulsé en fonction du temps tend à se stabiliser.

La phase de saturation est poursuivie jusqu'au temps  $t_0$  où l'écart entre la mesure du débit entrant et celle du débit sortant est inférieur à 10 % du débit entrant dans l'éprouvette.

**NOTE** La saturation peut aussi être effectuée hors banc de mesure. Dans ce cas, l'ensemble éprouvette plus cellule de perméabilité vannes ouvertes est immergé dans une enceinte contenant le liquide d'essai et dans laquelle il est possible d'appliquer progressivement une dépression jusqu'à 70 kPa pendant 24 heures. Après arrêt du pompage, l'enceinte est maintenue fermée pendant 24 heures. À l'issue de ce cycle et après ouverture de l'enceinte, l'ensemble est conservé au moins 2 heures à la pression atmosphérique. À la fin de cette étape, les vannes sont fermées sous eau et la cellule peut être montée sur le banc de mesure.

### 6.3 Phase de mesure

#### 6.3.1 Charge constante

La mise en circulation du liquide dans l'éprouvette s'effectue en appliquant une différence de charge hydraulique entre ses deux faces au temps  $t_0$ .

À défaut de spécification particulière, on adaptera les gradients du Tableau 2 en fonction de la perméabilité présumée.

**Tableau 2 — Ordre de grandeur de gradients hydrauliques pendant la phase de mesure, en fonction du coefficient de perméabilité présumé du matériau**

Coefficient de perméabilité (m/s)	Gradient hydraulique recommandé
$> 1,10^{-6}$	5
$1,10^{-6}$ à $1,10^{-8}$	20
$1,10^{-8}$ à $1,10^{-10}$	50
$< 1,10^{-10}$	100

Le régime hydraulique d'écoulement est considéré permanent ou établi au bout d'une durée  $t_p - t_0$ .  $t_p$  est le temps correspondant au début de la phase d'évolution linéaire des volumes entrant  $V_e$  et sortant  $V_s$  dans les graphes en fonction du temps.

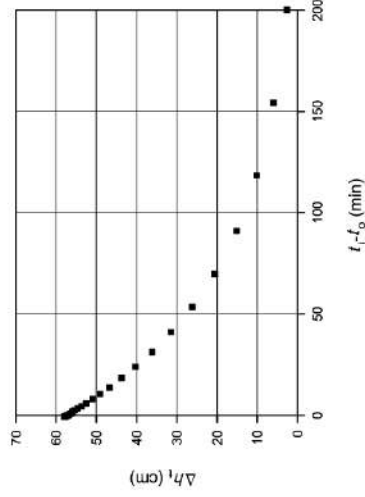
Le volume entrant  $V_e$  et le volume sortant  $V_s$  sont mesurés sur le même intervalle de temps  $(t_j - t_p)$ . À chaque instant  $t_j$ , la température du liquide, à défaut celle du local, est mesurée.

#### 6.3.2 Charge variable

La mise en circulation de l'eau dans l'éprouvette s'effectue en appliquant une différence de charge hydraulique initiale  $\Delta h_0$  entre ses deux faces au temps  $t_0$ .

Aux instants  $(t_j - t_0)$  sont relevées les valeurs  $\Delta h_j$  de la différence de charge hydraulique correspondant au niveau d'eau dans le tube réservoir.

Il est nécessaire de disposer d'au moins 30 points de mesure régulièrement répartis sur la courbe représentant la variation de charge entre les deux faces de l'éprouvette, distribués selon une échelle logarithmique ou une échelle géométrique tout au long de cette phase (Voir Figure 3).



**Figure 3 — Exemple de relevé de mesures brutes en fonction du temps**

#### 6.4 Critères d'arrêt de l'essai

Pour l'essai à charge constante, on trace au fur et à mesure de l'avancement de l'essai la courbe de variation des volumes entrant  $V_e$  du volume sortant  $V_s$  en fonction du temps. L'essai est arrêté lorsque la linéarité est vérifiée. Pour l'essai à charge variable, on trace la courbe de variation de la charge en fonction du temps en graphique semi-logarithmique. Les mesures sont poursuivies au moins jusqu'à ce que  $\Delta h_i = 0,25 \Delta h_0$ . L'essai est arrêté si la courbe obtenue est linéaire. Dans le cas contraire, l'essai est reconduit à partir de la phase 6.3.2.

#### 6.5 Démontage de l'éprouvette

Procéder à la fermeture des vannes.

Peser la bague avec l'éprouvette, après avoir retiré l'excès de liquide sur ses faces au moyen d'un papier filtre.

Déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon NF P 94-050.

**NOTE** Si l'essai a été effectué sur une éprouvette de matériau non remanié avec introduction d'un produit de collage entre l'éprouvette et la bague : peser l'ensemble comme en 6.1. La détermination de la teneur en eau finale n'est faite que sur une partie de l'éprouvette si le produit de collage est sensible au moyen de dessiccation.

## 7 Expression des résultats

### 7.1 Calcul pour les essais à charge constante

À partir des relevés de mesures pendant la phase d'écoulement, calculer :

- la différence  $\Delta h$  entre les charges hydrauliques en entrée et sortie de l'éprouvette imposées par les contrôleurs pression volume CPV1 et CPV2 ; on tiendra compte des pertes de charge du dispositif de mesure pour le débit considéré ;
- les volumes cumulés entrés  $V_e$  et sortis  $V_s$  sur l'intervalle de temps  $(t_j - t_p)$  ;
- le gradient hydraulique  $i = \Delta h / H$ .

Seules sont prises en compte pour le calcul du coefficient de perméabilité les mesures des grandeurs faites au-delà du temps  $t_p$  nécessaire à l'établissement de l'écoulement, soit :

$$k_f = \frac{(V_e + V_s) \cdot H}{2 \cdot (t_j - t_p) \cdot \Delta h \cdot A}$$

### 7.2 Calcul pour les essais à charge variable

On applique la relation suivante sur la droite obtenue sur le diagramme semi-logarithmique tracé en 6.4.

$$k_f = \frac{\sigma \cdot H \cdot \ln \frac{\Delta h_{j-1}}{\Delta h_j} \cdot 1}{A \cdot \Delta h_j \cdot (t_j - t_{j-1})}$$

où :

$\Delta h_{j-1}$  et  $\Delta h_j$  sont les différences de charge hydraulique entre les extrémités de l'éprouvette respectivement aux temps  $t_{j-1}$  et  $t_j$ .

### 7.3 Expression du résultat

La valeur du coefficient de perméabilité  $k_f$  doit être corrigée en fonction de la température qui influe sur la viscosité  $\eta$  de l'eau traversant l'éprouvette. On considère habituellement une température de référence de 20 °C. Les valeurs numériques du rapport  $\eta_{T^{\circ}} / \eta_{20^{\circ}}$  sont données en Annexe B. La correction à apporter par rapport à la valeur mesurée à une température  $T^{\circ}$  se détermine ainsi :

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = k_{T^{\circ}} \cdot \frac{\eta_{T^{\circ}}}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}}$$

La valeur du coefficient de perméabilité est obtenue par la moyenne de  $n_b$  valeurs  $k_f$ .

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{n_b} \sum_{f=1}^{n_b} k_{f,20^{\circ}\text{C}}$$

## 8 Procès verbal d'essai

Le procès verbal d'essai comporte les informations minimales suivantes :

- la référence au présent document NF X 30-441 ;
- l'identification de l'organisme et de l'opérateur qui a procédé à l'essai ;
- le numéro du dossier correspondant ;
- la provenance de l'échantillon diquél a été extraite l'éprouvette soumise à l'essai : site, numéro du sondage, profondeur ou cote par rapport à un repère précisé ;
- classification selon NF P 11-300 de la formation dont est issu l'échantillon : au minimum sont renseignés la classe, le  $D_{\text{max}}$  et les passants (pourcentages) à 50 mm, 20 mm, mm et 80  $\mu\text{m}$  ;
- classe de qualité du prélèvement selon XP P 94-202 ;
- les caractéristiques de l'éprouvette avant et après essai : dimensions (diamètre et hauteur), masse volumique sèche  $\rho_d$ , teneur en eau  $w$ , degré de saturation  $S_r$  initial et final, valeur mesurée ou estimée de la masse volumique des particules solides  $\rho_s$  ;
- les dates et heures (hh:mm:ss) de mise en écoulement et de fin de l'écoulement ;
- l'origine de l'eau à la date de l'essai ;
- les températures minimale et maximale du local d'essai relevées pendant l'essai ;
- les observations liées à la réalisation de l'essai ainsi que les incidents ou détails opératoires non prévus dans le présent document et susceptibles d'avoir une incidence sur les résultats.

En plus des informations minimales citées plus haut, doivent figurer :

- la différence de charge entre l'amont et l'aval de l'éprouvette ;
- la valeur de la contre-pression éventuelle appliquée  $u_{cp}$  ;
- la nature et l'origine du liquide utilisé désaéré, ainsi que son pH ;
- les observations faites sur l'éprouvette (hétérogénéités, litage, etc.) ainsi que les détails opératoires non prévus et susceptibles d'avoir une influence sur le résultat ;
- en plus des informations générales mentionnées plus haut, la feuille d'essai comprenant le tableau des mesures brutes en fonction du temps des volumes entrant et sortant et de la température.
- l'origine des temps correspondant aux mesures permettant le calcul de la perméabilité  $k$  ;
- la valeur du coefficient de perméabilité  $k$ .

Des exemples de procès-verbal sont donnés Figures 4 et 5.

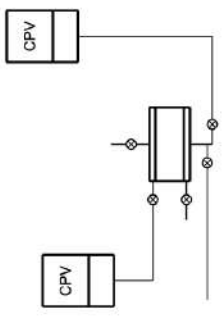
Organisme : Essai réalisé selon  
Norme : NF X 30-441

**FICHE D'ESSAI**

**ESSAI DE PERMEABILITE AU PERMEAMETRE A PAROI RIGIDE**  
Essai à charge constante

Site : Matériau  
 Nature : Provenance :  
 Ref. Affaire : Classification matériau (NF P 11-300) :  
 Date : Classe de qualité (XP P 94-202) :  
 Opérateur : D<sub>max</sub> (mm) :  
 Référence de l'essai :

Mesures brutes des volumes				
Temps	Entrant	Sortant	T° C	Observations



Hauteur de l'éprouvette H (mm) : Masse volumique sèche (kg/m<sup>3</sup>) :  
 Diamètre de l'éprouvette (mm) : Charge hydraulique (m) :  
 Teneur en eau (%) initiale : Gradient hydraulique :  
 Degré de saturation (%) initial : Valeur de la contre-pression (m) :  
 finale :

Temps	Volumen entrant et sortant (cm <sup>3</sup> )

Observations en fin d'essai : Degré de saturation final (%) :

Durée de la phase de saturation préalable : Coefficient de perméabilité (ms) à 20 °C :  
 Méthode de saturation préalable :  
 Température dans le local d'essai (°C) : moyenne / mini-Maxi :  
 Nature et origine du liquide d'essai :

Figure 4 — Exemple de fiche d'essai — charge constante

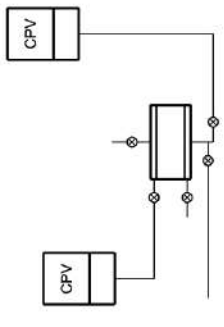
Organisme : Essai réalisé selon  
Norme : NF X 30-441

**FICHE D'ESSAI**

**ESSAI DE PERMEABILITE AU PERMEAMETRE A PAROI RIGIDE**  
Essai à charge variable

Site : Matériau  
 Nature : Provenance :  
 Ref. Affaire : Classification matériau (NF P 11-300) :  
 Date : Classe de qualité (XP P 94-202) :  
 Opérateur : D<sub>max</sub> (mm) :  
 Référence de l'essai :

Mesures brutes des charges				
Temps	Δh	H	T° C	Observations



Hauteur de l'éprouvette H (mm) : Masse volumique des grains (kg/m<sup>3</sup>) :  
 Diamètre de l'éprouvette (mm) : Charge hydraulique (m) :  
 Teneur en eau (%) initiale : Gradient hydraulique :  
 Degré de saturation (%) initial : Valeur de la contre-pression (m) :  
 Masse volumique sèche (kg/m<sup>3</sup>) : finale :

Temps	Charge hydraulique (cm)	Ln(Δh)	Temps

Observations en fin d'essai : Degré de saturation final (%) :

Durée de la phase de saturation préalable : Coefficient de perméabilité (ms) à 20 °C :  
 Méthode de saturation préalable :  
 Température dans le local d'essai (°C) : moyenne/mini-Maxi :  
 Nature et origine du liquide d'essai :

Figure 5 — Exemple de fiche d'essai — charge variable



## Annexe A

(normative)

### Confection de l'éprouvette

#### A.1 Critères de constitution de l'éprouvette

L'échantillon destiné au compactage doit être représentatif de la fraction granulométrique in situ et doit respecter les critères de la norme d'analyse granulométrique (XP CEN ISO/TS 17892-4).

Si, dans un échantillon, la fraction d'éléments supérieurs à 20 mm est supérieure à 40 de la masse de matériau, l'éprouvette doit être obligatoirement confectionnée à partir d'un échantillon non écrité et respecter les critères dimensionnels donnés en 6.1.1.

Pour les échantillons de matériaux se présentant en mottes, l'échantillon est fractionné, préalablement au compactage, en éléments de l'ordre de 20 mm.

Le Tableau A.1 donne des recommandations pour la préparation des éprouvettes à partir des principaux matériaux fins et de leur classification.

Tableau A.1 — Tableau de recommandations pour la préparation d'essais en laboratoire sur les principaux matériaux fins

Type de matériau	Classe du matériau selon NF P 11-300	Recommandations
Limons, argiles et marnes peu plastiques sans éléments grossiers	A <sub>1</sub>	Pas d'écrêtage nécessaire dans la majorité des cas, fractionnement des mottes en éléments de 20 mm
Sols sableux et graveleux avec fins	B <sub>1</sub>	Respecter les critères d'écrêtage pour les matériaux à forte fraction de graves, fractionnement des mottes en éléments de 20 mm
Sols comportant des fines et des gros éléments (argiles à silex...)	C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> B <sub>1</sub>	Respecter les critères d'écrêtage, fractionnement des mottes en éléments de 20 mm
Craie peu dense et altérée	F <sub>13</sub>	Écrêtage nécessaire en fonction de la taille des plus gros éléments et de leur fragmentabilité au compactage
Roches argilieuses : marnes très fragmentables	F <sub>34</sub>	Écrêtage nécessaire, fonction de la taille des plus gros éléments et de leur dégradabilité et fragmentabilité au compactage

#### A.2 Compactage direct dans la bague du perméamètre

Le compactage du matériau est effectué directement dans la bague en utilisant une embase de compactage et une rehausse (Figure A.1).

Les opérations suivantes doivent être effectuées :

- enduire la paroi interne de la bague d'une fine couche de graisse non dégradable au liquide d'essai pour assurer l'étanchéité périphérique ;
- peser la bague ;
- assembler la bague sur l'embase en plaçant une cale de surélévation d'épaisseur minimale 3 mm et de diamètre interne identique à celui de la bague ; mettre en position la rehausse et solidariser l'ensemble ;

- compacter le matériau selon la norme P 94-093 ;
- démonter l'ensemble du dispositif ;
- araser les excédents de matériau sur les deux faces de l'éprouvette en opérant du centre vers la périphérie au moyen d'une règle biseautée ;
- scarifier légèrement la surface des deux extrémités de l'éprouvette (par exemple au moyen d'un lame de scie à métaux) ;
- peser l'éprouvette avec sa bague ;
- placer la bague contenant l'éprouvette dans le perméamètre.

#### A.3 Confection de l'éprouvette et mise en place dans la bague du perméamètre

Pour un échantillon non remanié de classe 1 ou 2 selon NF EN ISO 22475-1 ou reconstitué hors du perméamètre, procéder aux opérations suivantes :

- déconditionner l'échantillon et découper une longueur supérieure de 2 cm à la hauteur finale de la bague et dresser une des faces perpendiculairement au sens d'écoulement
- centrer l'échantillon sur le touret et découper l'éprouvette de manière à obtenir une éprouvette cylindrique de diamètre inférieur au diamètre intérieur de la bague ; l'écart entre ces diamètres est de l'ordre de 5 mm ; il peut être réduit ou augmenté en fonction de la nature du produit d'étanchéité qui viendra combler le vide annulaire (voir exemple en Annexe C).
- calculer l'aire de la section transversale de l'éprouvette à partir d'au moins six mesures du diamètre, prises sur au moins deux diamètres perpendiculaires et à trois niveaux différents ;
- positionner l'éprouvette coaxiale à la bague surélevé par une cale de 3 mm d'épaisseur minimum, pour araser ultérieure (Figure A.1) ;
- remplir l'annulaire par le produit d'étanchéité (voir Annexe C) ; pendant la durée de la prise du produit d'étanchéité, l'éprouvette est protégée des risques de dessiccation ;
- araser les excédents de matériau sur les deux faces de l'éprouvette en opérant du centre vers la périphérie au moyen d'une règle biseautée ;
- scarifier légèrement la surface des deux extrémités de l'éprouvette (par exemple au moyen d'un lame de scie à métaux) ;
- peser la bague avec son éprouvette.

**Annexe B**  
(informative)

**Correction de viscosité**

Le coefficient de perméabilité  $k$  est directement lié à la viscosité de l'eau. Plus la valeur de la viscosité est élevée, plus la perméabilité est faible. Il y a donc lieu de ramener la valeur calculée de  $k$  à une température de référence. Conventionnellement, le coefficient de perméabilité  $k$  est donné, pour une température de l'eau s'écoulant dans le matériau de 20 °C, à partir de la formule suivante :

$$k_{20} = k_{T^{\circ}} \cdot \frac{\eta_{T^{\circ}}}{\eta_{20}}$$

où :

$k_{20}$  est le coefficient de perméabilité à 20 °C ;

$k_{T^{\circ}}$  est le coefficient de perméabilité à la température  $T^{\circ}$  ;

$\eta_{20}$  est la viscosité dynamique à 20 °C ;

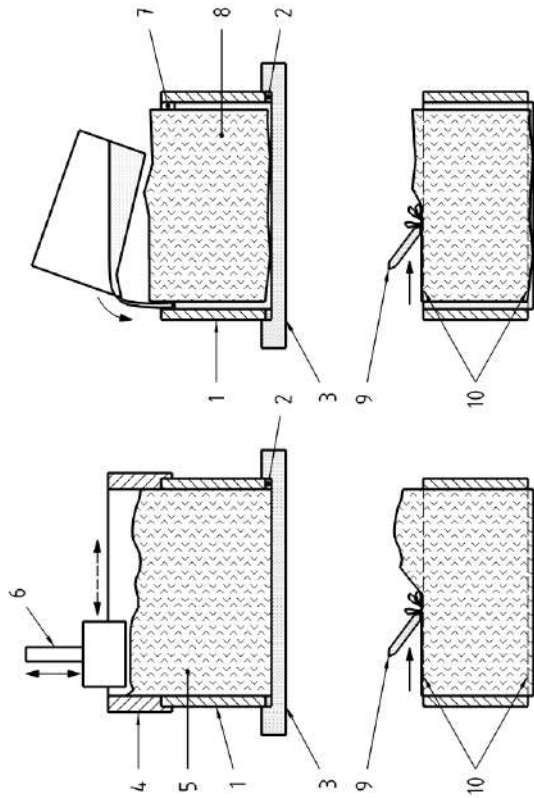
$\eta_{T^{\circ}}$  est la viscosité dynamique à la température  $T^{\circ}$  ;

Les valeurs de  $\eta_{T^{\circ}}$  sont fournies dans le Tableau B.1 et la courbe en Figure B.1 (valeurs à pression atmosphérique), qui s'exprime par :

$$\frac{\eta_{T^{\circ}}}{\eta_{20}} = \exp[2,44 \cdot 10^{-2} (20 - T^{\circ}) + 1,8 \cdot 10^{-4} (20 - T^{\circ})^2 + 2,5 \cdot 10^{-6} (20 - T^{\circ})^3]$$

où :

$T^{\circ}$  est la température de l'eau, en degrés Celsius, dans le local d'essai, et  $\eta_{20} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .



**Légende**

- 1 Bague
- 2 Cale de surélévation
- 3 Embase
- 4 Renhausse de compactage
- 5 Matériau reconstitué (a)
- 6 Dôme de compactage
- 7 Produit d'étanchéité
- 8 Matériau intact (b)
- 9 Règle à araser
- 10 Faces arasées de l'éprouvette

**Figure A.1** — Schémas de préparation de l'éprouvette : a) Compactage direct dans la bague ; b) mise en place d'une éprouvette de matériau dans la bague

T °C	$\eta$ (mPa.s)	T °C	$\eta$ (mPa.s)
0	1,787	16	1,109
1	1,728	17	1,081
2	1,671	18	1,053
3	1,618	19	1,027
4	1,567	20	1,002
5	1,519	21	0,978
6	1,472	22	0,955
7	1,428	23	0,932
8	1,386	24	0,911
9	1,346	25	0,890
10	1,307	26	0,870
11	1,271	27	0,851
12	1,235	28	0,833
13	1,202	29	0,815
14	1,169	30	0,797
15	1,139	31	0,781

**Figure B.1** — Valeurs de la viscosité dynamique de l'eau, à la pression atmosphérique, entre 0 °C et 31 °C

**Annexe C**  
(informative)

**Produits de collage pour échantillon non remanié**

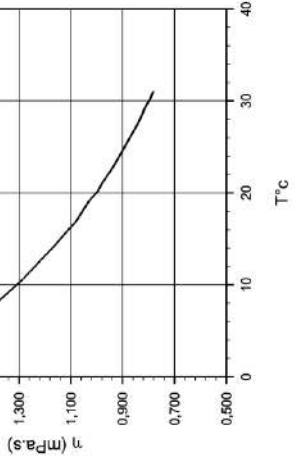


Figure B.2 — Courbe de variation de la viscosité dynamique de l'eau à la pression atmosphérique

La mise en place de l'éprouvette par collage dans la bague impose de disposer d'un matériau approprié pour réaliser cette opération.

**C.1 Propriétés du matériau de collage**

Ce matériau assure la fixation mécanique de l'éprouvette à la bague et l'éanchéité vis à vis de la charge hydraulique appliquée à l'intérieur de l'appareil. Ses propriétés doivent être les suivantes :

- réalisation à partir de composants facilement mis en œuvre en laboratoire ;
- consistance de liquide visqueux pour la phase de mise en place (> 10<sup>2</sup> mPa.s, afin d'éviter une infiltration dans le matériau). Si un risque de pénétration est à craindre, enduire la paroi périphérique de l'échantillon d'un film de graisse silicone ou équivalent ;
- temps de prise à température ambiante inférieur à 1 heure et protéger l'éprouvette contre la dessiccation pendant cette phase de préparation de l'essai ;
- coefficient de perméabilité inférieur à celui estimé de l'éprouvette (si possible coefficient de perméabilité de l'ordre de 10 fois plus faible) ;
- bonne adhérence à l'éprouvette et à la bague (pas de retrait), et ne pas être hydrophobe ;
- possibilité d'être détaché de la bague sans difficulté après démontage du dispositif d'essai.

**C.2 Nature des matériaux potentiellement utilisables**

Typiquement on utilise les coulis à base de ciment ou des résines silicone.

**C.2.1 Autres produits**

D'autres produits peuvent être retenus, à base de résines époxy, etc.

**C.3 Validité des matériaux de collage**

Il est nécessaire, lors de la mise en œuvre des matériaux de collage, que l'opérateur puisse satisfaire aux points suivants :

- respecter la préparation du coulis conformément aux recommandations du fournisseur, ou pouvoir justifier, par des essais préalables suffisamment documentés, d'un mode de préparation spécifique ;
- couler, simultanément à l'opération de collage de l'éprouvette, des échantillons témoins de même provenance et de préparation identique, afin de s'assurer de la bonne prise du matériau ;
- fournir une fiche technique succincte du produit utilisé sur demande (informative).



### Annexe D (informative)

#### Contrôle et vérifications de l'appareillage

##### D.1 Contrôle d'étanchéité des circuits d'application de la contre-pression et de mise en charge hydraulique

Le circuit contrôlé inclut l'indicateur de variation de volume, les circuits de contre-pression entre l'indicateur de variation de volume et la cellule, ainsi que les circuits de drainage du bas et du haut de l'éprouvette :

- rincer complètement les circuits avec de l'eau désaérée. Faire fonctionner l'appareil de mesure des variations de volumes deux fois sur sa course totale en injectant ou en absorbant de l'eau à partir d'une des embases, et en remplaçant l'eau des circuits ;
- mettre en pression jusqu'à 0,8MPa le circuit de contre-pression, puis le fermer. Attendre la stabilisation et noter la valeur lue sur l'appareil indicateur de variation de volume ;
- lire à nouveau l'indicateur de variation de volume après avoir laissé le circuit sous la même pression pendant 5 min ;
  - si la variation de volume n'excède pas  $0,1 \text{ cm}^3$ , le circuit est considéré comme exempt de bulles d'air et de fuite ;
  - si la variation de volume est supérieure à  $0,1 \text{ cm}^3$ , il faut purger à nouveau le circuit ou déterminer l'origine de la fuite, la supprimer et recommencer la procédure a).

##### D.2 Contrôle de la perte de charge associée au dispositif de mesure

Les dispositifs d'alimentation en eau, les diamètres des pores des disques drainants, les papiers filtres ne doivent pas induire de pertes de charge supérieures à  $0,1 (h_{\text{amont}} - h_{\text{aval}})$ . La détermination de la courbe de la perte de charge, en fonction du débit, associée au seul dispositif (appareillage complet en remplaçant l'éprouvette par une éprouvette témoin de grande perméabilité) est effectuée dans la configuration d'essai. Elle est utilisée pour la correction de l'écart de charge entre l'amont et l'aval pendant la phase d'essai.

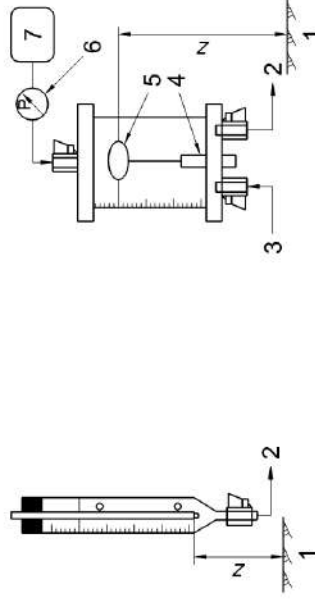
##### D.3 Déformation de la cellule oedométrique sur son bâti de chargement

La mesure de la déformation de la cellule oedométrique est effectuée avec une éprouvette témoin métallique placée entre les deux disques drainants, éventuellement recouverte de papier filtre, en passant par les mêmes paliers des chargement que pour l'essai, afin de déterminer l'amplitude des corrections à prendre en compte.

Cette mesure des déformations de l'appareillage est nécessaire en présence de matériaux gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à 1,6 MPa.

### Annexe E (informative)

#### Exemples de Contrôleurs Pression-Volume (CPV)



a) Tube de Mariotte  
( $h = z$ )

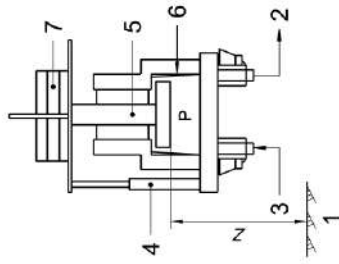
#### Légende

- 1 Plan de référence de la charge hydraulique
- 2 Vers le perméamètre

b) Réservoir pressurisé  
( $h = z + P/(\rho \cdot g)$ )

#### Légende

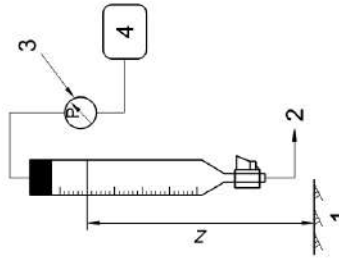
- 1 Plan de référence de la charge hydraulique
- 2 Vers le perméamètre
- 3 Vanne de remplissage
- 4 Capteur de déplacement
- 5 Flotteur
- 6 Manomètre
- 7 Générateur de pression d'azote



c) CPV type «Piston»  
( $h = z$ )

**Légende**

- 1 Plan de référence de la charge hydraulique
- 2 Vanne de remplissage
- 3 Vers le perméamètre
- 4 Capteur de déplacement
- 5 Piston
- 6 Membrane
- 7 Poids



d) ( $h = z + P/\rho g$ )  
(Burette pressurisée)

**Légende**

- 1 Plan de référence de la charge hydraulique
- 2 Vers le perméamètre
- 3 Manomètre
- 4 Générateur de pression d'azote



# TP Essai de cisaillement direct

## Matériel et matériau

Le matériel comprend :

- Deux **demi-boîtes de cisaillement** de 60 mm de diamètre et de 25 mm de hauteur avec un système de centrage des deux demi-boîtes leur conférant le même axe de symétrie intérieur, des plaques drainantes (pierre poreuse) ou non drainante (disque aluminium) à la base des demi-boîtes inférieure et supérieure de 10 mm d'épaisseur, un piston rigide permettant la transmission de l'effort vertical,
- Une **machine de cisaillement** comprenant les dispositifs permettant l'application de l'effort normal sur l'éprouvette, de produire le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps,
- Une **presse de compactage** pour compacter le sol dans les deux demi-boîtes,
- Une **balance** de précision sensible à 5 centigrammes au moins,
- Un **tamis** d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 2 mm,
- Du matériel divers permettant la préparation de l'éprouvette de sol et sa mise en place dans la boîte de cisaillement.

Le matériau est un sable HN31 (voir fiche technique à la fin du fascicule) qui a été préalablement tamisé pour avoir des éléments inférieurs à 2 mm et séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Les caractéristiques des échantillons de sol à préparer sont :

- Hauteur :  $h_0 = 30 \text{ mm}$ ,
- Diamètre :  $D_0 = 60 \text{ mm}$ ,
- Masse volumique apparente sèche :  $\rho_d = 1600 \text{ kg/m}^3$ ,
- Masse volumique spécifique des grains :  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ,
- Teneur en eau :  $w = 7\%$ .

Dès lors, au préalable et la veille du TP, vous devez calculer :

- Masses de sol sec  $m_s$  et d'eau  $m_e$  pour un échantillon dans la boîte de cisaillement,
- Masse de sol humide  $m_h$  à mettre dans la boîte de cisaillement,
- Masses de sol sec  $m_s$  et d'eau  $m_e$  à prendre pour la préparation du sol.

## Manipulation

La préparation du sol est la suivante :

1. Prendre une masse de sol sec permettant de confectionner 4 échantillons de sorte que la masse volumique apparente sèche soit  $\rho_d = 1600 \text{ kg/m}^3$ ,
2. Répandre le sol dans le bac de malaxage prévu à cet effet et humidifier uniformément le sol à une teneur en eau  $w = 7\%$ ,
3. Placer le sol ainsi préparé dans un récipient permettant d'éviter toute variation de la teneur en eau pendant la séance de TP.
4. Prendre la masse de sol humide nécessaire pour atteindre la masse volumique apparente sèche ( $\rho_d = 1600 \text{ kg/m}^3$ ),
5. Mettre en place le sol humide dans la boîte de cisaillement préalablement munie des deux goupilles de maintien et positionner sur le cylindre (penser aux disques d'aluminium),
6. Compacter avec la presse grâce au piston dédié au compactage (attention au retour élastique lors du compactage à la presse),

La mise en place est la suivante :

1. Repositionner le chariot dans la limite de course du capteur horizontale (30 mm)
2. Mettre en place la boîte de cisaillement dans la machine en veillant à connecter la boîte au système de mesure de la force tangentielle et la bloquer dans le chariot à l'aide des vis prévus à cet effet,
3. Mettre en place le piston de chargement (367 g) en partie haute et l'étrier (42,32 N) qui devra être bien mise sur les ciseaux du bras de levier,
4. Mettre en position le capteur de déplacement vertical de sorte à être positionné en demi-course (5 mm) – relevé la valeur donnée par le capteur verticale,
5. Mettre en tension le capteur de force tangentielle,
6. Enlever les goupilles de la boîte de cisaillement,
7. Mettre l'application de la charge ( $m = 1 \text{ kg}$ ,  $2 \text{ kg}$  et  $3 \text{ kg}$ ) sur le plateau de chargement doucement – relevé la valeur donnée par le capteur verticale.
8. Demander à l'enseignant de vérifier la mise en place du dispositif,
9. Lancer l'essai jusqu'à un déplacement du chariot de 6 mm.

Le principe de l'appareillage est schématisé ci-contre. Les conditions d'essais sont les suivantes :

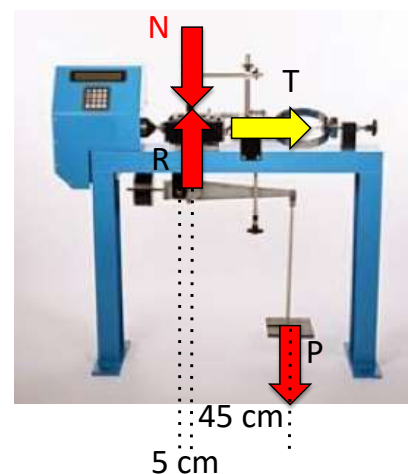
- Vitesse de l'essai :  $1 \text{ mm / min}$ ,
- Type d'essai : non consolidé et non drainé.

Les résultats en format informatique donnent dans l'ordre :

$\Delta h$  : variation de hauteur (capteur de déplacement verticale)

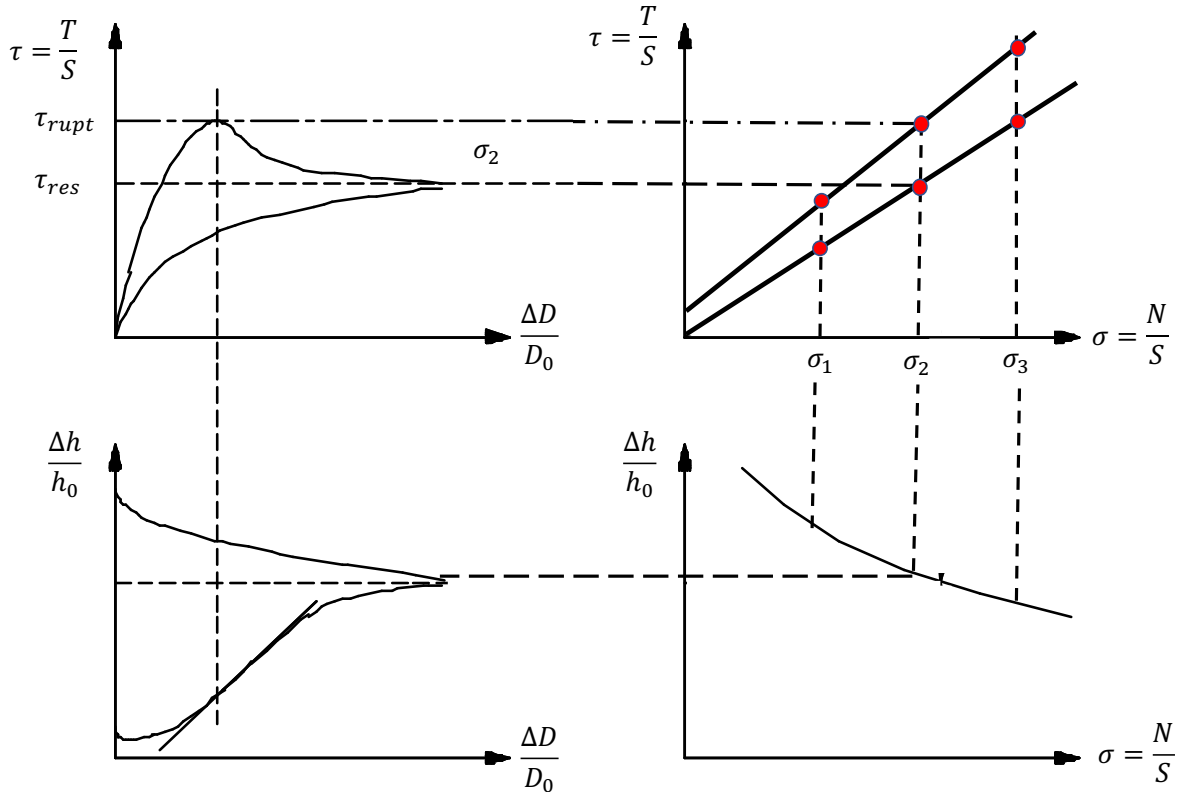
$\Delta D$  : variation de diamètre (capteur de déplacement horizontale)

T : effort tangentiel (capteur de force)



## Résultats

1. Pour chaque essai ( $m = 1 \text{ kg}$ ,  $2 \text{ kg}$  et  $3 \text{ kg}$ ), calculer les contraintes normales  $\sigma$  appliquées en tête d'échantillon et donner l'incertitude  $\Delta\sigma$ .
2. A partir des données issues de chaque essai, tracer les courbes suivantes :



La présentation de ces courbes devra être similaire à la disposition ci-dessus.

3. En déduire la cohésion  $C$  et l'angle de frottement interne  $\phi$  à la rupture et résiduel ainsi que les incertitudes  $\Delta C$  et  $\Delta\phi$ .

## Analyses

1. Pourquoi sommes-nous en conditions non consolidé et non drainé ?
2. L'exécution de l'essai comme proposée dans ce TP respecte t'elle la norme NF P 94-071 en termes de hauteur d'éprouvette et d'effort vertical à appliquer ? Expliquer.
3. Que représente les valeurs en résiduel ? Pourquoi  $C_{res} = 0 \text{ kPa}$  ?
4. Quel est l'angle de rupture du sol dans les conditions d'essai ?
5. Est-ce que 3 essais suffisent pour évaluer  $C_u$  et  $\phi_u$  ?
6. Dans quelle catégorie placez-vous ce sol ?

# Feuille d'essai cisaillement direct

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

Hauteur de l'éprouvette  $h_0$  (mm) :

Diamètre de l'éprouvette  $D_0$  (mm) :

Surface de l'échantillon  $S$  (mm<sup>2</sup>) :

Teneur en eau initiale  $w_i$  (%) :

Teneur en eau finale  $w_f$  (%) :

Poids volumique apparent sec  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Type d'essai : CD  CU  UU

Vitesse d'essai (mm/min) :

Contrainte normale appliquée  $\sigma$  (kPa) :

Déplacements Horizontales $\Delta D$ (mm)	Déplacements Verticales $\Delta h$ (mm)	Force Tangentielle T (kN)	Allure générale des courbes
0,0			<p>Force tangentielle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- à la rupture <math>T_r =</math> _____ kN</li> <li>- résiduelle <math>T_{res} =</math> _____ kN</li> </ul>
0,5			
1,0			
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			

Commentaire :

# Feuille d'essai cisaillement direct

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

Hauteur de l'éprouvette  $h_0$  (mm) :

Diamètre de l'éprouvette  $D_0$  (mm) :

Surface de l'échantillon  $S$  (mm<sup>2</sup>) :

Teneur en eau initiale  $w_i$  (%) :

Teneur en eau finale  $w_f$  (%) :

Poids volumique apparent sec  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Type d'essai : CD  CU  UU

Vitesse d'essai (mm/min) :

Contrainte normale appliquée  $\sigma$  (kPa) :

Déplacements Horizontales $\Delta D$ (mm)	Déplacements Verticales $\Delta h$ (mm)	Force Tangentielle T (kN)	Allure générale des courbes
0,0			<p>Force tangentielle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- à la rupture <math>T_r =</math> _____ kN</li> <li>- résiduelle <math>T_{res} =</math> _____ kN</li> </ul>
0,5			
1,0			
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			

Commentaire :

# Feuille d'essai cisaillement direct

NOM :

GRUPE :

DATE :

NATURE DE L'ECHANTILLON :

Hauteur de l'éprouvette  $h_0$  (mm) :

Diamètre de l'éprouvette  $D_0$  (mm) :

Surface de l'échantillon  $S$  (mm<sup>2</sup>) :

Teneur en eau initiale  $w_i$  (%) :

Teneur en eau finale  $w_f$  (%) :

Poids volumique apparent sec  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) :

Type d'essai : CD  CU  UU

Vitesse d'essai (mm/min) :

Contrainte normale appliquée  $\sigma$  (kPa) :

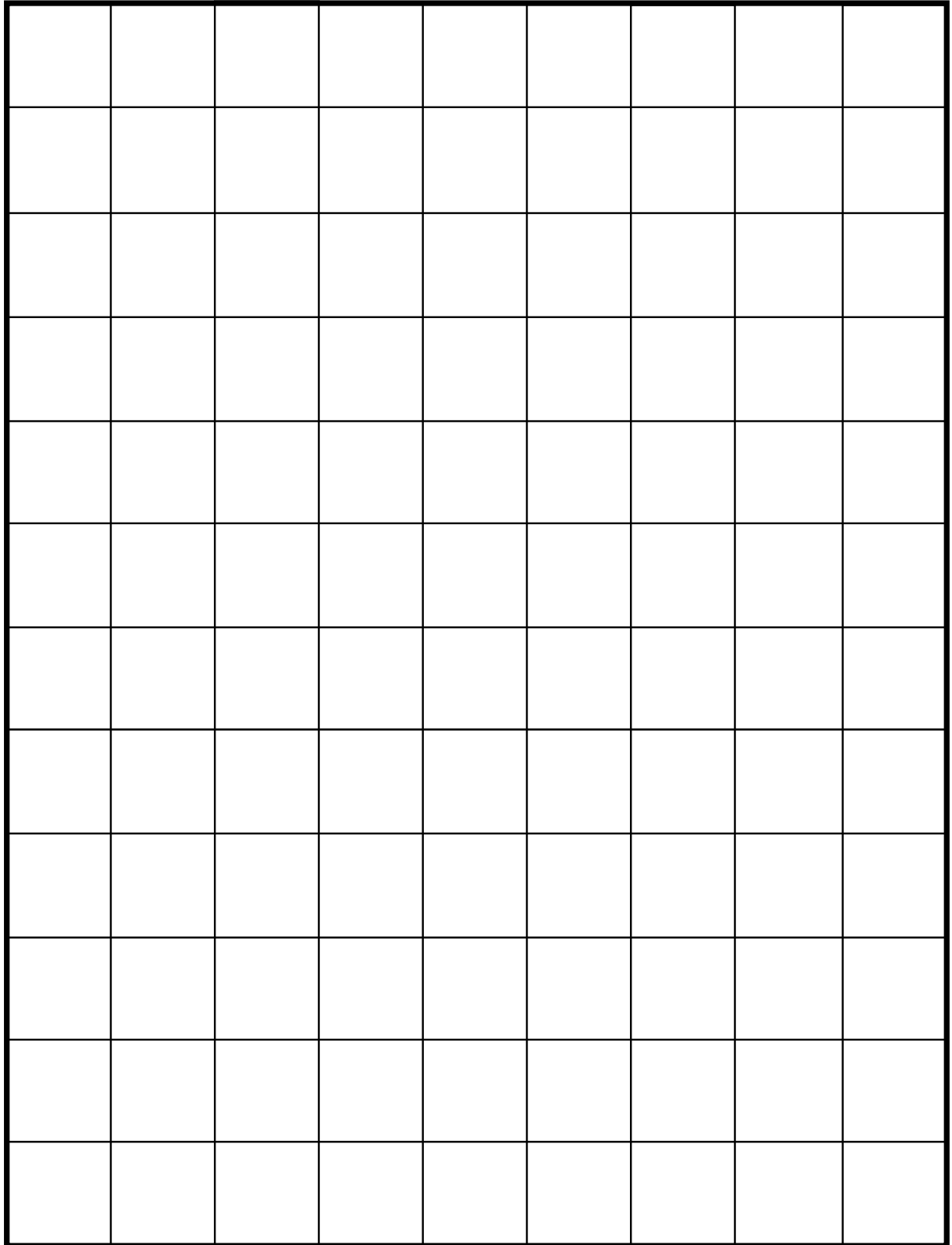
Déplacements Horizontales $\Delta D$ (mm)	Déplacements Verticales $\Delta h$ (mm)	Force Tangentielle T (kN)	Allure générale des courbes
0,0			<p>Force tangentielle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- à la rupture <math>T_r =</math> _____ kN</li> <li>- résiduelle <math>T_{res} =</math> _____ kN</li> </ul>
0,5			
1,0			
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			

Commentaire :

# Droite de Mohr-Coulomb

Contrainte tangentielle  $\tau$  (kPa)

Contraintes normales  $\sigma$  (kPa)





Sols : reconnaissance et essais

**Essai de cisaillement rectiligne à la boîte****Partie 1 : Cisaillement direct**

E : Soil : Investigation and testing — Direct shear test with shearbox apparatus — Part 1 : Direct shear  
 D : Bodenerkündung und Prüfungen — Gerade Kastenscherprüfung — Teil 1 : Direkte Scherbeanspruchung

**Norme française homologuée** par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 5 juillet 1994 pour prendre effet le 5 août 1994.

**correspondance** À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux européens ou internationaux sur le sujet.

**analyse**

Le présent document traite de l'essai de cisaillement rectiligne direct, à la boîte, d'éprouvettes consolidées et cisailées dans des conditions drainées. Il définit les paramètres mesurés et spécifie les caractéristiques de l'appareillage. Il fixe le mode opératoire de l'essai, fournit la méthode de détermination des différents paramètres et précise les résultats à présenter.

**descripteurs**

**Thésaurus International Technique** : sol, essai, essai de cisaillement, conditions d'essai, appareillage, mode opératoire, résistance au cisaillement.

**modifications**

**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	BARNOLD	UNION SYNDICALE GEOTECHNIQUE
M	BLONDEAU	COMITE PROFESSIONNEL DE LA PREVENTION ET DU CONTROLE TECHNIQUE
M	CASSAN	FONDASOL
M	CHAILLLOT	SNCF — DION DE L'EQUIPEMENT
M	DAURELLE	AFNOR
M	DEBATTISA	EDF — CEMETE
M	DORE	MECASOL
M	GONIN	SIMECSOL
M	LEGENDRE	SONDAGE, FORAGE ET FONDATIONS SPECIALES — SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
M	PAREZ	SOL — ESSAI
M	PHILIPPONNAT	CENTRE EXPERIMENTAL DE RECHERCHES ET D'ETUDES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
M	RINCENT	

**A collaboré en tant qu'expert :**

M BLIVET  
 LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE ROUEN — CETE NORMANDIE

**Avant-propos**

Le présent document constitue la partie 1 de la norme d'essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Chaque partie correspond à un essai particulier :  
 — NF P 94-071-1 : Cisaillement direct,  
 — NF P 94-071-2 : Cisaillement alterné.

**1 Domaine d'application**

Le présent document s'applique aux essais de cisaillement rectiligne réalisés à la boîte, dans des conditions drainées sur tous les types de sols naturels, reconstitués ou artificiels, dont la dimension maximale des grains est définie au paragraphe 6.2. L'essai fournit des paramètres de résistance au cisaillement rectiligne des matériaux soumis à essais. Ce document ne s'applique pas au domaine agrépédologique.

**2 Références normatives**

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

- NF P 94-050 Sols : reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en eau pondérale des sols — Méthode par étuvage.
- NF P 94-070 Sols : reconnaissance et essais — Essai à l'appareil triaxial — Généralités et définitions 1).
- NF X 15-016 Encointes et conditions d'essais — Encointes à régulation automatique de la température et de l'humidité.

**3 Symboles**

- A est l'aire de la section transversale de l'éprouvette avant cisaillement, exprimée en centimètres carrés.
- h est la hauteur initiale de l'éprouvette dans la boîte de cisaillement, exprimée en millimètres.
- L est le diamètre intérieur ou côté intérieur de la boîte de cisaillement de section droite circulaire ou carrée, exprimé en millimètres.
- N est l'effort vertical, exprimé en newtons.
- T est l'effort horizontal de cisaillement, exprimé en newtons.
- t<sub>100</sub> est la durée conventionnelle de consolidation de l'éprouvette sous un effort vertical, exprimée en minutes.
- v est la vitesse du déplacement relatif des deux demi-boîtes, exprimée en micromètres par minute.

1) En cours de préparation.

**Sommaire**

	Page
Avant-propos .....	4
<b>1</b> Domaine d'application .....	4
<b>2</b> Références normatives .....	4
<b>3</b> Symboles .....	4
<b>4</b> Principe .....	6
<b>5</b> Appareillage .....	6
5.1 Le bâti .....	7
5.2 La boîte de cisaillement .....	8
5.3 Dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette .....	8
5.4 Dispositif de production du déplacement .....	8
5.5 Système de mesure .....	8
5.6 Matériel complémentaire .....	9
5.7 Local d'essai .....	9
<b>6</b> Mode opératoire .....	9
6.1 Préparation des plaques drainantes .....	9
6.2 Préparation des éprouvettes .....	9
6.3 Réalisation de l'essai .....	10
6.4 Mesurage .....	12
<b>7</b> Expression des résultats .....	12
7.1 Pour chaque éprouvette .....	12
7.2 Pour l'ensemble des éprouvettes .....	14
<b>8</b> Procès-verbal d'essai .....	15

$v_{max}$  est la vitesse maximale de déplacement relatif des deux demi-boîtes, exprimée en micromètres par minute.

$c'_f$  est la cohésion effective pour le critère d'état final, exprimée en kilopascals.

$c'_p$  est la cohésion effective pour le critère de pic, exprimée en kilopascals.

$\delta h$  est la variation de la hauteur de l'éprouvette par rapport à l'état initial, exprimée en millimètres.

$\delta h_c$  est la variation de la hauteur de l'éprouvette en fin de consolidation par rapport à l'état initial, exprimée en millimètres.

$\delta l$  est le déplacement horizontal relatif des deux demi-boîtes, exprimé en millimètres.

$\delta l_f$  est la valeur à l'état final, exprimée en millimètres.

$\delta l_p$  est la valeur au pic, exprimée en millimètres.

$P_d$  est la masse volumique sèche de l'éprouvette, exprimée en kilogrammes par mètre cube ou en mégagrammes par mètre cube.

$\sigma$  est la contrainte normale moyenne appliquée à l'éprouvette, exprimée en kilopascals.

$\sigma'$  est la contrainte normale effective moyenne appliquée à l'éprouvette, exprimée en kilopascals.

$\sigma'_{vo}$  est la contrainte effective verticale du sol en place lors du prélèvement de l'échantillon, exprimée en kilopascals.

$\tau$  est la contrainte tangentielle ou de cisaillement, exprimée en kilopascals.

$\tau_f$  est la résistance au cisaillement, exprimée en kilopascals.

$\tau_{f,f}$  est la valeur à l'état final, exprimée en kilopascals.

$\tau_{f,p}$  est la valeur au pic, exprimée en kilopascals.

$\phi'_f$  est l'angle de frottement effectif pour le critère d'état final, exprimé en degrés.

$\phi'_p$  est l'angle de frottement effectif pour le critère de pic, exprimé en degrés.

$e$  est l'indice des vides.

$P_s$  est la masse volumique des grains, exprimée en kilogrammes par mètre cube ou en mégagrammes par mètre cube.

$d_{max}$  est la plus grande dimension des particules constituant le matériau soumis à essai, exprimée en millimètres.

$w$  est la teneur en eau, exprimée en pourcentage.

Conventions de signe :

- une diminution de la hauteur de l'éprouvette est comptée positivement ;
- les compressions sont positives.

#### 4 Principe

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à :

- appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai,
- produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif  $\delta l$  à vitesse constante,
- mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

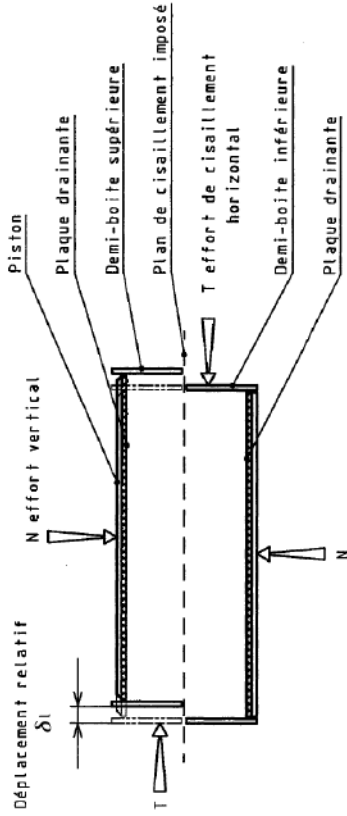
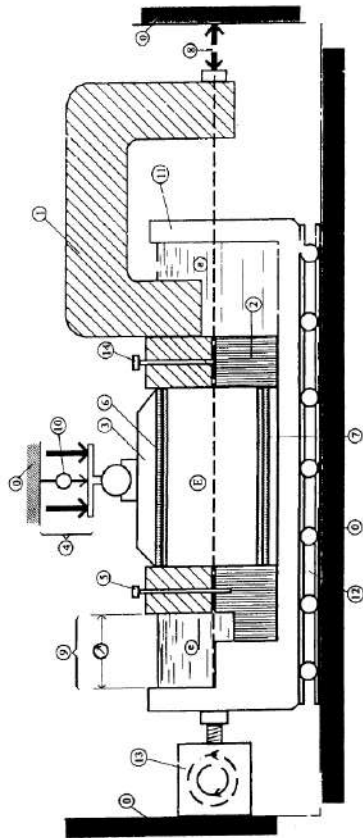


Figure 1 : Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte

#### 5 Appareillage

L'appareillage spécifique à l'essai comprend (voir figure 2) :

- le bâti,
- la boîte de cisaillement,
- le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette,
- le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes,
- le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.



- 0 Bâti
- 1 Demi-boîte supérieure
- 2 Demi-boîte inférieure
- 3 Piston rigide
- 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston
- 5 Solidarisation des demi-boîtes
- 6 Plaque drainante supérieure
- 7 Plaque drainante inférieure amovible
- 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T
- 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal  $\delta h$
- 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical  $\delta h$
- 11 Châssis étanche
- 12 Glissière sans frottement
- 13 Système de déplacement à vitesse constante
- 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte
- e Eau déminéralisée
- E Éprouvette de sol

Figure 2 : Schéma de la boîte de cisaillement — Exemple avec la demi-boîte inférieure mobile

### 5.1 Le bâti

Le bâti indéformable sous l'effet des efforts appliqués supporte la boîte de cisaillement et son châssis et les maintient horizontalement avec une tolérance  $\pm 1^\circ$ .

### 5.2 La boîte de cisaillement

Une boîte de cisaillement comporte les éléments suivants :

- a) deux demi-boîtes (l'une inférieure, l'autre supérieure), cylindriques intérieurement, de même section droite, carrée ou circulaire ( $L = 60 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  ou  $100 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ) et de hauteur compatible avec les indications du paragraphe 6.2 ;
- b) la demi-boîte supérieure est équipée de vis permettant un léger soulèvement ;
- c) un blocage ou une solidarisation des deux demi-boîtes de telle façon qu'elles aient le même axe de symétrie intérieur ;
- d) un châssis étanche support de la demi-boîte inférieure ;
- e) une plaque drainante à la base de la demi-boîte inférieure ;
- f) un piston rigide muni à sa base d'une plaque drainante, l'ensemble glissant librement dans la demi-boîte supérieure. Ce piston possède en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort vertical.

Les plaques drainantes (pierres poreuses,...) sont planes et reliées à des orifices pour la circulation des fluides.

Les matériaux utilisés sont inertes chimiquement vis-à-vis du sol et des fluides qu'il contient.

La surface de contact entre les deux demi-boîtes est plane et lisse.

### 5.3 Dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette

Le dispositif permet d'appliquer une force suivant une direction verticale, avec une tolérance de  $\pm 2^\circ$ , et de la maintenir constante.

Le matériel est conçu pour transmettre à l'éprouvette une contrainte verticale moyenne d'au moins 0,5 MPa.

### 5.4 Dispositif de production du déplacement

Le déplacement possible des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre, est d'au moins 5 mm à une vitesse compatible avec la vitesse maximale définie au paragraphe 6.3.2.3. Cette vitesse est maintenue constante pendant l'essai avec une incertitude qui est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- 10 % de la valeur lue, ou
- 0,5  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

### 5.5 Système de mesure

#### 5.5.1 Force verticale

L'intensité de la force verticale constante (N) est connue avec une incertitude de 1/100 de sa valeur.

#### 5.5.2 Effort de cisaillement

La mesure de l'effort horizontal (T) s'effectue au moyen d'un capteur avec une incertitude de 1/100 de la valeur maximale lue au cours de l'essai.

#### 5.5.3 Déplacements

- a) Le déplacement vertical  $\delta h$ , dans l'axe du piston placé à la partie supérieure de l'éprouvette, est mesuré par rapport à un repère fixe avec une incertitude de 0,05 mm.
- b) Le déplacement horizontal  $\delta i$  des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre est mesuré au moyen d'un capteur avec une incertitude de 0,05 mm.

**5.6 Matériel complémentaire**

Il comprend :

- une balance de portées maximale et minimale compatible avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 105 °C de classe d'exactitude C comme défini dans l'annexe A de la norme NF X 15-016 ;
- les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes ;
- un chronomètre donnant la seconde.

**5.7 Local d'essai**

Un thermomètre de contrôle est placé dans la salle d'essai. La température de la salle d'essai est maintenue à ± 5 °C pendant la durée de chaque essai. L'appareillage est en plus protégé du rayonnement solaire direct.

**6 Mode opératoire**

**6.1 Préparation des plaques drainantes**

Les plaques sont saturées avec de l'eau désaérée et tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Elles sont recouvertes d'un papier-filtre lorsque des particules de sol risquent de migrer vers les pores des plaques drainantes.

**6.2 Préparation des éprouvettes**

La hauteur des éprouvettes, une fois confectionnées, est telle que :

$$6d_{\max} \leq h \leq \frac{L}{2}$$

Dans ces conditions, le matériau essayé a des éléments dont la dimension maximale est :

- $d_{\max} \leq 5$  mm dans le cas de la boîte de 60 mm de côté, et
- $d_{\max} \leq 8$  mm dans le cas de la boîte de 100 mm de côté.

**6.2.1 Sols cohérents ou reconstitués après compactage**

Tailler les éprouvettes de telle sorte que les dimensions de la section droite de l'éprouvette soient ajustées au mieux à celles de la boîte et que la hauteur (h) en millimètres soit telle que :

$$20 \leq h \leq \frac{L}{2}$$

Peser l'échantillon et mesurer sa hauteur.

Placer une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure.

Introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes solidarisées au préalable.

L'éprouvette est calée dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.

**6.2.2 Sols pulvérulents**

Après solidarisation des deux demi-boîtes et après avoir mis en place une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure, le matériau est compacté directement dans la boîte qui servira au cisaillement.

La masse de sol à introduire dans la boîte est déterminée pour obtenir, après compactage, une éprouvette de masse volumique choisie et pour que le plan de cisaillement se trouve sensiblement à mi-hauteur de l'éprouvette.

**6.3 Réalisation de l'essai**

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisailées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents.

**6.3.1 Choix de l'effort vertical à appliquer**

L'effort vertical (N) est déterminé pour chaque éprouvette en fonction des contraintes normales  $\sigma$  fixées par le géotechnicien responsable.

La contrainte verticale maximale appliquée à la série d'éprouvettes doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après la réalisation de l'ouvrage.

Si aucune spécification n'est fournie, choisir les valeurs à partir des indications données dans le tableau 1 et en respectant la condition précédente.

Tableau 1 : Effort vertical à appliquer aux éprouvettes de sol — Exemple

$\sigma'_{vo}$	Valeurs en kilopascals	
	< 100	≥ 100
$\frac{N}{A}$	50 100 200	0,5 $\sigma'_{vo}$ $\sigma'_{vo}$ 2 $\sigma'_{vo}$

**6.3.2 Essais sur sols cohérents**

Dès que l'éprouvette a été mise en place, les opérations suivantes se déroulent sans interruption.

**6.3.2.1 Mise en place**

La boîte de cisaillement contenant l'éprouvette est placée dans le châssis étanche fixé sur le bâti. Tout en maintenant la solidarisation des deux demi-boîtes :

- placer le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette ;
- noter, après fixation du système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T), et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort (T) ;
- régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et noter la valeur d'origine ;
- positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine ;
- appliquer l'effort (N) <sup>2)</sup> sur la partie supérieure du piston ;
- mesurer le déplacement vertical du piston  $\delta h$  en fonction du temps.

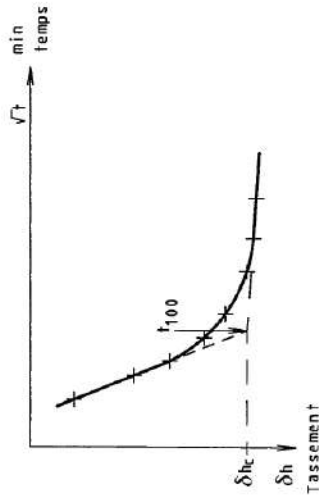
2) Dans certains cas, l'ingénieur géotechnicien peut imposer que la saturation précède l'application de l'effort normal.

**6.3.2.2 Saturation et consolidation**

Remplir le châssis contenant la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée.

Mesurer le déplacement vertical  $\delta h$  du piston en fonction du temps pendant 1 h au moins et jusqu'à stabilisation.

La stabilisation est considérée comme obtenue dès que les mesures permettent de déterminer une direction asymptotique comme indiqué à la figure 3. Cette figure montre également la mode de détermination du déplacement vertical  $\delta h_c$  en fin de consolidation.



**Figure 3 : Détermination de la fin de consolidation d'une éprouvette dans la boîte de cisaillement**

**6.3.2.3 Cisaillement**

a) Déterminer, à l'issue de la phase de consolidation, la vitesse maximale de cisaillement par la relation suivante exprimée en micromètres par minute :

$$v_{\max} = \frac{125}{t_{100}} \text{ avec } v_{\max} \leq 25$$

où :

t<sub>100</sub> est le temps exprimé en minutes, déterminé par la construction indiquée à la figure 3.

b) Libérer le système de solidarisation des deux demi-boîtes.

c) Agir sur les vis de la boîte supérieure afin de supprimer le contact entre les deux demi-boîtes et ramener immédiatement les vis à leur position antérieure.

d) Imposer le déplacement relatif des deux demi-boîtes à une vitesse constante  $v \leq v_{\max}$

e) Arrêter le cisaillement :

— soit lorsque la variation de l'effort (T), pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement horizontal  $\delta l$  de 0,5 mm, est inférieure à 1/100 de l'effort maximal,

— soit lorsque le déplacement horizontal  $\delta l$  a atteint au moins 5 mm.

**6.3.2.4 Identification de l'éprouvette après essai**

Peser l'éprouvette et noter les particularités (inclusion,...) du plan de rupture.

Déterminer sa teneur en eau comme indiqué dans la norme NF P 94-050.

**6.3.3 Essais sur sols pulvérulents**

La masse volumique des éprouvettes soumises à essai et la vitesse de cisaillement sont fixées par le géotechnicien responsable de l'étude. En l'absence d'indication, la vitesse de cisaillement est au plus de 1 mm/min.

La phase d'immersion et de consolidation sous la contrainte normale d'essai est effectuée dans les mêmes conditions qu'au paragraphe 6.3.2.2 ; sa durée est d'au moins 1 h.

Le cisaillement est réalisé et arrêté dans les mêmes conditions qu'au paragraphe 6.3.2.3 e).

**6.4 Mesurage**

Les lectures de tous les appareils sont effectuées simultanément (en moins de 2 s) à chaque augmentation du déplacement horizontal relatif des deux demi-boîtes d'environ 0,2 mm jusqu'à 2 mm, puis tous les 0,5 mm au-delà.

**7 Expression des résultats**

**7.1 Pour chaque éprouvette**

7.1.1 Calculer :

a) La contrainte normale effective  $\sigma'$  à partir de l'expression :

$$\sigma' = \frac{N}{A}$$

L'effort normal est éventuellement corrigé du poids du piston si sa valeur est supérieure à  $\frac{N}{100}$ .

Dans les conditions de l'essai, la contrainte normale  $\sigma$  est la contrainte effective en fin de consolidation.

b) La contrainte de cisaillement  $\tau$ , par la relation :

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Les corrections dues à la variation de l'aire de la section cisailée et au frottement du sol sur le métal de la boîte ne sont pas prises en compte dans la présentation des résultats.

c) La teneur en eau du sol avant essai et en fin de cisaillement.

d) La masse volumique sèche  $\rho_d$  de l'éprouvette avant essai, après stabilisation de l'évolution de son épaisseur  $\delta h_c$  sous l'effort appliqué N.

Le volume de l'éprouvette à une étape donnée est :

$$V = A (h - \delta h)$$

e) L'indice des vides et le degré de saturation avant essai à partir de la masse volumique  $\rho_g$ .

Le calcul implique la connaissance de la masse volumique des particules solides  $\rho_s$ . Si celle-ci n'a pas été mesurée, sa valeur est estimée et indiquée sur le procès-verbal.

7.1.2 Tracer les courbes suivantes en utilisant les mêmes échelles pour toutes les éprouvettes :

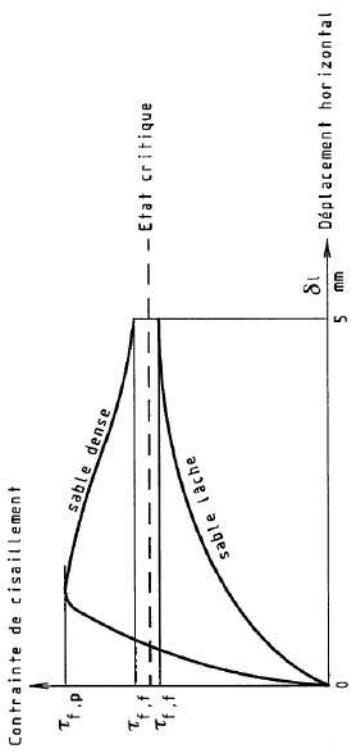
— de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du déplacement horizontal  $\delta l$  ;

— du déplacement vertical  $\delta h$  du piston en fonction du déplacement horizontal  $\delta l$ .

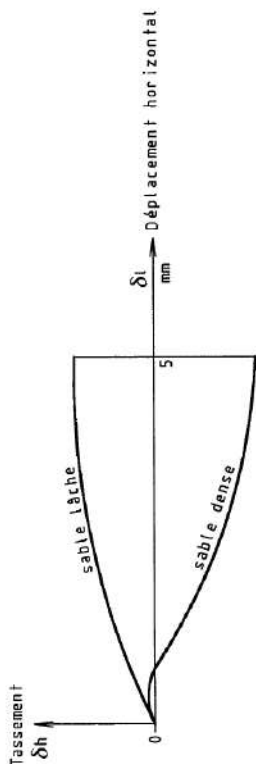
7.1.3 Déterminer les paramètres de cisaillement :

- $\tau_{f,p}$  : valeur correspondant au critère de rupture : pic de la courbe  $\tau = f(\delta l)$  lorsque cette courbe présente un pic,
- $\tau_{f,f}$  : valeur correspondant au critère de rupture à l'état final de la courbe,
- $\tau = f(\delta l)$  (voir figure 4).

Si la courbe ne présente pas de palier,  $\tau_{f,f}$  est la valeur atteinte pour un déplacement horizontal  $\delta l$  de 5 mm.



a) Courbe de contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal



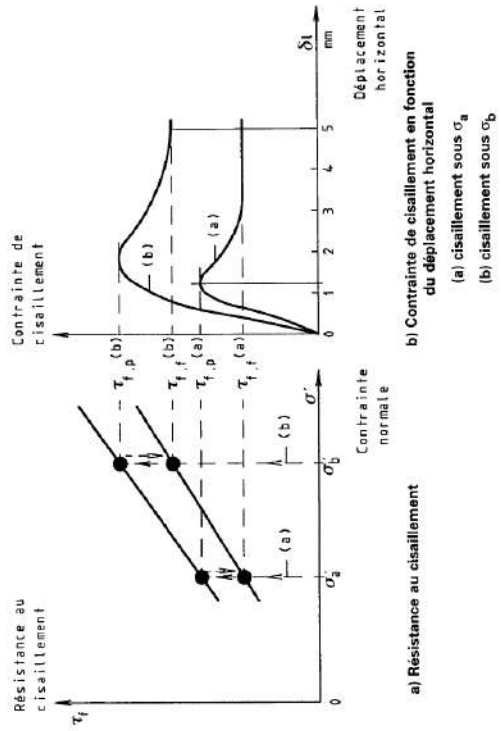
b) Courbe de tassement en fonction du déplacement dans le plan de cisaillement

Figure 4 : Courbes d'essai sur des matériaux sableux

7.2 Pour l'ensemble des éprouvettes

Représenter sur un même graphique ( $\sigma' - \tau_f$ ) (même échelle pour  $\sigma'$  et pour  $\tau_f$ , voir figure 5) les couples de points ( $\sigma' - \tau_{f,p}$ ) et ( $\sigma' - \tau_{f,f}$ ).  
 Déterminer par un ajustement linéaire l'équation de la droite correspondant à chaque critère de rupture (pic, état final). Les paramètres de résistance au cisaillement rectiligne sont obtenus :  
 — à partir de la pente des droites pour les angles  $\phi'_p$  et  $\phi'_f$   
 — à partir de l'ordonnée à l'origine des droites pour les cohésions  $c'_p$  et  $c'_f$

NOTE : Lorsque l'ordonnée à l'origine des droites est négative, reprendre le calcul en faisant un ajustement linéaire sur les couples de points et leurs symétriques par rapport à l'origine des axes de coordonnées.



a) Résistance au cisaillement  
 b) Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal  
 (a) cisaillement sous  $\sigma'_a$   
 (b) cisaillement sous  $\sigma'_b$   
 c) Paramètres de résistance au cisaillement pour un critère de rupture défini

Figure 5 : Détermination des paramètres de résistance au cisaillement



### 8 Procès-verbal d'essai

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

- a) la référence à la présente norme,
- b) le nom de la firme qui a procédé à l'essai,
- c) le numéro de dossier,
- d) la provenance des échantillons : site, numéro du sondage, profondeur ou cote par rapport à un repère précisé,
- e) la date de prélèvement sur site ou de confection de l'éprouvette et la date de l'essai,
- f) les caractéristiques des éprouvettes :
  - avant essai : dimensions, masse volumique sèche, teneur en eau, l'indice des vides et le degré de saturation,
  - après consolidation : masse volumique sèche,
  - après cisaillement : teneur en eau,

g) la valeur mesurée ou estimée de la masse volumique des particules solides,

h) la vitesse de cisaillement,

i) les courbes de résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal  $\delta l$  —  $\tau$  et variation de la hauteur en fonction du déplacement horizontal  $\delta l$  —  $\delta h$ , où figurent les points expérimentaux,

j) le graphique,  $\sigma' - \tau$ , résistance au cisaillement en fonction de la contrainte effective,

k) les valeurs de l'angle de frottement effectif  $\phi'$  et de la cohésion effective  $c'$  : résistance de pic ou résistance à l'état final et les valeurs correspondantes du déplacement horizontal  $\delta l$ ,

l) les observations liées à la réalisation de l'essai (particularités de la surface de rupture) ainsi que les incidents et détails opératoires non prévus dans la norme et susceptibles d'avoir une influence sur les résultats.

Un exemple de procès-verbal est donné à la figure 6.

PROCÈS-VERBAL D'ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE — CISAILLEMENT DIRECT effectué conformément à la norme NF P 94-071-1																			
Firme :		N° dossier :																	
		Date essai :																	
Site :		<b>Caractéristiques de l'éprouvette</b>																	
		Hauteur = ..... mm		Largeur, diamètre = ..... mm															
N° sondage :		Date de prélèvement :		Vitesse de cisaillement = ..... $\mu\text{m}/\text{min}$															
				mesuré = ..... $\text{kg}/\text{m}^3$ estimé = ..... $\text{kg}/\text{m}^3$															
<b>Identification des éprouvettes de sol</b>																			
N°	Avant essai			Après consolidation			Après cisaillement												
	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_d$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	w (%)	$\rho_d$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$S_R$	$\sigma'$ (kPa)	w (%)	$\tau_p$ (kPa)										
1									$\delta l_p$ (mm)										
2									$\tau_f$ (kPa)										
3									$\delta l_f$ (mm)										
4																			
<b>Paramètres de résistance au cisaillement</b>																			
Résistance au cisaillement																			
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Résultats</td> <td><math>c'</math> (kPa)</td> <td><math>\phi'</math> (°)</td> </tr> <tr> <td><math>c_p</math></td> <td><math>\phi_p</math></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td><math>c_f</math></td> <td><math>\phi_f</math></td> </tr> </table>										Résultats		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c_p$	$\phi_p$			$c_f$	$\phi_f$
Résultats		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)																
		$c_p$	$\phi_p$																
		$c_f$	$\phi_f$																
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Contrainte normale</td> <td><math>c'</math> (kPa)</td> <td><math>\phi'</math> (°)</td> </tr> <tr> <td><math>c_p</math></td> <td><math>\phi_p</math></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td><math>c_f</math></td> <td><math>\phi_f</math></td> </tr> </table>										Contrainte normale		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c_p$	$\phi_p$			$c_f$	$\phi_f$
Contrainte normale		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)																
		$c_p$	$\phi_p$																
		$c_f$	$\phi_f$																
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Déplacement horizontal</td> <td><math>c'</math> (kPa)</td> <td><math>\phi'</math> (°)</td> </tr> <tr> <td><math>c_p</math></td> <td><math>\phi_p</math></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td><math>c_f</math></td> <td><math>\phi_f</math></td> </tr> </table>										Déplacement horizontal		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c_p$	$\phi_p$			$c_f$	$\phi_f$
Déplacement horizontal		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)																
		$c_p$	$\phi_p$																
		$c_f$	$\phi_f$																
Observations : .....																			
Responsable : .....																			
Signature : .....																			

Figure 6 : Procès-verbal d'essai de cisaillement rectiligne direct — Exemple

## Composition chimique type

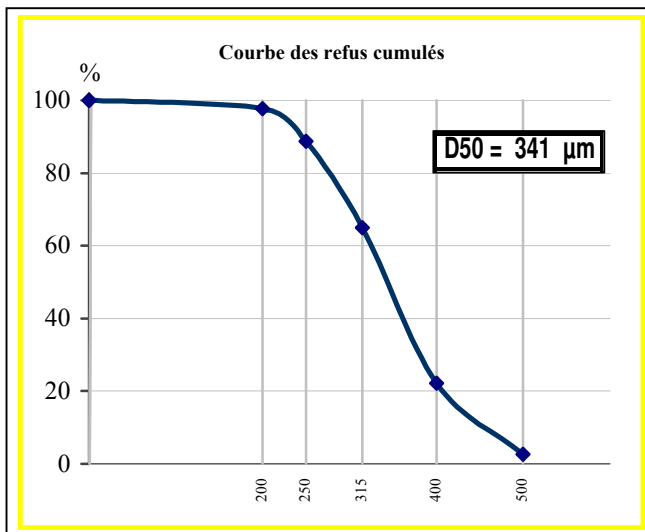
SiO <sub>2</sub> ..... sup. à	98.76 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... moy. à	0.080 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... moy. à	0.478 %
CaO ..... moy. à	0.047 %
K <sub>2</sub> O ..... moy. à	0.389 %

## Caractéristiques physiques types

densité réelle (Pycnomètre) .....	2.65
dureté (Mohs) .....	7
pH .....	# 7.5
densité apparente sable sec ("Prolabo") .....	1.5
perte au feu (à 1000°C) .....	0.09 %
résistance pyroscopique (SFC ISO R528) ...	1750 °C

## GRANULOMETRIE MOYENNE STATISTIQUE

(% en masse - Valeurs indicatives)

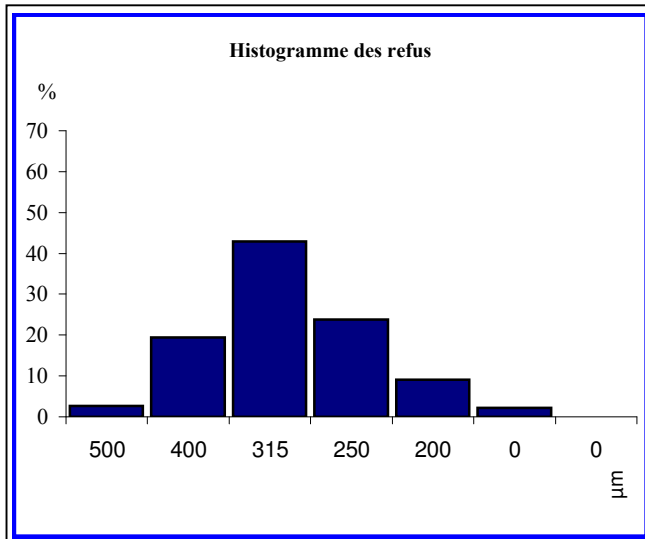


### TAMISAGE AFNOR X.11-507

ouverture des mailles µm	refus cumulés %
> 500 µm	2.7
> 400 µm	22.1
> 315 µm	65.0
> 250 µm	88.8
> 200 µm	97.8
> 0 µm	100.0
> 0 µm	100.0

### CORRESPONDANCE Série R20 ISO 565

ouverture des mailles µm	refus cumulés %
> 2000 µm	0.0
> 1400 µm	0.0
> 1000 µm	0.0
> 630 µm	0.0
> 500 µm	2.7
> 315 µm	65.0
> 250 µm	88.8
> 180 µm	98.9
> 125 µm	100.0
> 63 µm	100.0
passé	0.0



Classe µm	refus par tamis %
> 500 µm	2.7
500-400 µm	19.4
400-315 µm	42.9
315-250 µm	23.8
250-200 µm	9.0
Passant	2.2

Classe µm	refus par tamis %
> 2000 µm	0.0
2000-1400µm	0.0
1400-1000µm	0.0
1000 - 630µm	0.0
630 - 500 µm	2.7
500-315 µm	62.3
315 - 250 µm	23.8
250 - 180 µm	10.1
180 - 125 µm	1.1
125 - 63 µm	0.0
< 63 µm	0.0

