

MINISTÈRE DE L'URBANISME DU LOGEMENT
ET DES TRANSPORTS
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES

Essais œdométriques

MÉTHODES D'ESSAI LPC
n° 13

Juillet 1985

AVERTISSEMENT

Les *Projets de méthode d'essai* sont mis en application et diffusés, à titre expérimental, par les chefs de division ou de service du LCPC, après examen par la Direction des programmes et applications (Délégation à la qualité des essais, la normalisation et la réglementation technique).

Au bout d'une période dont la durée est normalement d'un an, les *Projets de méthode d'essai* sont réexaminés pour tenir compte des observations émises par leurs utilisateurs et, éventuellement, des résultats d'études complémentaires (essais interlaboratoires, qualification des matériels d'essais...).

Selon l'importance des modifications à apporter, ils sont alors soit reconduits à titre de *Projet* pour une nouvelle période d'essai, soit transformés en *Méthodes d'essai LPC* ou proposés à l'AFNOR comme projet de norme.

Les *Méthodes d'essai LPC* sont approuvées par le Directeur du LCPC après qualification par la Délégation à la qualité des essais, la normalisation et la réglementation technique, et diffusées par la Section des publications du Service de l'information scientifique et technique.

Essais œdométriques

MÉTHODES D'ESSAI LPC
n° 13

Ce recueil de méthodes d'essai LPC comporte les méthodes d'essai suivantes :

- essai de compressibilité par paliers,
- essai de fluage,
- essai à vitesse de déformation constante,
- essai à gradient contrôlé,
- essai accéléré par chauffage,
- essai à drainage radial.

Les essais de gonflement à l'œdomètre font l'objet d'un document séparé.

*Ce document a été rédigé par Jean-Pierre Magnan,
Claude Mieussens, Bertrand Soyez et Jean Vautrain.*

Sommaire

	Page
INTRODUCTION	5
NOTATIONS, SYMBOLES ET UNITES	7
SECTION 1 - GENERALITES	10
CHAPITRE 11 - APPAREILLAGES	10
11.1 - APPAREILLAGE SPECIFIQUE	10
11.1.1 - La cellule oedométrique	10
11.1.2 - Systèmes de chargement	11
11.1.3 - Mesure de pression interstitielle et contre-pression	14
11.1.4 - Système de régulation de la température	14
11.2 - APPAREILLAGE D'USAGE COURANT INDISPENSABLE POUR LA REALISATION DE L'ESSAI	14
CHAPITRE 12 - PRELEVEMENT ET CONSERVATION DES ECHANTILLONS INTACTS	18
12.1 - PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS INTACTS	18
12.2 - CONSERVATION DES ECHANTILLONS	19
12.3 - TRANSPORT	19
CHAPITRE 13 - PREPARATION DE L'EPROUVEtte SOUMISE A L'ESSAI	21
13.1 - CHOIX DE LA PRISE D'ESSAI	21
13.2 - EXTRACTION DE LA CAROTTE DE SON ETUI	22
13.3 - DECOUPAGE ET MISE EN PLACE DE L'EPROUVEtte SOUMISE A L'ESSAI	22
13.3.1 - Cellules oedométriques sans trousse coupante	22
13.3.2 - Cellules oedométriques munies d'une trousse coupante	23
SECTION 2 - ESSAI DE COMPRESSIBILITE PAR PALIERS	28
CHAPITRE 21 - EXECUTION DE L'ESSAI	28
21.1 - APPAREILLAGES ET OPERATIONS DIVERSES	28
21.1.1 - Appareillage	28
21.1.2 - Saturation de L'éprouvette	28
21.1.3 - Pesée en fin d'essai	29
21.2 - DEROULEMENT DE L'ESSAI	30
21.2.1 - Loi de chargement	30
21.2.2 - Durée des paliers de chargement	34
21.2.3 - Mesures du tassement en fonction du temps	34
CHAPITRE 22 - CALCULS ET RESULTATS	35
22.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	35
22.1.1 - Calcul de l'indice des vides	35
22.1.2 - Détermination des paramètres d'identification	36

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du Directeur du Laboratoire central des Ponts et Chaussées
(ou de ses représentants autorisés).

© 1985 LCPC

ISBN 2-7208-3130-1

MINISTÈRE DE L'URBANISME, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES
58, boulevard Lefebvre - 75732 PARIS CEDEX 15
Tél. : (1) 532-31-79 - Télex : LCPARI 200361 F

Septembre 1985

22.2 - CARACTERISTIQUES DE COMPRESSIBILITE	36
22.2.1 - Courbe de compressibilité	36
22.2.2 - Indices de compression et de gonflement	37
22.2.3 - Pression de préconsolidation	37
22.2.4 - Indice des vides en place	38
22.2.5 - Courbe de compressibilité corrigée	38
22.2.6 - Module oedométrique	39
22.3 - COURBES "TASSEMENTS-TEMPS"	39
22.3.1 - Construction graphique (méthode de Taylor)	39
22.3.2 - Calcul du coefficient de consolidation	41
22.3.3 - Calcul du coefficient de perméabilité	41
22.4 - DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE PERMEABILITE ET DE CONSOLIDATION CORRIGES	41
22.5 - PRESENTATION DES RESULTATS	42
22.6 - EXEMPLE	42
SECTION 3 - ESSAI DE FLUAGE	48
CHAPITRE 31 - EXECUTION DE L'ESSAI	48
31.1 - APPAREILLAGE ET OPERATIONS DIVERSES	48
31.1.1 - Appareillage	48
31.1.2 - Pesée en fin d'essai	48
31.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI	48
31.2.1 - Loi de chargement	48
31.2.2 - Mesures du tassement en fonction du temps	48
CHAPITRE 32 - CALCULS ET RESULTATS	49
32.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	49
32.1.1 - Calcul de l'indice des vides	49
32.1.2 - Détermination des paramètres d'identification	49
32.2 - COURBES DE TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS	50
32.3 - PRESENTATION DES RESULTATS	50
SECTION 4 - ESSAI A VITESSE DE DEFORMATION CONSTANTE	52
CHAPITRE 41 - EXECUTION DE L'ESSAI	52
41.1 - APPAREILLAGE ET OPERATIONS DIVERSES	52
41.1.1 - Appareillage	52
41.1.2 - Saturation de l'éprouvette	53
41.1.3 - Pesée en fin d'essai	54
41.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI	54
41.2.1 - Choix de la vitesse	54
41.2.2 - Fréquence des Lectures	54
41.2.3 - Charge maximale	55
CHAPITRE 42 - CALCULS ET RESULTATS	56
42.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	56
42.2 - CARACTERISTIQUES DE COMPRESSIBILITE	56
42.2.1 - Courbe de compressibilité	56
42.2.2 - Pression de préconsolidation σ'_p	57
42.2.3 - Indices de compression et de gonflement	57
42.2.4 - Module oedométrique	57
42.3 - COEFFICIENTS DE CONSOLIDATION ET DE PERMEABILITE	57
42.3.1 - Coefficient de consolidation	57
42.3.2 - Coefficient de perméabilité	58
42.4 - PRESENTATION DES RESULTATS	58
SECTION 5 - ESSAI A GRADIENT CONTROLE	60
CHAPITRE 51 - EXECUTION DE L'ESSAI	60
51.1 - APPAREILLAGE ET OPERATIONS DIVERSES	60
51.1.1 - Appareillage	60
51.1.2 - Saturation de l'éprouvette	61
51.1.3 - Pesée en fin d'essai	62
51.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI	62
51.2.1 - Généralités	62
51.2.2 - Valeurs recommandées des paramètres de l'essai	63

CHAPITRE 52 - CALCULS ET RESULTATS	64
52.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	64
52.1.1 - Calcul de L'indice des vides	64
52.1.2 - Détermination des paramètres d'identification	65
52.2 - PARAMETRES DE COMPRESSIONNABILITE	65
52.2.1 - Courbe de chargement au cours du temps	65
52.2.2 - Courbe de compressionnabilité	66
52.2.3 - Coefficient de consolidation	66
52.2.4 - Coefficient de perméabilité	67
52.3 - PRESENTATION DES RESULTATS	67
SECTION 6 - ESSAI ACCELERE PAR CHAUFFAGE	69
CHAPITRE 61 - EXECUTION DE L'ESSAI	69
61.1 - APPAREILLAGE ET OPERATIONS DIVERSES	69
61.1.1 - Appareillage	69
61.1.2 - Saturation de L'éprouvette	69
61.1.3 - Pesée en fin d'essai	69
61.2 - DEROULEMENT DE L'ESSAI	69
CHAPITRE 62 - CALCULS ET RESULTATS	71
62.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	71
62.1.1 - Calcul de L'indice des vides	71
62.1.2 - Détermination des paramètres d'identification	71
62.2 - CARACTERISTIQUES DE COMPRESSIONNABILITE	72
62.2.1 - Courbe de compressionnabilité	72
62.2.2 - Indices de compression et de gonflement	72
62.2.3 - Pression de préconsolidation	73
62.2.4 - Coefficient de gonflement	73
62.2.5 - Module oedométrique	73
62.3 - COURBES DE TASSEMENT AU COURS DU TEMPS	73
62.4 - PRESENTATION DES RESULTATS	74
SECTION 7 - ESSAI DE GONFLEMENT (p.m.)	
SECTION 8 - ESSAI A DRAINAGE RADIAL	75
CHAPITRE 81 - EXECUTION DE L'ESSAI	75
81.1 - APPAREILLAGES ET OPERATIONS DIVERSES	75
81.2 - DEROULEMENT DE L'ESSAI	77
CHAPITRE 82 - CALCULS ET RESULTATS	79
82.1 - CALCULS ELEMENTAIRES	79
82.1.1 - Calcul de L'indice des vides	79
82.1.2 - Détermination des paramètres d'identification	79
82.2 - CARACTERISTIQUES DE COMPRESSIONNABILITE	80
82.3 - COURBES "TASSEMENTS-TEMPS"	80
82.3.1 - Construction graphique (méthode de Taylor)	80
82.3.2 - Calcul du coefficient de consolidation	80
82.3.3 - Calcul du coefficient de perméabilité pour un incrément de charge donné	80
82.4 - DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE PERMEABILITE ET DE CONSOLIDATION CORRIGES	81
82.5 - PRESENTATION DES RESULTATS	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82

INTRODUCTION

On appelle "oedomètres" les appareils qui permettent de réaliser des essais de compressibilité en laboratoire sur des éprouvettes de sol cylindriques placées à l'intérieur d'une enceinte cylindrique indéformable, dont la paroi interne est au contact direct de l'éprouvette (fig.I.1).

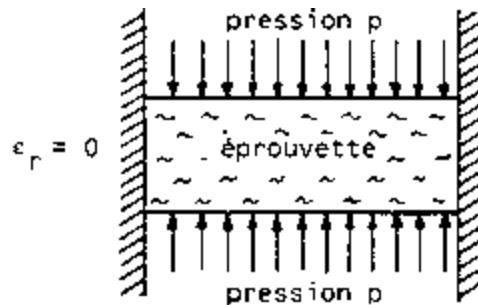


Fig.I.1 Principe des "oedomètres"

Dans les oedomètres, l'enceinte cylindrique rigide qui entoure l'éprouvette interdit toute dilatation radiale du sol, de sorte que les déformations qui se produisent lorsque l'on exerce une pression sur le piston sont uniquement verticales (ou axiales). Ce mode de déformation "unidimensionnel" a acquis en mécanique des sols une grande importance pratique et, dans le langage courant, l'adjectif "oedométrique" a pris le double sens de "relatif aux oedomètres" et de "à déformation latérale nulle", ce qui conduit certains spécialistes à parler d' "essais oedométriques à l'appareil triaxial" pour désigner les essais triaxiaux dans lesquels on interdit toute déformation latérale de l'éprouvette. Le présent document a un objectif plus limité que ce second sens du terme "oedométrique" puisqu'il regroupe seulement les modes opératoires des essais que l'on peut réaliser dans les oedomètres.

Les essais que l'on peut réaliser dans des oedomètres sont très variés : la charge peut croître continuellement ou être appliquée par paliers de durées diverses, on peut appliquer une charge unique ou plusieurs charges successives, imposer une déformation initiale et suivre la relaxation des contraintes ou au contraire faire subir au sol une déformation à vitesse constante, on peut asservir le chargement à l'évolution des contraintes ou encore chercher à caractériser le gonflement de certains sols ou l'effondrabilité de leur structure lorsqu'on les met en présence d'eau, etc.

Après des indications générales (valables pour tous les types d'essais) sur les caractéristiques des oedomètres, les précautions à prendre lors du prélèvement, du transport et de la conservation des carottes de sol et la préparation des éprouvettes soumises à l'essai, le document comporte sept sections consacrées aux modes opératoires des essais suivants :

- essai de compressibilité par paliers,
- essai de fluage,
- essai à vitesse de déformation constante,
- essai à gradient contrôlé,
- essai accéléré par chauffage,
- essai de gonflement,
- essai à drainage radial.

NOTATIONS, SYMBOLES ET UNITÉS

Les notations et symboles utilisés dans ce document sont conformes aux recommandations de la Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation (C.R. du Congrès International de TOKYO, 1977, Vol. III).

Le système d'unités utilisé est le Système International (S.I.), légal en FRANCE (Décret du 3 mai 1961).

LISTE DES SYMBOLES UTILISÉS

SYMBOLES ET DESIGNATION	UNITES	DIMENSIONS	COMMENTAIRES
<u>Lettres minuscules</u>			
a_v coefficient de compressibilité	Pa^{-1}	$\text{M}^{-1} \text{LT}^2$	$a_v = -\Delta e / \Delta \sigma'$
c_r coefficient de consolidation radiale	m^2/s	$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$	$c_r = \frac{k_r}{\gamma_w m_v} = c_v \frac{k_r}{k_v}$
c_v coefficient de consolidation verticale	m^2/s	$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$	$c_v = \frac{k_v}{\gamma_w m_v}$
d distance de drainage	m	L	-
d diamètre du drain	m	L	Section 8, uniquement
e indice des vides	-	sans	-
e_i indice des vides initial (de l'essai)	-	sans	-
e_k	-	sans	Paramètre de la relation entre e et k_v
e_m indice des vides moyen	-	sans	$e_m = \frac{e_{n+1} + e_n}{2}$
e_o indice des vides en place	-	sans	Indice des vides sous σ'_{vo}

SYMBOLES ET DESIGNATION	UNITES	DIMENSIONS	COMMENTAIRES
h_p hauteur des pleins	m	L	-
k_r coefficient de perméabilité radiale (ou horizontale)	m/s	LT ⁻¹	-
k_v coefficient de perméabilité verticale	m/s	LT ⁻¹	-
m_v coefficient de compressibilité	P _a ⁻¹	M ⁻¹ LT ²	$m_v = -(\Delta H/H_0)/\Delta \sigma_v'$
n	-	sans	$n=D/d$ (Section 8)
s tassement	m	L	$\delta = \Delta H$
s_c	m	L	
s_o	m	L	
s_{60}	m	L	
s_{90}	m	L	
t temps	s	T	-
t_{90}	s	T	Construction de Taylor (chapitre 22.3)
$(t_{90})_r$	s	T	Section 8
u pression interstitielle	P _a	ML ⁻¹ T ⁻²	-
u_{cp} contre pression	P _a	ML ⁻¹ T ⁻²	-
w teneur en eau	-	sans	-
<u>Lettres majuscules</u>			
C_c indice de compression	-	sans	$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \lg \sigma_v'}$
C_g coefficient de gonflement	-	sans	
C_k taux de variation de la perméabilité	-	sans	$e = e_k + C_k \lg k_v$
C_s indice de gonflement	-	sans	Compression du sol sur-consolidé
C_α taux de fluage	-	sans	$C_\alpha = -(\Delta H/H_0)/\Delta \lg t$
C_{ae} indice de fluage	-	sans	$C_{ae} = -\Delta e/\Delta \lg t$
D diamètre de l'éprouvette	m	L	Section 8
E_{oed} module oedométrique	P _a	ML ⁻¹ T ⁻²	$E_{oed} = 1/m_v = -\Delta \sigma_v' / (\Delta H/H_0)$
H hauteur de l'éprouvette	m	L	-
H_0 hauteur initiale de l'éprouvette	m	L	-
S section de l'éprouvette	m ²	L ²	-
S_d section du drain	m ²	L ²	-

SYMBOLES ET DESIGNATION	UNITES	DIMENSIONS	COMMENTAIRES
s_r degré de saturation	-	sans	$s_r = \frac{w}{1/\gamma_d - 1/\gamma_s}$
T_v facteur temps	-	sans	$T_v = \frac{c_v t}{d^2}$
U degré de consolidation	-	sans	-
W poids de l'éprouvette	N	ML T ⁻²	-
W_d poids de l'éprouvette après étuvage	N	ML T ⁻²	-
W_{eau} poids de l'eau dans l'éprouvette	N	ML T ⁻²	-
W_s poids des grains du sol dans l'éprouvette	N	ML T ⁻²	-
W_{sable} poids du sable constituant le drain	N	ML T ⁻²	Section 8
<u>Lettres grecques</u>			
γ poids volumique	N/m ³	ML ⁻² T ⁻²	-
γ_d poids volumique du sol sec	N/m ³	ML ⁻² T ⁻²	-
γ_s poids volumique des grains	N/m ³	ML ⁻² T ⁻²	-
γ_w poids volumique de l'eau	N/m ³	ML ⁻² T ⁻²	$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$
δu tolérance sur la valeur de u	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	Section 5
AH tassement	m	L	-
Au surpression interstitielle	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-
a contrainte totale	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-
a' contrainte effective	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	$\sigma' = \sigma - u$
σ'_p pression de préconsolidation	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-
σ'_r	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	Section 2
σ_v contrainte totale verticale	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-
σ'_{v} contrainte effective verticale	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	$\sigma'_{v} = \sigma_v - u$
σ'_{vc} contrainte effective verticale en place	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-
σ'_{vf} contrainte effective verticale finale	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²	-

Divers

indice n x_n valeur de x pour la n-ième étape de chargement

surlignage \bar{x} valeur moyenne de x dans l'éprouvette

point sur symbole \dot{x} dérivée de x par rapport au temps

SECTION 1 - GENERALITES

CHAPITRE 11 – APPAREILLAGES

11.1 – APPAREILLAGE SPÉCIFIQUE

Les essais qui sont décrits dans ce document ont en commun d'être réalisés sur des éprouvettes de sol placées à l'intérieur d'un moule cylindrique rigide qui empêche toute déformation radiale lors du chargement. Historiquement, l'appareillage d'essai a été développé pour la réalisation d'essais de chargement par paliers et des matériels de ce type sont utilisés dans le monde entier. Par la suite, des variantes de ces appareillages ont été imaginées pour permettre l'exécution des autres types d'essais décrits dans le présent recueil.

Ces appareillages comportent tous une partie centrale appelée "cellule oedométrique" et diffèrent par le mode d'application des charges, par la présence éventuelle d'un système de mesure de la pression interstitielle, avec ou sans **contre-pression**, et par l'existence éventuelle d'un dispositif de régulation de la température du sol pendant **l'essai**.

11.1.1 – LA CELLULE OEDOMETRIQUE

Différentes variantes existent dans la conception de la cellule oedométrique, mais elles répondent toutes au principe défini ci-dessus et représenté sur la coupe schématique de la figure 11.1.

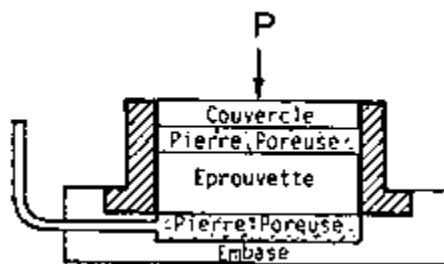


Fig. 11.1 Coupe schématique d'une cellule oedométrique

L'éprouvette de sol est retenue latéralement par une paroi lisse indéformable. Elle est comprise entre deux pierres poreuses ou entre deux disques en métal **fritté**, permettant à l'eau de circuler.

L'effort de compression s'exerce verticalement sur l'éprouvette par l'intermédiaire d'un couvercle ou d'un piston rigide qui répartit l'effort.

Les déformations de l'éprouvette sont lues sur un ou deux comparateurs ou enregistrées au moyen d'un capteur de déplacement.

COMMENTAIRES

L'enregistrement automatique des déformations de l'éprouvette en fonction du temps est souhaitable. Les figures 11.4 et 11.6 présentent deux exemples de montage d'un capteur de déplacement sur le boîtier d'un oedomètre.

L'enregistrement permet :

- une meilleure concomitance entre la mesure du temps et celle du tassement ;*
- de multiplier les mesures en début d'essai, ce qui est souhaitable pour améliorer le dépouillement des résultats des essais de compressibilité sous charges appliquées par paliers ;*
- de lancer l'essai oedométrique à n'importe quel moment ;*
- de ne pas perdre certaines mesures (nuit, jours fériés).*

L'acquisition des données au moyen d'un système numérique programmable est préférable au système analogique parce qu'elle permet d'utiliser directement des procédures de dépouillement automatique. Pour certains types d'essai, qui nécessitent un asservissement précis, ce type d'acquisition de données est pratiquement indispensable (essai à gradient contrôlé, par exemple).

11.1.2 - SYSTEMES DE CHARGEMENT

Les oedomètres d'usage courant peuvent être classés en quatre catégories selon leur mode de chargement : par poids, pneumatique ou hydraulique, lorsqu'il s'agit d'imposer une pression, ou par presse. Lorsque l'on veut imposer une déformation.

Dans la catégorie des oedomètres à poids, la cellule dite de TERZAGHI est couramment utilisée en FRANCE (Fig. 11.2 et 11.3a). La charge est transmise par un piston creux coulissant avec un faible jeu et un frottement négligeable dans un cylindre de 70 mm de diamètre intérieur. Une goupille permet de bloquer l'ensemble piston-cylindre suivant deux positions telles que le logement destiné à l'éprouvette ait une hauteur de 12 ou 24 mm environ. Pour les oedomètres à chargement par poids, le bâti, qui comprend essentiellement un levier pour la transmission des charges, doit être stable et rigide et doit permettre l'application de la force dans l'axe du piston. Les poids sont généralement constitués par des disques plats (Fig. 11.3b).

L'oedomètre à mise en charge pneumatique du Centre d'Etudes et de Construction de Prototypes (CECP) d'ANGERS du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées est représenté sur les figures 11.4 et 11.5. Cet oedomètre permet de réaliser les essais de compressibilité sur des échantillons de 60 mm de diamètre et 25 mm de hauteur. Pour les oedomètres à chargement pneumatique, l'ensemble de mise en charge doit comprendre une alimentation en gaz comprimé suffisamment stable, un détendeur régulateur à fuite et un filtre assurant la propreté du gaz. Un filtre à l'entrée du manomètre de contrôle de pression permet de supprimer les a-coups au moment de la lecture de la pression appliquée (Fig. 11.5).

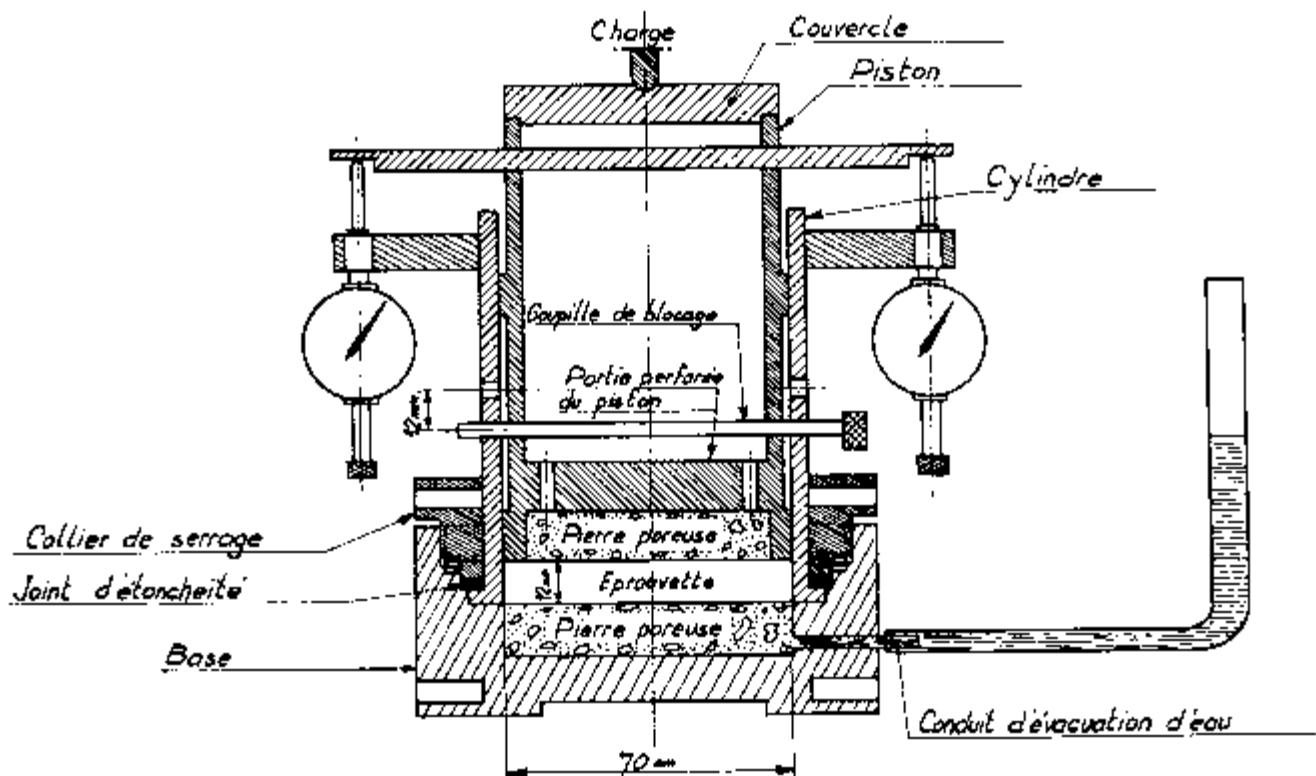


Fig. 11.2 Coupe de la cellule oedométrique de TERZAGHI

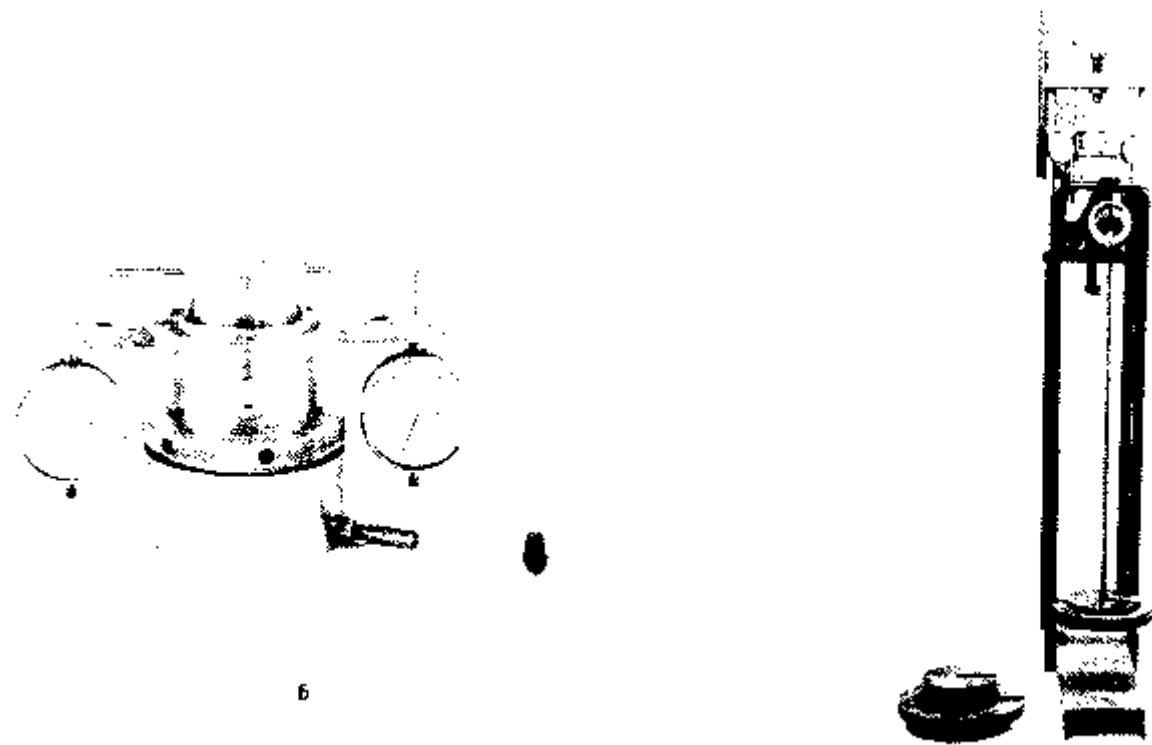


Fig. 11.3 Cellule oedométrique de TERZAGHI (a) et bâti de consolidation (b)

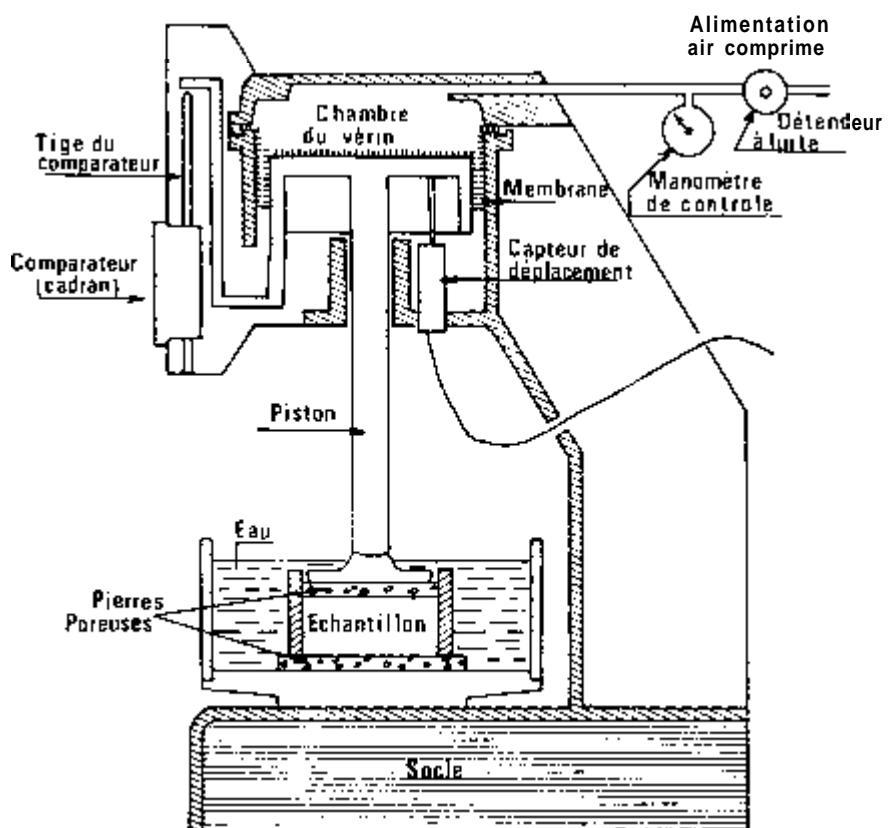


Fig. 11.4 Schéma de l'oedomètre à chargement pneumatique du CECP d'ANGERS

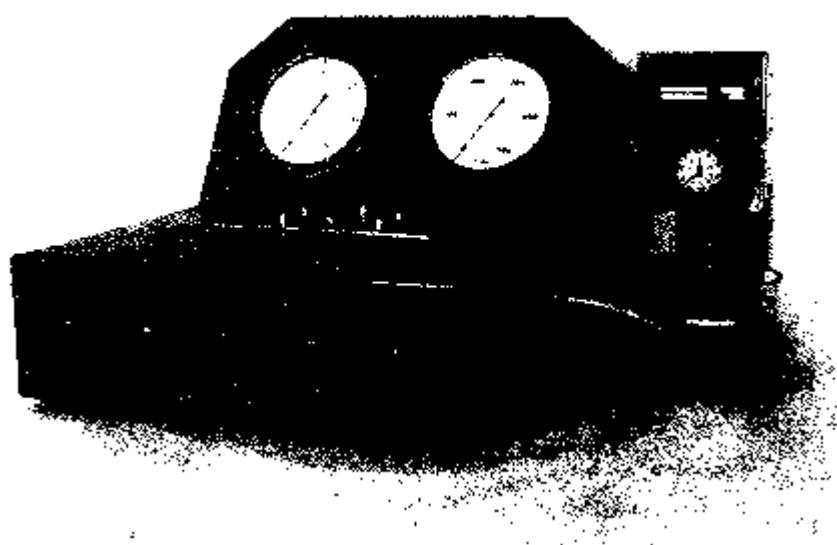


Fig. 11.5 Vue d'ensemble d'un oedomètre pneumatique et du pupitre de commande pour 5 appareils

Le chargement pneumatique des cellules oedométriques peut être remplacé par un chargement hydraulique, réalisé par exemple au moyen de rampes à pots de mercure. On peut citer comme exemple l'"oedomètre à contre-pression" des LPC (Fig. 11.6) dont la mise en charge peut être effectuée soit à l'air comprimé soit en utilisant les pots de mercure des appareils triaxiaux et qui permet de plus d'appliquer une contre-pression et de mesurer la pression interstitielle aux extrémités de l'éprouvette de sol. L'éprouvette de sol a dans cet oedomètre un diamètre de 65,2 mm et une hauteur de 25 mm.

Pour les essais où l'on souhaite imposer une certaine déformation ou une vitesse de déformation donnée à l'éprouvette de sol, on place la cellule oedométrique sur le plateau d'une presse. L'oedomètre à contre-pression cité ci-dessus (fig. 11.6) peut faire l'objet d'un tel chargement par presse.

11.1.3 - MESURE DE PRESSION INTERSTITIELLE ET CONTRE-PRESSION

Pour certains types d'essais on a besoin de connaître la pression interstitielle aux deux extrémités de l'éprouvette : en pratique, l'une de ces deux extrémités a une pression interstitielle imposée (pression atmosphérique ou contre-pression) et l'on mesure la pression interstitielle à l'autre extrémité. La mesure de la pression interstitielle s'effectue à l'aide d'un capteur solidaire du corps de l'oedomètre et séparé de l'éprouvette de sol par une pierre poreuse. La mesure de la pression interstitielle nécessite que le drainage soit fait seulement sur la face opposée de l'éprouvette. Pour permettre une mise en place correcte de l'éprouvette de sol dans l'oedomètre en début d'essai, il est nécessaire de disposer à côté du capteur d'un orifice de purge de la pierre poreuse, qui sera rebouché avant l'essai proprement dit.

La contre-pression est généralement appliquée sur la ou les faces de l'éprouvette où s'effectue le drainage, au moyen d'une rampe à pot de mercure ou d'air comprimé avec échangeur air-eau.

L'oedomètre à contre-pression représenté sur la figure 11.6 a été prévu pour ce type d'utilisation.

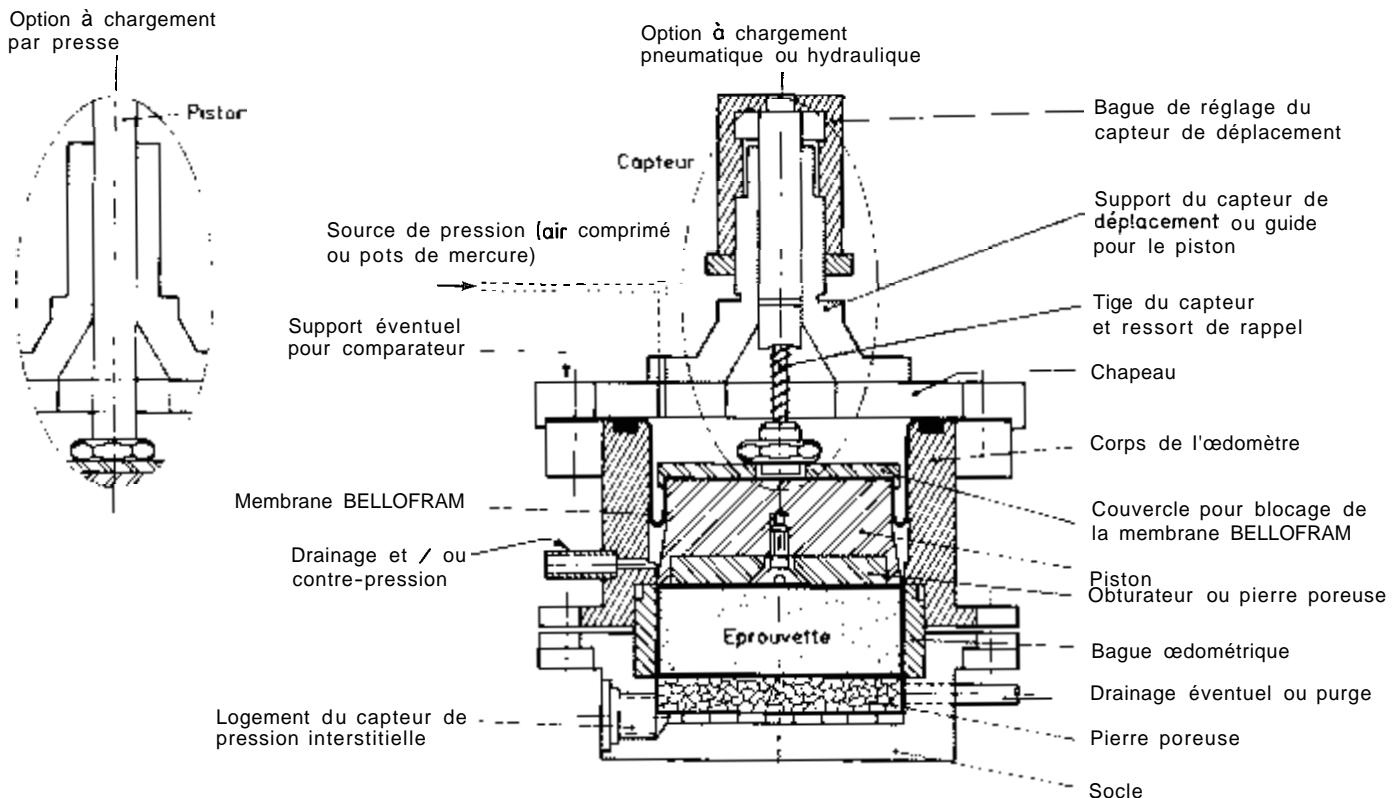
11.1.4 - SYSTEME DE REGULATION DE LA TEMPERATURE

Pour certains types d'essai il est nécessaire de pouvoir imposer à l'éprouvette de sol une température constante différente de la température ambiante de la salle d'essai. Ceci peut être réalisé en immergant la cellule oedométrique dans une cuve d'eau thermostatée. La figure 11.7 présente un exemple d'oedomètre automatique à mise à charge pneumatique permettant de réaliser des essais à température élevée (70 °C).

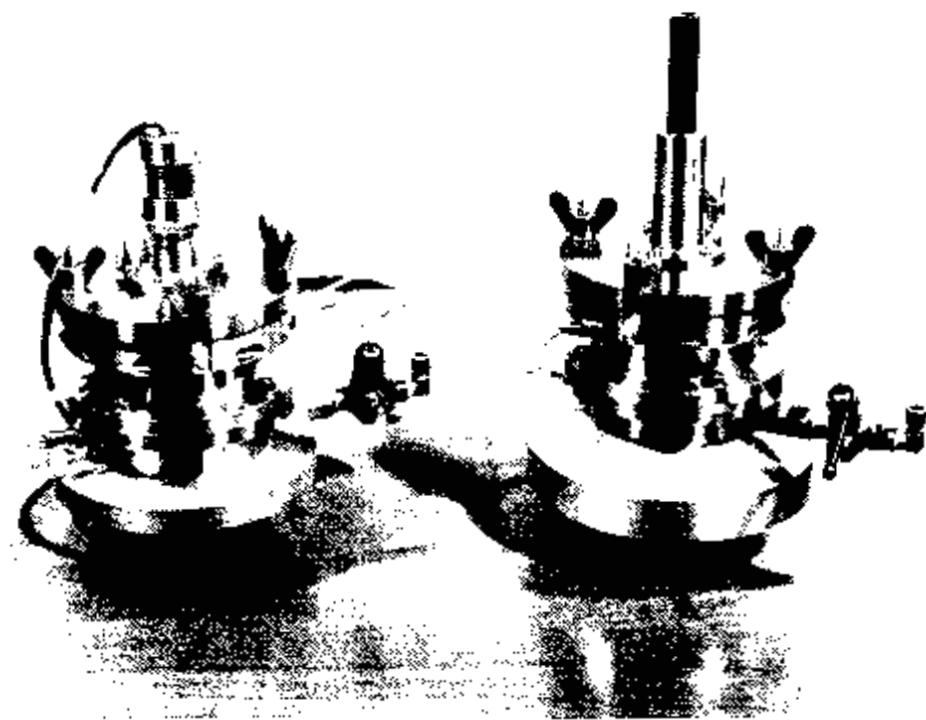
11.2 - APPAREILLAGE D'USAGE COURANT INDISPENSABLE POUR LA RÉALISATION DE L'ESSAI

On utilise le matériel suivant :

- une balance de précision 0,1 g et de portée 500 g minimum ;
- une étuve réglée à 105 °C pour les sols courants ou 65 °C pour les sols organiques ;
- des comparateurs au 1/100 de mm ayant une course au moins égale à l'épaisseur de l'éprouvette ou des capteurs de déplacement équivalents ;



a) Schéma de L'œdomètre à contre-pression

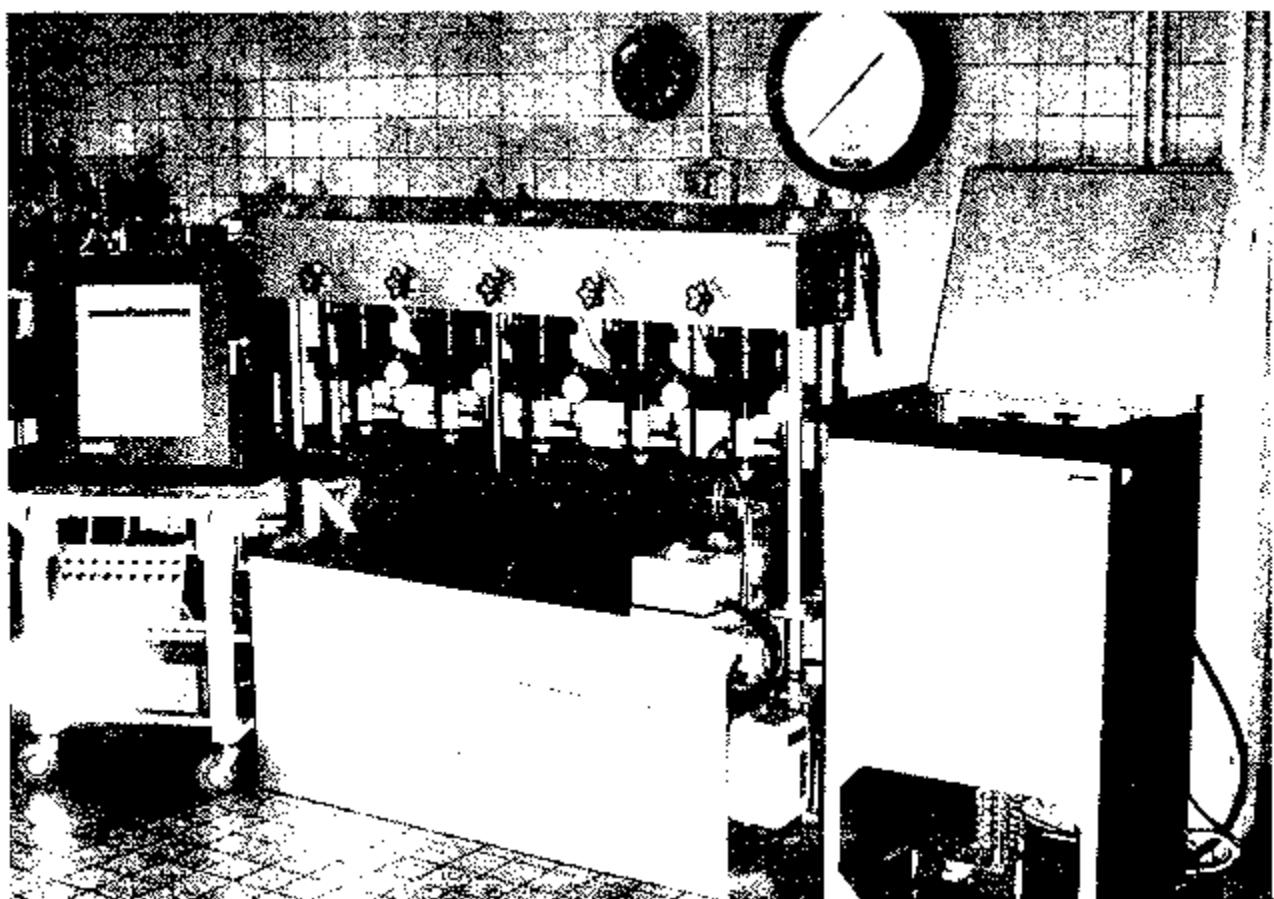


b) Vue d'ensemble de l'œdomètre à contre-pression

Fig. 11.6 Oedometre à contre-pression du CECP d'ANGERS



a) Détail de l'oedomètre accéléré du CEBTP



b) Vue d'ensemble d'une batterie d'oedomètres accélérés du CEBTP

Fig. 11.7 Oedometre accéléré du CEBTP (Centre d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics)

- un chronomètre ;
- du papier filtre pour protéger Les pierres poreuses ;
- Le matériel spécifique à chaque type d'oedomètre pour La préparation de l'échantillon (fil à araser, scies à fil, couteaux divers, etc.).

La figure 11.8 montre Le petit matériel nécessaire à La préparation des essais.



Fig. 11.8 Petit matériel nécessaire pour Les essais oedométriques

CHAPITRE 12 – PRÉLEVEMENT ET CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS INTACTS

12.1 – PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS INTACTS

Le prélèvement des échantillons se fait à l'aide d'un carottier enfoncé par pression, battage ou vibration. Dans les sols durs, le fonçage s'accompagne d'une rotation du carottier.

Pour prélever des échantillons intacts, c'est-à-dire des échantillons n'ayant subi qu'un très faible remaniement, le carottier doit avoir un bon indice de surface ($C_a < 12 \%$) et un faible indice de jeu intérieur ($0,5 \% < C_j < 1 \%$). Il doit contenir une enveloppe étanche qui recevra la carotte de sol au cours du prélèvement et servira à la manipulation et à la conservation.

Dans les sols mous, on doit utiliser un carottier à piston stationnaire (Fig. 12.1), dont l'enfoncement s'effectue uniquement par pression continue, sans mise en rotation du carottier.

Dans les sols raides, qui donnent le refus au carottier à piston stationnaire, on utilisera un carottier triple en rotation. Seule l'enveloppe extérieure est rotative et se termine à son extrémité par une couronne à grenade, à carbure de tungstène ou à diamants suivant les difficultés de pénétration. La rotation est accompagnée d'une injection d'eau ou de boue de bentonite au niveau de la couronne. On pourra également utiliser un carottier battu ayant un bon indice de surface. Ce dernier procédé est cependant à déconseiller dans les terrains sensibles aux vibrations.

Tout autre type de carottier est à proscrire. Il faut, par ailleurs, souligner que les sols mous et les sols raides ne peuvent être prélevés avec les mêmes carottiers. Le prélèvement des sols à l'aide d'un système mal adapté au terrain ne peut conduire qu'à un remaniement et, par conséquent, à perturber de manière importante les résultats des essais oedométriques.

En aucun cas, la pénétration du carottier ne doit dépasser la longueur du carottier.

Les diamètres adoptés pour les carottes sont en général compris entre 50 et 100 mm. Il faut choisir de préférence des diamètres supérieurs à 70 mm, les carottes offrant alors plus de facilités pour l'exécution des essais.

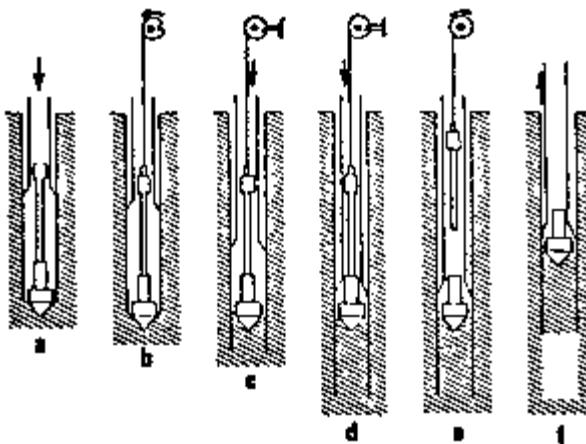


Fig. 12.1 Principe de fonctionnement du carottier à piston stationnaire à câble

- a) Mise en place du carottier, Le piston étant verrouillé
- b) Arrêt du fonçage et déverrouillage
- c) Fonçage du carottier, piston maintenu fixe par Le câble
- d) Verrouillage du piston en fin de course et déverrouillage de La tige du piston
- e) Remontée de la tige du piston et enlèvement du câble
- f) Remontée du carottier

12.2 - CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS

Dès la sortie de L'échantillon du carottier, les extrémités du conteneur doivent être hermétiquement bouchées. La paraffine pure, dont le retrait est trop important, est à exclure. On utilisera de préférence des bouchons extensibles par serrage ou des mélanges se solidifiant sans retrait (paraffine-cire, par exemple).

Les conteneurs ne devront jamais être exposés au soleil ni au gel et seront conservés en atmosphère fraîche et humide.

12.3 - TRANSPORT (Fig. 12.2)

Les échantillons seront transportés verticalement dans Le même sens que celui qu'ils avaient dans Le terrain, c'est-à-dire que La partie basse au transport devra correspondre à La plus grande profondeur.

On évitera Les chocs et les vibrations ; Les conteneurs reposeront sur une plaque souple, en mousse synthétique par exemple.

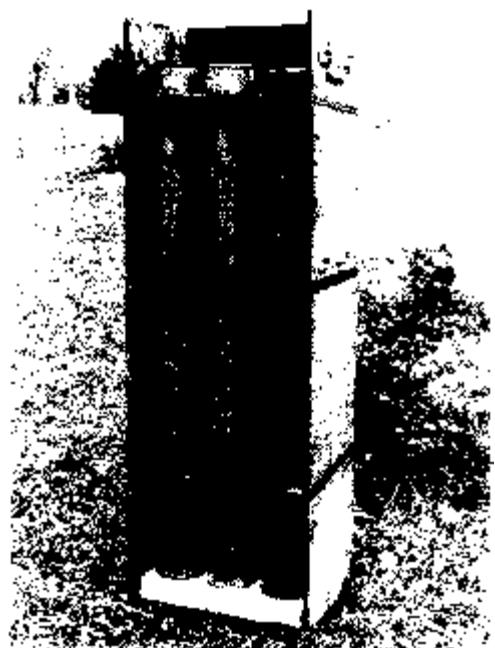


Fig. 12.2 Caisse de transport de carottes

CHAPITRE 13 – PRÉPARATION DE L'ÉPROUVEtte SOUMISE A L'ESSAI

13.1 – CHOIX DE LA PRISE D'ESSAI

Avant d'extraire une carotte de son conteneur et de faire un choix pour La prise d'essai, il est indispensable de rassembler au préalable Le maximum d'informations sur La coupe géotechnique. Les moyens peuvent être Les suivants :

- coupe du sondeur et, si possible, coupe de sondage d'un forage voisin du carottage (tarière à main, par exemple) ;
- profil de densité en continu grâce au passage de La carotte, dans son conteneur, au banc de nucléodensimétrie.

Si La carotte est présumée homogène, découper un cylindre ayant de 2 à 4 fois La hauteur de L'éprouvette désirée et commencer La préparation comme il est indiqué au paragraphe 13.3.

Si Le sol est hétérogène, il peut être indispensable d'ouvrir entièrement Le conteneur (paragraphe 13.2). Dans ce cas, immédiatement après L'ouverture, Le choix des prises nécessaires pour tous Les essais mécaniques (appareil triaxial, boîte de cisaillement, oedomètre, etc.) doit être fait en même temps et L'on doit tailler Les éprouvettes correspondantes dans un délai aussi court que possible.

Repérer La zone retenue pour La prise d'essai au centimètre près pour La situer sur La coupe de sondage.

a. Si La carotte est constituée de deux ou plusieurs sols différents, effectuer un essai oedométrique par sol ou, à défaut, un seul sur Le sol a priori Le plus compressible.

b. Si La carotte contient de petites hétérogénéités (inclusions, veines de nature différente, etc.), essayer de Les éviter mais Les noter sur La feuille des résultats.

c. Si La carotte est constituée de petites alternances de deux ou trois sols distincts qui se répètent, La considérer comme un sol homogène.

d. Si La carotte est très hétérogène, L'essai n'est pas adapté.

COMMENTAIRES

Lorsqu'une carotte est constituée de plusieurs sols différents, le nombre d'essais à effectuer ou le choix d'un de ces sols dans le cas d'un seul essai dépendent du problème posé et de la représentativité de ces sols dans la couche étudiée.

En tout état de cause, la plus ou moins grande représentativité de la prise d'essai dans une carotte hétérogène est importante et doit être soigneusement notée.

Les photographies sont recommandées.

Il serait souhaitable d'utiliser des moules oedométriques de plus grandes dimensions pouvant intégrer des hétérogénéités petites ou moyennes.

13.2 - EXTRACTION DE LA CAROTTE DE SON ETUI

La carotte intacte se présente généralement dans un étui en métal ou en matière plastique rigide. L'étui en métal ou "conteneur" est parfois fendu suivant une génératrice comportant plusieurs points de soudure.

- Repérer Le haut et Le bas de la carotte, avant L'extraction.
- Si possible, découper Le conteneur suivant une génératrice avec une meule en évitant d'entamer la carotte.
- Eviter de faire sauter brutalement au burin les points de soudure.
- L'extraction de l'échantillon par vérinage doit être évitée dans les sols très mous.
- Entreprendre rapidement L'essai pour éviter La dessication.

COMMENTAIRES

Certains sols très compressibles (vases molles, tourbes peu denses) souffrent à un tel point de la minérale manutention qu'il est préférable d'effectuer l'essai de compressibilité dans l'étui tronçonné plutôt que de tenter l'extraction de la carotte. Cette opération nécessite d'adapter les pierres poreuses et le piston au diamètre du conteneur et ne peut être réalisée qu'avec des bâts oedométriques comportant un bac de saturation dans lequel l'ensemble peut être immergé (voir par exemple la figure 11.4).

13.3 - DÉCOUPAGE ET MISE EN PLACE DE L'ÉPROUVENTE SOUMISE À L'ESSAI

IL s'agit d'obtenir une éprouvette :

- non perturbée par le découpage ;
- cylindrique, aux dimensions exactes de La cellule ;
- ayant deux faces planes et parallèles.

Le choix du mode de découpage dépend du type de matériel utilisé (il dépend aussi du sol, de L'expérience et de L'habileté de l'opérateur). Les oedomètres d'usage courant se répartissent en deux groupes :

- les oedomètres dépourvus de trousse coupante ;
- Les oedomètres à trousse coupante.

Les paragraphes 13.3.1 et 13.3.2 décrivent les procédures propres aux oedomètres de ces deux types.

13.3.1 - CELLULES OEDOMETRIQUES SANS TROUSSE COUPANTE

La description ci-après est relative à La cellule de TERZAGHI (fig. 11-2).

13.3.1.1 - Dimensions de L'éprouvette

Le diamètre est imposé par La cellule oedométrique : $D = 70 \text{ mm}$.

Deux hauteurs sont données par La position de La goupille de blocage : 12 mm et 24 mm. En règle générale, on prendra La hauteur la plus grande, afin d'avoir un nombre de mesures suffisant avant la fin de la consolidation et de faire L'essai sur un échantillon un peu plus représentatif de La masse du sol.

La cellule oedométrique classique n'est plus adaptée à l'essai lorsque Le sol possède des éléments de dimension supérieure à 5 mm ou plus de 20 % d'éléments supérieurs à 2 mm (ces chiffres ne devant être considérés que comme des ordres de grandeur).

13.3.1.2 - Découpage et mise en place de l'éprouvette

- Si l'on ne connaît pas de façon certaine la profondeur du Logement destiné à recevoir l'éprouvette pour la position choisie de La goupille de blocage, monter l'oedomètre à vide et déterminer à L'aide des comparateurs La course totale du piston (hauteur initiale de l'éprouvette).

COMMENTAIRES

Il est conseillé de connaître une fois pour toutes la profondeur exacte du logement de la cellule pour les deux positions de la goupille de blocage.

- Goupiller le piston après s'être assuré qu'il coulisse librement dans Le cylindre. Le moule oedométrique sera rempli "par le bas", c'est-à-dire en pratique en position renversée, comme on le voit sur les figures 13.2 et 13.3.

- Découper dans la carotte au niveau choisi (§ 13.1) un cylindre de hauteur égale à 2 à 4 fois celle de l'éprouvette (suivant la consistance du sol et les difficultés prévisibles de La taille).

- Dresser soigneusement La face de L'éprouvette qui s'applique sur la base du piston (cette face doit être perpendiculaire à l'axe du cylindre).

- Commencer à tailler le cylindre en s'appuyant sur le gabarit, d'une façon tronconique, afin de conserver un diamètre toujours supérieur au diamètre final (Fig. 13.1). Utiliser L'outil le mieux adapté. Pour cette première phase, on peut choisir un couteau.

- Mettre un papier filtre sur la pierre poreuse du piston, saturée au préalable.

- Faire entrer l'éprouvette dans le moule, progressivement et sans effort, en réduisant le diamètre du cône de sol au diamètre exact de la cellule, au moyen, par exemple, de L'outil montré sur la figure 13.2 (spatule échancrée prenant appui sur le bord de la cellule oedométrique).

- S'assurer, sans pression excessive, que l'éprouvette est au contact de la pierre poreuse du piston.

- Araser en s'appuyant franchement sur les bords du cylindre pour obtenir une face plane. Utiliser de préférence un **fil**. Ne pas lisser la face (Fig. 13.3).

- Peser l'ensemble cellule + échantillon pour pouvoir calculer La teneur en eau exacte en fin d'essai.

- Mettre un papier filtre sur la pierre poreuse de l'embase de la cellule, préalablement saturée et maintenue sous l'eau.

- Retourner l'ensemble moule + éprouvette + piston et le mettre en place dans 1^{er} embase.

- Avant de visser le collier de serrage, s'assurer par une légère rotation. que le cylindre s'appuie bien sur le fond de l'embase.

- Bien visser le collier de serrage à l'aide des deux broches, mais sans écraser au maximum le joint d'étanchéité.

- Bien serrer les comparateurs dans leur support et s'assurer du libre mouvement des palpeurs.

- Remplir au même niveau d'eau distillée Le tube d'évacuation et le piston creux de telle manière que l'échantillon soit complètement immergé tout au long de L'essai.

COMMENTAIRES

Dans le cas où l'on souhaite réaliser dans la cellule oedométrique des essais de perméabilité, il faut



Fig. 13.1 Taille tronconique d'une éprouvette d'essai



Fig. 13.2 Réduction d'un diamètre du cône de sol

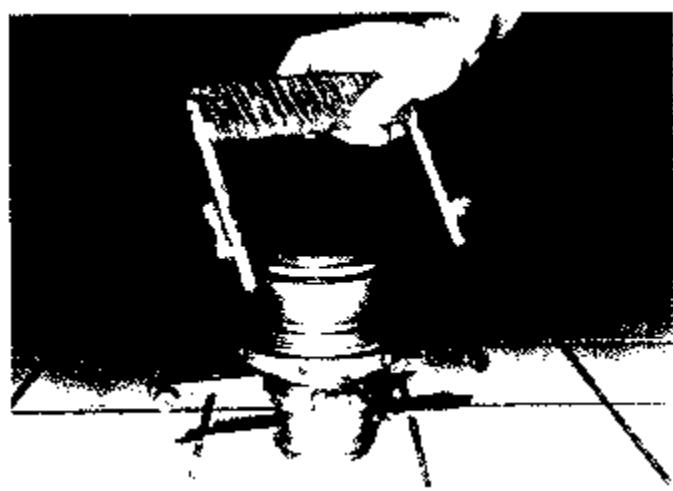


Fig. 13.3 Arasage de L'éprouvette

veiller :

- à l'étanchéité du joint situé à la base du moule ;
- à la saturation des deux pierres poreuses ;
- à la mise en place de papier filtre entre l'éprouvette et les deux pierres poreuses pour conserver leur porosité.

Si l'éprouvette de sol se met à gonfler lorsqu'on la met au contact de l'eau, on se trouve en présence d'un sol gonflant pour lequel il est utile de déterminer la pression de gonflement. Dès que l'on aura constaté le gonflement du sol on appliquera sur le piston des charges suffisantes pour annuler le gonflement. La pression de gonflement est égale à la charge nécessaire pour bloquer le gonflement. De plus, il faudra réfléchir à l'intérêt de réaliser des essais de gonflement, tels qu'ils sont décrits dans la section VII du présent document.

13.3.2 - CELLULES OEDOMETRIQUES MUNIES D'UNE TROUSSE COUPANTE

L'utilisation de cellules munies d'une trousse coupante est préférable dans le cas de sols très mous.

La description ci-après est relative à l'oedomètre à chargement pneumatique du C.E.C.P. d'ANGERS (fig. 11-4).

13.3.2.1 - Dimensions de l'éprouvette

Le diamètre imposé par la bague oedométrique est $D = 60$ mm. Le bâti permet de tester des échantillons jusqu'à 25 mm de hauteur. La bague généralement utilisée correspond à une hauteur de 25 mm.

13.3.2.2 - Découpage et mise en place de l'éprouvette

La mise en place de l'échantillon dans la bague oedométrique du C.E.C.P. d'ANGERS, munie d'une trousse coupante amovible, nécessite l'utilisation du matériel accessoire indiqué sur la figure 13.4b.

- Découper dans la carotte, au niveau choisi (§.13.1), un cylindre de hauteur égale à 2 à 3 fois celle de l'éprouvette. Extraire de son conteneur le cylindre de sol.

- Placer le cylindre de sol dans le tube de guidage (Fig. 13.4) ; auparavant, bien graisser ce tube (ce tube ayant un diamètre légèrement supérieur à celui de la carotte, l'introduction se fait sans effort).

- Mettre le tube de guidage avec l'échantillon de sol sur le bâti, la bague oedométrique munie de la trousse coupante étant placée dans le logement prévu à cet effet. Au préalable, bien graisser l'intérieur de la trousse coupante et de la bague oedométrique.

- A l'aide d'un cylindre, pistonner le matériau sur une longueur légèrement supérieure à la hauteur de l'ensemble bague + trousse coupante.

- Dégager la trousse coupante en tirant vers le haut et en retenant le matériau avec un piston.

- Araser le matériau sur les deux faces de la bague, de préférence avec un fil (Fig. 13.3), sans lisser la surface.

- Peser l'ensemble bague + éprouvette pour pouvoir calculer la teneur en eau en fin d'essai.

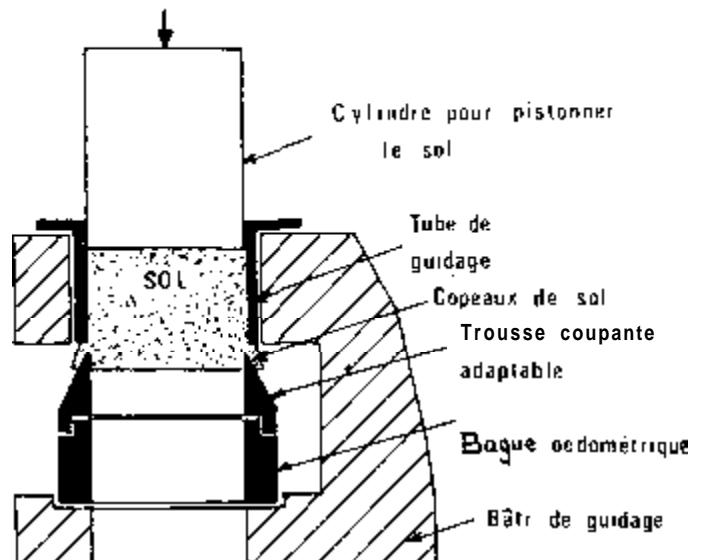


Fig. 13.4 a) Photographie de la mise en place de l'échantillon dans la bague oedométrique munie de La trousse coupante
 b) Représentation schématique de La mise en place de l'échantillon

13.3.2.3 - Montage de la cellule sur le bâti pneumatique

- Saturer les deux pierres poreuses (base et piston) avec de l'eau désaérée;
- Mettre du papier filtre entre l'éprouvette et les deux pierres poreuses ;
- Placer la pierre poreuse de base au fond du bac plastique et poser la bague oedométrique sur la pierre poreuse ;
- Centrer la bague au moyen du disque métallique usiné à cet effet et bloquer les trois écrous ;
- Remplir le bac avec de l'eau désaérée et placer Le piston supérieur. Il faudra veiller à maintenir un niveau d'eau suffisant tout au long de L'essai.

La figure 33.5 montre l'ensemble des pièces utilisées.

COMMENTAIRES

Si l'éprouvette de sol se met à gonfler lorsqu'on la met au contact de l'eau, on se trouve en présence d'un sol gonflant pour lequel il est utile de déterminer la pression de gonflement. Dès que l'on aura constaté le gonflement du sol, on appliquera sur le piston des charges suffisantes pour annuler le gonflement. La pression de gonflement est égale à la charge nécessaire pour bloquer le gonflement. De plus, il faudra réfléchir à l'intérêt de réaliser des essais de gonflement, tels qu'ils sont décrits dans la section VII du présent document.

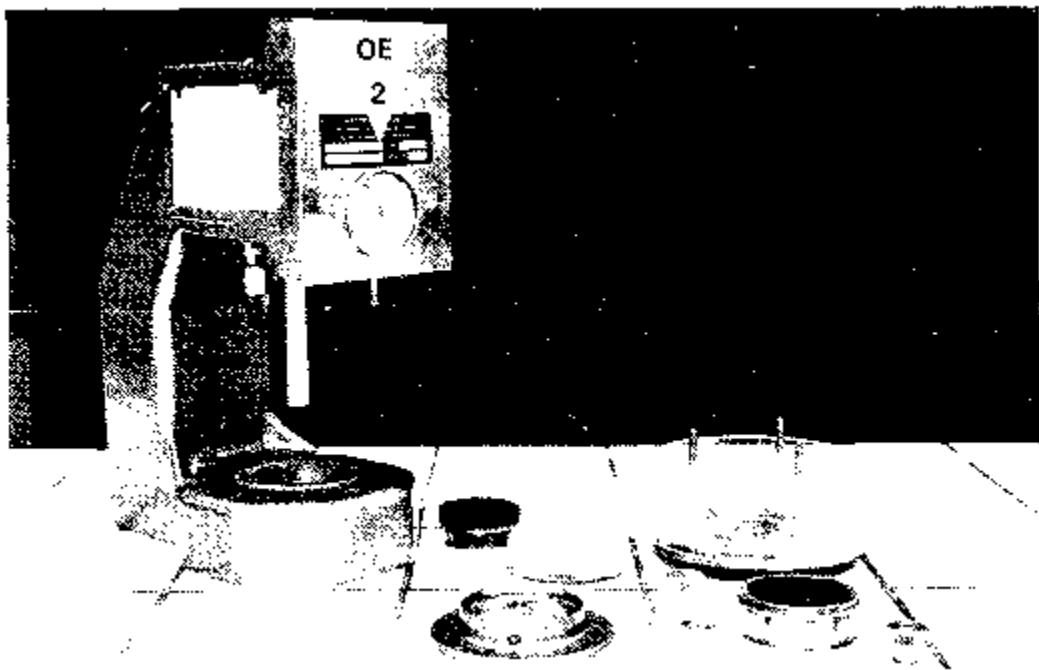


Fig. 13.5 Détail des diverses pièces utilisées pour
Le montage de La cellule sur Le bâti pneumatique

13.3.2.4 - Montage des cellules avec prise de pression interstitielle

Comme précédemment :

- saturer les deux pierres poreuses
- et placer les papiers filtres.

Ensuite :

- s'assurer de la bonne saturation du conduit jusqu'au niveau du capteur de pression interstitielle,
- maintenir un film d'eau au-dessus de la pierre poreuse inférieure,
- placer L'ensemble "bague + échantillon" dans son logement en ouvrant Le robinet de purge, robinet que L'on fermera dès que Le contact est assuré,
- terminer le montage de la cellule.

(La présente description correspond au matériel de la figure 11.6).

SECTION 2 - ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ PAR PALIERS

CHAPITRE 21 – EXÉCUTION DE L'ESSAI

21.1 – APPAREILLAGE ET OPÉRATIONS DIVERSES

21.1.1 – APPAREILLAGE

L'essai de compressibilité par paliers est depuis de nombreuses années L'essai oedométrique de référence et de nombreux modèles d'oedomètres sont proposés sur Le marché. Ces oedomètres, dont des exemples ont été décrits au chapitre 11, peuvent être divisés en deux catégories, selon qu'ils permettent ou non L'application d'une contre-pression. Ces deux catégories d'oedomètres sont couramment utilisées à L'heure actuelle. Toutefois, compte tenu de ce qui est indiqué dans Le paragraphe suivant 1.1.2, il est souhaitable d'utiliser un matériel permettant d'appliquer une contre-pression.

21.1.2 – SATURATION DE L'ÉPROUVENTE

L'essai de compressibilité par paliers fournit des indications à La fois sur la compressibilité du sol et sur sa vitesse de consolidation. Pour L'interprétation des courbes de consolidation (courbes de tassement en fonction du temps sous charge constante), on utilise la théorie de la consolidation unidimensionnelle de Terzaghi qui suppose que le sol est saturé d'un liquide incompressible. Il est pour cette raison indispensable de réaliser l'essai sur une éprouvette de sol saturé.

Pour saturer une éprouvette de sol, il faut appliquer une contre-pression pendant toute la durée de l'essai. L'application d'une contre-pression n'est possible que dans Les oedomètres où l'éprouvette de sol est placée dans une enceinte étanche. La mise en charge de l'eau interstitielle doit s'accompagner de L'application sur le piston de l'oedomètre d'une pression Légèrement supérieure à La valeur de la contre-pression (quelques kPa suffisent à maintenir le piston au contact de L'éprouvette). La contre-pression appliquée doit assurer la saturation presque parfaite de l'éprouvette. Sa valeur dépend du sol et de son degré de saturation initial.

Pour déterminer, pour une éprouvette donnée, la valeur de La contre-pression nécessaire, on peut opérer de la façon suivante :

- on intercale une burette de type Bishop sur Le ou Les circuits de drainage relié(s) à La contre-pression (fig. 21.1) ;
- on augmente progressivement la contre-pression en notant Le volume de l'eau (désaérée) entrant dans l'éprouvette de sol ;
- Lorsque le volume d'eau entrant dans l'éprouvette devient négligeable quand on augmente la contre-pression, on considère que la saturation est satisfaisante et on conserve cette même valeur de la contre-pression pendant tout l'essai.

Une fois effectuée la saturation de l'éprouvette, on attendra quelques heures avant de commencer l'essai afin de laisser les gaz interstitiels se dissoudre plus complètement dans l'eau interstitielle.

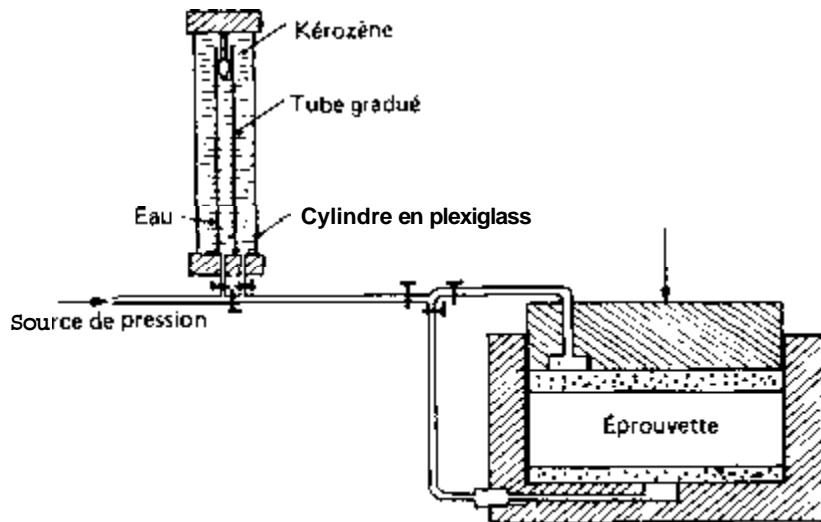


Fig. 21.1 Dispositif de contrôle de la saturation de l'éprouvette

COMMENTAIRES

Il est difficile de saturer complètement une éprouvette de sol fin qui n'est pas saturée à l'état naturel. L'opération qui consiste à placer dans un bac d'eau désaérée la bague oedométrique contenant l'éprouvette ne permet pas de saturer le sol. D'autre part, la circulation d'eau désaérée à travers l'éprouvette n'est pas non plus une solution satisfaisante car elle ne permet pas de chasser complètement les bulles de gaz occlus dans le sol et présente d'autre part le défaut majeur de modifier la nature chimique du liquide interstitiel.

La saturation des sols par contre-pression nécessite un matériel spécifique et allonge la préparation de l'essai. Dans beaucoup de cas, et notamment pour la plupart des sols compressibles prélevés sous la nappe, le degré de saturation naturel du sol est assez proche de 1 pour que l'on puisse réaliser l'essai sans procéder à une resaturation préalable en laboratoire, ce qui permet d'utiliser les oedomètres sans contre-pression.

Si l'on réalise des essais de compressibilité par paliers sur des sols non saturés sans procéder au préalable à la saturation des éprouvettes, on obtiendra une estimation de l'amplitude des tassements en fonction de la charge mais des valeurs peu fiables des coefficients de consolidation.

Dans certains types de sols (loess, certains matériaux compactés), la saturation provoque un effondrement de la structure du squelette, de sorte que les courbes de compressibilité obtenues sur le sol non saturé et sur le sol saturé peuvent être différentes.

21.1.3 - PESÉE EN FIN D'ESSAI

En fin d'essai on déterminera le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de l'é-

prouvette après séchage à l'étuve (24 heures à 65 °C pour les sols organiques et 105 °C pour les autres sols).

COMMENTAIRES

Si on souhaite déterminer le poids humide du sol en fin d'essai (cf. § 22.1), il est nécessaire de mesurer le gonflement du sol après déchargement complet et de ne pas l'ensemble "bague plus sol" qu'après stabilisation de ce gonflement.

21.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

L'essai proprement dit consiste à soumettre l'éprouvette à une série de charges définie ci-après et à mesurer le tassement du sol au cours du temps sous chacune de ces charges.

21.2.1 - LOI DE CHARGEMENT

La loi de chargement est définie par la succession des contraintes effectives σ'_n imposées à l'éprouvette à la fin de chacun des paliers de l'essai. La contrainte effective σ'_n à la fin du palier de chargement d'indice n est égale à :

$$\sigma'_n = \sigma_n - u_{cp} \quad .$$

avec

σ_n - contrainte totale appliquée (pression exercée par le piston),

u_{cp} - contre pression éventuelle (maintenue constante pendant l'essai).

La contrainte effective σ'_n est appelée "charge appliquée au palier n ".

Le taux d'accroissement de charge est défini par la relation :

$$i = \frac{\sigma'_{n+1} - \sigma'_n}{\sigma'_n}$$

21.2.1.1 - Chargement de l'éprouvette

La loi de chargement dépend de la valeur de la contrainte effective verticale initiale σ'_{vo} existant dans l'éprouvette avant son prélèvement.

La première charge appliquée sur l'éprouvette oedométrique doit être petite devant σ'_{vo} . On choisira de préférence 5 kPa ou une charge voisine suivant le matériel utilisé. Cette première charge permettra de corriger les défauts de surface de l'échantillon et de mise en place du piston ; elle donnera également le premier point de la courbe de compressibilité.

Jusqu'à la contrainte effective σ'_{vo} , les charges appliquées seront égales successivement à $\frac{\sigma'_{vo}}{2}$, $\frac{3\sigma'_{vo}}{4}$, σ'_{vo} . Si l'échantillon est surconsolidé, on poursuivra le chargement avec un taux d'accroissement de 0,5 jusqu'à la pression a'_p .

Cette pression σ'_{p} étant le plus souvent inconnue au moment de l'essai, il faudra tracer la courbe de tassement relatif $\Delta H/H$ en fonction de la contrainte effective appliquée. La pression de préconsolidation σ'_{p} est située au voisinage de la courbure maximale de la courbe. On considère que l'on a dépassé σ'_{p} dès qu'une courbure marquée apparaît.

A ce niveau, décharger jusqu'à La première charge σ'_1 en s'arrêtant à une charge intermédiaire σ' , telle que la distance entre σ' et σ'_p soit approximativement égale à celle comprise entre σ'_1 et σ' dans une échelle Logarithmique, puis recharger en suivant Le même chemin de contrainte. Poursuivre ensuite L'essai en appliquant Les chargements successifs définis avec un taux d'accroissement de 1 (doublement de La charge).

Le tableau 21.1 présente Le programme de chargement d'une éprouvette de sol ayant supporté dans Le terrain une pression $\sigma'_{vo} = 40$ kPa. La pression de préconsolidation σ'_p est inconnue.

La courbe de tassement relatif en fonction du Logarithme de La contrainte effective a été tracée au fur et à mesure du chargement et a permis de placer La boucle de déchargement Lorsqu'a été atteinte La pression de 90 kPa (Fig. 21.1).

TABLEAU 21.1

ORDRE DE CHARGEMENT	EXPRESSION DE LA CHARGE	VALEUR EN kPa	TAUX D'ACCROISSEMENT
1	suivant le matériel	5	
2	$\sigma'_{vo}/2$	20	
3	$\frac{3 \sigma'_{vo}}{4}$	30	(0,5)
4	σ'_{vo}	40	(0,33)
5	$\sigma'_{vo} + \frac{\sigma'_{vo}}{2} = \frac{3 \sigma'_{vo}}{2}$	60	(0,5)
6	$\frac{3 \sigma'_{vo}}{2} + \frac{3 \sigma'_{vo}}{4} = \frac{9 \sigma'_{vo}}{4}$	90	(0,5)
7		20	déchargement
8		5	déchargement
9		20	rechargement
10	$\frac{9 \sigma'_{vo}}{4}$	90	rechargement
11	$\frac{9 \sigma'_{vo}}{2}$	180	1
12	$9 \sigma'_{vo}$	360	1
13	$19 \sigma'_{vo}$	720	1

Dans Le cas des sols très surconsolidés (σ'_p très supérieur à σ'_{vo}) on pourra Limiter Le nombre de paliers de chargement en déterminant Les premières charges à partir d'une pression de référence σ'_r voisine de La valeur estimée de σ'_p . Le programme de chargement sera dans ce cas, jusqu'au cycle de déchargement-rechargement :

$$5 \text{ kPa}, \frac{1}{2} \sigma'_r, \frac{3}{2} \sigma'_r, \sigma'_r, \frac{3}{2} \sigma'_r$$

Dans Le cas de sols soumis en place à de faibles contraintes effectives, Les paliers de chargement peuvent être difficiles à réaliser. On adaptera Le programme de chargement en conservant si possible 2 ou 3 paliers entre σ'_{vo} et σ'_p .

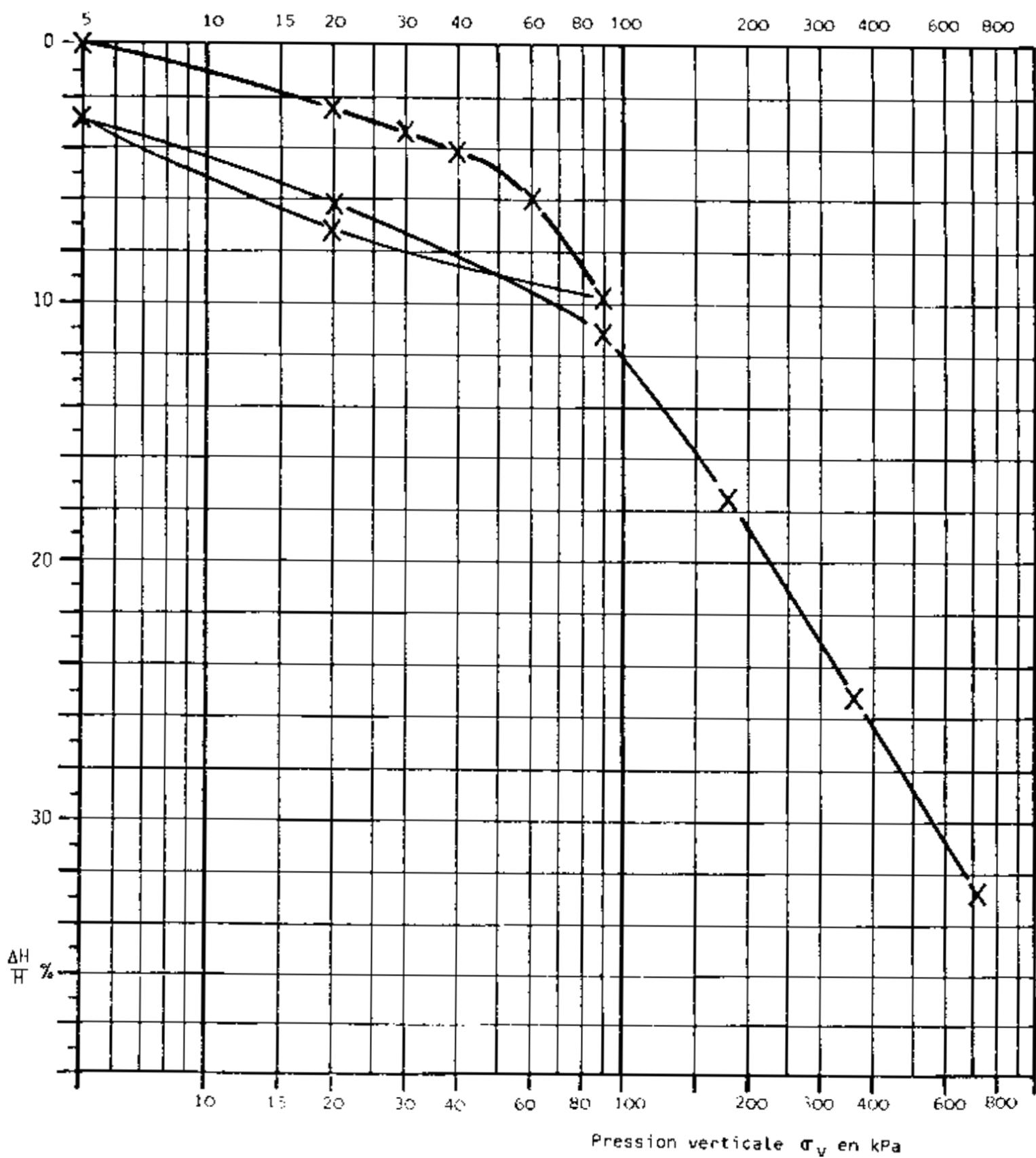


Fig. 21.1 Courbe de tassement relatif $\frac{\Delta H}{H} \%$ en fonction de la contrainte effective, tracée au fur et à mesure du chargement

Dans tous les cas, on reprendra le rythme de chargement normal (doublement de la charge) après le cycle de déchargement-rechargement.

COMMENTAIRES

La boucle de déchargement-rechargement simule le gonflement qui résulte de l'extraction de l'échantillon du sol et éventuellement du déchargement de σ'_p à σ'_v . Cette boucle doit donc être située au voisinage de σ'_p .

La pente moyenne de ce cycle est aussi un critère de remaniement. En effet, si cette pente est très différente de celles de la courbe de compressibilité obtenue entre σ'_v et σ'_p , on peut en déduire que l'échantillon a été remanié. En pratique, on considérera que l'échantillon n'est pas remanié lorsque la droite de pente C_s tracée à partir du premier point de la courbe et parallèle à la boucle de déchargement-rechargement recoupe la courbe de compressibilité (figure 21.2) ■

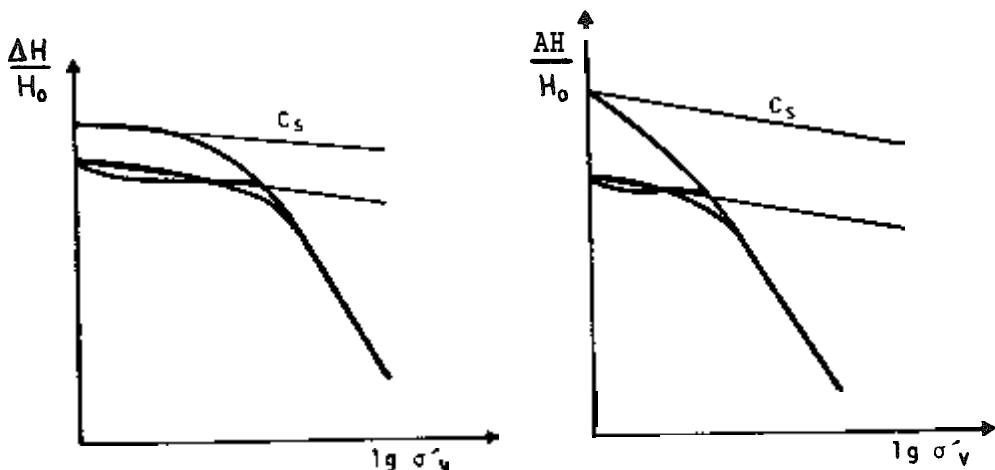


Fig. 21.2 Critère de remaniement

a) Echantillon peu remanié

b) Echantillon très remanié

21.2.1.2 - Charge maximale

La charge maximale à appliquer sur l'éprouvette oedométrique sera déterminée en fonction de 2 critères :

- il est nécessaire d'obtenir 3 points alignés dans la partie droite de la courbe de compressibilité ;

- la dernière charge devra dépasser la charge réelle qu'il est prévu d'appliquer sur le terrain naturel.

21.2.1.3 - Cas particulier des sols gonflants

Si l'éprouvette a tendance à gonfler en présence d'eau, appliquer immédiatement et progressivement des charges jusqu'à l'apparition du tassement, afin d'empêcher ce gonflement. Noter la pression correspondante et poursuivre normalement l'essai comme indiqué ci-dessus.

21.2.2 - DUREE DES PALIERS DE CHARGEMENT

Chaque charge sera appliquée pendant une période de 24 h. Cette durée pourra être réduite pour les paliers du cycle de déchargement-rechargement à condition de vérifier que les déformations sont stabilisées avant de modifier la charge.

COMMENTAIRES

La durée imposée aux paliers de chargement est une valeur conventionnelle justifiée par plus de cinquante années d'usage courant pour ce type d'essai. On peut penser que, pour certains sols peu perméables, cette durée est insuffisante tandis que pour d'autres elle est trop importante. Néanmoins, il paraît préférable de ne pas modifier la procédure de cet essai par paliers, pour lequel on dispose d'une grande expérience, et de se tourner vers d'autres types d'essais (par exemple, ceux décrits dans les sections IV à VI du présent document) si l'on souhaite diminuer la durée des essais oedométriques.

21.2.3 - MESURES DU TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS

Effectuer des lectures aux comparateurs aux temps suivants :

0 - 15 s - 30 s - 1 min - 2 min - 4 min - 8 min - 15 min - 30 min - 60 min - 2 h - 4 h - 8 h - 24 h.

L'essentiel est de respecter le mieux possible cette progression des temps et surtout de noter exactement les temps réels des lectures.

Noter les amplitudes de tassement au centième de millimètre.

Ces mesures ne sont pas nécessaires pendant les paliers de déchargement-rechargement. Il suffira de noter le tassement juste avant d'appliquer la charge suivante.

CHAPITRE 22 – CALCULS ET RÉSULTATS

22.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

Les calculs élémentaires ont pour but, d'une part, de déterminer l'indice des vides du sol avant l'essai et sa variation au cours de la consolidation et, d'autre part, de caractériser l'éprouvette par les principaux paramètres d'identification.

22.1.1 – CALCUL DE L'INDICE DES VIDES

Deux méthodes peuvent être utilisées pour calculer l'indice des vides de l'éprouvette de sol :

$$e = \frac{H - h_p}{h_p}$$

H : hauteur de l'éprouvette au moment considéré ,

h_p : hauteur de solide équivalente ou hauteur des pleins .

1ère méthode : h_p est donné par la relation

$$h_p = \frac{w_d}{\gamma_s s}$$

w_d : poids de sol sec obtenu par pesée de l'éprouvette après passage à l'étuve (§ 21.1.3),

s : section droite de l'éprouvette,

γ_s : poids volumique des grains. On pourra prendre généralement $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ mais la mesure de γ_s est indispensable dans les sols organiques et calcaires.

2e méthode : h_p est donné par la relation

$$h_p = H_o - \frac{w - w_d}{s \gamma_w}$$

H_o : hauteur initiale de l'éprouvette,

w : poids initial humide de l'éprouvette,

w_d : poids de sol sec obtenu par pesée de l'éprouvette après passage à l'étuve (§ 21.1.31),

s : section droite de l'éprouvette.

h_p peut aussi être calculé à partir des caractéristiques finales (cf § 21.1.3).

Cette deuxième méthode n'est valable que si l'échantillon est saturé.

L'indice des vides initial e_i s'obtient en faisant $H = H_0$ dans l'expression de e .

COMMENTAIRES

La deuxième méthode a pour avantage de ne pas nécessiter la connaissance de γ_s . Par contre, le poids humide initial (ou final) ne peut être connu avec suffisamment de précision que pour les oedomètres munis de bague. Dans le cas des autres appareillages, tels que le moule de TERZAGHI, la pesée de l'ensemble cellule plus piston ne permet généralement pas d'avoir une détermination assez précise de la teneur en eau.

e_i est l'indice des vides initial du sol en laboratoire avant l'essai. Il est donc différent de l'indice des vides e_o du sol en place (remaniement, gonflement dû à la décompression).

La vraie valeur de l'indice des vides e_o en place est impossible à connaître. Une méthode d'estimation est donnée dans le § 22.2.3 mais elle suppose implicitement un faible remaniement de l'échantillon pour qu'elle soit valable.

22.1.2 - DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

L'éprouvette testée dans l'essai oedométrique sera caractérisée par les paramètres suivants :

- teneur en eau initiale de l'éprouvette : $w = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100$
- poids volumique initial du sol sec : $\gamma_d = \frac{W_d}{S H_0}$
- poids volumique initial : $\gamma = \frac{W}{S H_0}$

22.2 - CARACTÉRISTIQUES DE COMPRESSIBILITÉ

22.2.1 - COURBE DE COMPRESSIBILITÉ (fig. 22.1)

Représenter dans un diagramme e - Lg a' Les points (e_n, σ'_n) , e_n étant l'indice des vides atteint en fin de palier de chargement sous la charge σ'_n .

Relier ces points par une courbe continue (courbe de compressibilité expérimentale).

Tracer la droite AB selon la pente moyenne de la boucle de déchargement-recharge.

A partir du point D origine de la courbe de compressibilité expérimentale, tracer la droite DL parallèle à AB.

Tracer la droite MN qui linéarise la seconde partie de la courbe de compressibilité expérimentale (au-delà du coude).

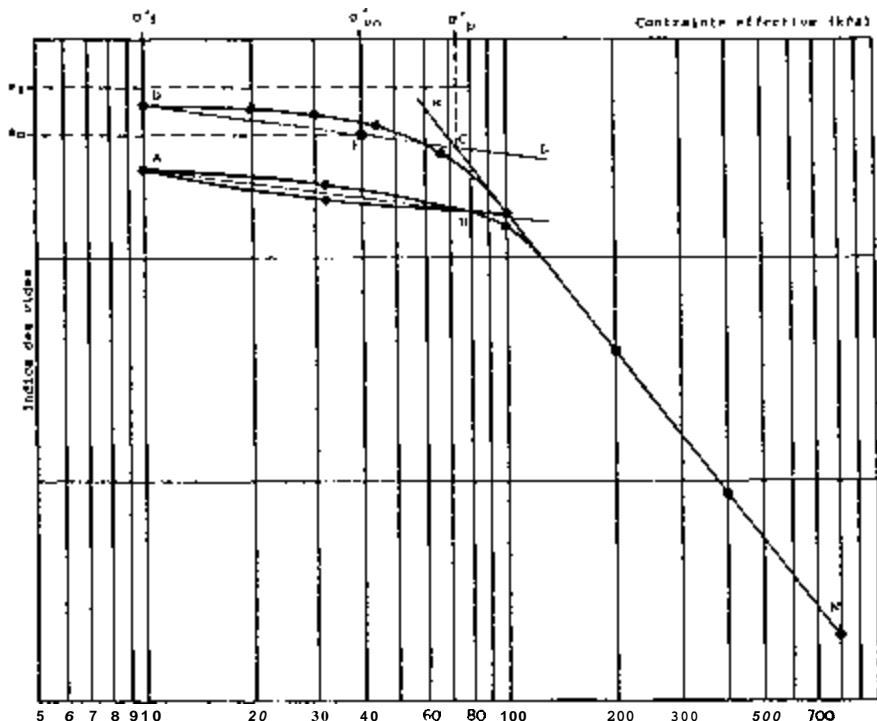


Fig. 22.1 Détermination graphique de a'_p

22.2.2 - INDICES DE COMPRESSION ET DE GONFLEMENT

La pente de la droite DL de la figure 22.1 est appelée "indice de gonflement" et notée C_s :

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta(\lg \sigma)} \quad |_{D_1}$$

La pente de la droite MN de la figure 22.1 est appelée "indice de compression" et notée C_c :

$$C_C = - \frac{\Delta e}{\Delta(\lg \sigma^*)} \quad |_{MN}$$

22.2.3 - PRESSION DE PRECONSOLIDATION

Les droites DL et MN de la figure 22.1 se coupent au point C . La contrainte σ' correspondant au point C est appelée "pression de préconsolidation" et notée a' .

COMMENTAIRE 1

Si $\sigma'_p > \sigma'$ on dit que le sol est surconsolidé.

Si $\sigma'_p = \sigma'$ on dit que le sol est normalement consolidé.

Si $\sigma'_p < \sigma'_{vo}$, il y a une anomalie, en général, la valeur de σ'_{vo} a été mal estimée (erreur sur la pression interstitielle le plus souvent) ou bien le sol a été remanié lors de son prélevement et l'essai donne des résultats peu fiables.

COMMENTAIRE 2

La pression de préconsolidation peut être estimée par d'autres méthodes : de BURMISTER, de SCHMERTMANN, de CASAGRANDE.

Ces méthodes sont décrites dans les ouvrages généraux de Mécanique des Sols. Elles nécessitent en général une expérience de recompression de l'éprouvette après la première décompression. Elles ont toutes pour inconvénient de dépendre beaucoup de l'opérateur (en particulier la méthode de CASAGRANDE qui est la plus généralement employée).

La méthode proposée ici donne le même résultat quel que soit l'opérateur et se prête d'ailleurs très bien à la programmation sur calculateurs (le cycle de déchargement-rechargement étant remplacé par des segments de droite). Par contre, elle a pour inconvénient de dépendre du choix de la première charge.

Le cycle de déchargement-rechargement effectué en laboratoire a pour but de simuler celui qu'a suivi le sol antérieurement :

σ'_{p} à σ'_{vo} : si le sol est surconsolidé,
 σ'_{vo} à 0 : prélèvement de l'échantillon,
0 à σ'_{p} : chargement en laboratoire.

Le choix de σ'_{i} est arbitraire et affecte peu le résultat. Il correspond à une commodité de construction dans un diagramme à échelle semi-logarithmique.

Le résultat dépend aussi de la valeur de la charge à partir de laquelle s'effectue le cycle de déchargement-rechargement. C'est pourquoi il est souhaitable de réaliser ce cycle à partir d'une charge proche de la pression de préconsolidation σ'_{p} estimée, comme il est indiqué au § 21.2.1.

Enfin, il faut souligner que toutes les méthodes pour déterminer a'_{p} sont imparfaites et, en particulier, que la valeur de la pression de préconsolidation peut être plus affectée par la durée de l'essai et le choix de l'incrément de charge que par le principe de détermination.

22.2.4 - INDICE DES VIDES EN PLACE

Pour les sols normalement consolidés et surconsolidés, Le point E de la droite DL d'abscisse σ'_{vo} a pour ordonnée e_0 , valeur approchée de L'indice des vides en place.

22.2.5 - COURBE DE COMPRESSIBILITE CORRIGEE

Les deux segments de droite EC et ON constituent la courbe de compressibilité corrigée de l'éprouvette de sol soumise à l'essai.

COMMENTAIRES

Pour un sol surconsolidé, les points E et C sont distincts.

Pour un sol normalement consolidé, les points E et C sont confondus, mais il faut tout de même déterminer la valeur de l'indice de gonflement, qui peut servir pour les calculs en cas de déchargement du sol dans le projet étudié.

22.2.6 - MODULE OEDOMETRIQUE

Le module oedométrique E_{oed} a pour définition $E_{\text{oed}} = \frac{\Delta G'}{\Delta H/H_0}$.

Ce module varie avec la contrainte effective σ' et il est nécessaire de préciser pour chaque valeur la variation de contraintes à laquelle il correspond. Par exemple :

$$E_{\text{oed}}(\sigma'_1, \sigma'_2) = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{(H_1 - H_2)/H_0} ,$$

en désignant par H_1 et H_2 les épaisseurs de l'éprouvette sous les contraintes verticales σ'_1 et σ'_2 , respectivement, et par H_0 la hauteur initiale de l'éprouvette.

A partir d'un essai de compressibilité par paliers, on peut définir :

- un module oedométrique pour chaque palier de chargement

$$E_{\text{oed}}(\sigma'_n, \sigma'_{n+1}) = \frac{\sigma'_{n+1} - \sigma'_n}{(H_n - H_{n+1})/H_0} = \frac{(\sigma'_{n+1} - \sigma'_n)(1 + e_0)}{e_n - e_{n+1}} ,$$

- des modules sécants entre deux points de la courbe de compressibilité

$$E_{\text{oed}}(\sigma'_1, \sigma'_2) = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{(H_1 - H_2)/H_0} = \frac{(\sigma'_2 - \sigma'_1)(1 + e_0)}{e_1 - e_2} ,$$

- un module tangent en chaque point de la courbe de compressibilité

$$E_{\text{oed}}(\sigma') = \frac{23 \sigma' (1 + e_0)}{c_c \text{ ou } c_s} .$$

22.3 - COURBES "TASSEMENTS - TEMPS"

L'exploitation des courbes de consolidation ("tassements-temps") ne sera faite que pour $\sigma' > \sigma'_{vo}$.

22.3.1 - CONSTRUCTION GRAPHIQUE (Méthode de TAYLOR)

On trace pour une charge donnée la courbe des tassements $s (= \Delta H)$ en fonction de la racine carrée du temps (fig. 22.2). La lecture initiale s_0 ne sera pas prise en compte dans la construction ci-après.

Tracer la droite D_1 correspondant à la partie quasi linéaire du début de la courbe de tassement. Cette droite coupe l'axe des ordonnées en un point s_c qui est le zéro corrigé.

De ce point s_c , on trace une droite D_2 de pente 1,15 fois plus faible que celle de D_1 . L'intersection avec la courbe donne le point correspondant à 90 % de consolidation primaire (point d'ordonnée s_{90}).

Vérifier que la fin de la partie linéaire de la courbe de tassement est proche de 60 % de consolidation (point d'ordonnée s_{60}) :

$$\frac{\sigma - s_c}{s_{90} - s_c} + \frac{6}{9} .$$

Dans le cas contraire, refaire une (ou plusieurs) linéarisation(s) jusqu'à satisfaire ce critère.

Le temps correspondant à 90 % de consolidation est noté t_{90} .

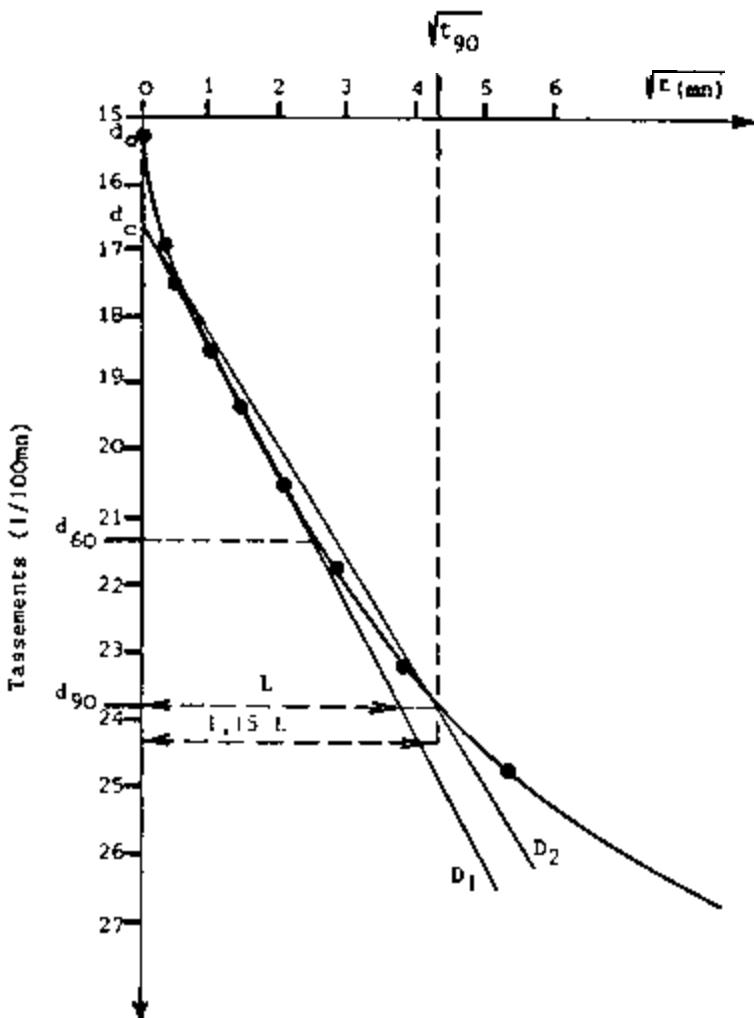


Fig. 22.2 Courbe de tassement en fonction du temps (\sqrt{t}). Principes de l'exploitation graphique

COMMENTAIRES

Une méthode couramment utilisée pour la détermination de c_v est fondée sur la représentation du tassement en fonction du logarithme du temps (méthode proposée par CASAGRANDE et décrite dans la plupart des ouvrages de mécanique des sols).

Dans bien des cas la méthode de CASAGRANDE n'est pas utilisable, la forme de la courbe ne se prêtant pas à la construction graphique :

- cas des sols présentant une forte compression secondaire ;
- faibles incrément de charge ;
- fortes valeurs de c_v ($c_v > 10^{-7}$ à $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

L'emploi de la méthode de TAYLOR (§.22.3.1) est préférable dans le cas des sols présentant une forte compression secondaire ; par contre, elle nécessite des mesures précises en début d'essai, d'où le grand intérêt d'une acquisition automatique des résultats. Cette méthode n'est correctement appliquée que si on vérifie bien, a posteriori, que la linéarisation porte effectivement sur 60 % de consolidation.

En règle générale, que l'on utilise la méthode de TAYLOR ou de CASAGRANDE, on n'accordera une valeur repré-

sentative qu'aux coefficients de consolidation c_v déterminés pour des charges $\sigma' > \sigma'_p$.

Pour les charges $\sigma'_{vo} < \sigma' < \sigma'_p$, le coefficient de consolidation sera calculé à partir de l'extrapolation de la loi expérimentale $e = f(\lg k)$ décrite au § 22.4.

Afin d'éliminer le facteur "opérateur", il est recommandé d'utiliser un calculateur de bureau ou un ordinateur pour l'exploitation automatique de l'essai.

22.3.2 - CALCUL DU COEFFICIENT DE CONSOLIDATION

Le coefficient de consolidation c_v est un facteur qui apparaît dans La théorie de la consolidation et qui permet de relier les temps de tassement à l'épaisseur de la couche de sol intéressée.

$$\text{Il est défini par : } c_v = \frac{T_v d^2}{t} ,$$

T_v : facteur temps, fonction du degré de consolidation U ,

t : temps nécessaire pour atteindre Le degré de consolidation U ,

d : distance de drainage (épaisseur ou demi-épaisseur de L'échantillon suivant que le drainage se fait sur une ou deux faces) au début du palier de chargement considéré.

Pour $U = 90\% \quad T_v = 0,848$

$$\text{d'où } c_v = \frac{0,848}{t_{90}} d^2$$

22.3.3 - CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITÉ

Pour l'incrément de charge σ'_{n+1} à σ'_{n+1} , Le coefficient de perméabilité k_{vn} est donné par la relation :

$$k_{vn} = c_{vn} \cdot m_{vn} \cdot \gamma_w$$

où c est Le coefficient de consolidation déterminé pour l'incrément σ'_{n+1} à σ'_{n+1} ,

$$m_{vn} = -\frac{1}{1+e_{mn}} \frac{e_n - e_{n+1}}{\sigma'_{n+1} - \sigma'_{n+1}} \quad (\text{coefficient de compressibilité}) ,$$

e_n est L'indice des vides pris sur La courbe de compressibilité pour $\sigma' = \sigma'_{n+1}$,

$$e_{mn} = \frac{e_n + e_{n+1}}{2} \quad \text{est L'indice des vides moyen .}$$

22.4 - DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE PERMÉABILITÉ ET DE CONSOLIDATION CORRIGÉS

Reporter sur un diagramme semi-Logarithmique l'indice des vides e_{mn} en fonction du logarithme de La perméabilité k_{vn} (cf. exemple, figure 22.4). Faire passer une droite par les points représentés en excluant ceux de La plage (σ'_{vo} , σ'_{p}), fréquemment dispersés. On obtient ainsi Les coefficients e_k et c_k de l'équation :

$$e = e_k + c_k \lg k_v .$$

Prolonger la droite ainsi obtenue jusqu'à $e = e_0$.

On obtient ainsi un diagramme de variation de La perméabilité en fonction de L'indice des vides. Connaissant Les variations de e en fonction de La charge σ' (courbe de compressibilité), on peut en déduire La loi expérimentale des variations de la perméabilité k_v en fonction de La charge.

Cette loi permet de calculer Les valeurs du coefficient de consolidation c_{vn} corrigé , au moyen des relations :

$$c_v = \frac{k_v (1+e)}{0,454 c_s \gamma_w} \sigma' \quad \text{pour } \sigma'_{vo} < \sigma' < \sigma'_{p} ,$$

$$c_v = \frac{k_v (1+e)}{0,434 c_c \gamma_w} \sigma' \quad \text{pour } \sigma'_{p} < \sigma'$$

Dans ces relations :

- e est l'indice des vides correspondant à la charge a' , pris sur La courbe vierge,
- k_v est le coefficient de perméabilité, pris sur la droite définie ci-dessus,
- c_c , c_s sont les indices de compression et de gonflement.

22.5 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour chaque essai de compressibilité par paliers, il est nécessaire de constituer un dossier comprenant :

- les minutes des essais (résultats des pesées et remarques éventuelles sur La préparation de L'essai, programme du chargement, tableau des Lectures de tassements au cours du temps pour chaque palier de chargement),
- la courbe de tassement relatif en fonction de La charge construite point par point au cours de L'essai,
- Les courbes de tassement en fonction du temps pour chaque palier de chargement, avec La construction de TAYLOR pour chaque courbe et Le résultat du calcul de c_v ,
- Le diagramme "e-Lg k " obtenu pour l'essai,
- Le diagramme de variation de c_v en fonction de La contrainte effective σ' ,
- La courbe de compressibilité, avec La construction donnant σ' , c_c et c_s .

Il est recommandé de donner Les résultats sous une forme synthétique aisément incorporable dans Les dossiers. La figure 22.3 présente un modèle de fiche de synthèse.

22.6 - EXEMPLE

Les caractéristiques de L'échantillon testé sont récapitulées dans L'en-tête de La figure 22.4.

Le tableau 22.3 récapitule Les calculs préliminaires et Les résultats bruts de l'essai. A partir de ces résultats, on peut construire La courbe de compressibilité : $e = f(\lg \sigma')$ et déterminer ainsi Les valeurs de σ'_{p} , c_s et c_c (Fig. 22.4).

Le tableau 22.2 donne un exemple de tassements mesurés en fonction du temps pour un des paliers de charge et La figure 22.5 Le diagramme correspondant et Le calcul de c_v par La méthode de TAYLOR.

Les valeurs de c_{vn} ainsi déterminées pour chaque palier de charge sont reportées dans le tableau 22.1.

ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ
PAR PALIERS

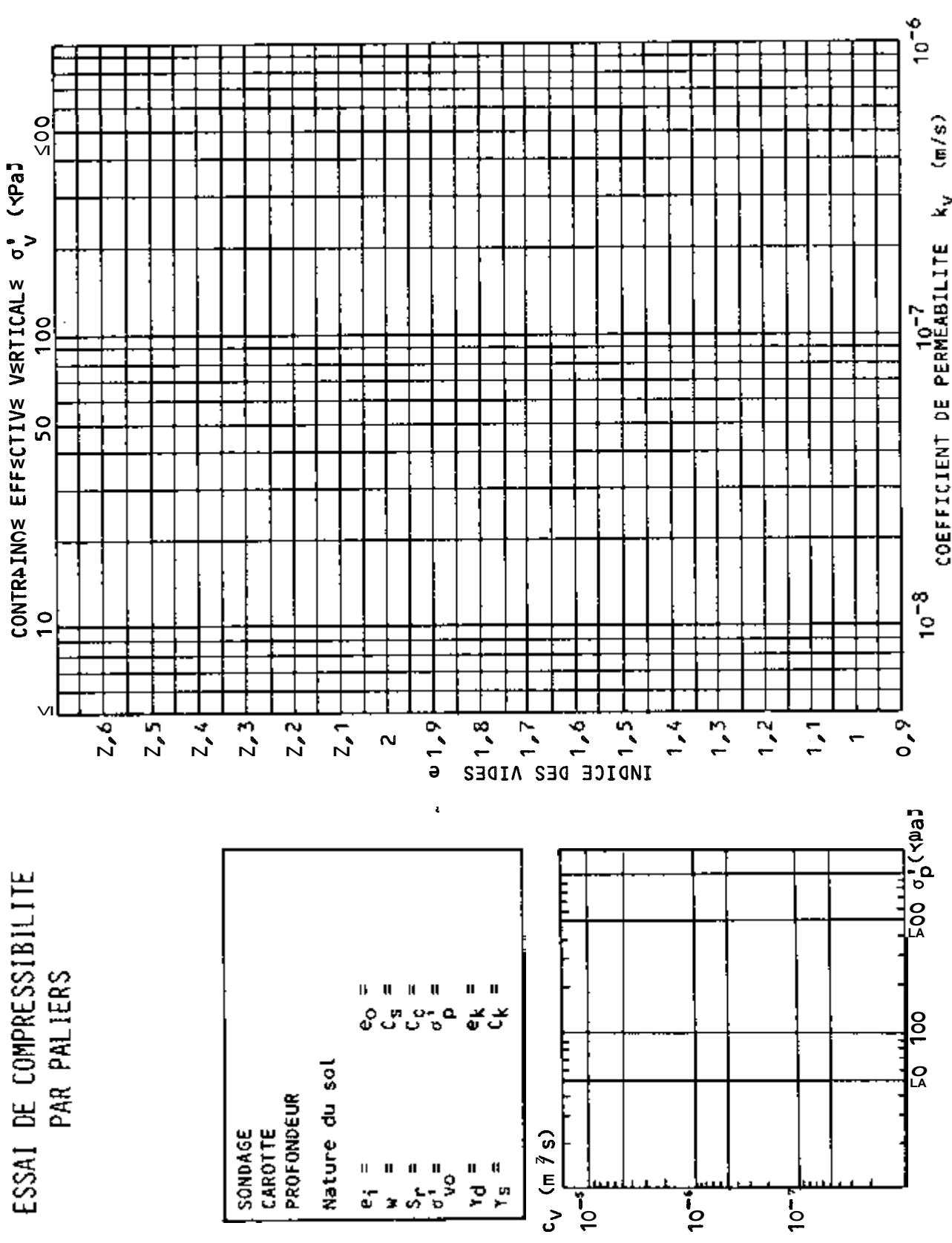


fig. 22.3 Modèle de fiche de synthèse des principaux résultats des essais de compressibilité par paliers

ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ
PAR PALIERS

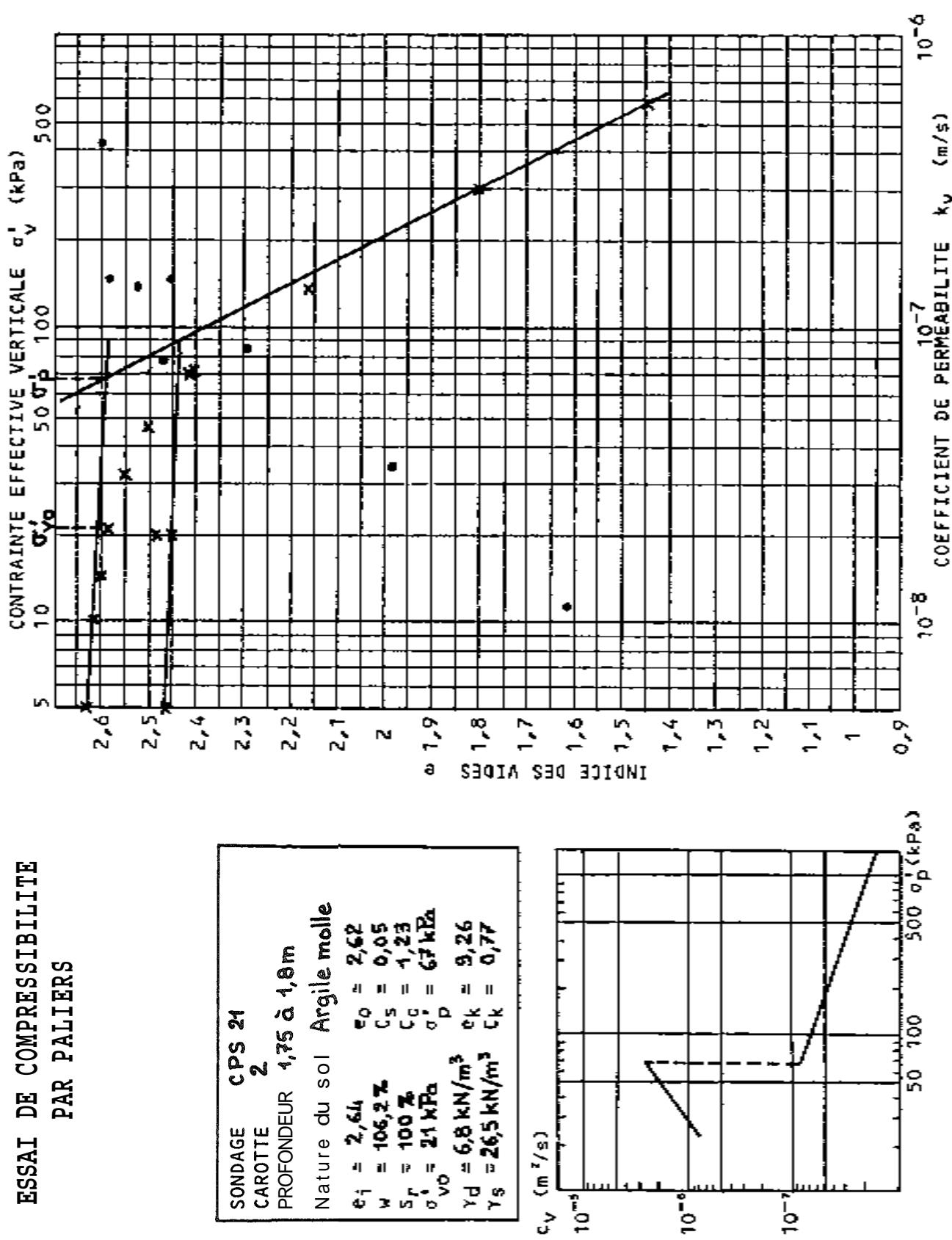


Fig. 22.4 Exemple de résultats d'essai (feuille de synthèse)

Tableau 22.1

Sondage n° : C.P.S. 21	Dossier n° : FAER 1.06.12.6
Echantillon n° : 2	Projet : CUBZAC - Remblai B
Horizon : 1,75 à 1,8 m	
Nature : argile molle	
W total humide = 1,5351 N	Eprouvette : ($S = 38,5 \text{ cm}^2$)
W total sec = 0,855 N	($H_o = 24,34 \text{ mm}$)
Tare = 0,215 N	$h_p = \frac{W_d}{\gamma_s S} = 6,68 \text{ mm}$
W_{eau} = 0,6801 N	$e_i = \frac{H_o - h_p}{h_p} = 2,64$
W_d = 0,64 N	$w = 106,2$

DATES	PRESSIONS (kPa)	TASSEMENT $\frac{1}{100}$ de mm)	H=H _o - H (mm)	$e = \frac{H-h_p}{h_p}$	e _{mn}	VALEURS NON CORRIGEES	
						c _v (m ² /s)	k _v (m/s)
14.3.77	0	-	24,34	2,641	-	-	-
14.3.77	5	4	24,30	2,635	2,638	-	-
15.3.77	10,4	14,1	24,20	2,620	2,628	-	-
16.3.77	15	23	24,11	2,607	2,614	-	-
17.3.77	21	28,25	24,06	2,599	2,603	-	-
18.3.77	31,5	54,25	33,80	2,560	2,580	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$
21.3.77	47,2	88	23,46	2,510	2,535	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
22.3.77	70,8	137	22,97	2,436	2,473	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
23.3.77	19	117,75	23,16	2,465	2,451	$8,9 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$
23.3.77	5	99,75	23,34	2,492	2,479	-	-
24.3.77	19	104	23,30	2,486	2,489	-	-
24.3.77	70,8	144,5	22,89	2,425	2,456	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
25.3.77	150	317	21,17	2,167	2,296	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$
28.3.77	300	564,75	18,69	1,797	1,982	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$
29.3.77	600	806,5	16,27	1,435	1,616	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$

Tableau 22.2
Tassements mesurés en fonction du temps

Temps (min)	0	0,25	0,5	1	2	4	8	15
Tassements ($\frac{1}{100}$ de mm)	144,5	163	168,5	175,5	185	198	215,25	234
Temps (min)	30	60	120	240	480	1440		
Tassements ($\frac{1}{100}$ de mm)	252,25	271	285	297	305	319		

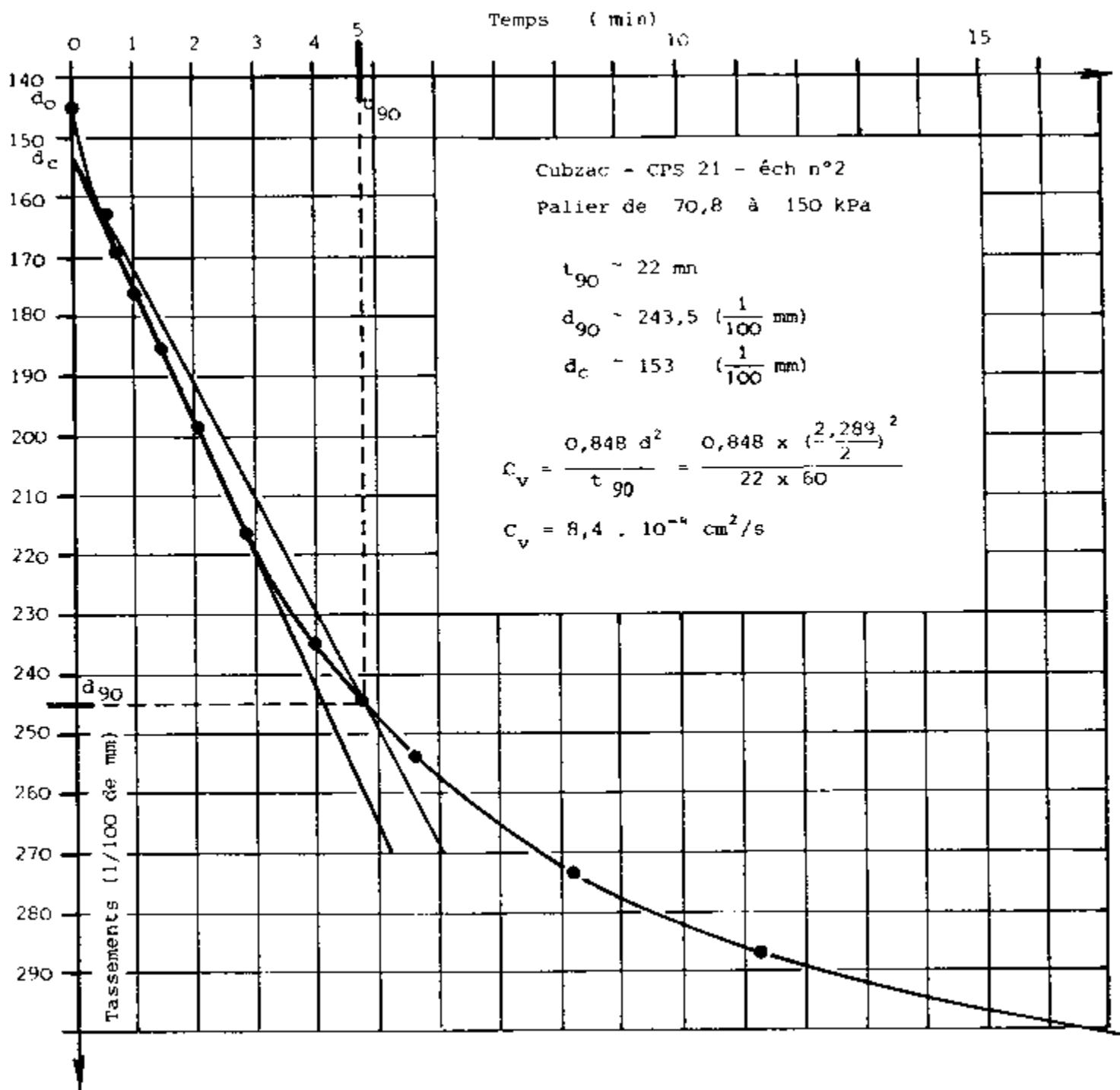


Fig. 22.5 - Exemple de courbe de tassement en fonction de \sqrt{t} pour un palier de charge. Détermination de C_v

Le coefficient de perméabilité est donné par la relation :

$$k_{vn} = c_{vn} \cdot m_{vn} \cdot \gamma_w$$

Pour La charge $a' = 150 \text{ kPa}$, on calcule :

$$k_{vn} = \frac{8,4 \cdot 10^{-8} \times \frac{(2,43 - 2,17)}{150 - 70,8} \times 10}{1 + \frac{2,43 + 2,17}{2}} = 8,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

Les valeurs de k_{vn} ainsi déterminées pour chaque charge sont reportées dans Le tableau 22.1.

Le diagramme de La figure 22.4 donne Les variations de e en fonction de $\lg k_v$.

Ce diagramme met en évidence La dispersion des résultats pour Les charges comprises entre a'_{vo} et a'_{p} . La Linéarisation retenue pour la loi $e = f(\lg k_v)$ s'écrit :

$$e = 9,26 + 0,77 \lg k_v \quad (k_v \text{ en m/s})$$

Les deux courbes de la partie droite de la figure 22.4 permettent donc de calculer les variations de c_v corrigé en fonction de La charge σ' (§ 22.4).

Par exemple, pour $a' = 110 \text{ kPa}$ (valeur moyenne pour le palier 70,8 à 150 kPa) :

$$e = 2,335 \quad k_v = 10^{-9} \text{ m/s} \quad \text{d'où}$$

$$c_v = \frac{10^{-9} (1 + 2,335)}{0,434 \times 1,23 \times 10} \times 110 = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

L'ensemble des résultats $c_v = f(\sigma')$ est reporté sur Le diagramme de gauche de la figure 22.4. Le choix d'une échelle bilogarithmique correspond seulement à une commodité de représentation.

Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des résultats pour l'échantillon testé.

$\sigma'_{vo} = 21 \text{ kPa}$	$\sigma'_{p} = 67 \text{ kPa}$
$c_s = 0,05$	$c_c = 1,23$
$e_i = 2,65$	$e_o = 2,63$
$e = 9,26 + 0,77 \lg k_v \quad (k_v \text{ en m/s})$	
$c_v = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour } \sigma' = \sigma'_{vo}$	
$c_v = 9,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour } \sigma' = \sigma'_{p}$	

Les valeurs de c_v ne sont données qu'à titre indicatif : c'est l'utilisation du diagramme $c_v = f(\sigma')$ qui permettra de retenir la valeur adéquate ou mieux La loi expérimentale de variation à introduire dans un programme de calcul.

SECTION 3 - ESSAI DE FLUAGE

CHAPITRE 31 – EXÉCUTION DE L'ESSAB

31.1 - APPAREILLAGE ET OPÉRATIONS DIVERSES

31.1.1 - APPAREILLAGE

L'essai de fluage peut être exécuté avec l'un quelconque des modèles d'oeedomètres disponibles sur le marché. La saturation préalable de l'éprouvette n'est pas nécessaire.

31.1.2 - PESEE EN FIN D'ESSAI

En fin d'essai, on déterminera le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de l'éprouvette après séchage à l'étuve (24 h à 65 °C pour les sols organiques et 105 °C pour les autres sols).

31.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

L'essai consiste à mesurer le tassement de l'éprouvette pendant une période de durée au moins égale à 7 jours sous plusieurs charges appliquées successivement.

31.2.1 - LOI DE CHARGEMENT

Le nombre des paliers de chargement sera normalement de trois, pour les charges σ'_{vo} , σ'_{p} et σ'_{vf} , contrainte effective verticale finale sous l'ouvrage terminé.

Dans le cas où l'urgence de l'étude ne permet pas la réalisation de ces 3 paliers, on pourra ne réaliser qu'un seul chargement sous σ'_{vf} .

31.2.2 - MESURES DU TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS

Les lectures seront faites avec la même périodicité que pour l'essai de compressibilité par paliers, soit :

0 - 15s - 30s - 1min - 2min - 4min - 8min - 15min - 30min - 1h - 2h - 4h - 8h - 24h, puis une fois par jour, au moins jusqu'à 7 jours (durée minimale des paliers de chargement).

On notera les amplitudes de tassement au centième de millimètre.

CHAPITRE 32 – CALCULS ET RÉSULTATS

32.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

32.1.1 – CALCUL DE L'INDICE DES VIDES

On calculera l'indice des vides à l'instant t au moyen de la formule

$$e = \frac{H - h_p}{h_p}$$

avec H – épaisseur de l'éprouvette à l'instant considéré,
 h_p – hauteur de solide équivalente, égale à

$$h_p = \frac{w_d}{\gamma_s \cdot S}$$

w_d – poids de sol sec obtenu par pesée de l'éprouvette après passage à l'étuve (§ 31.1.2),

S – section droite de l'éprouvette,

γ_s – poids volumique des grains. On pourra prendre généralement $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ mais la mesure de γ_s est indispensable dans les sols organiques et calcaires.

COMMENTAIRES

On peut utiliser la seconde méthode du paragraphe 22.1.1 à condition de saturer l'éprouvette avant l'essai et d'effectuer les pesées nécessaires.

32.1.2 – DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

L'éprouvette testée dans l'essai oedométrique sera caractérisée par les paramètres suivants :

- teneur en eau initiale de l'éprouvette : $w = \frac{w - w_d}{w_c} \times 100$
- poids volumique initial du sol sec $\gamma_d = \frac{w_d}{S \cdot H_0}$
- poids volumique initial $\gamma = \frac{w}{S \cdot H_0}$

32.2 - COURBES DE TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS

Pour chacun des paliers de chargement, tracer dans un diagramme **semi-logarithmique** la courbe de tassement AH en fonction du temps exprimé en minutes, comme indiqué sur La figure 32.1. La partie finale de la courbe est généralement Linéaire.

Tracer la droite correspondant à cette phase de l'essai.

Choisir sur cette droite deux temps t_1 et t_2 auxquels correspondent les tassements ΔH_1 et ΔH_2 .

Le taux de compression secondaire C_α est donné par la relation :

$$C_\alpha = \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{H_0} \cdot \frac{1}{\lg t_2/t_1}$$

Dans l'exemple de La figure 32.1, on détermine ainsi :

$$C_\alpha = \frac{1}{24,35} \cdot \frac{(936 - 924) \cdot 10^{-2}}{\lg \frac{9000}{2000}} = 0,0075$$

L'indice de fluage C_{ae} est égal pour sa part à

$$C_{ae} = \frac{\Delta e}{\Delta \lg t} = (1+e_0) C_\alpha$$

e_0 désignant l'indice des vides **initial** de L'essai.

Dans L'exemple de La figure 32.1, on obtient :

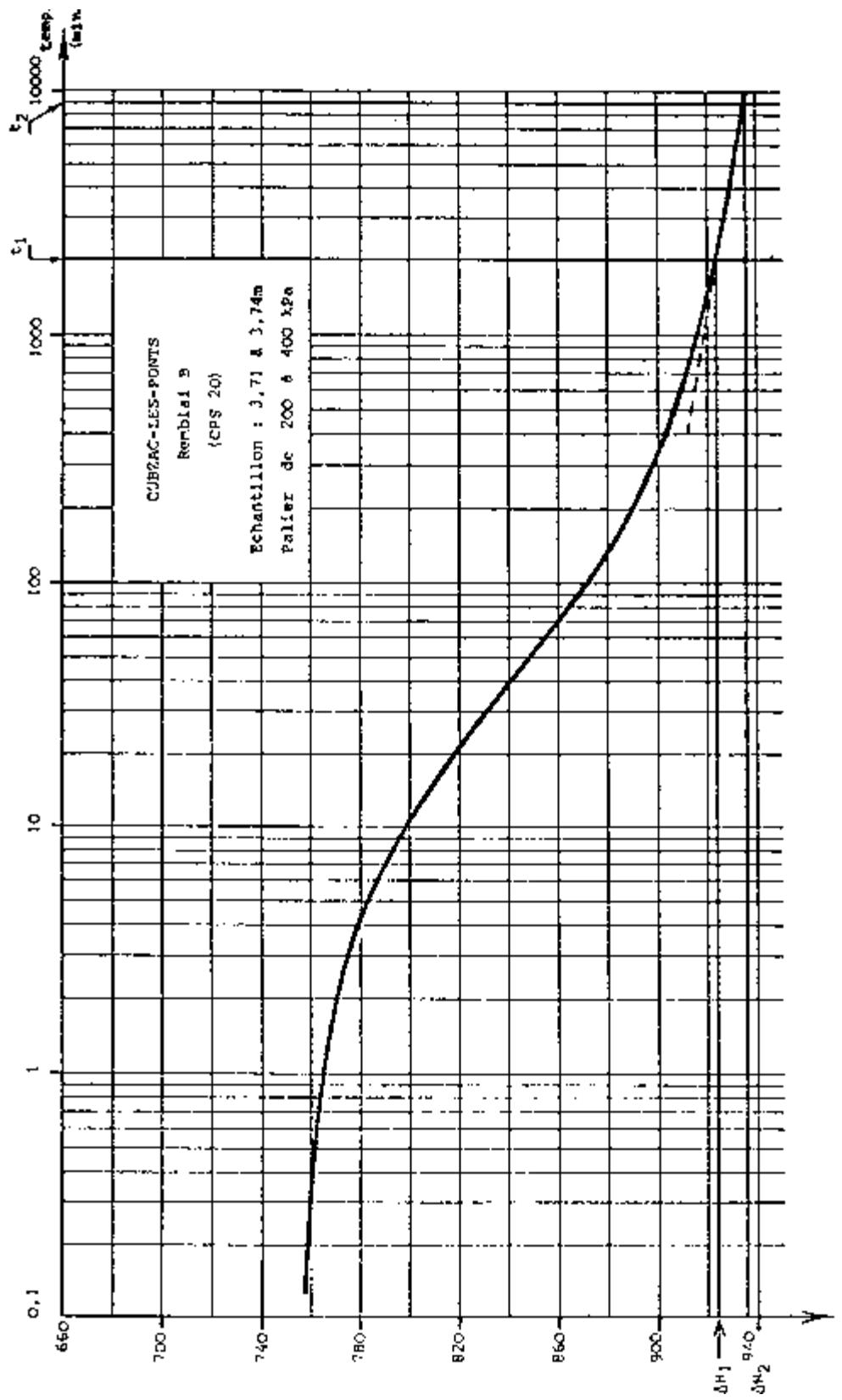
$$C_{ae} = 0,0075 (1+2,54) = 0,027$$

32.3 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Rassembler dans un tableau Les valeurs de C_α et C_{ae} obtenues pour Les différents paliers de l'essai.

COMMENTAIRES

Les valeurs de C_α et C_{ae} peuvent varier de façon sensible d'un palier à l'autre. Si tel est le cas, on retiendra comme résultat de l'essai la moyenne des valeurs obtenues sous σ'_p et σ'_{vf} (contrainte effective verticale finale au niveau de l'échantillon, sous l'ouvrage).



Tracé de l'essai de fluage :
fig. 32.1

Fig. 32.1 Essai de fluage : exemple de courbe de tassement en fonction de $\log t$

SECTION 4 - ESSAI A VITESSE DE DEFORMATION CONSTANTE

CHAPITRE 41 – EXÉCUTION DE L'ESSAI

41.1 – APPAREILLAGE ET OPÉRATIONS DIVERSES

41.1.1 – APPAREILLAGE

L'essai de compressibilité à vitesse de déformation constante peut être réalisé avec les matériels relativement courants dans un laboratoire de mécanique des sols.

L'oedomètre sera du type "à contre-pression", décrit par la figure 11.6 (Section I – Chap. 11) avec l'option à chargement par presse au moyen d'un piston.

Le chargement à "vitesse constante" est obtenu au moyen d'une presse telle que celles utilisées pour les essais triaxiaux. La figure 41.1 montre le principe du montage de l'ensemble oedomètre-presse.

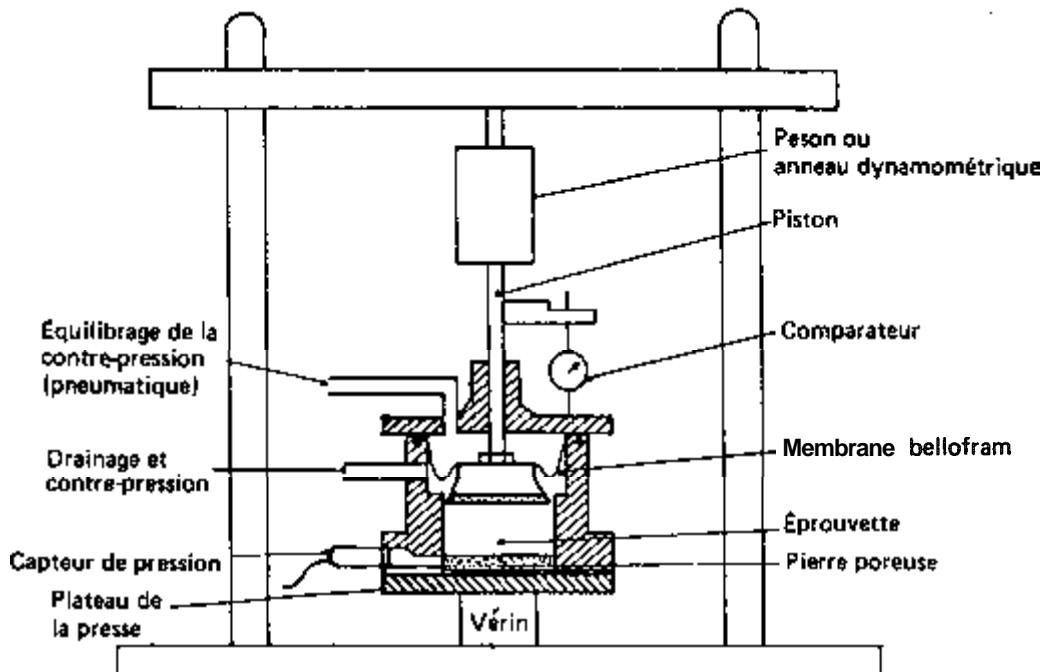


Fig. 41.1 Montage de l'oedomètre sur la presse

La force verticale est mesurée au moyen d'un anneau dynamométrique ou, mieux, d'un peson qui seul permet d'assurer la condition "vitesse de déformation constante".

Le tassement est mesuré avec un comparateur ou un capteur de déplacement fixé sur le piston. La pression interstitielle est mesurée à la base au moyen d'un capteur électrique.

La contre-pression est appliquée par le circuit de drainage du haut de l'éprouvette, qui sera par exemple relié à des rampes à pots de mercure, à un système de mise en pression par vérin ou tout autre matériel équivalent.

Compte tenu de la durée de l'essai (24 h à 48 h) il est pratiquement indispensable de disposer d'un système d'acquisition des mesures, analogique ou numérique.

41.1.2 - SATURATION DE L'EPROUVENTE

Pour que la mesure de la pression interstitielle soit satisfaisante, il est indispensable de saturer l'éprouvette en applicant une contre-pression.

Pour déterminer, pour une éprouvette donnée, la valeur de la contre-pression nécessaire, on peut opérer comme suit :

- on intercale une burette de type BISHOP sur le circuit de drainage (correspondant à la face supérieure de l'échantillon dans le cas de la figure 41.1) ;
- on augmente progressivement la contre-pression en notant le volume de l'eau (désaérée) entrant dans l'éprouvette de sol ;
- lorsque le volume d'eau entrant dans l'éprouvette devient négligeable quand on augmente la contre-pression, on considère que la saturation est satisfaisante et on conserve cette même valeur de la contre-pression pendant tout l'essai.

Une fois effectuée la saturation de l'éprouvette, on attendra quelques heures avant de commencer l'essai, afin de laisser les gaz interstitiels se dissoudre plus complètement.

COMMENTAIRES

On veillera à ce que la capacité de la presse et la plage de mesure du capteur de pression interstitielle utilisés soient compatibles avec les valeurs parfois élevées des contre-pressions nécessaires pour une bonne saturation, de manière à ne pas limiter la charge totale maximale réellement appliquée à l'échantillon.

Afin d'avoir un bon contact entre le piston et l'éprouvette, il est nécessaire de charger le piston au fur et à mesure de l'augmentation de la contre-pression. Dans le cas de l'appareillage présenté sur la figure 41.1, on appliquera dans la chambre située au-dessus de la membrane une pression pneumatique ou hydraulique légèrement supérieure à la contre-pression (de 5 kPa, par exemple) ou une pression égale si le poids du piston suffit à assurer cet écart. On notera que l'utilisation de l'huile et d'une tige de piston bien rodée permet avec le matériel décrit de supprimer les joints toriques et de réduire ainsi les frottements, mais nécessite de prendre en considération la différence de densités des deux fluides de part et d'autre de la membrane.

Si l'éprouvette a tendance à gonfler en présence d'eau, il est nécessaire d'imposer une charge supplémentaire pour empêcher ce gonflement. Avec le matériel décrit sur la figure 41.1, il suffit de disposer l'œdomètre sur la presse encore à l'arrêt en bloquant la tige du piston, le peson mesurant alors la pression de gonflement. Si la presse est équipée d'un anneau dynamométrique, il est nécessaire de

ratrapper La déformation propre de l'anneau, mesurée avec un comparateur.

COMMENTAIRE

Si l'on a laissé gonfler l'éprouvette, il est préférable de reprendre l'essai sur une nouvelle éprouvette que l'on empêchera de gonfler pendant la saturation,

41.1. 3 - PESEE EN FIN D'ESSAI

En fin d'essai, on déterminera Le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de l'éprouvette après séchage à l'étude (24 heures à 65 °C pour Les sols organiques, 105 °C pour Les autres). Si l'on souhaite déterminer le poids humide du sol en fin d'essai, il est nécessaire de mesurer Le gonflement du sol après décharge complet et de ne peser l'ensemble bague + sol qu'après stabilisation de ce gonflement.

41.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

L'essai proprement dit consiste à imposer à l'éprouvette une déformation à vitesse constante et à mesurer La contrainte totale verticale σ_v , la pression interstitielle u à La base de l'éprouvette, La contrepression u_{cp} et Le tassement AH en fonction du temps t .

41.2.1 - CHOIX DE LA VITESSE

Pour un échantillon de 25 mm de haut, on choisira une vitesse dans la plage de 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ à 25 $\mu\text{m}/\text{min}$ selon Le type de sol, La vitesse étant d'autant plus grande que La valeur de c_v est élevée.

On prendra comme valeur de référence 2,5 $\mu\text{m}/\text{min}$:

- si La surpression interstitielle générée est trop faible, La vitesse sera augmentée pour Les essais ultérieurs ;
- si La surpression interstitielle générée dépasse 0,15 ($\sigma_v - u_{cp}$), La vitesse sera diminuée pour les essais ultérieurs.

COMMENTAIRES

Contrairement à l'essai de compressibilité par paliers, pour lequel une certaine normalisation de la loi de chargement a pu être établie sur la base de plusieurs décennies d'expériences, l'essai à vitesse de déformation constante est trop récent pour que des indications définitives puissent être données.

Compte tenu de l'antériorité de l'essai par paliers pour la prévision du tassement des ouvrages, il sera utile, régionalement, pour chaque type de sol, de faire des essais comparatifs, permettant de préciser la vitesse de déformation donnant des courbes de compressibilité similaires.

On peut indiquer que l'écart sur la valeur de a'_{cp} peut atteindre 20 % pour des vitesses variant de 1 à 25 $\mu\text{m}/\text{min}$.

41.2.2 - FREQUENCE DES LECTURES

Une acquisition numérique ou analogique est souhaitable pour ce type d'essai.

Dans Le cas de lectures manuelles, on adaptera la fréquence des Lectures a la vitesse de L'essai.

41.2.3 - CHARGE MAXIMALE

La charge maximale σ_V appliquée pendant l'essai devra être largement supérieure à la charge de service envisagée.

Ce type d'essai permet d'atteindre avec un matériel courant des contraintes verticales très élevées (plus de 10 MPa, par exemple, avec l'appareillage décrit sur la figure 11.6) ; on veillera donc à bien choisir l'anneau dynamométrique ou le pessonne et à prévoir une sécurité par rapport à la charge maximale.

CHAPITRE 42 – CALCULS ET RÉSULTATS

42.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

Ces **calculs** ont pour but, d'une part, de déterminer L'indice des vides du **sol** avant **l'essai** et sa variation au cours de La **consolidation** et, d'autre part, de caractériser L'éprouvette par les principaux paramètres d'identification.

On se reportera aux paragraphes 22.1.1 pour le **calcul** de L'indice des vides et 22.1.2 pour La détermination des paramètres d'identification.

42.2 – CARACTÉRISTIQUES DE COMPRESSIBILITÉ

42.2.1 – COURBE DE COMPRESSIBILITÉ

Tracer dans un diagramme e-Lg $\bar{\sigma}'_v$ La courbe de **compressibilité**, e étant L'indice des vides au moment de La mesure à L'instant **t** et $\bar{\sigma}'_v$ La contrainte effective moyenne dans L'éprouvette au même instant **t** (Fig. 42.1a). $\bar{\sigma}'_v$ est donné par La relation :

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma_v - \frac{2}{3} \Delta u - u_{cp} ,$$

σ_v = contrainte verticale mesurée à L'instant **t**,

Δu = surpression **intersticielle** à La base de L'éprouvette à L'instant **t**, calculée par référence à La contre pression imposée $\Delta u = u - u_{cp}$,

u_{cp} = contre pression.

COMMENTAIRE

La relation précédente suppose une répartition parabolique de la surpression intersticielle dans l'éprouvette. Elle n'est valable que si $\Delta u / (\sigma_v - u_{cp}) < 15\%$. Dans le cas où le rapport $\Delta u / (\sigma_v - u_{cp}) > 15\%$, ce qui correspond à une vitesse de déformation trop grande, on pourra utiliser la relation

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma_v - \frac{4}{5} \Delta u \times \frac{5 \dot{\sigma} - 4 \Delta \dot{u}}{6 \dot{\sigma} - 5 \Delta \dot{u}} - u_{cp}$$

où

$$\dot{\sigma} = d\sigma / dt \text{ et } \Delta \dot{u} = d(\Delta u) / dt .$$

42.2.2 - PRESSION DE PRECONSOLIDATION σ'_p

- Tracer La courbe Au $(\lg \bar{\sigma}'_v)$ (Fig. 42.1a) .

Cette courbe présente généralement une zone de variation rapide de La surpression interstitielle. L'abscisse du point de courbure maximum sera retenue comme valeur de σ'_p .

COMMENTAIRE

La détermination de σ'_p peut aussi être faite selon les méthodes classiques citées dans les ouvrages généraux de Mécanique des sols, à partir du diagramme $e=f(\lg \bar{\sigma}'_v)$. L'essai à vitesse de déformation constante a dans ce cas l'avantage de mieux définir la courbe de compressibilité que l'essai par paliers.

42.2.3 - INDICES DE COMPRESSION ET DE GONFLEMENT

La Linéarisation de La courbe $e(\lg \bar{\sigma}'_v)$ dans La plage $\sigma'_v < \sigma'_p$ donne une droite de pente c_s ("indice de gonflement").

$$c_s = - \frac{\Delta e}{\Delta \lg(\bar{\sigma}'_v)} \Big|_{\sigma'_v < \sigma'_p}$$

La Linéarisation de La courbe $e(\lg \bar{\sigma}'_v)$ dans La plage $\sigma'_p < \sigma'_v$ donne une droite de pente c_c ("indice de compression") :

$$c_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \lg(\bar{\sigma}'_v)} \Big|_{\sigma'_v > \sigma'_p}$$

42.2.4 - MODULE OEDOMETRIQUE

Le module oedométrique est défini par

$$E_{oed} = \frac{\Delta \bar{\sigma}'_v}{\Delta H/H_0} = \frac{\Delta \bar{\sigma}'_v}{\Delta e} (1 + e_0)$$

dans Laquelle e_0 désigne L'indice des vides initial de L'essai.

En chaque point de La courbe $e(\bar{\sigma}'_v)$, on peut définir un module tangent. Ce module varie avec La contrainte effective et on pourra tracer Le diagramme $E_{oed} = f(\bar{\sigma}'_v)$. On peut aussi calculer un module sécant sur un intervalle de contraintes donné.

42.3 - COEFFICIENTS DE CONSOLIDATION ET DE PERMÉABILITÉ

42.3.1 - COEFFICIENT DE CONSOLIDATION

Le coefficient de consolidation c_v est donné par La relation

$$c_v = \frac{da'}{dt} \times \frac{H^2}{2\Delta u}$$

Cette relation n'est valable que si $\Delta u/\bar{\sigma}'_v < 15\%$.

On tracera le diagramme $c_v = f(\bar{\sigma}'_v)$ (Fig. 42.1b).

4.2.3.2 - COEFFICIENT DE PERMEABILITE

Le coefficient de perméabilité est donné par la relation :

$$k_V = \frac{d(\frac{\Delta H}{H})}{dt} = \frac{H^2}{2\Delta u} = \gamma_W$$

$$k_v = \frac{de}{dt} = \frac{H^2}{2\Delta u} \cdot \frac{Y_w}{1+e_o}$$

On tracera ensuite Le diagramme

$$e = f (\lg k_v) \quad (\text{Fig. 42.1b}),$$

qui permet de définir les paramètres e_k et c_k de la relation expérimentale

$$e = e_k + c_k \lg k_v,$$

42.4 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Du fait de sa continuité, ce type d'essai se prête aisément à une exploitation informatisée et à un tracé automatique des différentes courbes.

Dans Le cas d'une acquisition manuelle ou automatique mais sans exploitation, on établira un tableau de résultats et de calculs **selon** le modèle ci-après, qui permet ensuite de tracer aisément Les différents résultats sous forme de courbes :

- $e = f(\lg \sigma_v^T)$
 - $u = f(\sigma_v^T)$
 - $c_v = f(\sigma_v^T)$
 - $e = e_k + c_k \lg k_v$

Les principaux résultats sont ensuite regroupés sous une forme synthétique (Fig. 42.1).

Tableau 42.1

Modèle de tableau de résultats et de calculs

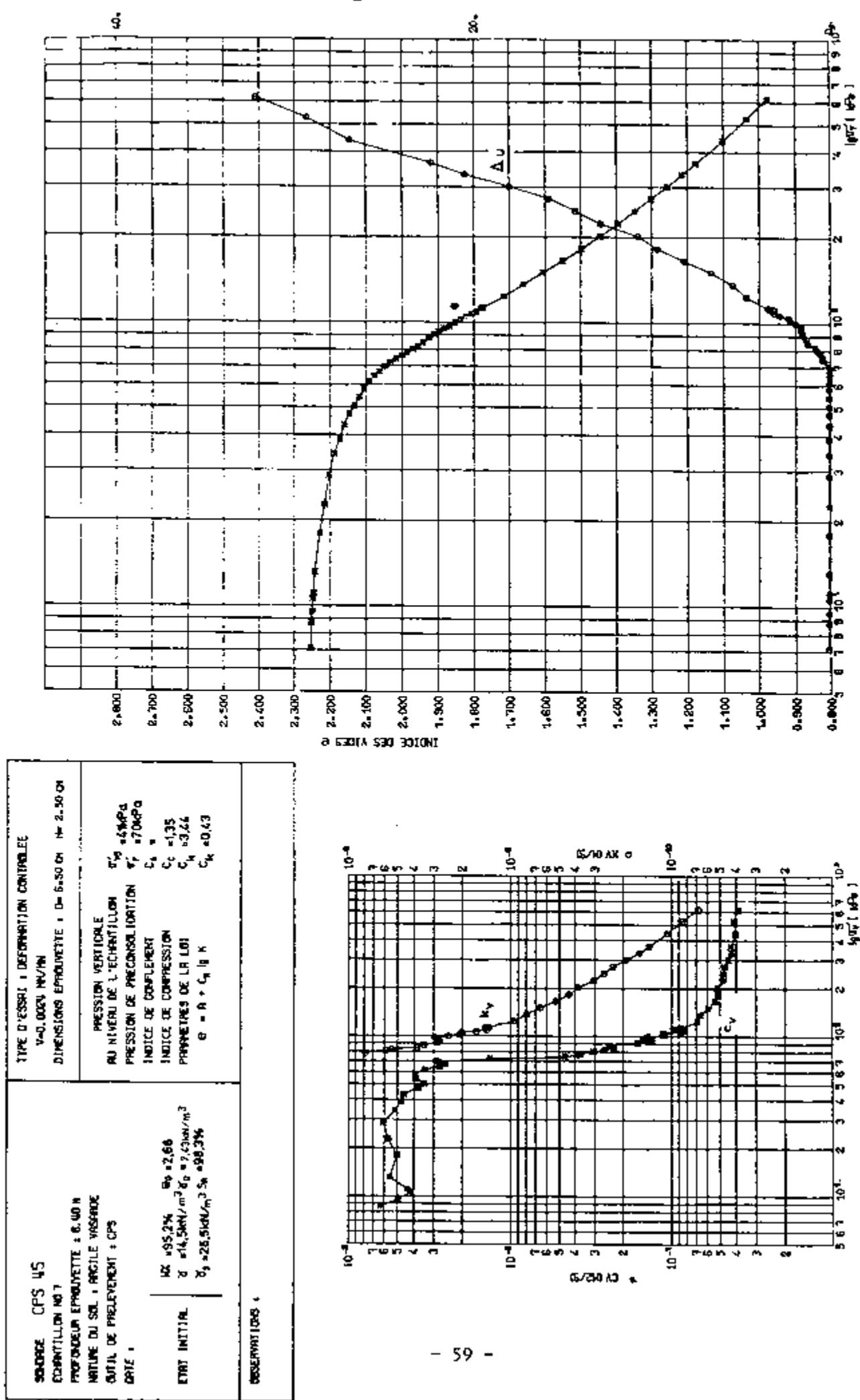


Fig. 42-1 *Essai oedométrique à vitesse de déformation constante (exemple)*

SECTION 5 - ESSAI A GRADIENT CONTROLE

CHAPITRE 51 – EXÉCUTION DE L'ESSAI

51.1 – APPAREILLAGE ET OPÉRATIONS DIVERSES

51.1.1 – APPAREILLAGE

L'essai à gradient contrôlé est réalisé sur une éprouvette cylindrique de faible hauteur, identique à celle utilisée dans l'essai classique à chargement par paliers (Section 11). L'éprouvette est placée à l'intérieur d'un oedomètre dans lequel le drainage s'effectue dans la direction axiale et seulement par la face supérieure de l'éprouvette. A la face inférieure de l'éprouvette, on mesure la surpression interstitielle, que l'on maintient constante en appliquant graduellement une charge axiale sur le piston (Fig. 51.1). L'essai à gradient contrôlé peut être réalisé avec ou sans contre-pression appliquée à la partie supérieure de l'éprouvette.

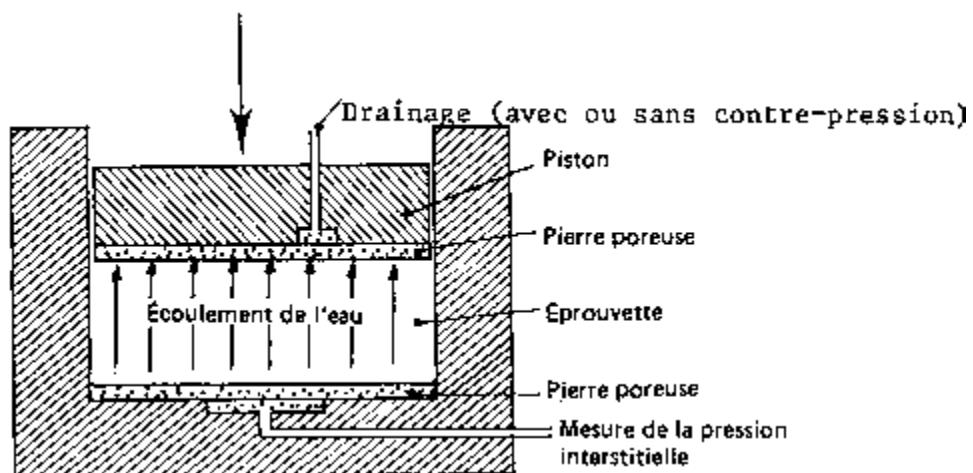


Fig. 51.1 Principe de l'oedomètre pour essai à gradient contrôlé

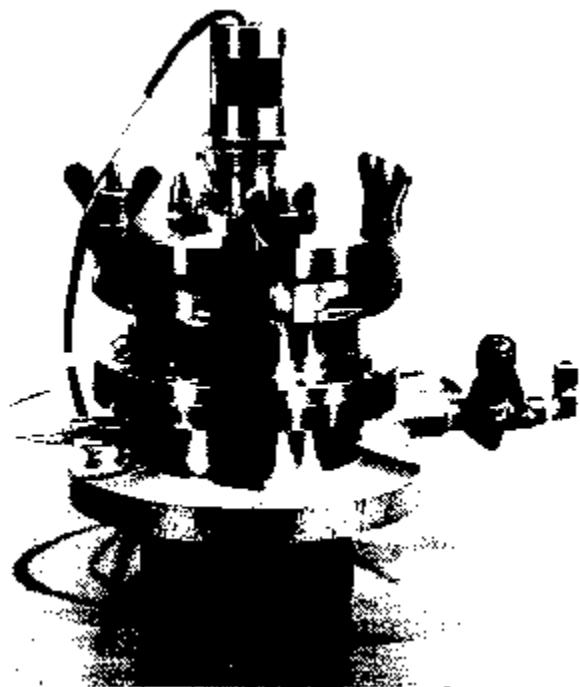
Outre une cellule équipée à sa base d'un système de mesure de la pression interstitielle, l'essai à gradient contrôlé nécessite un dispositif d'asservissement de la charge appliquée sur le piston aux variations de la pression interstitielle mesurée à la base de l'éprouvette.

COMMENTAIRE

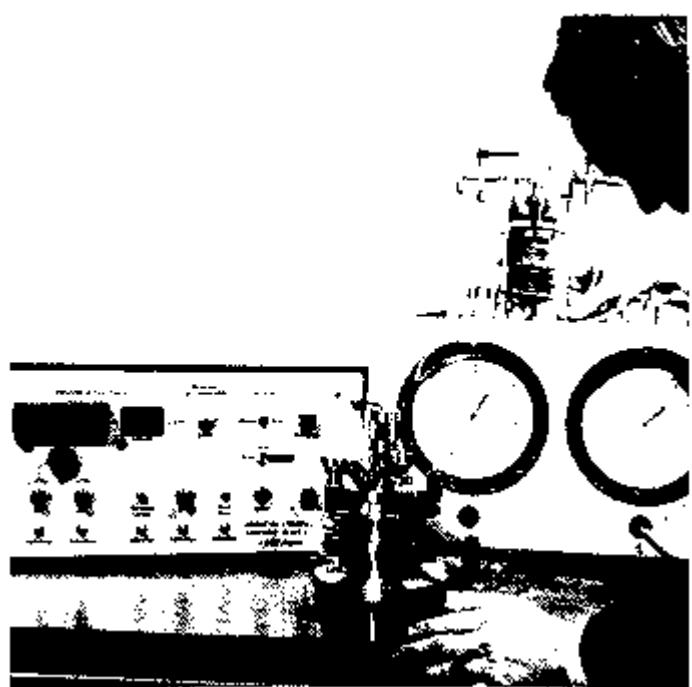
L'oedomètre à gradient contrôlé du CECP d'Angers (Fig. 51.2) est particulièrement bien adapté pour ce type

d'essai. Cet oedomètre comporte une cellule à mise en charge pneumatique identique à celle de la figure 11.6 et un dispositif d'asservissement programmable suivant le gradient de pression interstitielle que l'on veut imposer pendant l'essai.

L'asservissement de l'essai peut être également assuré par un microcalculateur.



a) Cellule oedométrique



b) Système d'asservissement et de mise en charge

Fig. 51.2 Oedomètre à gradient contrôlé du CECP d'Angers. La préparation de L'éprouvette et sa mise en place dans L'oedomètre s'effectuent comme indiqué au chapitre 13.

La préparation de l'éprouvette et sa mise en place dans L'oedomètre s'effectuent comme indiqué au chapitre 13.

51.1.2 - SATURATION DE L'ÉPROUVEAU

L'interprétation de l'essai à gradient contrôlé suppose que Le sol est saturé d'un liquide incompressible. Il est pour cette raison nécessaire de saturer Le sol avant Le début de l'essai, ce qui nécessite en pratique l'application d'une contre-pression pendant toute La durée de l'essai.

Pour déterminer pour une éprouvette donnée La valeur de La contre-pression nécessaire, on peut opérer comme suit :

- on intercale une burette de type Bishop sur Le circuit de drainage (correspondant à La face supérieure de l'échantillon dans Le cas de La figure 11.6) ;
- on augmente progressivement La contre-pression en notant Le volume de L'eau (désaérée) entrant dans L'éprouvette de sol ;
- Lorsque le volume d'eau entrant dans L'éprouvette devient négligeable quand on augmente La contre-pression, on considère que La saturation est satisfaisante et

on conserve cette même valeur de La contre pression pendant tout l'essai.

Une fois effectuée La saturation de L'éprouvette, on attendra quelques heures avant de commencer L'essai afin de Laisser Les gaz interstitiels se dissoudre plus complètement.

COMMENTAIRE

On veillera à ce que la capacité du système de mise en charge et la plage de mesure du capteur de pression interstitielle utilisé soient compatibles avec les valeurs des contre-pressions nécessaires pour une bonne saturation, de manière à ne pas limiter la charge totale maximale réellement appliquée à l'échantillon.

Afin d'avoir un bon contact entre le piston et l'éprouvette, il est nécessaire de charger le piston au fur et à mesure de l'augmentation de la contre-pression. Dans le cas de l'appareillage décrit par la figure 41.1, on appliquera une pression hydraulique dans la chambre située au-dessus de la membrane, légèrement supérieure à la contre-pression (de 5kPa, par exemple) ou une pression égale si le poids du piston suffit à assurer cet écart.

51.1.3 - PESEE EN FIN D'ESSAI

En fin d'essai, on déterminera le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de L'éprouvette après séchage à L'étuve (24 heures à 65 °C pour Les sols organiques et 105 °C pour les autres sols). Si L'on souhaite déterminer Le poids humide du sol en fin d'essai, il est nécessaire de mesurer Le gonflement du sol après déchargement complet et de ne peser L'ensemble bague + sol qu'après stabilisation de ce gonflement.

51.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

51.2.1 - GENERALITES

L'essai à gradient contrôlé comprend trois phases (Fig. 51.1) :

- au début de L'essai, Le drainage étant fermé, on applique manuellement sur Le piston une charge à égale ou légèrement supérieure en pratique, à La pression interstitielle Δu que L'on va maintenir pendant tout L'essai à La base de L'éprouvette. Cette charge est maintenue constante jusqu'au temps t_0 où La surpression interstitielle à La base de L'éprouvette se stabilise ;

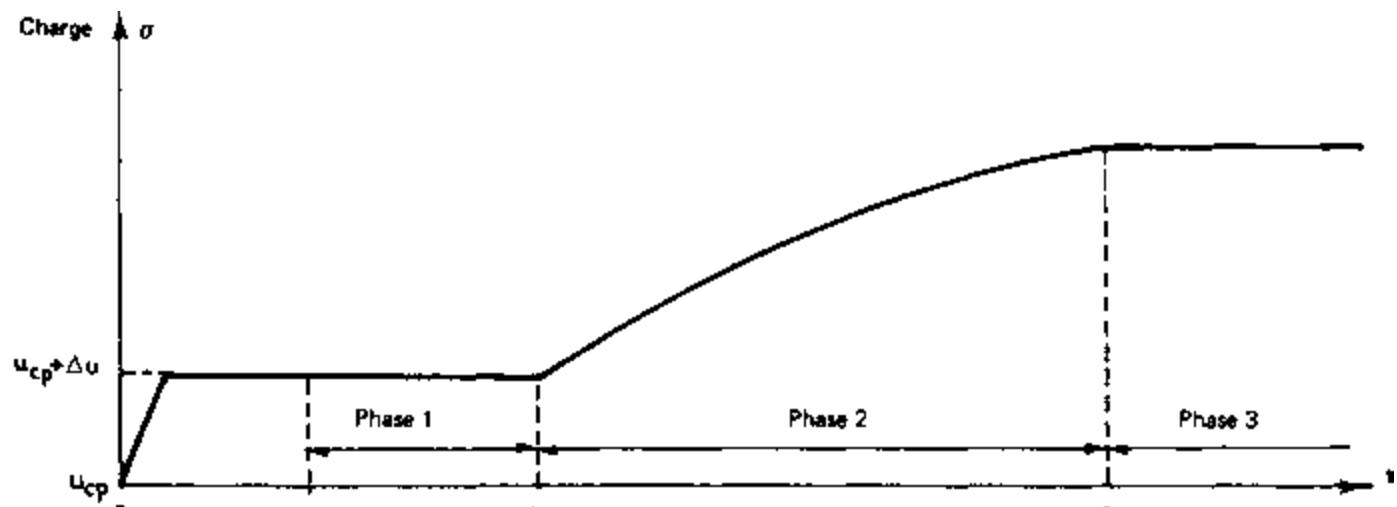
- à L'instant t_0 on ouvre Le drainage et on met Le dispositif de chargement en position d'asservissement automatique. La charge σ reste constante jusqu'au temps t_1 où La surpression interstitielle à La base de L'éprouvette commence à diminuer ;

- à partir du temps t_1 , on augmente La charge appliquée à L'éprouvette de façon à maintenir La pression interstitielle à La base de L'éprouvette à La valeur choisie (c'est-à-dire Δu plus La contre-pression u_{cp} éventuelle). La vitesse d'augmentation de La charge dépend de La vitesse de consolidation du sol. En pratique, on se contente de maintenir La pression interstitielle à La base entre Les deux Limites

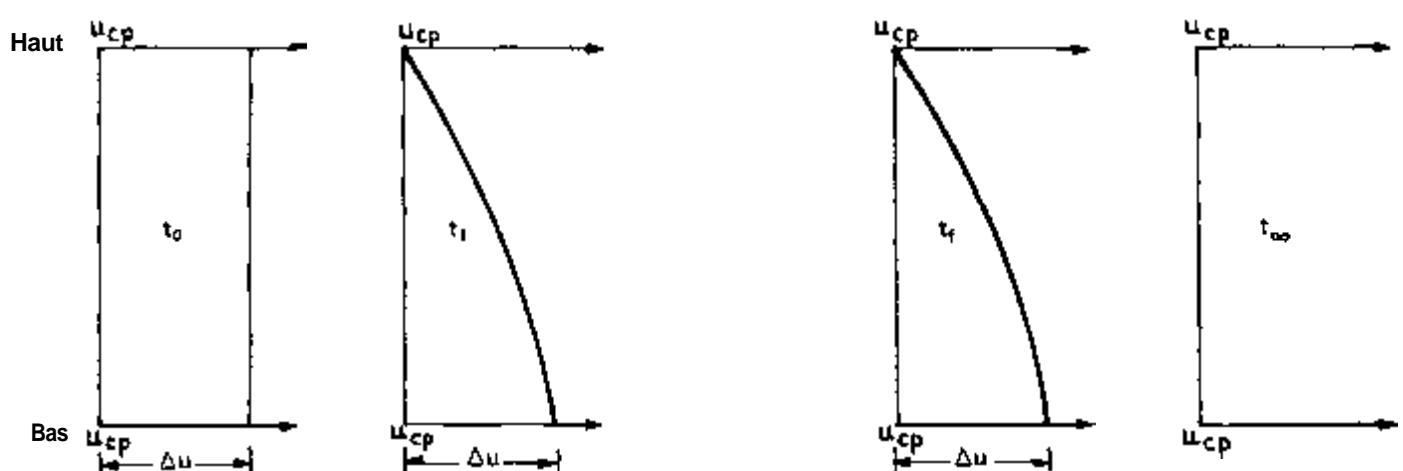
$$u_{cp} + \Delta u - \delta u \quad \text{et} \quad u_{cp} + \Delta u + bu,$$

bu représentant La tolérance sur L'asservissement ;

- une fois que L'on a atteint La valeur maximale de La charge prévue pour L'essai, au temps t_f , on attend La fin de La consolidation du sol sous La dernière charge appliquée avant de supprimer La charge (et La contre-pression éventuelle) et procéder aux opérations de pesage indiquées au paragraphe 51.1.3.



a) Charge appliquée au cours du temps



b) Distribution de la pression interstitielle dans l'éprouvette

Fig. 51.3 Phases de l'essai à gradient contrôlé

51.2.2 - VALEURS RECOMMANDÉES DES PARAMETRES DE L'ESSAI

L'essai est d'autant plus rapide que la différence Δu des pressions interstitielles entre le bas et le haut de l'éprouvette est importante. Par contre, plus cette différence est importante, plus le gradient de l'écoulement est élevé et plus la variation des contraintes effectives à l'intérieur de l'éprouvette est grande. On pourra adopter en pratique $\Delta u = 20 \text{ kPa}$.

La contre-pression u_{cp} imposée pendant l'essai sera choisie de façon à saturer l'éprouvette (paragraphe 51.1.2).

La tolérance δu sur la valeur de la pression interstitielle imposée à la base de l'éprouvette sera prise égale à 1 kPa si le matériel d'essai le permet. Sinon, on adoptera une valeur de δu aussi faible que possible.

CHAPITRE 52 – CALCULS ET RÉSULTATS

52.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

Ces calculs ont pour but, d'une part, de déterminer l'indice des vides du sol avant l'essai et sa variation au cours de la consolidation et, d'autre part, de caractériser l'éprouvette par les principaux paramètres d'identification.

52.1.1 – CALCUL DE L'INDICE DES VIDES

L'indice des vides de l'éprouvette de sol

$$e = \frac{h}{h_p}$$

(h – hauteur de l'éprouvette au temps t , h_p – hauteur de solide équivalente) peut être calculé par deux méthodes, selon la façon dont on calcule h_p :

– si l'on est certain que l'éprouvette est saturée, on utilise la formule

$$h_p = H_0 - \frac{W - W_d}{S \cdot \gamma_w}$$

avec H_0 – hauteur initiale de l'éprouvette,
 W_0 – poids initial humide de l'éprouvette,
 W_d – poids de l'éprouvette après passage à l'étuve (paragraphe 52.1.3),
 S – section droite de l'éprouvette,
 γ_w – poids volumique de l'eau ;

– si l'on n'est pas certain de la saturation de l'éprouvette, on utilise la formule suivante, qui fait intervenir le poids volumique des grains du sol γ_s :

$$h_p = \frac{W_d}{S \cdot \gamma_s}$$

avec W_d – poids de l'éprouvette après passage à l'étuve (paragraphe 52.1.3),
 S – section droite de l'éprouvette,
 γ_s – poids volumique des grains. On pourra prendre en général $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$, mais la mesure de γ_s est indispensable dans les sols organiques et calcaires.

L'indice des vides initial e_i s'obtient en faisant $H = H_0$ dans l'expression de e .

COMMENTAIRES
Voir paragraphe 22.1 .1.

52.1.2 - DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

Les mesures effectuées au cours de l'essai permettent de calculer :

- la teneur en eau initiale de l'éprouvette

$$w = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100$$

- Le poids volumique initial du sol sec

$$\gamma_d = \frac{W_d}{S H_0}$$

- le poids volumique initial

$$\gamma = \frac{W}{S H_0}$$

avec les notations

W - poids initial humide de l'éprouvette,

W_d - poids de l'éprouvette après passage à l'étuve (paragraphe 52.1.3),

S - section droite de l'éprouvette,

H_0 - hauteur initiale de l'éprouvette.

52.2 - PARAMÈTRES DE COMPRESSIBILITÉ

À la fin de l'essai on dispose des valeurs mesurées de la charge appliquée σ et de la hauteur de l'éprouvette H au cours du temps.

52.2.1 - COURBE DE CHARGEMENT AU COURS DU TEMPS

On représentera sur un graphique tel que *celui* de la figure 52.1 les variations de la pression σ appliquée sur le piston en fonction du temps.

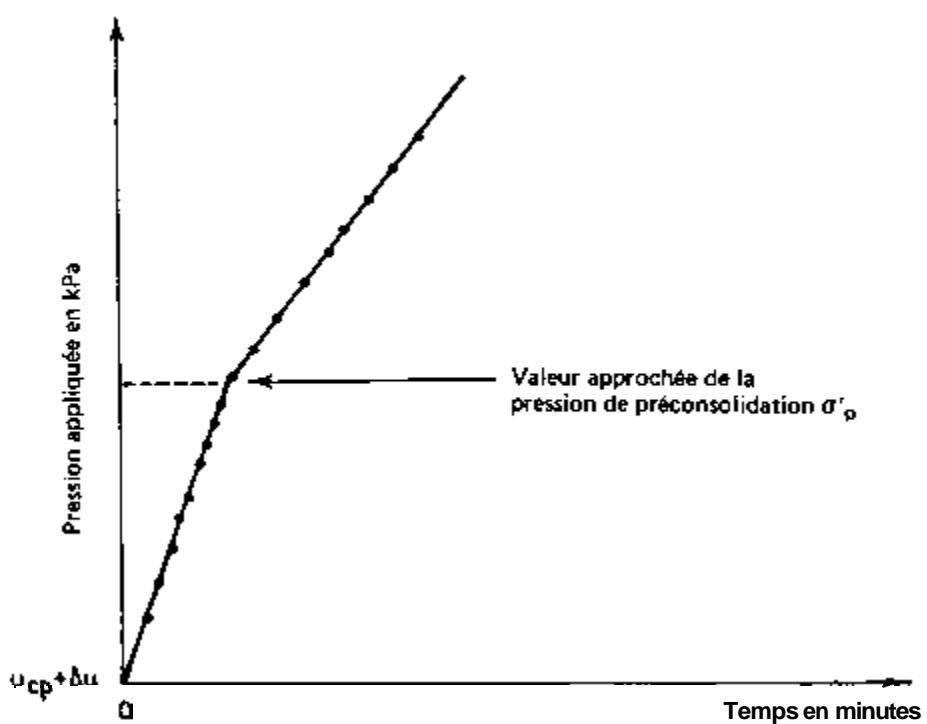


Fig. 52.1 Pression appliquée sur le piston au cours du temps

52.2.2 - COURBE DE COMPRESSIBILITE

On reportera sur un diagramme tel que celui de La figure 52.1 Les variations de l'indice des vides e du sol en fonction du Logarithme de La contrainte effective moyenne dans L'éprouvette $\lg \bar{\sigma}'_v$.

L'indice des vides e à L'instant t peut être déduit de la hauteur de L'éprouvette au même instant à L'aide des formules du paragraphe 52.1.1.

La contrainte effective moyenne $\bar{\sigma}'_v$ se déduit de La pression appliquée sur Le piston, a , à l'aide de La formule :

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma - u_{cp} - \frac{2\mu}{3}$$

obtenue dans L'hypothèse où La distribution des pressions interstitielles dans l'éprouvette est parabolique.

La pression de préconsolidation σ'_p peut être déterminée simplement en linéarisant Les deux parties de La courbe de compressibilité (Fig. 52.2).

COMMENTAIRE

On peut également utiliser la méthode de Casagrande, décrite dans les ouvrages généraux de Mécanique des sols, pour déterminer la pression de préconsolidation d'après la courbe de compressibilité.

Les pentes des deux parties linéarisées de la courbe de compressibilité sont égales respectivement à C_s , indice de gonflement, et C_c , indice de compression du sol testé.

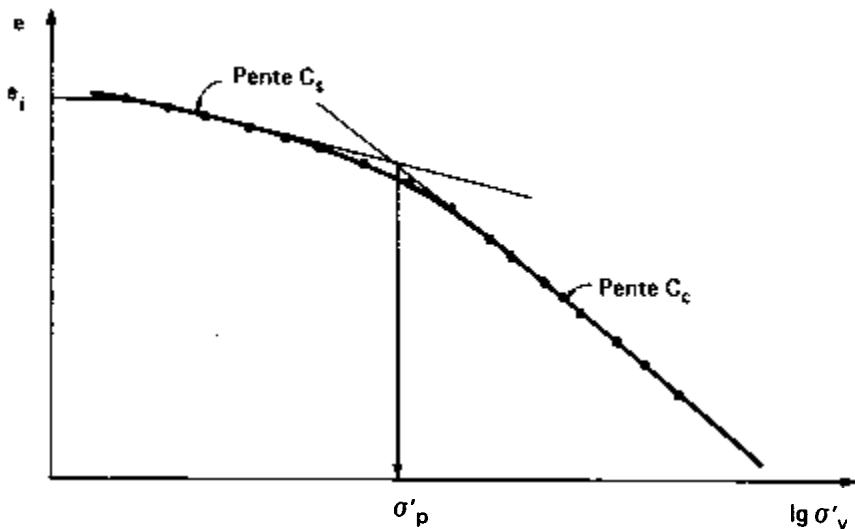


Fig. 52.2 Courbe de compressibilité

52.2.3 - COEFFICIENT DE CONSOLIDATION

Le coefficient de consolidation vertical c_v sera évalué d'après Les pentes moyennes des parties Linéarisées de La courbe de chargement au cours du temps (Fig. 52.1), à L'aide de La formule :

$$c_{vi} = \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_i \times \frac{H_0^2}{2\Delta u}$$

avec

- $\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_i$ - pente de La courbe de chargement,
- H_0 - hauteur initiale de l'éprouvette,
- Δu - différence des pressions interstitielles en bas et en haut de l'éprouvette.

COMMENTAIRE

On peut analyser de façon plus détaillée les variations du coefficient de consolidation du sol au cours de l'essai en calculant pour chaque accroissement élémentaire de la charge un coefficient de consolidation particulier, au moyen de la formule précédente.

Il est toutefois le plus souvent suffisant de disposer d'une évaluation du coefficient de consolidation du sol à l'état surconsolidé et à l'état normalement consolidé, comme indiqué ci-dessus.

52.2.4 - COEFFICIENT DE PERMEABILITE

Le coefficient de perméabilité du sol peut être calculé à partir du coefficient de consolidation, en utilisant La formule :

$$k_v = \frac{c_v \gamma_w a_v}{1 + e_0}$$

avec

- γ_w - poids volumique de L'eau,
- e_0 - indice des vides initial,
- $a_v = - \frac{a_e}{a_d} \frac{c_s \text{ ou } c_c}{\sigma'_v}$, coefficient de compressibilité.

COMMENTAIRE

Le coefficient de perméabilité obtenu par cette formule varie avec la contrainte effective en suivant la même loi que l'indice des vides. Cette approximation est suffisante pour la plupart des cas pratiques.

Toutefois, on peut effectuer une analyse plus détaillée des variations de k_v en analysant la réponse du sol pour chaque accroissement élémentaire de la charge.

52.3 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour chaque essai à gradient contrôlé, on constituera un dossier comprenant :

- les minutes de l'essai (résultats des pesées et remarques éventuelles sur La préparation de L'essai, valeurs de u_{cp} , Δu , δu , courbes de chargement enregistrées ou tableau des valeurs des pressions appliquées au cours du temps, courbes de tassement enregistrées ou tableau des lectures de tassement au cours du temps),
- La courbe de chargement Linéarisée par morceaux,
- La courbe de compressibilité "e-lgσ"
- Les valeurs de c_s , c_c , σ'_p , c_v , k_v calculées d'après Les résultats de L'essai.

Il est recommandé de présenter les principaux résultats sous une forme synthétique aisément incorporable dans Les dossiers. La figure 52.3 présente un modèle de fiche de synthèse.

ESSAI OEDOMETRIQUE
A GRADIENT CONTROLE

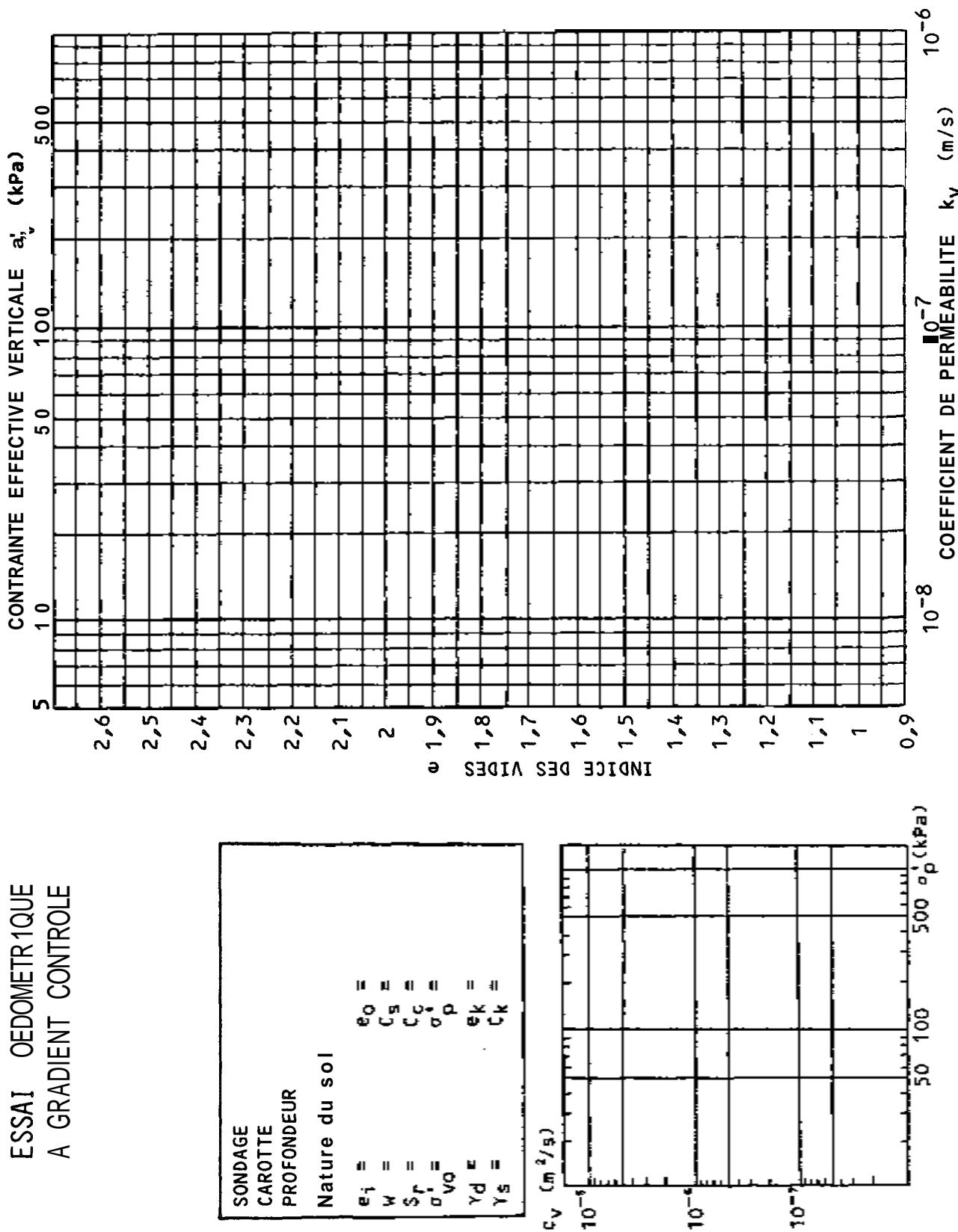


Fig. 52.3 Modèle de fiche de synthèse des principaux résultats des essais a gradient contrôlé

SECTION 6 - ESSAI ACCELERE PAR CHAUFFAGE

CHAPITRE 61 - EXÉCUTION DE L'ESSAI

61.1 - APPAREILLAGE ET OPÉRATIONS DIVERSES

61.1.1 - APPAREILLAGE

L'oedomètre spécial mis au point par le Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) pour la réalisation d'essais accélérés par chauffage comporte cinq cellules oedométriques immergées dans un bain dont la température est maintenue entre 68 et 70 °C (Chap. 11.4). La mise en charge est assurée par des vérins à air comprimé et le tassement des éprouvettes est enregistré en continu, le système permettant d'apprécier sans difficulté des déplacements de 20 μm .

On peut aussi réaliser des essais oedométriques accélérés par chauffage avec des oedomètres standards placés dans des bains thermostatés.

61.1.2 - SATURATION DE L'ÉPROUVEtte

Il n'est pas nécessaire de saturer l'éprouvette avant l'essai.

COMMENTAIRES

Contrairement aux autres essais oedométriques, l'essai accéléré par chauffage a pour unique objectif de déterminer la courbe de compressibilité du sol. Les publications du CEBTP indiquent que l'analyse des courbes de tassement au cours du temps des éprouvettes saturées sous chacune des charges appliquées donne des valeurs trop dispersées du coefficient de consolidation. Si l'on ne souhaite pas déterminer le coefficient de consolidation, il est inutile de saturer l'éprouvette avant l'essai. Dans le cas contraire, il est naturellement indispensable de saturer l'éprouvette.

61.1.3 - PESEE EN FIN D'ESSAI

En fin d'essai, on déterminera le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de l'éprouvette après séchage à l'étuve (24 h à 65 °C pour les sols organiques et 105 °C pour les autres sols).

61.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

Une fois l'éprouvette mise en place dans la cellule oedométrique, on dispose cet-

te cellule dans le bac oedométrique. Le poids du piston de la cellule et du vérin appliquent alors une pression de 10,5 kPa sur l'éprouvette (cas de l'oedomètre accéléré du CEBTP décrit ci-dessus).

On bloque le vérin pour empêcher tout gonflement de l'éprouvette puis on remplit le bain thermostaté avec de l'eau et on règle le thermostat sur 68 °C. Une fois que l'on a atteint la température voulue, on effectue les opérations successives suivantes :

- application de 7 paliers de chargement de durée 8 heures, confirmément aux indications du tableau 61.1, et de 2 paliers de déchargement d'une durée de 4 heures. Sous chaque charge, on enregistre l'évolution du tassement au cours du temps ;
- retour sous le poids du piston, stabilisation des lectures, vidange du bain ;
- pesée de l'éprouvette après passage à l'étuve (§ 61.1.3).

TABLEAU 61.1

Cycle de chargement
(essai accéléré par chauffage)

Durée	Valeurs de la charge appliquée	
	Chargement	Déchargement
8 h	10,5 kPa	
8 h	40 kPa	
8 h	80 kPa	
8 h	160 kPa	
8 h	320 kPa	
8 h	640 kPa	
8 h	1280 kPa	
4 h		320 kPa
4 h		40 kPa
8 h		10,5 kPa

COMMENTAIRES

Les valeurs des charges indiquées dans le tableau 61.1 sont celles que l'on applique habituellement dans les essais réalisés au CEBTP, qui ne comportent pas de cycle de déchargement-rechargement en milieu d'essai, mais seulement un déchargement progressif à partir de la charge maximale appliquée.

On peut aussi adopter pour les essais accélérés par chauffage la procédure d'essai de l'essai de compressibilité par paliers, décrite au chapitre 21.2, avec les méthodes d'interprétation correspondantes.

CHAPITRE 62 – CALCULS ET RÉSULTATS

62.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

62.1.1 – CALCUL DE L'INDICE DES VIDES

On calculera l'indice des vides correspondant à L'épaisseur H de l'éprouvette à un instant donné au moyen de la formule :

$$e = \frac{H - h_p}{h_p}$$

avec

h_p – hauteur de solide équivalente, égale à

$$h_p = \frac{w_d}{\gamma_s} ,$$

w_d – poids du sol sec après passage à L'étuve (§61.1.3),

S – section droite de l'éprouvette,

γ_s – poids volumique des grains. On pourra généralement $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ mais la mesure de γ_s est indispensable dans les sols organiques et calcaires.

COMMENTAIRES

On peut utiliser la seconde méthode du paragraphe 22.1.1 à condition de saturer l'éprouvette avant l'essai et d'effectuer les pesées nécessaires.

62.1.2 – DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

L'éprouvette soumise à l'essai sera caractérisée par les paramètres suivants :

- teneur en eau initiale de l'éprouvette

$$w = \frac{w - w_d}{w_d} \times 300$$

- poids volumique initial du sol sec

$$\gamma_d = \frac{w_d}{S \cdot H_o}$$

- poids volumique initial

$$\gamma = \frac{w}{S \cdot H_o} -$$

62.2 - CARACTÉRISTIQUES DE COMPRESSIBILITÉ

62.2.1 - COURBE DE COMPRESSIBILITÉ

Tracer dans un diagramme $e = \lg \sigma'_v$ la courbe de compressibilité, e étant l'indice des vides final sous la charge $\sigma'_v = \sigma_v$ (fig. 62.1).

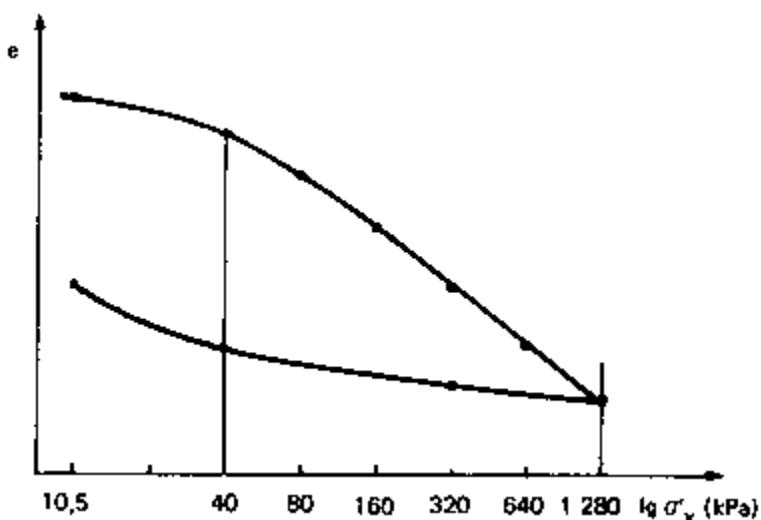


Fig. 62.1 Courbe de compressibilité

62.2.2 - INDICES DE COMPRESSION ET DE GONFLEMENT

Linéariser séparément la partie initiale et la partie finale de la courbe de chargement. Les pentes de ces deux droites sont égales respectivement à (Fig. 62.2) :

- C_s , indice de gonflement,

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma'_v} \Big|_1$$

- C_c , indice de compression

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma'_v} \Big|_2$$

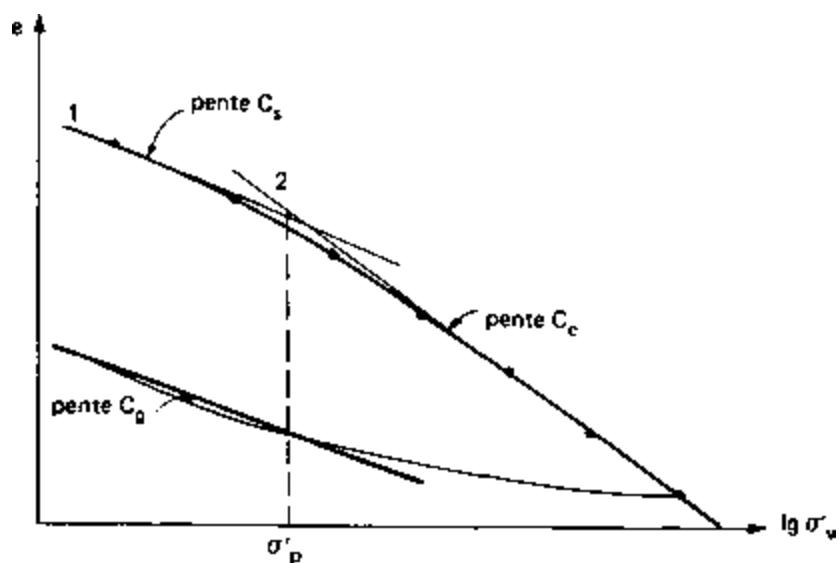


Fig. 62.2 Schématisation de la courbe de compressibilité

62.2.3 - PRESSION DE PRECONSOLIDATION

L'intersection des deux droites 1 et 2 de La figure 62.2 définit la pression de préconsolidation a' - P -

COMMENTAIRES
Voir § 22.2

62.2.4 - COEFFICIENT DE GONFLEMENT

La pente de la courbe de déchargement dans L'intervalle 5-100 kPa définit le coefficient de gonflement c_g' égal à (fig. 62.2) :

$$c_g' = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

COMMENTAIRES

Si l'on trouve des valeurs de c_g' nettement supérieures à c_s (et parfois même à c_c), le sol testé est un sol gonflant. Les propriétés des sols gonflants doivent être déterminées à l'aide d'essais particuliers.

62.2.5 - MODULE OEDOMETRIQUE

Le module oedométrique est défini par la formule

$$E_{oed} = \frac{A_0 \frac{v}{v}}{\Delta H / H_0} = \frac{\Delta \sigma' \frac{v}{v}}{\Delta e} (1 + e_0) ,$$

dans laquelle e_0 désigne l'indice des vides initial de l'essai.

En chaque point de la courbe $e(\sigma' \frac{v}{v})$, on peut définir un module tangent. Ce module varie avec la contrainte effective et on peut représenter sa variation dans un diagramme $E_{oed} = f(\sigma' \frac{v}{v})$.

On peut également calculer des modules sécants correspondant à des intervalles de contraintes donnés.

62.3 - COURBES DE TASSEMENT AU COURS DU TEMPS

Ces courbes ne sont pas interprétées.

COMMENTAIRES

Si l'on a saturé l'éprouvette de sol avant l'essai, on peut analyser les courbes de tassement au cours du temps en utilisant les procédures décrites aux § 22.3 et 22.4. Les résultats doivent être divisés par 3 pour redonner les valeurs usuelles des paramètres (température de l'essai = 20 °C).

62.4 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats de L'essai seront présentés sous La même forme que ceux de L'essai de compressibilité par paliers (Chap. 22.2). Si L'on n'a pas analysé Les courbes de tassement au cours du temps, on représentera seulement La courbe de compressibilité, en indiquant Les valeurs des paramètres d'identification et de compressibilité du sol testé.

SECTION 8 - ESSAI A DRAINAGE RADIAL

CHAPITRE 81 – EXÉCUTION DE L'ESSAI

81.1 – APPAREILLAGES ET OPÉRATIONS DIVERSES

L'essai oedométrique à drainage radial doit fournir le coefficient de consolidation radiale, qui combine la compressibilité verticale du sol et sa perméabilité horizontale. Il doit donc être réalisé sur une éprouvette de sol taillée verticalement dans la carotte prélevée au carottier à piston stationnaire, à l'intérieur d'un oedomètre dans lequel l'eau interstitielle ne peut s'écouler que dans le sens horizontal (Fig. 81.1).

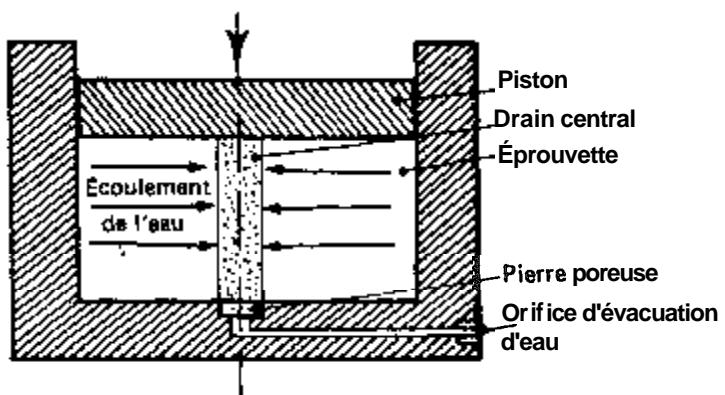


Fig. 81.1 Principe de l'oedomètre pour essai à drainage radial

Ces conditions sont remplies si, dans un oedomètre classique dont le piston est parfaitement étanche, on supprime la pierre poreuse supérieure, on fore dans l'axe de l'éprouvette un cylindre de faible diamètre que l'on remplit de sable et on restreint au diamètre du drain central la pierre poreuse inférieure, qui permet l'évacuation de l'eau interstitielle qui s'écoule vers le drain.

La charge verticale peut être appliquée à l'aide d'un piston souple (membrane) ou d'un piston rigide, l'essentiel étant l'étanchéité du contact entre le piston et la bague de l'oedomètre. Pour privilégier le plus possible l'écoulement radial par rapport à l'écoulement vertical qui peut éventuellement persister à la périphérie de l'éprouvette et pour tester un volume de sol aussi important (et donc représentatif) que possible, il est souhaitable de tester des éprouvettes de grand diamètre et d'é-

paisseur importante. Néanmoins, compte tenu des dimensions habituelles des carottes de sol prélevées lors des reconnaissances (souvent 76 mm de diamètre, rarement plus de 100 mm), les essais à drainage radial sont en général réalisés sur des éprouvettes de dimensions courantes (diamètres compris entre 60 et 70 mm, hauteurs de l'ordre de 25 mm) dans des oedomètres de série modifiés comme indiqués ci-dessus. L'oedomètre à contre-pression des LPC (Fig. 11.6), dont l'étanchéité est parfaite au niveau du piston, est particulièrement bien adapté pour ce type d'essai, à condition de remplacer sa pierre poreuse inférieure par une pièce cylindrique adaptée.

La préparation de l'éprouvette soumise à l'essai commence comme indiqué au chapitre 33, jusqu'à ce que l'éprouvette soit en place à l'intérieur de la bague oedométrique avec des extrémités arasées au niveau du bord de la bague. Il convient alors de forer le drain central.

Le diamètre du drain central doit être de l'ordre du dixième du diamètre de l'éprouvette, soit 7 mm pour un oedomètre de 70 mm de diamètre intérieur ou 6,5 mm pour l'oedomètre à contre-pression des LPC (éprouvette de 65,2 mm de diamètre). Le forage du trou central peut être réalisé à l'aide d'une petite tarière, d'un petit dispositif de lancement ou de tout autre système ne perturbant pratiquement pas le sol autour d'un trou. L'outil de forage doit être guidé avec précision pendant cette opération. La figure 81.2 présente le schéma du dispositif utilisé à cet effet par les Laboratoires des Ponts et Chaussées, dans le cas du lancement. L'outil représenté sur cette figure comporte une collerette fixée à l'extrémité d'un tube rigide creux relié à une canalisation d'eau sous une pression voisine de 200 kPa. Le tube rallonge permet d'évacuer l'eau et la boue de forage au-dessus du disque étanche qui protège la surface de l'éprouvette de tout contact avec l'eau. Pour effectuer le forage, la collerette est amenée au contact du sol, on ouvre le robinet d'eau et l'on pousse doucement le tube de lancement. Le sol se désagrège et remonte avec la circulation d'eau. L'opération demande environ 30 secondes.

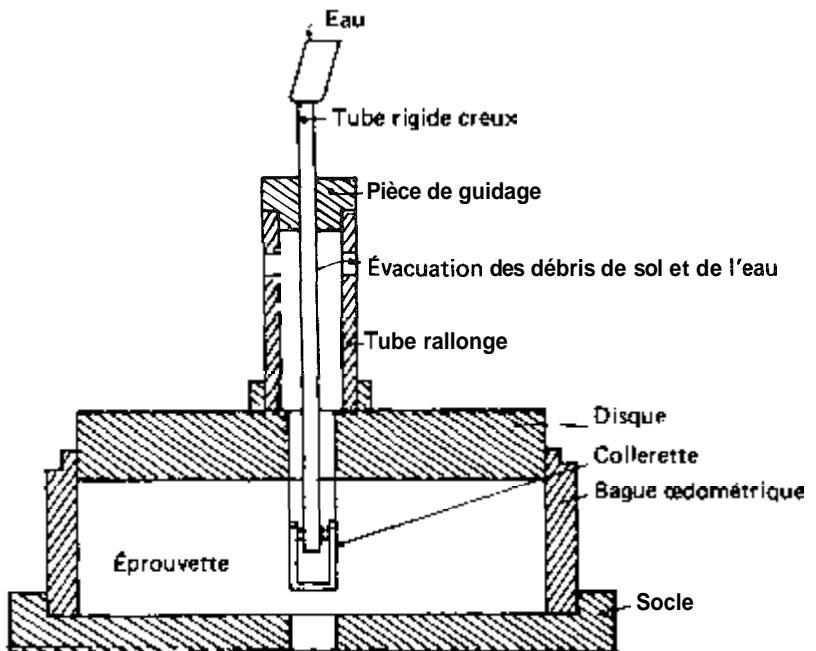


Fig. 81.2 Dispositif de forage du drain par Lancement

Lorsque l'on utilise une petite tarière, le disque qui recouvre l'éprouvette permet de maintenir l'éprouvette en place lorsque l'on soulève la tarière pour retirer le sol.

Une fois le trou réalisé, on met l'éprouvette en place dans l'oedomètre, on effectue une première pesée de l'ensemble éprouvette + bague + socle de l'oedomètre puis on remplit le forage central de sable propre ne contenant pas d'éléments de dimension inférieure à 0,1 mm et dont les plus gros éléments ont un diamètre voisin du vingtième

du diamètre du drain central (soit 03 mm pour L'oedomètre à contre-pression des LPC). On procède alors à une seconde pesée de L'ensemble éprouvette (+ sable) + bague + socle de L'oedomètre, ce qui permet de déterminer par différence le poids du sable introduit dans le drain.

On procède alors à La saturation du drain et du système d'évacuation de l'eau à travers le socle de l'oedomètre en faisant circuler de l'eau désaérée sous faible pression (3 ou 4 kPa). On met alors en place Le piston de l'oedomètre, on applique éventuellement une contre-pression dans Le drain et une pression légèrement supérieure sur le piston (pour que le piston ne se décolle pas de la surface supérieure de l'éprouvette, ce qui perturberait les conditions de drainage) et l'on peut commencer l'essai proprement dit.

Saturation de l'éprouvette

La théorie de la consolidation radiale de Barron, qui permet d'interpréter Les résultats de l'essai, ne s'applique qu'au comportement d'un sol saturé de liquide incompressible. Dans le cas (fréquent) où l'éprouvette de sol soumise à L'essai n'est pas parfaitement saturée, il est nécessaire de la saturer avant le début de l'essai. Ceci n'est guère possible qu'en appliquant une contre-pression à l'intérieur de l'éprouvette. On pourra considérer que la saturation est satisfaisante Lorsque le volume d'eau rentrant dans l'éprouvette quand on augmente la contre-pression devient négligeable ; ce volume d'eau peut être mesuré en intercalant une burette de type Bishop sur le circuit de drainage relié à la contre-pression.

Pesée en fin d'essai

En fin d'essai on déterminera le poids du sol sec W_d , obtenu par pesée de l'éprouvette après séchage à l'étuve (24 heures à 65 °C pour les sols organiques et 305 °C pour les autres sols). Si l'on souhaite déterminer le poids humide du sol en fin d'essai, il est nécessaire de mesurer le gonflement du sol après déchargement complet et de ne peser l'ensemble bague + sol qu'après stabilisation de ce gonflement.

81.2 - DÉROULEMENT DE L'ESSAI

L'essai oedométrique à drainage radial se déroule suivant le même schéma général que l'essai de compressibilité par paliers, dont Le mode opératoire a été présenté dans la section III (chapitres 21 et 22). C'est donc un essai de type incrémental dans Lequel les charges augmentent selon une progression géométrique et sont maintenues constantes par périodes de 24 heures, 48 heures ou plus, selon les sols.

COMMENTAIRES

L'interprétation de l'essai n'est possible que si la durée de chaque palier est suffisante, c'est-à-dire supérieure au temps $(t_{90})_r$ nécessaire pour obtenir 90 % de consolidation.

La théorie de la consolidation radiale permet d'obtenir un ordre de grandeur de ce temps.

Pour un oedomètre de 65,2 mm de diamètre intérieur et un drain de 6,5 mm de diamètre, on obtient :

pour $c_r = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $(t_{90})_r \approx 5h30$

pour $c_r = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ $(t_{90})_r = 39h$

pour $c_r = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ $(t_{90})_r = 54h$.

La Loi de chargement sera prise identique à celle de l'essai de compressibilité par paliers, avec une première phase de chargement de taux d'accroissement de charge 1/2 jusqu'à ce qu'on dépasse la pression de préconsolidation, puis une boucle de décharge-recharge et enfin La poursuite du chargement avec un taux d'accrois-

sement de charge de 1. Pour plus de détails, on se reportera au chapitre 21 (§ 21.2).

COMMENTAIRES

L'essai oedométrique à drainage radial décrit dans le présent mode opératoire-est un essai à écoulement centripète, vers un drain central. On peut également réaliser des essais à écoulement centrifuge, vers un drain périphérique, ce qui élimine les problèmes liés à la réalisation du drain et à l'étanchéité au contact piston-bague oedométrique. Les essais oedométriques à drain périphérique posent toutefois des problèmes spécifiques liés au frottement du sol sur la paroi poreuse de la bague oedométrique et ils sont peu répandus pour cette raison.

L'essai oedométrique à drainage radial dure de quinze jours à deux mois selon le nombre et la durée des paliers de chargement. On peut imaginer différentes façons d'accélérer cet essai de détermination du coefficient de consolidation (ou de perméabilité) radiale, soit en réalisant des essais de type "gradient contrôlé" ou "vitesse de déformation constante", soit en accélérant la consolidation par chauffage. Toutefois, à l'heure actuelle seul l'essai de type incrémental est couramment utilisé.

Le mode opératoire décrit dans le présent chapitre ne s'applique pas aux sols gonflants (c'est-à-dire aux sols qui gonflent quand on les met en présence d'eau). Si l'on doit réaliser des essais à drainage radial sur de tels sols, il faudra saturer l'éprouvette après l'exécution du drain en appliquant sur le piston des charges suffisantes pour équilibrer la pression de gonflement du sol pour poursuivre l'essai en s'inspirant du mode opératoire indiqué ici. Il n'est pas utile de réaliser des essais à drainage radial sur des sols gonflants non saturés car de tels essais ne permettraient pas de déterminer le coefficient de consolidation radiale, les propriétés de compressibilité étant pour leur part plus facile à étudier dans les essais à drainage vertical (voir section VII du présent document).

CHAPITRE 82 – CALCULS ET RÉSULTATS

Les calculs nécessaires à L'interprétation des essais oedométriques à drainage radial sont semblables à ceux des essais de compressibilité par paliers, a deux exceptions près qui concernent

- Le calcul de L'indice des vides initial,
- Les formules de calcul du coefficient de consolidation radiale, qui sont fondées sur La théorie de La consolidation radiale de Barron et non plus sur La théorie de La consolidation unidimensionnelle de Terzaghi. On se reportera aux développements relatifs à l'essai de compressibilité par paliers (chapitre 22) pour tous Les calculs non détaillés dans Le présent chapitre.

82.1 – CALCULS ÉLÉMENTAIRES

Ces calculs ont pour but, d'une part, de déterminer L'indice des vides du sol avant L'essai et sa variation au cours de la consolidation et, d'autre part, de caractériser L'éprouvette par les principaux paramètres d'identification.

82.1.1 – CALCUL DE L'INDICE DES VIDES

La présence du drain central constitué de sable perturbe Le calcul de L'indice des vides développé au paragraphe 22.1.1 du chapitre 22. Toutefois, si L'on admet qu'au cours de La déformation de L'éprouvette La paroi du drain reste cylindrique et le drain conserve sa section initiale (ce qui n'est pas certain mais reste de toutes façons impossible à vérifier en pratique), Les méthodes de calcul données au chapitre 22 restent valables à la seule condition de remplacer

- La section droite S de L'éprouvette par cette même section S diminuée de La section S_d du drain,
- le poids W_d du sol sec obtenu par pesée de L'éprouvette après passage à l'étuve par ce même poids W_d diminué du poids du sable W_{sable} remplaçant Le drain (ce poids a été déterminé avant la saturation du drain, cf paragraphe 81.1),
- le poids initial humide W de L'éprouvette par Le poids déterminé après Le forage du drain mais avant la mise en place du sable (on pourra prendre aussi Le poids initial W de L'éprouvette multiplié par $1 - S_d/S$).

82.1.2 – DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

Les substitutions définies au paragraphe précédent s'appliquent également aux formules donnant w , γ_d et y . Il vient :

- teneur en eau initiale de l'éprouvette $w = \frac{W - W_d}{W_d - W_{sable}} \times 100$

$$\begin{aligned}
 & - \text{poids volumique initial du sol sec} \quad y_d = \frac{W_s - W_{\text{sable}}}{(S - S_d) H_o} \\
 & - \text{poids volumique initial} \quad \gamma = \frac{W (S - S_d)}{S} \times \frac{1}{(S - S_d) H_o} = \frac{W}{S H_o}
 \end{aligned}$$

avec

W - poids initial humide de l'éprouvette (avant le forage du drain),
 W_d - poids sec de l'éprouvette, y compris le sable du drain,
 W_{sable} - poids du sable constituant le drain,
 S - section de l'éprouvette (drain compris),
 S_d - section du drain,
 H_o - hauteur initiale de l'éprouvette.

82.2 - CARACTÉRISTIQUES DE COMPRESSIBILITÉ

Voir paragraphe 22.2

82.3 - COURBES "TASSEMENTS-TEMPS"

L'exploitation des courbes "tassements-temps" ne sera faite que pour $\sigma' > \sigma'_{vo}$

82.3.1 - CONSTRUCTION GRAPHIQUE (méthode de Taylor)

Voir paragraphe 22.3.1

La seule différence est que le rapport des pentes des droites D_1 et D_2 est égal à 1,06 au lieu de 1,15.

On remplacera de plus systématiquement c_v (coefficients de consolidation verticale) par c_r (coefficients de consolidation radiale).

82.3.2 - CALCUL DU COEFFICIENT DE CONSOLIDATION

Le coefficient de consolidation radiale c_r est égal à

$$c_r = 0,29 \frac{D^2 F(n)}{(t_{90})_r}$$

avec les notations suivantes :

D - diamètre de l'éprouvette,

d - diamètre du drain,

$n = D/d$,

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

(pour $n = 10$, $F(n)$ est égal à 1,578).

82.3.3 - CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITÉ POUR UN INCREMENT DE CHARGE DONNÉ

On calcule le coefficient de perméabilité horizontale (ou radiale) k_r à l'aide de la formule

$$k_{r_n} = c_{r_n} \cdot m_{v_n} \cdot \gamma_w$$

avec les notations suivantes :

c_r - coefficient de consolidation radiale déterminé pour l'incrément de charge de σ'_n à σ'_{n+1} ,

$$e_{mn} = -\frac{1}{1+e_{mn}} \left(\frac{e_n - e_{n+1}}{\sigma'_n - \sigma'_{n+1}} \right), \text{ coefficient de compressibilité,}$$

e_n = indice des vides pris sur la courbe de compressibilité pour $a' = \sigma'_n$,

$$e_{vn} = \frac{e_n + e_{n+1}}{2}, \text{ indice des vides moyen.}$$

82.4 - DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE PERMÉABILITÉ ET DE CONSOLIDATION CORRIGÉS

Voir paragraphe 22.4

Remplacer k_v (coefficient de perméabilité verticale) par k_r (coefficient de perméabilité radiale) et c_v par c_r .

82.5 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats seront présentés comme ceux de l'essai de compressibilité par paliers, en remplaçant seulement k_v par k_r et c_v par c_r .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Généralités

- 1 - MIEUSSENS C, MAGNAN J.P., SOYEZ B. (1985)
Essais de compressibilité a l'oedomètre : procédures recommandées
par Les Laboratoires des Ponts et Chaussées
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 139
- 2 - LOWE III, J, ZACCHIO, PF, FELDMAN, HS. (1964)
Consolidation testing with back pressure
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,
vol. 90, n° SM5, sept., 69-86

Essai à vitesse de déformation constante

- 3 - SMITH, RE, WAHLS, HE (1969)
Consolidation under constant rates of strain
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 95,
n° SM2, March, 519-539
- 4 - WISSA, AEZ, CHRISTIAN, J.T., DAVIS, EH, HEIBERG, S. (1969)
Consolidation at constant rate of strain
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,
vol. 97, n° SM10, October, 1393-1413
- 5 - SÄLLFORS, G. (1975)
New oedometer routines - Advantages in engineering practice. Proceedings, Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, march/april, 129-136
- 6 - GORMAN, C.T., HOPKINS, T.C., DEEN, R.C., DRNEVICH, V.P. (1978)
Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing
Geotechnical Testing Journal, vol. 1, n° 1, march, 3-15
- 7 - UMEHARA, Y, ZEN, K (1980)
Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils
Soils and Foundations, vol. 20, n° 2, june, 79-95.

Essai à gradient contrôlé

- 8 - LOWE III, J, JONAS, E, OBRICIAN, V. (1969)
Controlled gradient consolidation test.
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,
vol. 95, n° SM1, January, 77-97
- 9 - SÄLLFORS, G. (1975)
New oedometer routines - Advantages in engineering practice. Proceedings, Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, march/april, 129-136
- 10 - GORMAN, C.T., HOPKINS, T.C., DEEN, R.C., DRNEVICH, V.P. (1978)
Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing
Geotechnical Testing Journal, vol. 1, n° 1, march, 3-15

Essai accéléré par chauffage

- 11 • PHILIPPONNAT G. (1977)
Mesure de La compressibilité des sols par un essai oedométrique accéléré
Annales de L'ITBTP, n° 347; février, 119-132

Essai de gonflement

Essai à drainage radial

- 12 • PAUTE, J.-L., (1973)
Essai oedométrique à drain central
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° spécial T, 322-334
- 13 • ESCARIO, V, URIEL, S. (1961)
Determining the coefficient of consolidation and horizontal permeability
by radial drainage
C.R. 5e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de
Fondations, Paris, vol. 1, 83-87
- 14 • SHIELDS, DH, ROWE, PW. (1965)
Radial drainage oedometer for laminated clays
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,
vol. 91, n° SM1, January, 15-23
- 15 • ROWE, PW, BARDET, L. (1966)
A new consolidation cell
Géotechnique, vol. XVI, n° 2 june, 162-170

*Publié par le LCPC, 58 boulevard Lefebvre - 75732 PARIS CEDEX 15
sous le numéro 502 300 - Dépôt légal : septembre 1985*