

Sols : reconnaissance et essais

Essai pressiométrique Ménard

Partie 1 : Essai sans cycle

E : Soil : Investigation and testing — Menard pressure meter test —
Part 1: Test without unload-reload cycle

D : Boden : Erkundung und Prüfungen — Pressiometer-Versuch nach Menard —
Teil 1: Versuch ohne Entlastungs-Wiederbelastungszyklus

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 décembre 1999 pour prendre effet le 5 janvier 2000.

Destinée à remplacer la norme homologuée NF P 94-110, de juillet 1991, à partir du 1^{er} janvier 2001 (voir avant-propos).

Correspondance

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

Analyse

Le présent document traite de l'essai pressiométrique Ménard réalisé au moyen d'une sonde tricellulaire et dans laquelle les pressions sont imposées par paliers. Il définit les termes employés ainsi que les paramètres mesurés en spécifiant les caractéristiques de l'appareillage. Il fixe le mode opératoire de l'essai, fournit la méthode de calcul des différents paramètres et précise les modes de présentation des résultats.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : sol, fondation, essai, essai en place, essai à la pression, mode opératoire, calcul, résultats d'essai.

Modifications

Par rapport au document destiné à être remplacé, les modifications portent sur :

- la caractérisation de la courbe d'expansion pressiométrique ;
- le dispositif de mesurage associé à une saisie et au stockage des valeurs mesurées (pression, volume, temps) sur un support physique ;
- les types de sonde utilisables et leurs caractéristiques géométriques ;
- la détermination de la pression limite pressiométrique.

Corrections

Par rapport au 1^{er} tirage, correction de la formule de calcul de la pression limite p_{lh} , au paragraphe D.3.2.2.



Membres de la commission de normalisation

Président : M PAREZ

Secrétariat : M BIGOT — LABORATOIRE REGIONAL DE L'EST PARISIEN — DREIF

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

Ont participé en tant qu'experts

M	GAMBIN	APAGEO
M	JEZEQUEL	LABORATOIRE REGIONAL DE SAINT BRIEUC

Sommaire

	Page
Avant-propos	5
1 Domaine d'application	5
2 Références normatives	5
3 Principe de l'essai	5
4 Notations — Terminologie — Définitions	5
4.1 Notations	5
4.2 Terminologie et définitions	7
5 Appareillage	12
5.1 La sonde pressiométrique	12
5.1.1 La sonde à gaine souple	12
5.1.2 La sonde avec tube fendu	15
5.2 Le contrôleur pression-volume	15
5.3 La tubulure	15
5.4 Le liquide injecté	15
5.5 Les moyens de mesure et de contrôle	15
5.5.1 Temps	15
5.5.2 Pression et volume	15
5.5.3 Visualisation des grandeurs mesurées	16
5.5.4 Le tube pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage	16
5.6 L'enregistreur	16
6 Mode opératoire	16
6.1 Vérifications et mesures avant insertion de la sonde dans le terrain	16
6.2 Forage pressiométrique et insertion de la sonde dans le terrain	17
6.3 Réalisation de l'essai d'expansion	17
6.3.1 Programme de chargement de l'essai pressiométrique	17
6.3.2 Pression dans les cellules de garde	17
6.3.3 Variation des pas de pression (Dp)	17
6.3.4 Mesures	18
6.3.5 Fin de l'essai d'expansion	18
6.4 Archivage et édition sur site	18
6.4.1 Archivage sur le support d'enregistrement	18
6.4.2 Édition lors de l'essai	18
6.5 Espacement des essais et profondeur minimale de la sonde dans le terrain.	19
6.6 Incertitudes des mesures	19
7 Expression des résultats	20
8 Procès-verbal d'essai pressiométrique Ménard	20
9 Procès-verbal de sondage pressiométrique	22
Annexe A (normative) Caractéristiques géométriques des sondes pressiométriques	24
Annexe B (normative) Vérifications	26
B.1 Suivi des appareils de mesure	26
B.2 Résistance propre des membranes	26
B.2.1 Préparation de la sonde pressiométrique	26
B.2.2 Résistance propre de la membrane	26

Sommaire (fin)

	Page
B.3	Contrôle sur site du bon fonctionnement du matériel de mesure 27
B.4	Estimation des corrections de mesure 27
B.4.1	Prédilatation de la sonde et réglage du zéro du volumètre 27
B.4.2	Essai d'expansion propre de l'appareillage 27
B.4.3	Essai de résistance propre de la sonde pressiométrique 30
B.4.4	Détermination de la pression du gaz dans les cellules de garde à chaque essai 31
Annexe C	(normative) Introduction de la sonde pressiométrique dans le terrain 33
C.1	Méthodes de réalisation des forages pressiométriques 33
C.2	Introduction de la sonde pressiométrique par refoulement du terrain 33
C.3	Longueur maximale de la passe de forage fait avant introduction de la sonde pressiométrique 35
C.4	Choix de la sonde pressiométrique 35
C.5	Délai d'exécution des essais 36
Annexe D	(normative) Détermination des caractéristiques pressiométriques 37
D.1	Détermination de la courbe pressiométrique corrigée 37
D.1.1	Correction due à la charge hydraulique (p_H) 37
D.1.2	Correction due à la résistance propre de la sonde pressiométrique 38
D.1.3	Correction due à l'expansion propre de l'appareillage 38
D.1.4	Courbe pressiométrique corrigée 38
D.2	Détermination du module pressiométrique Ménard 38
D.2.1	Plage de calcul du module pressiométrique 38
D.2.2	Module pressiométrique Ménard (E_M) 39
D.3	Pression limite pressiométrique (p_l) 39
D.3.1	Détermination directe 39
D.3.2	Méthodes d'extrapolation 39
D.3.3	Pression limite conventionnelle par extrapolation 40
D.4	Pression de fluage pressiométrique 41
D.5	Vérification des valeurs des caractéristiques pressiométriques 41
Annexe E	(informative) Pression limite pressiométrique nette —
	Pression de fluage pressiométrique nette 42
E.1	Contraintes dans le terrain au repos avant essai 42
E.2	Pression limite pressiométrique nette p_l^* et pression de fluage pressiométrique nette p_f^* 43

Avant-propos

Actuellement l'essai pressiométrique est pratiqué conformément à la norme **NF P 94-110** de juillet 1991 avec deux types de matériel :

- un appareil de visualisation des valeurs mesurées et leur inscription par l'opérateur sur un support papier ;
- un appareil doté d'une saisie et d'un enregistrement des mesures.

La norme **NF P 94-110-1** impose une incertitude aux valeurs de mesures et une périodicité des relevés telles que pour répondre à ces nouvelles exigences, améliorer la qualité de l'essai et sa traçabilité, l'enregistrement des mesures sur un support physique est de fait rendu obligatoire.

Les praticiens auront jusqu'au 31 décembre 2000 pour adapter leur matériel de saisie et d'exploitation des résultats de mesure répondant aux exigences de la norme.

La norme **XP P 94-110-2** traite de l'essai pressiométrique avec un cycle.

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique à la réalisation de l'essai pressiométrique Ménard dans les sols naturels et les remblais traités ou non par certains procédés, dans les sols indurés et les roches tendres, tant en site terrestre qu'en site aquatique.

NOTE L'essai peut être réalisé dans le rocher mais les caractéristiques obtenues sont alors affectées d'une plus grande incertitude compte tenu de l'appareillage et de très faibles déformations du terrain dans ce cas.

2 Références normatives

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

NF P 94-500, *Missions géotechniques — Classification et spécifications*.

3 Principe de l'essai

L'essai pressiométrique Ménard consiste à dilater radialement une sonde cylindrique tricellulaire placée dans le terrain, à mesurer et à enregistrer les pressions appliquées par la sonde et les variations volumiques de cette dernière afin de déterminer la relation entre la pression appliquée et l'expansion de la sonde.

4 Notations — Terminologie — Définitions

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

4.1 Notations

- a est le coefficient de dilatation de la tubulure et de l'appareillage.
- d_g est le diamètre extérieur des cellules de garde de la sonde pressiométrique.
- d_i est le diamètre intérieur du tube utilisé pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage.
- d_s est le diamètre extérieur de la cellule centrale, y compris son habillage éventuel.
- d_{sf} est le diamètre extérieur du tube fendu au droit de la cellule centrale.
- d_t est le diamètre du forage.
- e est l'épaisseur du tube utilisé pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage.

l_c	est la longueur du tube utilisé pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage.
l_g	est la longueur de chaque cellule de garde de la sonde pressiométrique.
l_{gc}	est la longueur de chaque cellule de garde pour une sonde pressiométrique courte.
l_{gl}	est la longueur de chaque cellule de garde pour une sonde pressiométrique longue.
l_m	est la longueur projetée sur l'axe longitudinal de la partie fendue du tube fendu.
l_s	est la longueur de la cellule centrale de la sonde mesurée après montage de la membrane.
l_{sc}	est la longueur de la cellule centrale après montage de la membrane sur une sonde courte.
l_{sl}	est la longueur de la cellule centrale après montage de la membrane sur une sonde longue.
m_E	est la valeur minimale, strictement positive, des pentes m_i .
m_i	est la pente du segment de la courbe pressiométrique corrigée, délimité par les points de coordonnées (p_{i-1}, V_{i-1}) et (p_i, V_i) .
p	est la pression appliquée par la sonde au terrain.
p_e	est la résistance propre de la sonde après corrections.
p_E	est la pression de l'origine du segment de pente m_E .
p_{el}	est la résistance limite propre de la sonde pressiométrique.
p_f	est la pression de fluage pressiométrique.
p_g	est la pression du gaz délivrée par le conditionneur de pression placé sur le tube relié aux cellules de garde de la sonde pressiométrique.
p_h	est la pression due à la charge hydraulique entre le conditionneur de pression et la cellule centrale de la sonde pressiométrique.
p_k	est la pression du gaz régnant dans les cellules de garde de la sonde pressiométrique.
p_l	est la pression limite pressiométrique du terrain.
p_l^*	est la pression limite pressiométrique nette du terrain.
p_{lh}	est la pression limite pressiométrique extrapolée selon la méthode «hyperbolique».
p_{li}	est la pression limite pressiométrique extrapolée selon la méthode de la courbe «inverse».
p_m	est la résistance propre de la membrane de la sonde pressiométrique.
p_r	est la pression du liquide délivrée par le conditionneur de pression placé sur le tube relié à la cellule centrale dans la sonde pressiométrique.
p_s	est la pression du liquide dans la cellule centrale de la sonde pressiométrique.
p_1	est la pression corrigée correspondant à l'origine de la plage pressiométrique.
p_2	est la pression corrigée correspondant à l'extrémité de la plage pressiométrique.
t	est le temps.
u_s	est la pression de l'eau interstitielle dans le terrain au niveau d'essai.
z	est la cote altimétrique, comptée positivement vers le haut à partir d'un plan de référence.
z_c	est la cote altimétrique de la prise de pression (conditionneur de pression) du liquide injecté dans la cellule de mesure.
z_{cg}	est la cote altimétrique de la prise de pression (conditionneur de pression) du gaz alimentant les cellules de garde de la sonde pressiométrique.
z_N	est la cote altimétrique du terrain naturel au droit du forage pressiométrique.
z_s	est la cote altimétrique du milieu de la cellule de mesure de la sonde pressiométrique lors de l'essai.
z_w	est la cote altimétrique de la nappe ou du plan d'eau en site aquatique.
CPV	désigne le système de contrôle et de mesure des pressions et du volume.
E	désigne le type de sonde pressiométrique à cellules juxtaposées.
E_M	est le module pressiométrique Ménard.

G	désigne le type de sonde pressiométrique à cellules emboîtées.
K_0	est le coefficient de pression des terres au repos au niveau de l'essai.
TN	est le niveau du terrain existant au moment du forage pressiométrique.
V	est le volume, après corrections, injecté dans la cellule centrale et mesuré 60 s après le début du palier.
V_c	est le volume déterminé lors de l'essai d'expansion propre de l'appareillage.
V_E	est le volume injecté dans la cellule centrale, après corrections, correspondant à la pression p_E .
V_I	est le volume injecté dans la cellule centrale de mesure, après corrections, correspondant au doublement du volume initial de la cavité pressiométrique.
V_r	est le volume injecté dans la sonde (avant corrections) lu sur l'indicateur du CPV.
V_s	est le volume initial conventionnel de la cellule centrale de mesure (y compris éventuellement son habillage).
V_1	est le volume injecté dans la cellule centrale de mesure, après corrections, correspondant au début de la plage pressiométrique.
V_2	est le volume injecté dans la cellule centrale de mesure, après corrections, correspondant à l'extrémité de la plage pressiométrique.
V_{30}	est le volume injecté dans la cellule centrale de mesure 30 s après le début du palier.
V_{60}	est le volume injecté dans la cellule centrale de mesure 60 s après le début du palier.
β	est le coefficient servant au calcul de la plage pressiométrique conventionnelle.
γ	est le poids volumique total du terrain au moment de l'essai.
γ_i	est le poids volumique du liquide injecté dans la cellule centrale de mesure.
γ_w	est le poids volumique de l'eau.
λ_g	est le coefficient de compressibilité du gaz injecté dans les cellules de garde.
ν	est le coefficient de Poisson.
σ_{vs}	est la contrainte totale verticale du terrain au niveau de l'essai.
σ_{hs}	est la contrainte totale horizontale du terrain au niveau de l'essai.
δt	est la durée de passage d'un palier de pression au palier consécutif.
Δp	est le pas de pression.
Δt	est la durée d'application d'un palier de pression.
$\Delta V^{60/30}$	est la variation de volume injecté entre 30 s et 60 s au cours d'un même palier de pression.
$\Delta V^{60/60}$	est la variation de volume injecté à 60 s entre deux paliers consécutifs.

4.2 Terminologie et définitions

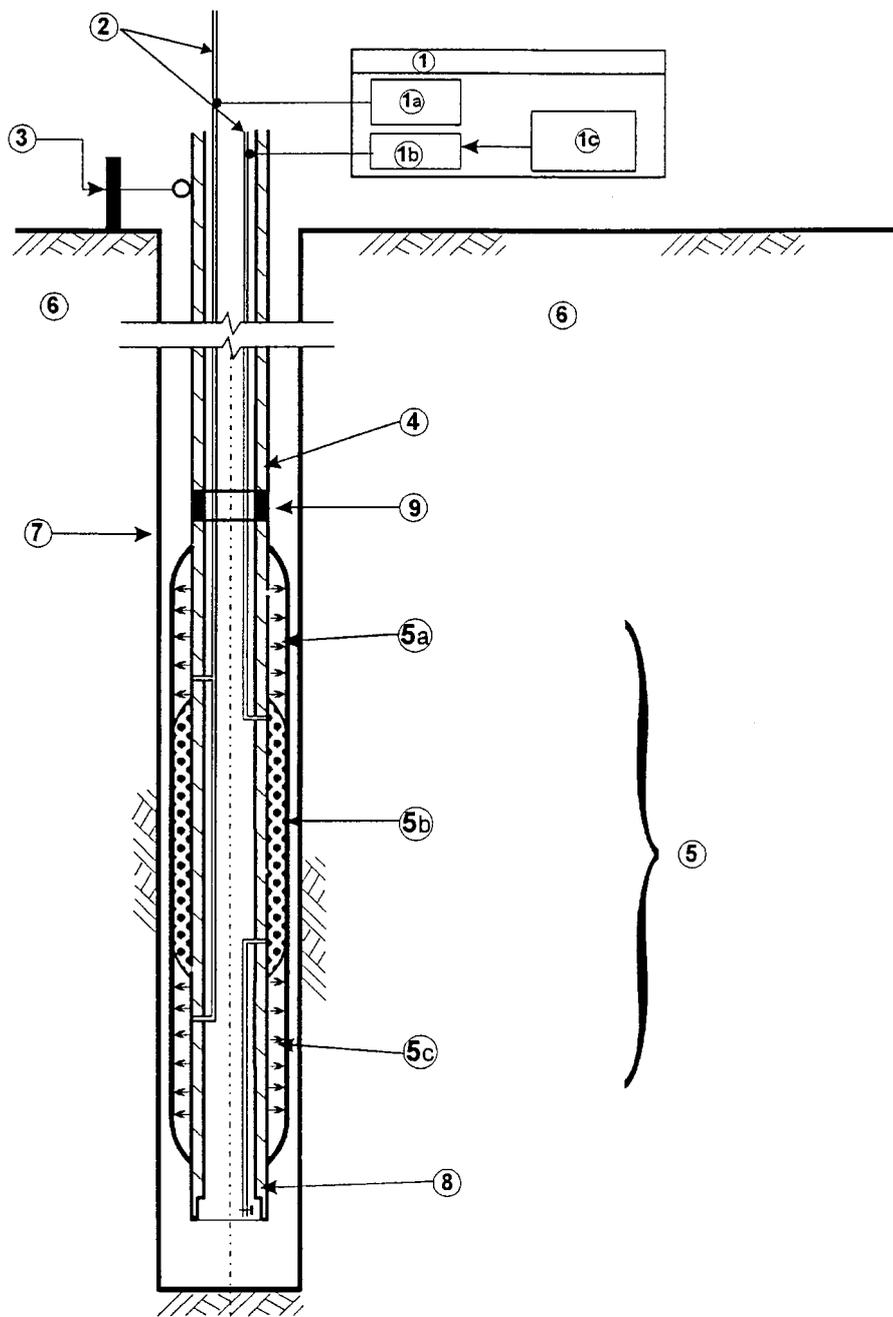
4.2.1 pressiomètre

ensemble de l'appareillage utilisé pour la réalisation de l'essai pressiométrique Ménard, indépendamment des moyens nécessaires à la mise en place de la sonde pressiométrique dans le terrain

Un pressiomètre comporte une sonde pressiométrique, un contrôleur pression-volume appelé CPV, des tubes de raccordement de la sonde au CPV et un système d'enregistrement incorporé au CPV ou rapporté sur celui-ci, voir Figure 1.

Le contrôleur pression-volume comprend lui-même :

- le système de mise en pression et de dilatation de la sonde pressiométrique ;
- un dispositif de mesurage permettant la visualisation et l'enregistrement des paramètres mesurés : temps — pressions — volumes.



Légende

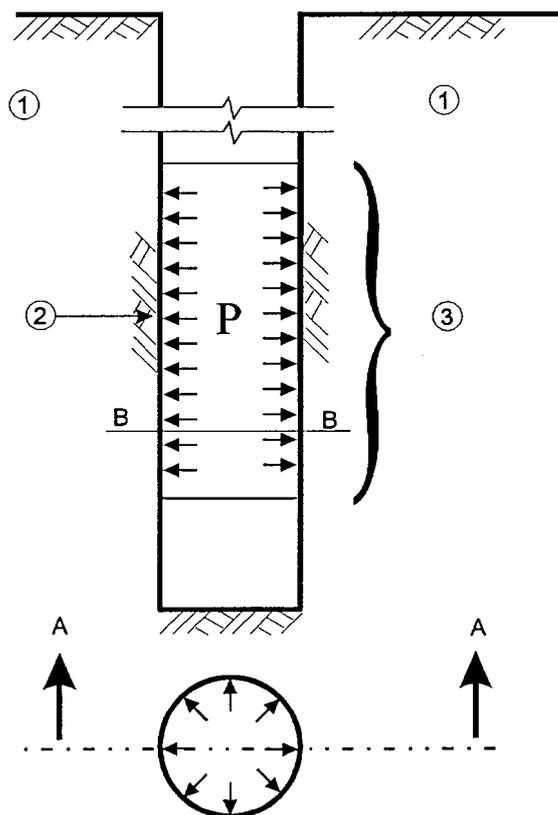
- 1 Contrôleur pression volume CPV
- 1a Saisie, Stockage impression des données
- 1b Conditionneur indicateur
- 1c Système de mise en pression et d'injection
- 2 Tubes pour injection
- 3 Système de repérage de la profondeur
- 4 Tige de manœuvre
- 5 Sonde pressiométrique
- 5a Cellule de garde supérieure
- 5b Cellule centrale de mesure
- 5c Cellule de garde inférieure
- 6 Terrain
- 7 Forage pressiométrique
- 8 Âme métallique creuse
- 9 Raccord sonde — Tige de manœuvre

Figure 1 — Schéma d'un pressiomètre

4.2.2

sondage pressiométrique

ensemble des opérations successives (voir Figure 2) consistant en l'exécution d'un forage pressiométrique (voir paragraphe 4.2.3) et en la réalisation, dans ce forage, d'un ou de plusieurs essais pressiométriques (voir paragraphe 4.2.4).



Légende

- 1 Terrain
- 2 Forage pressiométrique
- 3 Sonde pressiométrique

Figure 2 — Schéma d'un sondage pressiométrique

4.2.3

forage pressiométrique

réalisation dans le terrain d'une excavation cylindrique à section transversale circulaire dans laquelle est introduite la sonde pressiométrique

NOTE 1 Le choix entre les différentes techniques possibles pour réaliser l'excavation est fonction de la nature et de l'état des terrains rencontrés. Lorsque les parois du forage ne peuvent être rendues stables, la sonde peut être introduite directement par vérinage ou battage conformément aux prescriptions de l'annexe C.

NOTE 2 La qualité de l'essai pressiométrique et celle de la réalisation du forage préalable sont étroitement liées, aussi faut-il respecter les prescriptions générales définies dans le tableau C.1 de l'annexe C pour réaliser correctement le forage pressiométrique, et ne pas dépasser les longueurs de passe indiquées.

NOTE 3 Dans le cas où le forage n'est pas vertical, son inclinaison et son orientation doivent être précisées.

NOTE 4 L'expression «tube fendu direct» désigne la mise en place de la sonde au sein du terrain par vérinage ou battage d'un tube à fentes longitudinales à l'intérieur duquel est placée la sonde.

NOTE 5 «Essai avec un tube fendu» est l'expression utilisée lorsque la sonde munie d'une protection déformable, en général métallique, est descendue dans l'excavation préalable réalisée par forage.

4.2.4 essai pressiométrique
procédure qui consiste à dilater, dans le terrain, une sonde cylindrique de caractéristiques géométriques conformes à l'annexe A

Cette procédure comprend :

- l'application par paliers, voir paragraphe 6.3, d'une pression uniforme sur la paroi du forage, voir Figure 3, par l'intermédiaire de la sonde ;
- la mesure de la variation du volume de la sonde, dans le temps, en fonction de la pression qui lui est appliquée.

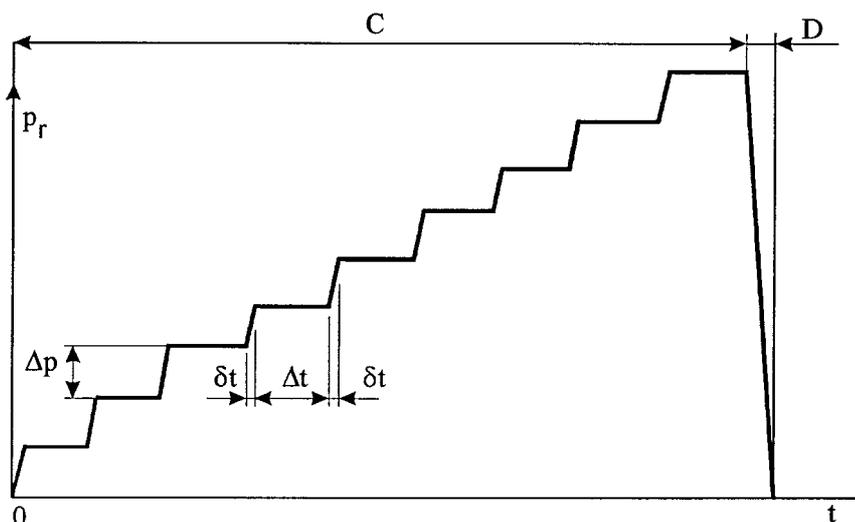
NOTE L'essai permet d'obtenir une caractéristique de déformabilité du sol (le module pressiométrique Ménard E_M , voir paragraphe 4.2.8), une caractéristique de résistance limite (la pression limite pressiométrique p_l , voir paragraphe 4.2.9) et une pression caractéristique appelée pression de fluage pressiométrique p_f (voir paragraphe 4.2.9).

4.2.5 profil pressiométrique
représentation graphique de l'ensemble des résultats des essais pressiométriques réalisés à différents niveaux, au cours d'un même forage pressiométrique, accompagnée des informations qui ont été recueillies durant cette opération

4.2.6 programme de chargement de l'essai pressiométrique
pression imposée par la sonde pressiométrique au terrain en fonction du temps, voir paragraphe 6.3.1 et Figure 3

NOTE Il s'agit, en général de la pression p_r mesurée, avant application des corrections, voir annexe D paragraphe D.1.

Le programme de chargement doit être du type de celui représenté sur la Figure 3, c'est-à-dire que la pression p_r doit être augmentée par des pas de pression Δp identiques (sauf tolérance du paragraphe 6.3.3) et que chaque pression doit être maintenue constante pendant une durée Δt fixée. La durée de passage d'un palier au palier suivant doit être inférieure à une valeur δt fixée. Enfin, le déchargement se fait sans palier.



Légende

p_r	Pression	δt	Durée de passage d'un palier au suivant
t	Temps	C	Chargement du terrain
Δt	Durée d'un palier de pression	D	Déchargement du terrain
Δp	Pas du palier de pression		

Figure 3 — Programme de chargement de l'essai pressiométrique Ménard

NOTE Lorsqu'un volume de liquide V est injecté dans la sonde, cette dernière en se dilatant vient tout d'abord au contact du terrain puis le déplace. Le volume de la cellule de mesure en cours d'essai désigné également par « volume de la cavité » est la somme du volume V_s de l'espace cylindrique initial, voir paragraphe B.4.2, occupé par la cellule centrale de la sonde pressiométrique et du volume injecté V .

4.2.7

courbe pressiométrique

représentation graphique des valeurs du volume injecté V_{60} dans la sonde en fonction de la pression appliquée au terrain mesuré 60 s après le début de chaque palier

NOTE 1 La courbe pressiométrique brute représente les valeurs de la pression p_r et du volume V_{60} données sur le site par les indicateurs du CPV (avant corrections).

NOTE 2 La courbe pressiométrique corrigée, voir Figure 4, donne l'évolution du volume V de la cellule centrale de la sonde en fonction de la pression p , voir paragraphe D.1.4 :

$$V = f(p)$$

où :

p désigne la pression appliquée au terrain par la paroi externe de la sonde après corrections de la charge hydraulique et de la résistance propre de la sonde, voir paragraphes D.1.1 et D.1.2 ;

V est le volume de liquide injecté dans la sonde et mesuré à la fin du palier de pression p , après correction due à l'expansion propre de l'appareillage, voir paragraphe D.1.3.

NOTE 3 La courbe pressiométrique corrigée, voir Figure 4, est constituée par la succession de segments de droite reliant les points de coordonnées (p, V) . Au début de l'essai d'expansion, l'anneau de terrain adjacent à la cavité est serré progressivement par la sonde jusqu'à retrouver sensiblement le degré de serrage initial. La pente de la courbe pressiométrique se stabilise puis la vitesse de déformation radiale de la sonde croît de plus en plus rapidement au fur et à mesure que la pression augmente.

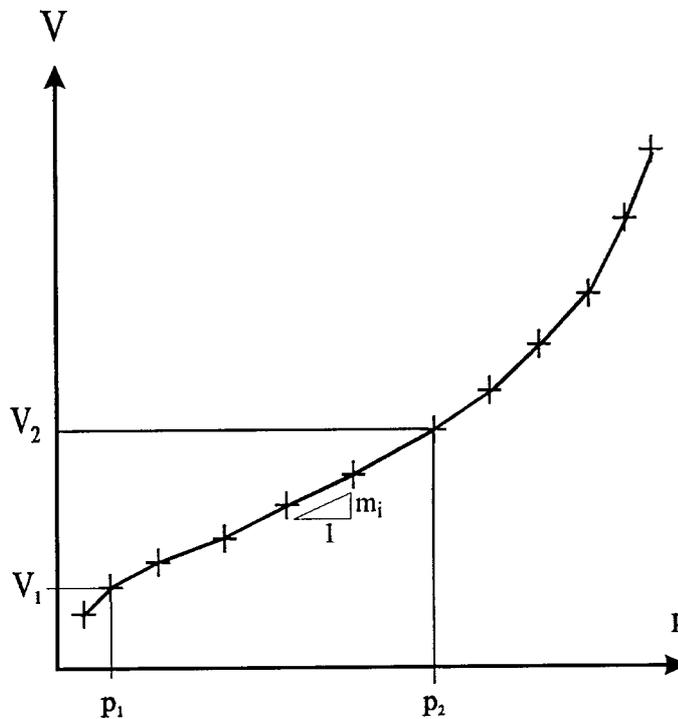


Figure 4 — Courbe pressiométrique corrigée — Exemple

4.2.8

module pressiométrique Ménard E_M

module de déformation calculé sur le segment $(p_1V_1 ; p_2V_2)$ en admettant que le comportement du terrain est régi par une loi élastique linéaire, voir annexe D.2

4.2.9

pression limite pressiométrique p_l

pression correspondant, par convention, à celle qui entraîne le doublement du volume de la cavité, voir paragraphe D.3

4.2.10

pression de fluage pressiométrique p_f

pression déterminée sur le diagramme de fluage, voir paragraphe D.4.

4.2.11

profondeur

longueur mesurée le long du forage entre le sommet du forage (ou du tubage en site aquatique) et le point considéré tel que, par exemple, le niveau d'eau, le fond de forage, la position d'un essai

5 Appareillage

L'ensemble pressiométrique dont les différents éléments sont schématisés dans leur environnement (Figure 1) comprend :

- une sonde tricellulaire ;
- des tiges de manœuvre de la sonde depuis la surface ;
- un contrôleur pression-volume (CPV) ;
- des tubes reliant le CPV à la sonde.

Le contrôleur pression-volume comporte :

- un système de mise en pression et de dilatation de la sonde ;
- un dispositif de mesurage, permettant la visualisation et l'enregistrement des valeurs mesurées.

Les conditionneurs de pression du liquide dans la cellule de mesure ou de gaz dans les cellules de garde sont :

- soit placés en surface ;
- soit incorporés à la sonde et fixés à une distance inférieure à 1 m du milieu de la cellule centrale de mesure.

Il faut disposer, en outre, de tout moyen permettant de déterminer la profondeur de l'essai (voir paragraphe 4.2.11) avec la précision requise.

5.1 La sonde pressiométrique

Deux types de sondes peuvent être employés selon la nature et l'état du terrain :

- sonde à gaine souple ;
- sonde à gaine souple solidarisée à une protection ou placée dans un tube fendu.

Ces sondes sont décrites respectivement aux Figures 5a et 5b et leurs caractéristiques géométriques sont données dans le tableau A.1.

La déformation radiale de la sonde par rapport à sa position au repos doit pouvoir atteindre au moins 50 %.

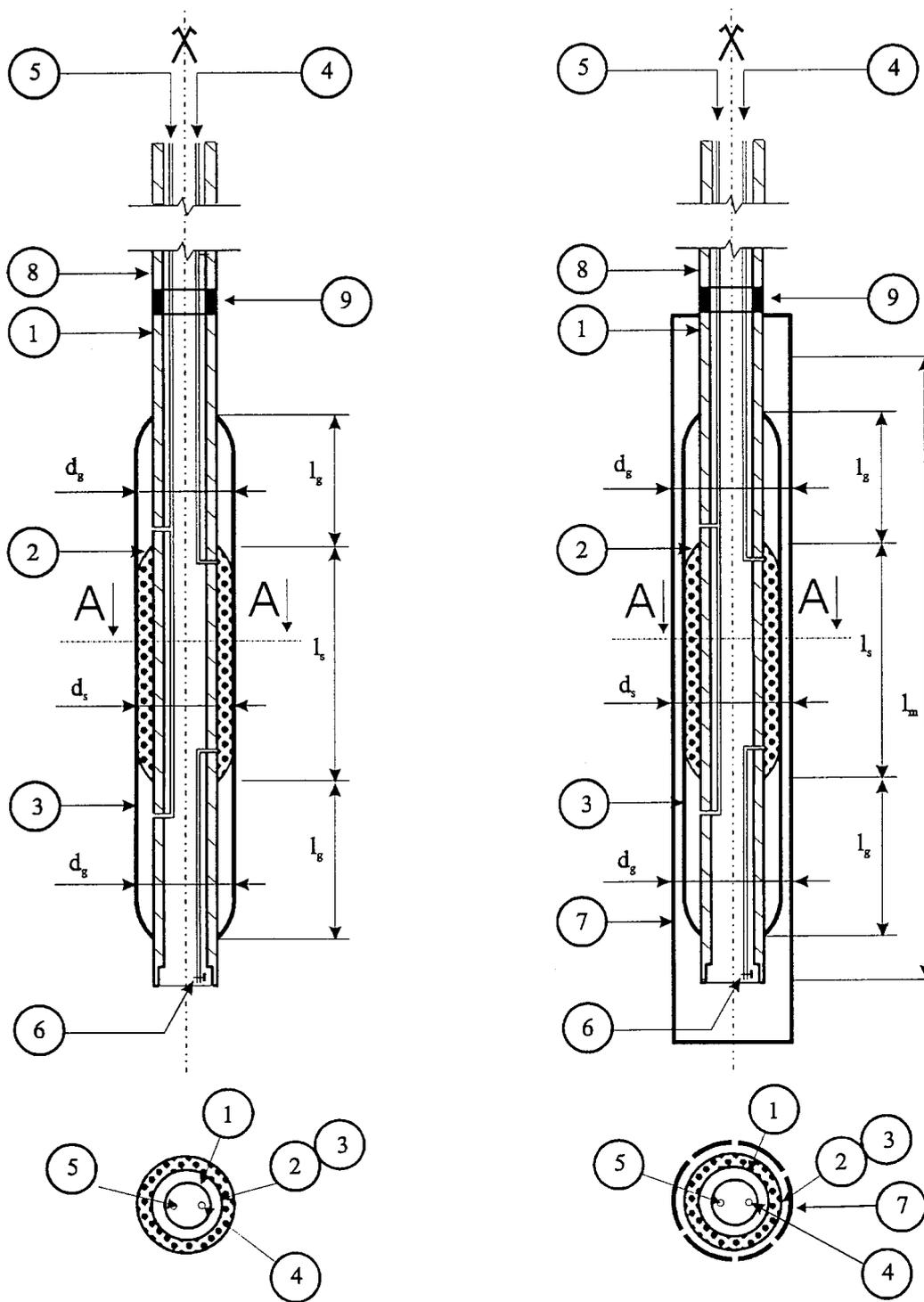
5.1.1 La sonde à gaine souple

La sonde se présente sous la forme de trois cellules cylindriques de section circulaire et de même axe, agissant simultanément sur la paroi du forage pendant l'essai. Elle comprend :

- une cellule centrale de mesure, de diamètre extérieur d_s , de longueur l_s capable de se déformer radialement dans un forage de diamètre d_t et d'appliquer une pression uniforme sur le terrain. Elle est dilatée par injection d'un liquide supposé incompressible ;
- deux cellules de garde de diamètre extérieur d_g et de longueur l_g , situées de part et d'autre de la cellule centrale et destinées à transmettre au terrain une pression voisine de celle de la cellule centrale. Elles sont gonflées à l'aide d'un gaz.

La sonde est constituée d'une âme métallique creuse et de tubes d'injection des fluides servant à dilater les cellules. Elle est équipée soit d'une membrane et d'une gaine déformables pour la sonde à cellules emboîtées type G, soit de trois membranes et éventuellement d'une gaine pour la sonde à cellules juxtaposées type E :

- a) l'âme métallique porte, sur sa face extérieure, un système de rainures répartissant uniformément le liquide dans la cellule de mesure. Elle sert de support aux membrane et gaine souples. La partie supérieure de l'âme est terminée par un raccord destiné à assurer la liaison avec le train de tiges manœuvré depuis la surface du terrain ;
 - la membrane de la cellule centrale isole la cellule de mesure des cellules de garde ;
 - la gaine recouvre la membrane de la cellule centrale et les cellules de garde ; une protection souple élastique peut être solidarisée à la gaine ;
- b) les tubes d'injection des fluides utilisés pour dilater les cellules relient la sonde au système de mise en pression. Le robinet de purge de la cellule de mesure est fixé à la partie inférieure de la sonde ;
- c) les cellules de garde peuvent être réalisées de deux manières différentes :
 - dans le cas d'une sonde G à cellules emboîtées, la gaine qui recouvre la cellule centrale et qui est fixée à ses deux extrémités, délimite les cellules de garde ;
 - dans le cas d'une sonde E à cellules juxtaposées, les cellules de garde sont individualisées par une membrane souple et élastique. Une même gaine souple peut recouvrir à la fois les cellules de garde et la cellule centrale.



Légende

- | | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Âme métallique creuse | 5 | Tube pour injection du gaz dans les cellules de garde |
| 2 | Membrane de la cellule de mesure | 6 | Robinet de purge de la cellule centrale de mesure |
| 3 | Gaine | 7 | Tube fendu |
| 4 | Tube pour injection du liquide dans la cellule centrale de mesure | 8 | Tige de manœuvre de la sonde |
| | | 9 | Raccord sonde — Tige de manœuvre |

a) Sonde pressiométrique à gaine souple

b) Sonde pressiométrique avec tube fendu

Figure 5 — Sonde pressiométrique — Exemple de sonde G à cellules emboîtées

5.1.2 La sonde avec tube fendu

La sonde (voir paragraphe 5.1.1) est placée à l'abri d'un tube en acier de diamètre extérieur d_s , portant six fentes équidistantes [Figure 5 b)] sur une longueur l_m projetée longitudinalement telle que :

$$l_m = \text{valeur max} \left\{ 1,3 \left(l_s + 2l_g \right); 800 \text{ mm} \right\}$$

L'ouverture de chaque fente du tube doit être, avant et après dilatation, inférieure ou égale à 0,4 mm. Après dilatation, le tube fendu et les fentes doivent retrouver leur forme et leur ouverture initiales.

La sonde est positionnée longitudinalement dans le tube fendu entre deux amortisseurs permettant en particulier à la sonde de se dilater radialement avec le minimum d'effort.

5.2 Le contrôleur pression-volume

Le contrôleur pression-volume (CPV) doit permettre d'assurer la dilatation des cellules de la sonde et de mesurer, en fonction du temps, les pressions du liquide et du gaz, ainsi que le volume de liquide injecté.

Le système de mise en pression doit permettre :

- d'atteindre la pression limite pressiométrique ou une pression p_r d'au moins 5 MPa ;
- de maintenir constante la pression dans la cellule de mesure et les cellules de garde pendant la durée de chaque palier ;
- d'appliquer un pas de pression de 0,5 MPa, mesuré à la sortie du CPV, en moins de 20 s ;
- de réguler la différence de pression entre la cellule de mesure et les cellules de garde ;
- d'injecter un volume de liquide dans la cellule de mesure supérieur à 700 cm³.

NOTE Le CPV est en général placé à la surface du terrain.

5.3 La tubulure

Les tubes flexibles assurant les connexions entre le contrôleur pression-volume et la sonde, pour le passage du liquide jusqu'à la cellule de mesure et du gaz jusqu'aux cellules de garde, peuvent être jumelés ou coaxiaux. Lorsque les tubes sont coaxiaux, le tube central permet le passage du liquide alors que le tube de plus gros diamètre transmet le gaz aux cellules de garde.

5.4 Le liquide injecté

Le liquide injecté dans la cellule de mesure est soit de l'eau, soit un liquide de viscosité équivalente à celle de l'eau et insensible au gel dans les conditions d'utilisation.

5.5 Les moyens de mesure et de contrôle

5.5.1 Temps

Le moyen utilisé doit permettre une mesure du temps avec l'erreur maximale tolérée indiquée au paragraphe 6.6.

5.5.2 Pression et volume

Les incertitudes maximales des instruments de mesure de la pression et du volume doivent être telles qu'elles permettent de déterminer les pressions et les volumes avec les erreurs maximales tolérées indiquées au paragraphe 6.6.

5.5.3 Visualisation des grandeurs mesurées

Sur site, le CPV doit permettre une visualisation simultanée et instantanée des valeurs mesurées : pression du liquide injecté, volume du liquide injecté dans la cellule centrale, pression du gaz dans le circuit des cellules de garde, et le temps.

5.5.4 Le tube pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage

Les caractéristiques du tube en acier doivent être telles que :

- son diamètre intérieur d_i , de valeur connue, soit inférieur ou égal à 66 mm ;
- son épaisseur e soit supérieure ou égale à 8 mm ;
- sa longueur : $l_c \geq \text{valeur max [1 m ; } l_m \text{]}$.

5.6 L'enregistreur

L'enregistreur (dispositif d'acquisition de données) doit être équipé :

- d'une horloge interne ;
- d'une imprimante ;
- d'un support d'enregistrement pouvant être relu par un micro-ordinateur.

L'enregistreur ne doit pas masquer les commandes d'acquisition et doit pouvoir restituer l'identification des capteurs ainsi que les lois de passage, entre les mesures brutes et les valeurs de pression et de volume archivées.

L'enregistreur ne doit imposer aucune modification au déroulement de l'essai conforme au paragraphe 6.3 et être conçu pour :

- fournir automatiquement ses caractéristiques propres : date, heure, minute, seconde, numéro du CPV, numéro de l'enregistreur, numéro du support d'enregistrement ;
- imposer l'introduction des informations nécessaires à l'identification de l'essai (voir paragraphe 6.1) ;
- ne pas permettre d'introduire des informations et des valeurs de pression et de volume en dehors du processus d'essai.

L'enregistreur doit comporter un système d'alarme ou d'affichage au moins dans les cas suivants :

- absence de support d'enregistrement ;
- absence des identificateurs de l'essai (voir paragraphe 6.1) ;
- défaut d'alimentation électrique.

La résolution du dispositif enregistreur numérique doit être inférieure ou égale à 5 kPa pour les pressions et inférieure ou égale à 0,5 cm³ pour le volume.

6 Mode opératoire

Les opérations suivantes sont à réaliser successivement.

6.1 Vérifications et mesures avant insertion de la sonde dans le terrain

Le contrôleur pression-volume et le système d'enregistrement doivent être protégés contre tout ensoleillement direct.

Avant d'introduire la sonde au sein du terrain, il doit être procédé aux contrôles de bon fonctionnement et aux mesures de résistance propre de la sonde décrits dans l'annexe B.

Le système de mesure et d'enregistrement est initialisé (lecture du zéro des capteurs) et les identificateurs de l'essai sont introduits :

- identification de l'opérateur effectuant l'essai ;
- numéro de dossier ;
- numéro du sondage ;
- type de sonde ;
- type de forage pressiométrique ou de mise en œuvre de la sonde ;
- références de l'essai de résistance propre de la sonde utilisée, voir paragraphe B.4 ;
- cote altimétrique du conditionneur de pression z_c ou position ($z_c - z_N$) du conditionneur — voir Annexe D, Figure D.1 ;
- cote altimétrique de l'essai z_s ou profondeur ($z_N - z_s$) — voir Annexe D, Figure D.1.

6.2 Forage pressiométrique et insertion de la sonde dans le terrain

Le forage dans lequel est introduite la sonde pressiométrique doit être repéré sur un plan de situation et identifié sur un plan coté.

La mise en place de la sonde doit être conforme aux prescriptions données dans l'annexe C tant du point de vue de la technique de forage et du diamètre de l'outil de forage que du délai qui s'écoule entre la réalisation du forage et le début de l'essai.

NOTE Il est à noter que l'influence d'un forage non tubé ou non rebouché peut affecter le terrain, selon sa nature, sur un rayon pouvant atteindre 25 fois le diamètre du forage.

6.3 Réalisation de l'essai d'expansion

6.3.1 Programme de chargement de l'essai pressiométrique

La pression p_r mesurée à l'indicateur de pression est augmentée par paliers de pression suivant un pas de pression Δp constant, voir paragraphe 6.3.3, et dont la valeur est de l'ordre du dixième de la pression limite estimée à partir des données du forage pressiométrique. Chaque pression est maintenue constante dans les cellules de mesure et de garde pendant une durée Δt de 60 s. La durée δt pour appliquer le pas de pression Δp doit être inférieure à 20 s lorsque la longueur de la tubulure ne dépasse pas 50 m. Une fois l'essai terminé (voir paragraphe 6.3.5), le déchargement se fait progressivement sans palier.

Au cours d'un palier, la pression doit rester comprise entre la pression p_r imposée au début du palier et la plus grande des deux pressions suivantes : $\{ (p_r + 25 \text{ kPa}) \text{ et } (p_r + 0,1 \Delta p) \}$.

6.3.2 Pression dans les cellules de garde

Dans une sonde G à cellules emboîtées, la pression du gaz régnant dans les cellules de garde doit être maintenue inférieure à celle de la cellule de mesure avec une différence au moins égale à deux fois la résistance limite propre conventionnelle de la membrane, voir paragraphe B.4.4. Cette pression doit être déterminée avant le début de l'essai, contrôlée à chaque palier et éventuellement réajustée.

Dans une sonde E à cellules juxtaposées, la pression du fluide dans la cellule de mesure et la pression du gaz dans les cellules de garde doivent être sensiblement égales, voir paragraphe B.4.4.

6.3.3 Variation des pas de pression (Δp)

Le pas de pression doit, en règle générale, être constant durant tout l'essai. Toutefois, s'il apparaît, au cours de l'essai que Δp a été surestimé ou sous-estimé, sa valeur peut être ajustée au plus deux fois durant l'essai.

6.3.4 Mesures

À chaque palier de pression, les pressions appliquées (gaz et liquide) et le volume injecté dans la sonde sont mesurés et enregistrés au moins aux temps $t = 1$ s, $t = 15$ s, $t = 30$ s et $t = 60$ s.

L'origine du temps est prise, à chaque palier, au moment où la pression prévue est établie.

En cas de panne de l'enregistreur, la poursuite des essais doit cesser jusqu'à sa remise en état, ou son remplacement.

6.3.5 Fin de l'essai d'expansion

L'essai peut être considéré comme achevé s'il comporte un minimum de huit paliers et si l'une des conditions suivantes est satisfaite :

- la pression p_r de 5 MPa a été atteinte ;
- le volume de liquide injecté dans la cellule centrale est d'au moins 600 cm³ (450 cm³ pour la sonde courte avec sa protection).

NOTE Si, lors d'un palier, le volume injecté dans la cellule de mesure dépasse 700 cm³ (550 cm³ pour la sonde courte avec tube fendu), l'essai peut être arrêté.

En cas d'éclatement de la sonde, l'essai est interrompu.

6.4 Archivage et édition sur site

Lors de chaque essai, que ce soit un essai dans le terrain ou un essai de résistance propre de la sonde ou un essai d'expansion propre de l'appareillage, l'enregistreur archive sur le support d'enregistrement l'ensemble des indicateurs de l'essai, voir paragraphe 6.1, et des mesures effectuées conformément aux prescriptions du paragraphe 6.3.4. ou B.4.2 et B.4.3 selon celles qui s'appliquent.

6.4.1 Archivage sur le support d'enregistrement

Les identificateurs de l'essai et les mesures brutes suivantes doivent être enregistrées :

- a) date, (année, mois, quantième, heure, minute, seconde), pressions (gaz et liquide), volume, au début de chaque essai et de chaque palier de pression ;
- b) pressions (gaz et liquide) et volume du liquide, à $t = 1$ s, $t = 15$ s, $t = 30$ s et $t = 60$ s après le début de chaque palier de pression.

6.4.2 Édition lors de l'essai

Pour tout essai (essai dans le terrain, essai de résistance propre, essai d'expansion propre), les informations minimales suivantes doivent être éditées :

6.4.2.1 Avant le début de l'essai

- a) Identification de l'opérateur ;
- b) essai pressiométrique conforme au présent document : NF P 94-110-1 ;
- c) caractéristiques propres à l'enregistreur :
 - numéro d'immatriculation du CPV (et éventuellement le numéro d'immatriculation de l'enregistreur lorsque le CPV et l'enregistreur sont dissociés) ;
 - numéro du support d'enregistrement ;

d) restitution des informations introduites pour identifier l'essai :

- numéro de dossier ;
- numéro de sondage ;
- dates (année, mois, quantième, heure, minute) du début de l'essai de résistance propre de la sonde pressiométrique et de l'essai d'expansion propre de l'appareillage (B.4.2 et B.4.3) ;
- type de forage pressiométrique ;
- type de sonde pressiométrique ;
- cote altimétrique du conditionneur de pression z_c ou position ($z_c - z_N$) du conditionneur. Voir annexe D, Figure D.1 ;
- cote altimétrique de l'essai z_s ou profondeur ($z_N - z_s$) — Voir annexe D, Figure D.1.

6.4.2.2 *Au début de l'essai*

— Date (année, mois, quantième, heure, minute) du début d'essai.

6.4.2.3 *À la fin de chaque palier*

- Le numéro du palier ;
- une mesure de pression du liquide dans l'intervalle compris entre le début du palier et 15 s après le début du palier avec trois chiffres significatifs au moins ;
- les volumes injectés à 30 s et 60 s après le début du palier arrondis au centimètre cube ;
- la différence entre les deux volumes injectés à 30 s et à 60 s après le début du palier : $\Delta V^{60/30}$;
- la différence entre les volumes à 60 s entre les deux paliers consécutifs $\Delta V^{60/60}$.

6.4.2.4 *À la fin de l'essai*

- Date (année, mois, quantième, heure, minute) de la fin de l'essai ;
- courbe pressiométrique brute tracée à partir des mesures de pression p_r et de volume V_r à 60 s ;
- authentification, (nom et signature) par l'opérateur du document édité.

6.5 **Espacement des essais et profondeur minimale de la sonde dans le terrain.**

Dans un même forage, la distance minimale entre deux essais consécutifs ne doit pas être inférieure à 0,75 m.

NOTE La distance usuelle entre le milieu des emplacements de deux cellules de mesure est de 1 m.

En règle générale, la profondeur minimale d'un essai dans un forage pressiométrique est de 0,75 m. Elle peut être ramenée à 0,5 m lorsque le forage pressiométrique est lui-même réalisé au fond d'un forage d'un diamètre inférieur ou égal à 0,6 m.

6.6 **Incertitudes des mesures**

a) Incertitude sur la position de la sonde pressiométrique.

L'incertitude sur la distance entre le milieu de la cellule de mesure et le sommet du forage pressiométrique ne doit pas excéder la plus grande des deux valeurs : 0,1 m et 1/100 de la longueur des tiges de manœuvre.

NOTE En site aquatique, la profondeur de l'essai est repérée, en général, par rapport au sommet du tubage utilisé pour réaliser le forage pressiométrique. Dans ce cas, la cote altimétrique du sommet du tubage doit être déterminée.

- b) incertitude sur le volume du liquide introduit dans la cellule centrale : inférieure ou égale à 1 cm³ ;
- c) incertitude sur les pressions : inférieure ou égale à 15 kPa ;
- d) incertitude sur la durée : inférieure ou égale à 0,5 s.

7 Expression des résultats

Les paramètres pressiométriques sont déterminés à partir des informations contenues sur le support d'enregistrement en procédant comme indiqué dans l'annexe D.

- Calculer les valeurs corrigées de pression et de volume et tracer la courbe pressiométrique correspondante (voir paragraphe D.1) ;
- calculer le module pressiométrique Ménard E_M (voir paragraphe D.2.) ;
- déterminer la pression limite pressiométrique p_l (voir paragraphe D.3) et la pression de fluage pressiométrique p_f (voir paragraphe D.4).

8 Procès-verbal d'essai pressiométrique Ménard

Le procès-verbal comprend pour chaque essai pressiométrique :

- a) une copie du document authentique édité lors de l'essai (voir paragraphe 6.4.2) ;
- b) la feuille d'essai établie après traitement des mesures récapitulant les données et présentant la courbe pressiométrique correspondante.

Ce procès-verbal de l'essai pressiométrique doit comporter les indications minimales suivantes (voir Figure 6) :

- a) la référence au présent document NF P 94-110-1 ;
- b) le numéro d'identification du sondage dans lequel a été réalisé l'essai pressiométrique ;
- c) la cote altimétrique de l'essai par rapport au sommet du forage pressiométrique ou du tubage en site aquatique ;
- d) le procédé utilisé pour les différentes phases de forage et l'outil employé ;
- e) la référence du contrôleur pression-volume (type, fabricant, numéro de série) et de l'enregistreur si celui-ci n'est pas solidarisé au CPV ;
- f) la date (année, mois, quantième, heure, minute) du début de l'essai ;
- g) le tableau des lectures effectuées (paliers de pression et volume du liquide aux temps $t = 1$ s, $t = 15$ s, $t = 30$ s et $t = 60$ s au cours d'un même palier) ;
- h) le type de sonde pressiométrique (E ou G) et ses caractéristiques (tube fendu, sonde courte, sonde longue, V_s) et de l'appareillage (a) ainsi que les mesures de l'essai de résistance propre de la sonde ;
- i) les incidents éventuels en cours d'essai (éclatement de la sonde pressiométrique, par exemple) ;
- j) les profondeurs des passes de forage pressiométrique ;
- k) les cotes altimétriques du sommet du forage z_N et du niveau de prise de pression z_c ;
- l) la cote altimétrique du liquide dans le trou de forage et le niveau de la nappe s'il est connu (z_w) ;
- m) le nom de l'organisme qui a réalisé le sondage pressiométrique ;
- n) les courbes pressiométriques brute et corrigée.

Unités	Cote : en m Temps : en s Volume : en cm ³ Pression : en MPa	PROCES VERBAL - ESSAI PRESSIOMETRIQUE MENARD Effectué conformément à la norme NF P 94-110-1																	
Lieu : Chantier :					N° dossier:			Sondage n° :											
Matériel de forage :					Outil :					Forage fait avant l'essai de m à m									
Date d'essai Heure : Min :		CPV N°		Sonde à cellules		<input type="checkbox"/> juxtaposées <input type="checkbox"/> emboîtées		<input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> G		Cote altimétrique du conditionneur de pression z _C =		Cote altimétrique de l'essai z _S =							
		Enregistreur n°		Tube fendu Avec sonde		<input type="checkbox"/> courte <input type="checkbox"/> longue		niveau d'eau z _W =											
Expansion propre de l'appareillage		a = cm ³ /MPa		Résistance propre de la sonde		p _r		V ₆₀				membrane p _m							
		d _r = cm																	
		l _s = cm																	
		V _s =																	
Pression gaz = pression liquide <input type="checkbox"/> + p _g = p _r <input type="checkbox"/> -																			
				N° palier		p _r		V _r 15 30 60		ΔV 60/30 60/60		N° palier		p _r		V _r 15 30 60		ΔV 60/30 60/60	
N° palier		p _r		V _r 15 30 60		ΔV 60/30 60/60		5				10							
0								6				11							
1								7				12							
2								8				13							
3								9				14							
4																			

Volume

700
600
500
400
300
200
100
0

0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 Pression

0 0,4 0,8 1,2 1,6 2,0 2,4 2,8 3,2 3,6 4,0 4,4 4,8 5,2 5,6 6,0 MPa

Z

Z_C

Z_N

Z_W

Z_S

Organisme :	Adresse : TEL.	Nom de l'approbateur : Signature :
-------------	-------------------	---------------------------------------

Figure 6 — Procès-verbal d'essai pressiométrique Ménard — Exemple

9 Procès-verbal de sondage pressiométrique

Le procès verbal doit comporter les informations minimales suivantes (voir Figure 7) :

- a) la référence au présent document NF P 94-110-1 ;
- b) le plan d'implantation et éventuellement les coordonnées planimétriques du sondage ;
- c) la cote altimétrique du terrain au droit du forage pressiométrique par rapport à un système de référence précisé ;
- d) la cote altimétrique de l'eau dans le trou de forage en fin de sondage ou de chantier et le niveau de la nappe, s'il est connu ;
- e) le procédé utilisé pour le forage pressiométrique, avec les notations du tableau C.1, la date des différentes passes de forage ;
- f) l'inclinaison du forage pressiométrique et son orientation ;
- g) les informations recueillies, sur les terrains traversés au cours du forage pressiométrique ;
- h) une représentation graphique des caractéristiques pressiométriques, en fonction de la profondeur, accompagnée de l'échelle des profondeurs et des valeurs numériques suivantes :
 - 1) module pressiométrique Ménard E_M ;
 - 2) pression limite pressiométrique p_l ;
 - 3) pression de fluage pressiométrique p_f ;
 - 4) où les pressions et les modules pressiométriques sont exprimés avec deux chiffres significatifs au moins. Pour un même site, il convient d'adopter pour l'ensemble des sondages réalisés une convention unique d'échelle ;
- i) les observations liées à la réalisation des essais ainsi que les incidents et les détails opératoires non prévus dans le présent document et susceptibles d'avoir une influence sur les résultats.

Le procès-verbal doit être accompagné :

- des procès-verbaux des essais pressiométriques (voir article 8) ;
- des fichiers informatiques dupliquant toutes les informations qui ont été archivées sur le support d'enregistrement (voir paragraphe 6.4.1) accompagné de la structure d'archivage.

NOTE Ce procès-verbal de sondage pressiométrique est un des éléments du rapport factuel conforme à la norme NF P 94-500.

Sondage pressiométrique Ménard Effectué conformément à la norme NF P 94-110-1						Date	Dossier n°										
						Orientation du forage	Nord ⊕					Sondage					
Lieu		Inclinaison/Verticale				Plan d'implantation											
Cote ZN	Prof m/T.N	Coupe schématique du terrain	Eau	Matériels utilisés et dates	Paramètres de forage	Pression limite p_l Pression de fluage p_f (MPa)					Module pressiométrique E_M (MPa)						
	①					0	1	2	3	4	5	0	10	20	30	40	50
	①																
	②																
	③																
	④																
	⑤																
	⑥																
	⑦																
	⑧																
	⑨																
	⑩																
Observations					Organisme	Nom Signature											

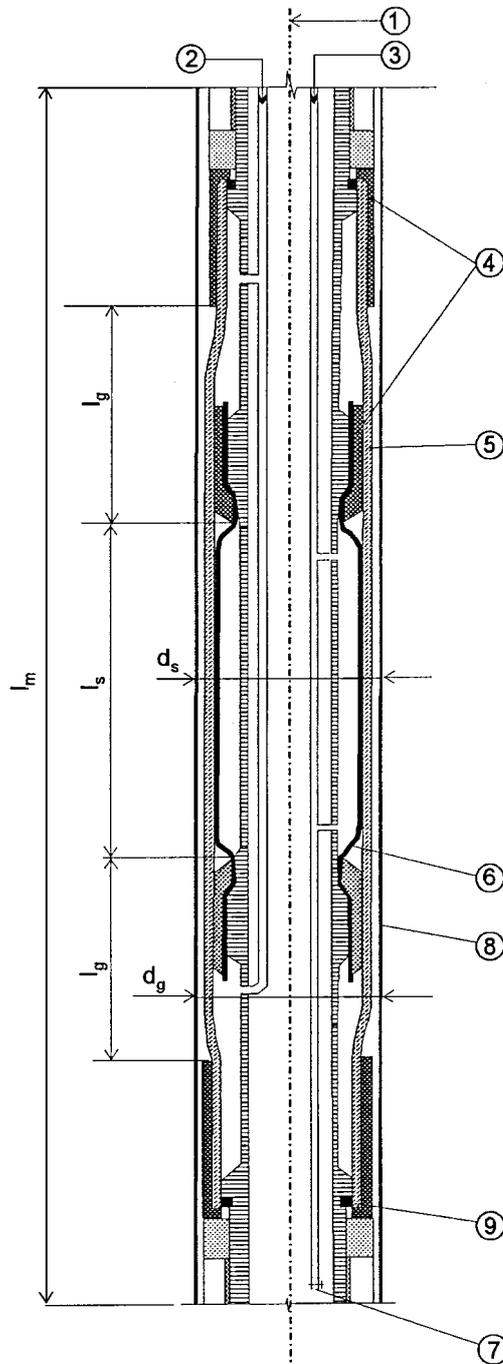
Figure 7 — Procès-verbal d'un sondage pressiométrique — Exemple

Annexe A

(normative)

Caractéristiques géométriques des sondes pressiométriques**Tableau A.1 — Caractéristiques géométriques des sondes pressiométriques**

				Référence	Unité	Valeur	Tolérance
Sonde à gaine souple	Cellule centrale	Longueur		l_s	mm	210	+ 5 0
		Diamètre extérieur		d_s	mm	58	± 2
	Cellules de garde	Longueur		l_g	mm	120	+ 15 - 15
		Diamètre extérieur		d_g	mm	58	± 2
Sonde avec tube fendu	« Courte »	Cellule centrale	Longueur	l_{sc}	mm	210	+ 2 0
		Cellules de garde	Longueur	l_{gc}	mm	200	± 5
	« Longue »	Cellule centrale	Longueur	l_{sl}	mm	370	+ 5 - 5
		Cellules de garde	Longueur	l_{gl}	mm	110	± 5
	Tube fendu	Diamètre extérieur		d_{sf}	mm	59	± 5
		Longueur des fentes		l_m	mm	≥ 800	



Légende

- 1 Axe de la sonde
- 2 Tube d'injection du gaz
- 3 Tube d'injection du liquide
- 4 Bagues de serrage
- 5 Gaine
- 6 Membrane
- 7 Robinet de purge
- 8 Tube fendu
- 9 Joint d'étanchéité

Figure A.1 — Constituants de la sonde pressiométrique
(cas de la sonde à cellules emboîtées G — protégée par un tube fendu)

Annexe B

(normative)

Vérifications

B.1 Suivi des appareils de mesure

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

Les manomètres et capteurs de pression doivent avoir été raccordés à un étalon depuis moins de six mois.

Les procès-verbaux de ces contrôles sont archivés conformément aux règles en vigueur dans l'organisme qui réalise les essais.

B.2 Résistance propre des membranes

Chaque type de membrane équipant la cellule centrale de mesure est caractérisé par une résistance propre limite conventionnelle p_m déterminée à partir d'un essai d'expansion.

Pour la sonde G à cellules emboîtées, la valeur de la résistance propre de la membrane de la cellule centrale doit être connue avant l'essai afin de déterminer la différence de pression à exercer entre la cellule de mesure et les cellules de garde. La résistance propre des membranes de chaque lot homogène est déterminée selon le processus opératoire décrit dans les paragraphes B.2.1 et B.2.2.

B.2.1 Préparation de la sonde pressiométrique

La sonde étant revêtue uniquement de la membrane de la cellule centrale et placée verticalement, il est procédé à une purge des gaz contenus dans la cellule de mesure et dans le circuit d'injection du liquide dont la longueur du tube flexible est inférieure à 2 m. Puis la membrane est prédilatée trois fois au moins en y injectant un volume de liquide de 700 cm³ (550 cm³ pour une sonde courte utilisée avec un tube fendu).

Le contrôleur de pression-volume doit, pour cette opération, être équipé d'un dispositif de mesurage de la pression dont l'incertitude sur la valeur mesurée est inférieure ou égale à 10 kPa.

Le dispositif de mesure du volume injecté est mis à zéro en faisant correspondre le milieu de la cellule de mesure avec le niveau de la prise de pression (conditionneur).

B.2.2 Résistance propre de la membrane

La membrane est mise en pression par pas de pression Δp de 10 kPa. Chaque pression est maintenue pendant une durée de 60 s. Le volume du liquide V_{60} injecté en fin de palier est mesuré afin de tracer la courbe :

$$V_{60} = f(p)$$

La résistance limite conventionnelle propre de la membrane p_m est la pression qui correspond à un volume de liquide injecté égal à 700 cm³ (550 cm³ pour la sonde courte utilisée avec le tube fendu).

NOTE Lorsque la sonde pressiométrique est constituée de cellules juxtaposées, la connaissance de la résistance propre de la membrane de la cellule centrale n'est nécessaire (voir paragraphe B.4.3) que si la sonde ne possède pas de gaine.

B.3 Contrôle sur site du bon fonctionnement du matériel de mesure

Outre l'autocontrôle permanent réalisé par l'opérateur sur le chantier, le bon fonctionnement du CPV doit être vérifié, selon une procédure écrite une fois par mois au moins, par exemple en comparant entre elles les valeurs des indicateurs de pression et celles des indicateurs de volume.

L'appareil doit être réparé ou révisé si l'écart est supérieur :

- a) pour les pressions, à la plus grande des deux valeurs :
 - 5 % de la moyenne des valeurs mesurées ;
 - 1 % de la valeur maximale du domaine de mesure ;
- b) pour les volumes à : 3 cm³.

B.4 Estimation des corrections de mesure

La gaine, la membrane et le tube fendu éventuel, sont choisis en fonction des caractéristiques mécaniques présumées du terrain dans lequel sera dilatée la sonde, et doivent respecter les critères du tableau C.3.

Il faut effectuer les contrôles et mesures décrits au paragraphe B.4.2 :

- à chaque modification de configuration de la sonde pressiométrique ;
- à chaque fois qu'intervient un changement de tubulure entre le contrôleur pression-volume et la sonde ;
- au moins une fois par semaine.

Cette série de mesures n'est entreprise que lorsque la sonde a été préparée, c'est-à-dire lorsqu'elle a été équipée de la longueur convenable de tubulure et qu'il a été procédé à la purge des gaz contenus dans la cellule de mesure et dans le circuit d'injection du liquide.

Les opérations à effectuer pour estimer les corrections de mesure sont les suivantes :

B.4.1 Prédilatation de la sonde et réglage du zéro du volumètre

Toute sonde avant sa première utilisation doit être dilatée trois fois au moins à l'air libre en y injectant 700 cm³ de liquide (550 cm³ pour la sonde courte équipée du tube fendu).

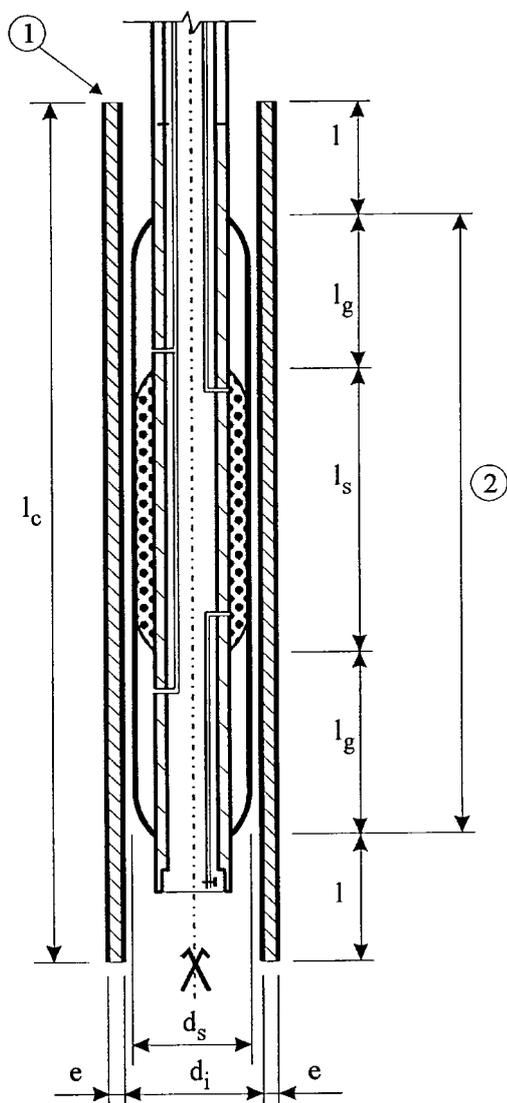
Le dispositif de mesure du volume injecté est mis à zéro en rajoutant ou en enlevant la quantité de liquide nécessaire tout en faisant correspondre le milieu de la cellule de mesure avec le niveau de la prise de pression (conditionneur).

B.4.2 Essai d'expansion propre de l'appareillage

La sonde, y compris le tube fendu éventuel, est introduite dans le tube destiné à l'essai d'expansion propre de l'appareillage, voir paragraphe 5.5.4 et figure B.1. Elle est mise en pression par pas, Δp , de 100 kPa jusqu'à obtenir le contact avec le tube, puis par paliers de 250 kPa pour les sondes dont l'habillage ne permet pas de dépasser 2,5 MPa et par paliers de 500 kPa pour les sondes pouvant atteindre au moins 5 MPa. Chaque pression, après sa mise en contact de la sonde pressiométrique avec le tube, doit être atteinte en moins de 20 s et maintenue pendant 60 s.

La pression dans les cellules de garde doit être conforme au paragraphe B.4.3.

Le volume injecté à la fin de chaque palier est mesuré afin de tracer la courbe $V_r = f(p_r)$.

**Légende**

- 1 Tube
- 2 Sonde pressiométrique

Figure B.1 — Tube pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage

Détermination du volume V_s de la cellule centrale de la sonde

Par convention, le volume initial de la cellule centrale de mesure de la sonde est calculé par exploitation de la courbe d'expansion de la Figure B.2.

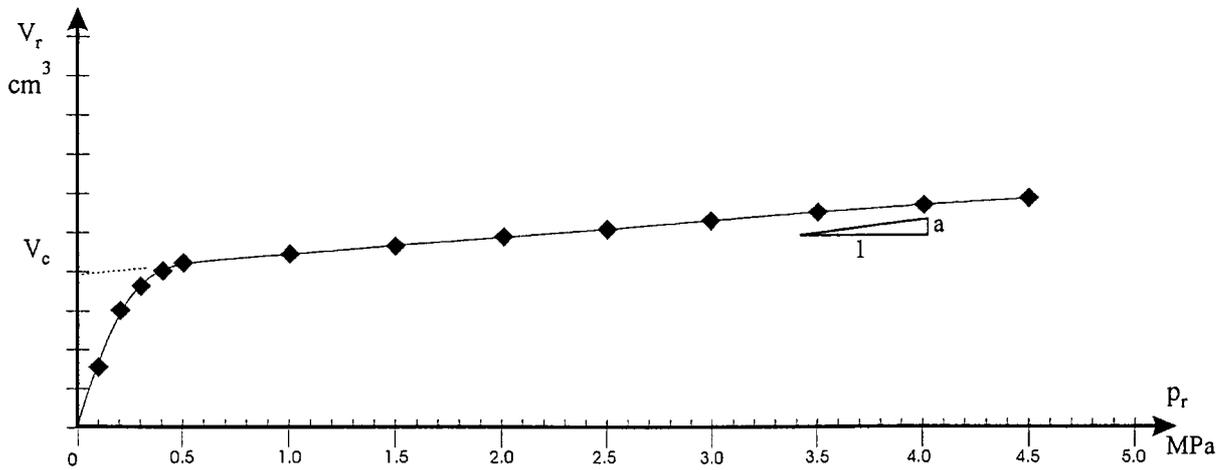
$$V_s = 0,25 \pi l_s d_i^2 - V_c$$

où :

V_c est l'ordonnée à l'origine de la droite ajustée sur les points représentatifs de l'essai au-delà du contact entre la sonde et le tube;

l_s est la longueur de cellule centrale mesurée une fois fixée la membrane sur l'âme métallique de la sonde, voir figure A.1 et tableau A.1, Dans le cas où la sonde comporte un tube fendu, la valeur l_s doit être conforme aux valeurs notées l_{sc} si la sonde est «courte» ou l_{sl} si la sonde est «longue».

d_i est la mesure du diamètre intérieur du tube utilisé pour l'essai d'expansion propre de l'appareillage. Elle doit être indiquée sur la feuille d'essai (Figure 6).



Légende

V_r Volume de liquide injecté en fin de palier.

p_r pression dans la cellule de mesure.

Figure B.2 — Essai d'expansion propre de l'appareillage — Exemple

Calcul du coefficient de compressibilité de l'appareillage

Le coefficient de compressibilité (a) a pour valeur la pente de la droite ajustée sur la partie linéaire de la courbe d'expansion (voir Figure B.2) : $V_r = f(p_r)$

$$a = \Delta V / \Delta p$$

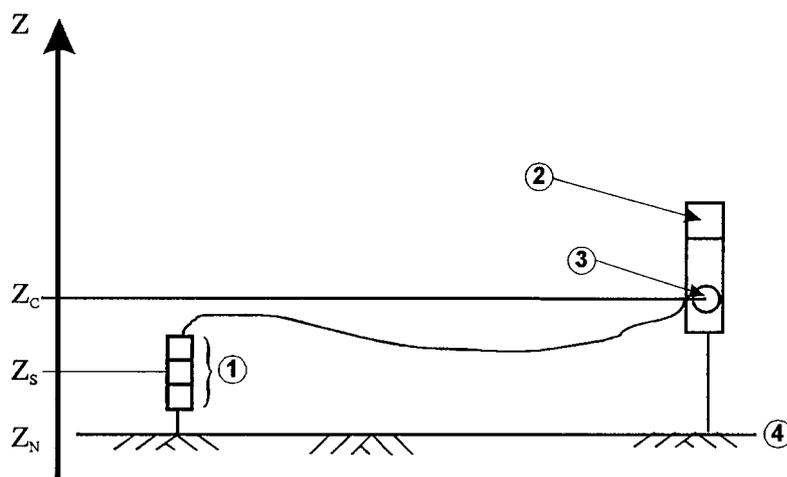
Il doit avoir une valeur inférieure à $6 \text{ cm}^3/\text{MPa}$ avec un appareillage équipé de 50 m de tubes.

NOTE Une valeur supérieure peut indiquer une mauvaise purge, une fuite ou une anomalie et doit conduire à une vérification de l'ensemble CPV, tubes flexibles et sonde.

B.4.3 Essai de résistance propre de la sonde pressiométrique

La sonde est placée à proximité du conditionneur de pression, voir Figure B.3, à l'air libre. Il est procédé à un essai d'expansion, dans les mêmes conditions que celles de l'essai dans le terrain. La sonde est dilatée par pas de pression Δp d'amplitude d'environ le cinquième de la résistance propre limite conventionnelle p_{el} de la sonde, maintenus 60 s et jusqu'à ce qu'ait été injecté un volume de liquide au moins égal à 700 cm^3 (550 cm^3 pour la sonde courte équipée d'un tube fendu).

La courbe pression-volume, $V_{60} = f(p_e)$, est tracée après avoir effectué les corrections comme indiqué à l'annexe D. L'ensemble de ces valeurs constitue la résistance propre de la sonde pressiométrique.



Légende

- 1 Sonde pressiométrique
- 2 Indicateur de pression
- 3 Conditionneur de pression
- 4 Terrain naturel
- Z Cote altimétrique

Figure B.3 — Repérage de la sonde et du conditionneur de pression lors de l'essai de résistance propre de la sonde pressiométrique

La résistance propre limite conventionnelle de la sonde p_{el} est la pression correspondant à un volume de liquide injecté de 700 cm^3 (550 cm^3 pour la sonde courte placée dans un tube fendu).

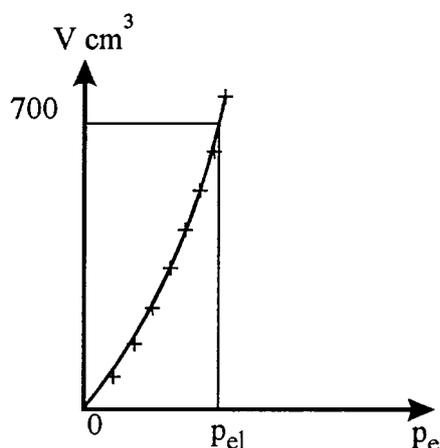


Figure B.4 — Courbe de résistance propre d'une sonde pressiométrique — Exemple

B.4.4 Détermination de la pression du gaz dans les cellules de garde à chaque essai

La pression du gaz dans les cellules de garde ne doit pas être supérieure à la pression transmise par la membrane de la cellule centrale. Cette pression doit être déterminée avant chaque essai. Sa valeur est ajustée, si besoin est, au cours de l'essai.

Lorsqu'une pression p_r est imposée par le CPV au liquide de la cellule de mesure, la pression du gaz p_g doit être adaptée selon les règles suivantes, voir figure B.5 avec sa légende.

a) Cas de la sonde type E à cellules juxtaposées.

La pression p_k dans la cellule de mesure doit être égale à la pression p_s dans la cellule centrale $p_s = p_k$.

b) Cas de la sonde type G à cellules emboîtées

La pression du gaz p_k dans les cellules de garde ne doit pas être supérieure à la pression transmise par la membrane de la cellule centrale tout en entraînant une déformation sensiblement cylindrique de la gaine de la sonde pressiométrique.

$$p_s - 3p_m \leq p_k \leq p_s - 2p_m$$

$$\text{soit } p_r + (p_h - 3p_m) \leq p_k \leq p_r + (p_h - 2p_m)$$

$$\text{et } p_k = 0 \text{ tant que } p_r + (p_h - 2p_m) \leq 0$$

p_s est la pression du liquide dans la cellule centrale de la sonde ;

$$p_s = p_r + p_h$$

p_m est la résistance propre de la membrane de la cellule centrale ;

p_k est la pression du gaz dans les cellules de garde qui tient compte de la masse volumique du gaz liée à sa compressibilité.

$$p_k = p_g \left[1 + \lambda_g (z_{cg} - z_s) \right]$$

p_r est la valeur de la pression délivrée par le capteur (conditionneur) de mesure de la pression du liquide injecté dans la cellule centrale de la sonde pressiométrique. La cote altimétrique du capteur est z_c ;

p_h est la pression générée par la dénivellée entre le capteur mesurant la pression du liquide injecté dans le tube relié à la cellule centrale de la sonde pressiométrique et cette cellule : $p_h = \gamma_l (z_c - z_s)$ voir paragraphe D.1.1.

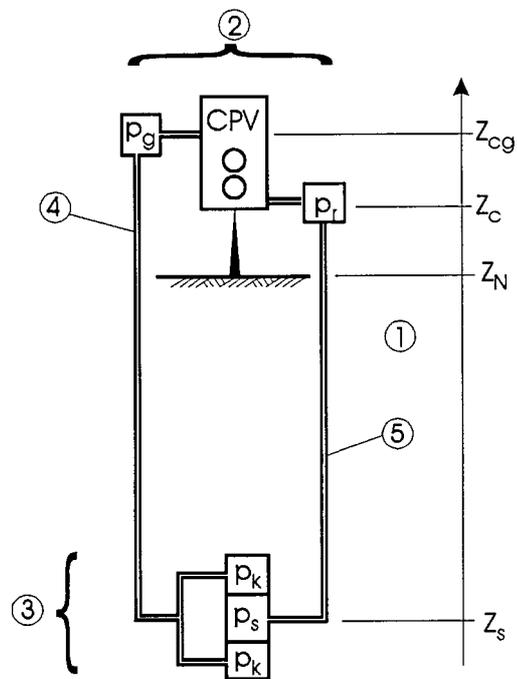
NOTE $p_h = 0$ lorsque le capteur de pression est incorporé à la sonde pressiométrique.

p_g est la valeur de la pression délivrée par le capteur (conditionneur) de mesure de la pression du gaz envoyé dans les cellules de garde de la sonde pressiométrique. La cote altimétrique du capteur est z_{cg} et celle de la sonde z_s .

En l'absence de données sur le gaz, adopter la valeur conventionnelle $\lambda_g = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot m^{-1}$, peut être adoptée.

NOTE En pratique, la correction provenant de la compressibilité du gaz peut être négligée lorsque la dénivellée

$(z_{cg} - z_s)$ est inférieure à 30 m et les pressions inférieures à 5 MPa. Dans ce cas, on admet que : $p_k = p_g$.



Légende

- 1 Terrain
- 2 CPV
- 3 Sonde pressiométrique
- 4 Tube contenant du gaz
- 5 Tube contenant du liquide

Figure B.5 — Notations des pressions et des cotes altimétriques lors d'un essai pressiométrique

Annexe C

(normative)

Introduction de la sonde pressiométrique dans le terrain

L'obtention de caractéristiques pressiométriques correctes implique que la sonde pressiométrique soit mise en place dans le terrain en respectant un certain nombre de règles données ci-après.

C.1 Méthodes de réalisation des forages pressiométriques

Les méthodes de forage et leur adaptation au terrain sont récapitulées dans le tableau C.1.

NOTE 1 Le tube fendu TF EM est une technique qui consiste à battre un tubage terminé par un tube fendu prolongé par un carottier et à désagréger simultanément le matériau pénétrant dans le carottier, soit au moyen d'un jet ascendant d'eau sous pression, soit par désagrégation au moyen d'un outil entraîné en rotation et remontée des copeaux par circulation inverse. Une fois remontées les tiges intérieures, la sonde pressiométrique est positionnée dans le tube fendu qui joue son rôle habituel pendant l'essai.

NOTE 2 L'utilisation de la tarière à main est en général limitée à des profondeurs de 3 à 4 m car au-delà le procédé manque d'efficacité (remontée très fréquente de la cuillère, ce qui perturbe les parois du forage).

NOTE 3 L'utilisation de la tarière à main avec injection est à utiliser dans les argiles de pression limite inférieure à 0,5 MPa, à condition :

- que le diamètre de l'outil (outil qui doit être bien affûté) soit légèrement supérieur à celui de la sonde et inférieur à 1,15 fois son diamètre ;
- que l'outil de forage ne refoule pas le terrain dans les sols mous.

C.2 Introduction de la sonde pressiométrique par refoulement du terrain

Si le maintien de la stabilité des parois s'avère impossible, la sonde peut être foncée directement dans le terrain ou battue à l'abri du tube fendu.

Tableau C.1 — Méthodes de réalisation des forages pressiométriques

Nature des terrains	Forage préalable									Refolement
	Rotation *					Battage et autres				
	TAM	TIN	THC	O DG IN	CAR	ROTOP	CAR BAT	CAR VBF	TF EM	TF BAT/VBF
Vase et argiles molles	—	R °	—	O °	—	—	O CPMF	—	—	—
Argiles moyennement compactes	R	R °	R	R °	—	O °	—	—	O	—
Argiles compactes, marnes raides			R	R °	R °	O °	—	—	—	—
Limons :										
— au-dessus de la nappe	R	O °	R	O °	—	O °	O	O	O	—
— sous la nappe	—	R °	—	O °	O °	O °	—	—	O ▲	—
Sables lâches :										
— au-dessus de la nappe	R	R °	O	O °	—	O °	—	—	O	—
— sous la nappe	—	R °	—	O °	—	O °	—	—	—	O
Sables moyennement compacts et compacts	R	R °	R	R °	—	R °	O	O	O ▲	O +
Sols grossiers : graviers, galets argiles à silex, etc.			O	O °		R °	O	O	O	O +
Roches altérées Roches tendres			R	R	O	R °	O	O		O +

Légende :

R : Recommandé

O : Toléré

— : Non toléré

■ : Inadapté

* Vitesse de rotation < 60 tr/min, et diamètre de l'outil inférieur ou égal 1,15 d_s.+ Éventuellement, forage préalable en petit diamètre (d_t < d_s).

° Injection avec boue (pression < 500 kPa ; débit < 15 l/min).

Dans le cas où le forage est fait par rotation, la pression (en tête du train de tiges) transmise sur l'outil doit être inférieure à 200 kPa.

▲ Avec dispositions particulières (par exemple imposer un gradient vertical descendant, réaliser les essais en descendant, prolonger le tube fendu par un tube de garde).

TAM Tarière à main (cuillère)

TIN Tarière avec injection de boue de forage

THC Tarière hélicoïdale continue à sec

O DG Outil désagrégateur

CAR Carottier

ROTOP Rotopercussion

IN Avec injection de boue

BAT Battage

CPMF Carottier à parois minces foncé

TF Tube fendu

TF EM Tube fendu avec enlèvement simultané des matériaux

VBF Vibrofonçage

C.3 Longueur maximale de la passe de forage fait avant introduction de la sonde pressiométrique

Les longueurs maximales de forage pressiométrique à réaliser avant l'introduction de la sonde dépendent des propriétés des terrains, de l'existence d'une nappe et de la présence ou non d'un tubage. La longueur maximale de forage fait à l'avance doit respecter les règles regroupées dans le tableau C.2.

Tableau C.2 — Longueur maximale d'une passe de forage avant essais

Nature des terrains	Longueur maximale de forage fait avant l'essai (m)
Vase et argiles molles	1** +
Argiles moyennement compactes	3 +
Argiles compactes, marnes raides	5
Limons :	
— au-dessus de la nappe	5
— sous la nappe	3 +
Sables lâches :	
— au-dessus de la nappe	3
— sous la nappe	1** +
Sables moyennement compacts et compacts	5
Sols grossiers : graviers, galets, argiles à silex, etc	5
Roches altérées, Roches tendres	5
** Ou intervalle entre deux essais consécutifs.	
+ Un tubage est recommandé au-delà de 10 m de profondeur.	

C.4 Choix de la sonde pressiométrique

L'essai pressiométrique est généralement réalisé au moyen d'une sonde type G à cellules emboîtées.

La résistance limite propre de la sonde pressiométrique, y compris le tube fendu éventuel, doit être la plus faible possible par rapport à la pression limite pressiométrique du terrain.

Le choix de la sonde et de son habillage est guidé par le respect des conditions suivantes :

$$p_{el} = p_l / 4 + 25 \text{ kPa} \text{ pour } p_l \leq 900 \text{ kPa}$$

$$p_{el} = \text{valeur inf} \left\{ p_l / 18 + 200 \text{ kPa}; 350 \text{ kPa} \right\} \text{ pour } p_l \geq 900 \text{ kPa}$$

$$\text{et } p_m \leq 75 \text{ kPa}$$

Dans les terrains dont la pression limite est inférieure à 400 kPa, une sonde type E à cellules juxtaposées est susceptible de fournir des résultats présentant une incertitude plus faible.

NOTE En cas d'éclatement répété d'une sonde à gaine souple descendue dans un forage pressiométrique, l'essai peut être réalisé en utilisant un tube fendu, à condition que la résistance limite propre soit telle que :

$$p_{el} \leq 0,5 \text{ MPa} \text{ et } p_l \geq 2,5 \text{ MPa}$$

C.5 Délai d'exécution des essais

La réalisation des essais pressiométriques doit suivre immédiatement celle de la passe du forage et doit toujours avoir lieu dans le même poste de travail.

Lorsque la sonde pressiométrique est foncée directement dans le terrain à l'abri d'un tube fendu, les essais peuvent être effectués en remontant le train de tubes si le diamètre extérieur des tubes est le même que celui du tube fendu et qu'aucune ovalisation manifeste de la cavité ne s'est produite pendant le fonçage.

Annexe D
(normative)

Détermination des caractéristiques pressiométriques

D.1 Détermination de la courbe pressiométrique corrigée

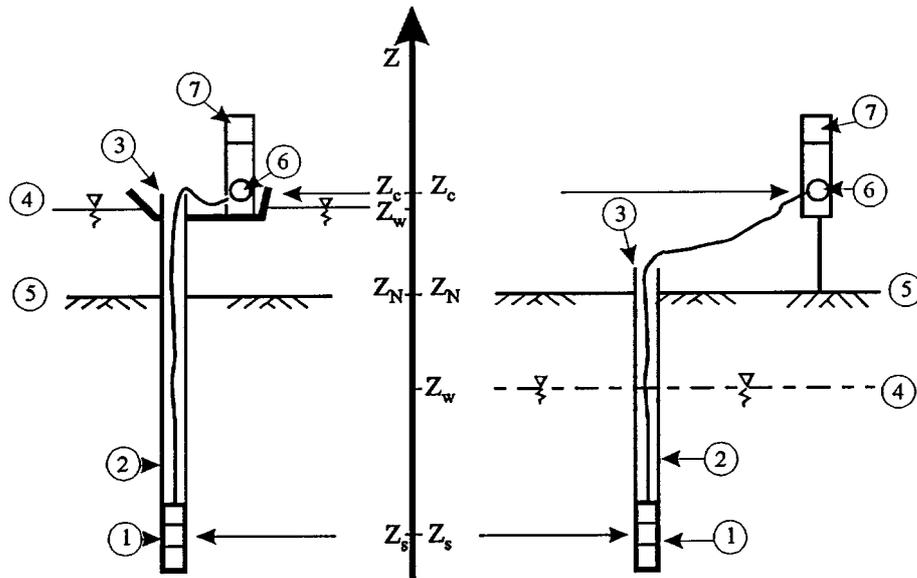
Les valeurs des pressions et des volumes relevés au cours de l'essai doivent être corrigées afin de tenir compte de :

- la pression due à la charge hydraulique p_h ;
- la résistance propre de la sonde p_e ;
- l'expansion propre de l'appareillage sous l'effet des augmentations de pression (dilatations des tubes et du système de mesure, etc).

D.1.1 Correction due à la charge hydraulique (p_h)

Lors d'un essai à une cote altimétrique z_s donnée, la pression au niveau de la cellule centrale de mesure est la valeur de la pression indiquée par le conditionneur de pression augmentée de la pression hydrostatique p_h existant entre le niveau de la prise de pression (conditionneur) et le milieu de la sonde pressiométrique (voir Figure D.1) :

$$p_h = \gamma_i (z_c - z_s)$$



Légende

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1 Sonde pressiométrique | 5 Terrain naturel |
| 2 Forage pressiométrique | 6 Conditionneur de pression |
| 3 Tubage | 7 Indicateur de pression |
| 4 Niveau piézométrique | Z Cote altimétrique |

a) Site aquatique

b) Site terrestre

Figure D.1 — Repérage de la sonde et du conditionneur de pression lors d'un essai

D.1.2 Correction due à la résistance propre de la sonde pressiométrique

Cette correction de pression prend en compte la résistance propre de la sonde pressiométrique p_e (voir paragraphe B.4.3 et Figure B.4).

Elle dépend de l'ensemble membrane-gaine, éventuellement de la présence du tube fendu, et du volume injecté.

$$p(\text{corrigée}) = p_r(V_r) - p_e(V_r)$$

D.1.3 Correction due à l'expansion propre de l'appareillage

Pour une pression p_r lue, il faut procéder à une correction de la valeur du volume V_r lue, afin d'éliminer les dilata-tions additionnelles de la sonde, de la tubulure et du système de mesure.

$$V = V_r(p_r) - a \cdot p_r$$

Le coefficient a est déterminé dans le paragraphe B.4.2.

D.1.4 Courbe pressiométrique corrigée

Les valeurs corrigées de volume et de pression (mesurée à chaque palier au bout de 60 s) sont déterminées par les relations :

$$p = p_r + p_h - p_e$$

$$V = V_r - ap_r$$

Les volumes sont exprimés en centimètres cubes et les pressions en mégapascals.

Les points de coordonnées (p, V) sont représentés sur un graphique avec en abscisses les pressions et en ordon-nées les volumes.

Si le dernier palier a dû être interrompu après la lecture à 15 s, la valeur du volume à 60 s de ce palier peut être extrapolée au delà de la lecture à 15 s par exploitation de la tendance au fluage lors des paliers précédents.

D.2 Détermination du module pressiométrique Ménard

D.2.1 Plage de calcul du module pressiométrique

La courbe pressiométrique corrigée est constituée d'une succession de segments de pente m_i (voir Figure 4) :

où :

$$m_i = \frac{(V_i - V_{i-1})}{(p_i - p_{i-1})}$$

avec :

p_i, V_i les coordonnées de l'extrémité du segment i . ($i \geq 1$).

On désigne par m_E la valeur m_i strictement positive, la plus faible. Les coordonnées de l'origine de ce segment sont notées (p_E, V_E) et celles de son extrémité (p'_E, V'_E) .

Par définition, la plage sur laquelle est déterminé le module pressiométrique est constituée de l'ensemble des segments consécutifs qui ont une pente inférieure ou égale à β fois la pente m_E la plus faible non nulle. Elle a pour origine, l'origine du premier segment, et pour extrémité, la fin du dernier segment. La valeur conventionnelle de β est :

$$\beta = 1 + \frac{1}{100} \cdot \frac{p'_E + p_E}{p'_E - p_E} + \frac{6}{V'_E - V_E}$$

où les volumes sont exprimés en centimètres cubes.

Par convention, les coordonnées de l'origine de la plage du module pressiométrique sont notées (p_1, V_1) et celles de son extrémité (p_2, V_2) .

D.2.2 Module pressiométrique Ménard (E_M)

Par définition, le module pressiométrique est calculé à partir de la formule :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[V_s + \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \right] \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$

où :

ν est le coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33.

Le module E_M s'exprime en mégapascals.

D.3 Pression limite pressiométrique (p_l)

Par convention, la pression limite, exprimée en mégapascals, est la pression corrigée qui correspond à un volume de liquide injecté tel que :

$$V_l = V_s + 2 V_1$$

D.3.1 Détermination directe

Lorsque le volume injecté au cours de l'essai est tel que le volume de la cavité a dépassé la valeur :

$$V_s + 2 V_1$$

la pression limite est déterminée par interpolation linéaire entre les valeurs des pressions des paliers qui encadrent ce volume.

D.3.2 Méthodes d'extrapolation

Lorsque, au cours d'un essai d'expansion, le volume de liquide injecté est insuffisant, la pression limite est extrapolée.

Mais cette extrapolation n'est admise que lorsque le nombre de paliers de pression au-delà de la pression p_2 est au moins égal à 3, ce qui correspond en général à un volume injecté supérieur à 500 cm³ (et à 350 cm³ pour la sonde courte avec un tube fendu). La courbe pressiométrique est extrapolée selon les deux méthodes décrites dans les paragraphes D.3.2 et D.3.3, utilisées conjointement.

Lorsqu'une pression supérieure ou égale à 5 MPa aura été appliquée sans pouvoir obtenir la pression limite par les méthodes d'extrapolation, la valeur de la pression limite sera notée $p_l \geq p$ (p étant la dernière valeur corrigée mesurée).

D.3.2.1 Méthode de la courbe «inverse»

Elle consiste à transformer les couples de valeur (p, V) en (p, 1/V) et à effectuer une régression linéaire pour toutes les valeurs telles que $p \geq p_2$.

L'extrapolation est faite par la transformation :

$$Y = Ap + B$$

avec :

$$Y = V - 1$$

où :

A et B sont les coefficients obtenus par la méthode «des moindres carrés» par rapport aux pressions sur les valeurs expérimentales (Y, p) au delà de (p_2, V_2) inclus.

La pression limite est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$p_{li} = -\frac{B}{A} + \frac{1}{\left[A \left(V_s + 2V_E \right) \right]}$$

D.3.2.2 Méthode d'extrapolation «hyperbolique»

L'extrapolation est faite avec toutes les valeurs mesurées telles que $p > p_E$ par la transformation suivante :

$$Y = CX - D$$

avec :

$$X = \frac{V^2 - V_E^2}{p - p_E} \quad \text{et} \quad Y = \frac{pV^2 - p_E V_E^2}{p - p_E}$$

où :

C et D sont les coefficients obtenus par la méthode «des moindres carrés» par rapport aux X sur les valeurs expérimentales (X, Y).

La pression limite p_{lh} est obtenue pour $V_l = V_s + 2V_1$.

$$p_{lh} = \left[p_E \left(V_E^2 + D \right) + C \left(V_l^2 - V_E^2 \right) \right] / \left(V_l^2 + D \right)$$

D.3.3 Pression limite conventionnelle par extrapolation

La pression limite est égale à la plus faible des deux valeurs p_{li} , p_{lh} calculées aux paragraphes D.3.2.1 et D.3.2.2.

Si : $\frac{|p_{li} - p_{lh}|}{p_{lh}} \geq 0,2$, l'essai ne permet pas de déterminer la pression limite.

NOTE 1 Un minorant de la pression limite peut être pris égal à la dernière pression corrigée mesurée.

NOTE 2 En site aquatique (avec un niveau de plan d'eau variable, par exemple), la référence par rapport à laquelle la pression limite est donnée devra être précisée (voir annexe E).

D.4 Pression de fluage pressiométrique

La pression de fluage p_f est obtenue par exploitation graphique du diagramme $(p, \Delta V^{60/30})$.

p_f est l'abscisse de l'intersection des deux droites retenues pour schématiser le diagramme $(p, \Delta V^{60/30})$, voir Figure D.2.

$\Delta V^{60/30}$ est la variation de volume du liquide injecté dans la cellule centrale de mesure entre les temps $t = 30$ s et $t = 60$ s après le début du palier de pression p .

NOTE La valeur p_f est en général peu différente de la valeur p_2 .

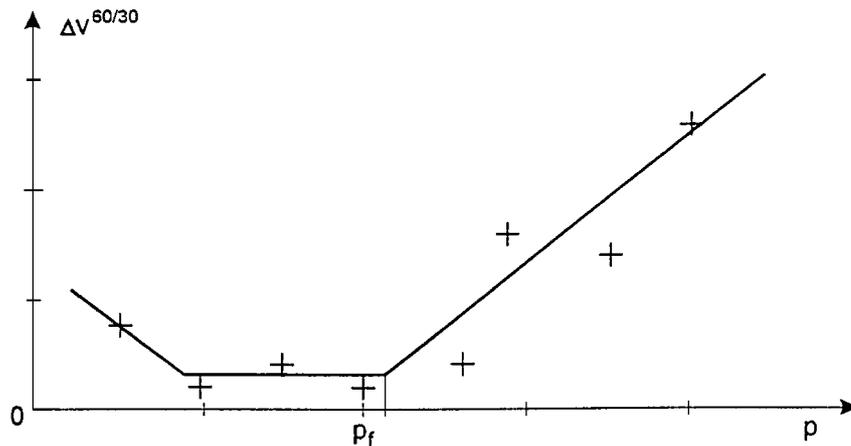


Figure D.2 — Courbe de fluage pressiométrique — Exemple

D.5 Vérification des valeurs des caractéristiques pressiométriques

Il est obligatoire, avant d'établir le procès-verbal, de visualiser et de confronter les valeurs calculées p_1 , p_2 , p_f et p_l à la courbe corrigée ainsi qu'éventuellement aux valeurs de E_M et E_M/p_l afin de déceler toute erreur et toute extrapolation abusive.

En particulier, la pression limite qui figure sur le procès-verbal ne doit pas être inférieure à la dernière pression (corrigée) appliquée au terrain lors de l'essai et, lorsque le volume injecté dans la cellule centrale est inférieur au volume correspondant au doublement du volume de la cavité.

NOTE Dans le cas où la valeur du module pressiométrique, calculée au paragraphe D.2.2, s'avère aberrante, par exemple au regard du rapport E/p_l , une estimation du module pressiométrique peut être faite à partir d'autres critères que celui défini au paragraphe D.2 : par exemple par corrélation avec la pression limite pressiométrique (si celle-ci a pu être définie) ou en redéfinissant une autre plage pressiométrique (lorsque cela est possible).

Le critère retenu pour estimer ce module doit être reporté sur le procès-verbal.

Annexe E

(informative)

Pression limite pressiométrique nette — Pression de fluage pressiométrique nette

La pression nette p^* est la pression comptée par rapport à la contrainte totale horizontale régnant dans le terrain avant introduction de la sonde pressiométrique au même niveau :

— pression limite pressiométrique nette :

$$p_l^* = p_l - \sigma_{hs}$$

— pression de fluage pressiométrique nette :

$$p_f^* = p_f - \sigma_{hs}$$

NOTE La procédure suivie lors d'un essai ne permet pas de connaître la contrainte totale horizontale du terrain au repos avant le forage (ou la mise en place de la sonde en cas de tube fendu direct). L'estimation repose sur un calcul et des hypothèses.

E.1 Contraintes dans le terrain au repos avant essai

σ_{vs} est la contrainte totale verticale au niveau de l'essai ;

σ_{hs} est la contrainte totale horizontale au niveau de l'essai prise égale à :

$$\sigma_{hs} = K_0 (\sigma_{vs} - u_s) + u_s$$

où conventionnellement :

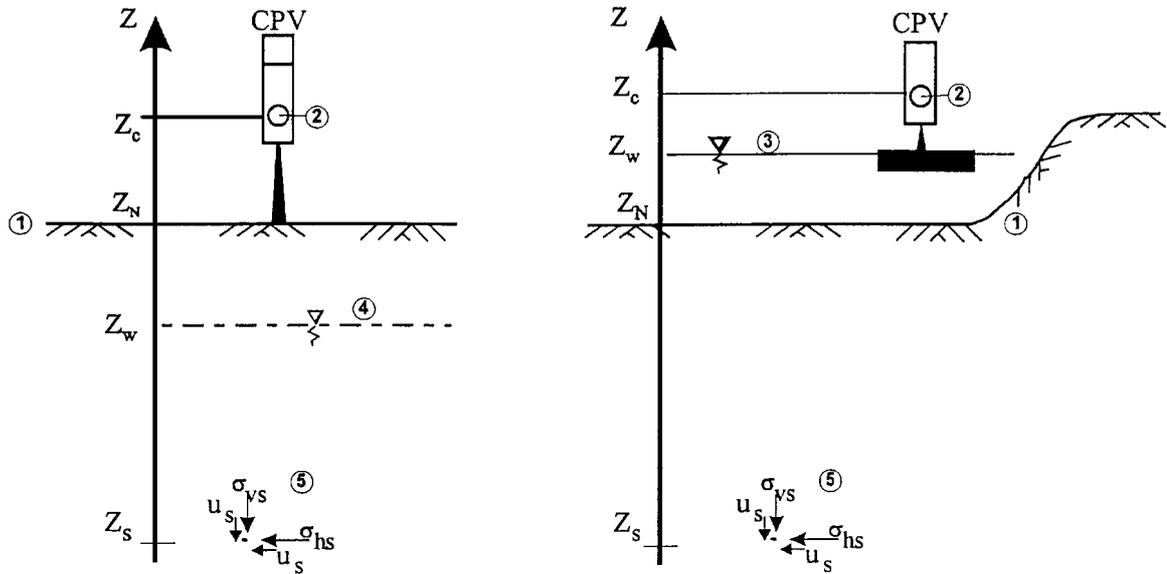
$$u_s = \gamma_w (z_w - z_s) \text{ pour } z_w > z_s$$

$$u_s = 0 \text{ pour } z_s < z_w$$

u_s est la pression interstitielle de l'eau dans le terrain au niveau de l'essai ;

K_0 est le coefficient de pression des terres au repos au niveau de l'essai ;

γ_w est le poids volumique de l'eau interstitielle dans le terrain.



Légende

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 Terrain naturel | 4 Niveau de la nappe |
| 2 Conditionneur de pression | 5 Contraintes dans le terrain |
| 3 Plan d'eau | |

a) Site terrestre

b) Site aquatique

Figure E.1 — Contraintes dans le terrain avant essai

En site terrestre (voir figure E.1.a) :

$$\sigma_{vs} = \gamma (Z_N - Z_s)$$

et on adopte conventionnellement :

$$u_s = \gamma_w (Z_w - Z_s)$$

(sauf si le niveau piézométrique réel au niveau de l'essai est connu)

En site aquatique (voir figure E.1.b) :

$$\sigma_{vs} = \gamma_w (Z_w - Z_N) + \gamma (Z_N - Z_s)$$

$$u_s = \gamma_w (Z_w - Z_s)$$

(sauf si la pression interstitielle réelle au niveau de l'essai, est connue)

E.2 Pression limite pressiométrique nette p_l^* et pression de fluage pressiométrique nette p_f^*

Lorsque les pressions nettes sont fournies sur le procès-verbal, ce dernier doit préciser :

- la valeur considérée de la masse volumique du terrain et si celle-ci a été mesurée ou estimée ;
 - pour la majorité des terrains la valeur conventionnelle généralement admise est de $1,8 \text{ Mg/m}^3$;
- la valeur, au niveau de l'essai du coefficient K_0 de pression des terres au repos et si celle-ci a été mesurée ou estimée ;
 - la valeur conventionnelle de K_0 égale à 0,5 est généralement admise.

