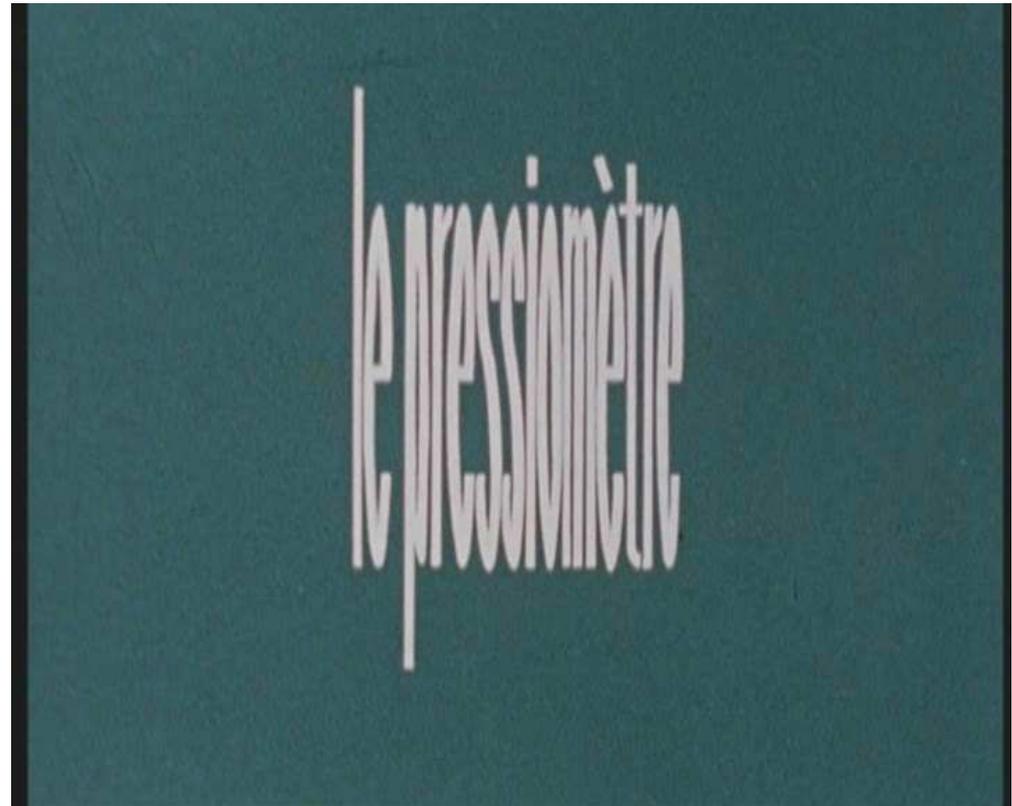




# Table des matières

- 1. Le pressiomètre**
- 2. Procédure d'essai**
- 3. Présentation des résultats**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

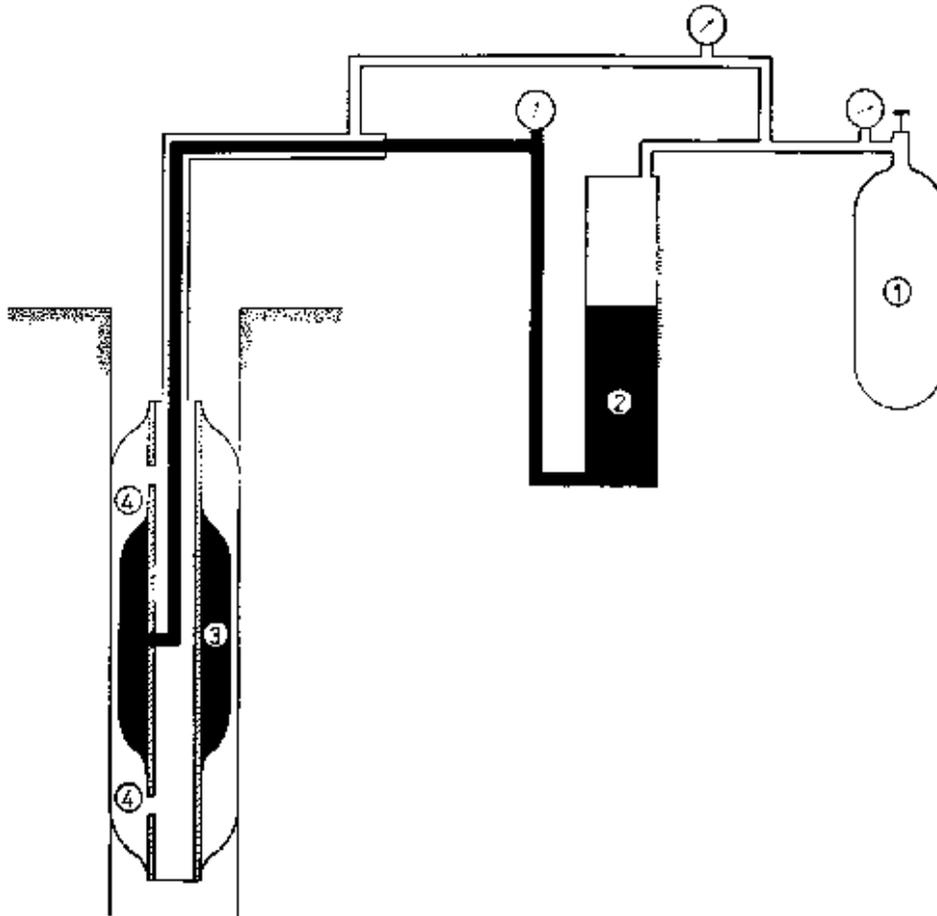


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# L'appareillage classique



1. Bouteille d'azote pour la mise en pression
2. Tube gradué permettant la mesure de l'augmentation de volume de la cellule centrale (volumètre).
3. Cellule centrale
4. Cellules de garde



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

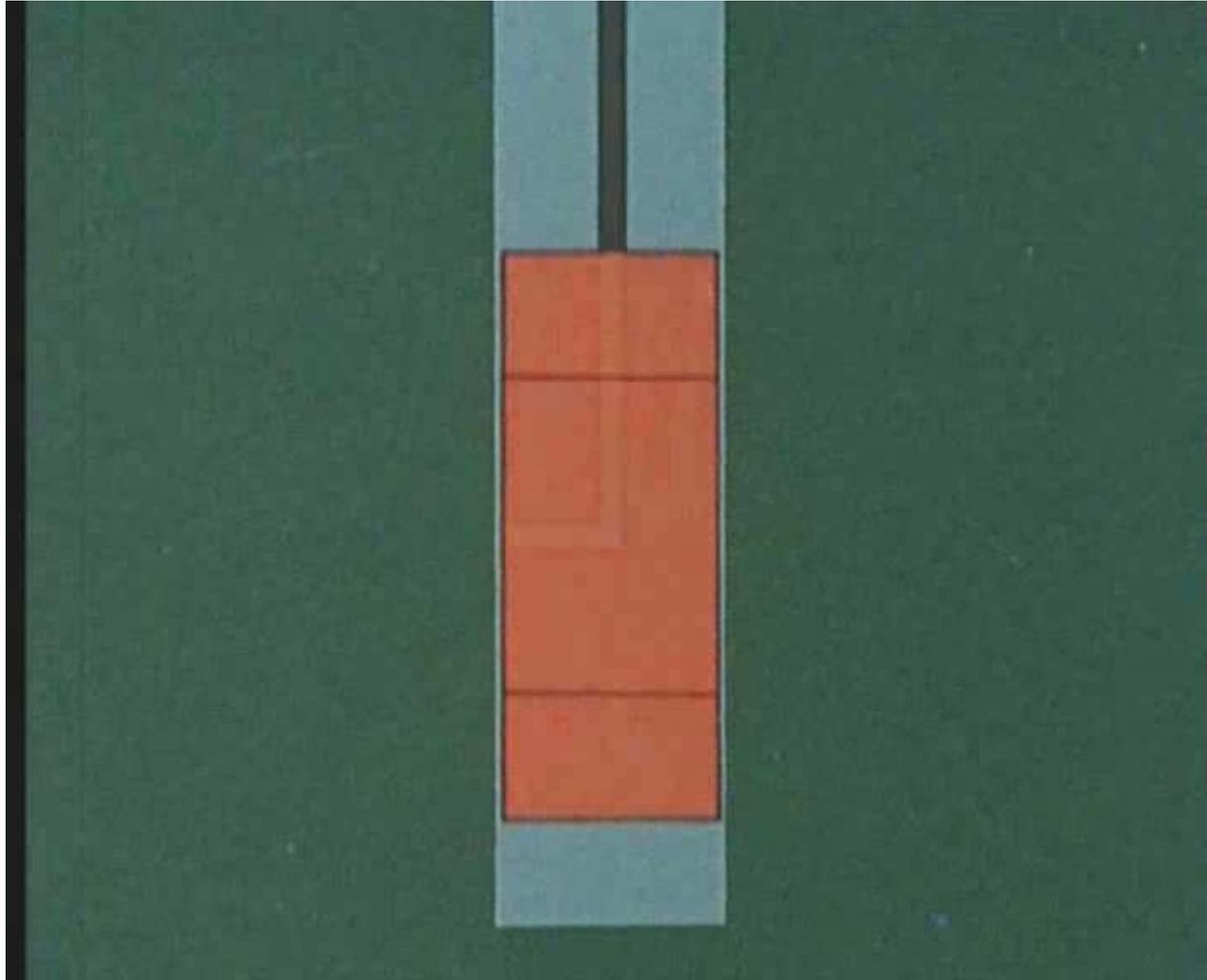


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Principe de l'essai pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# L'appareillage actuel



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

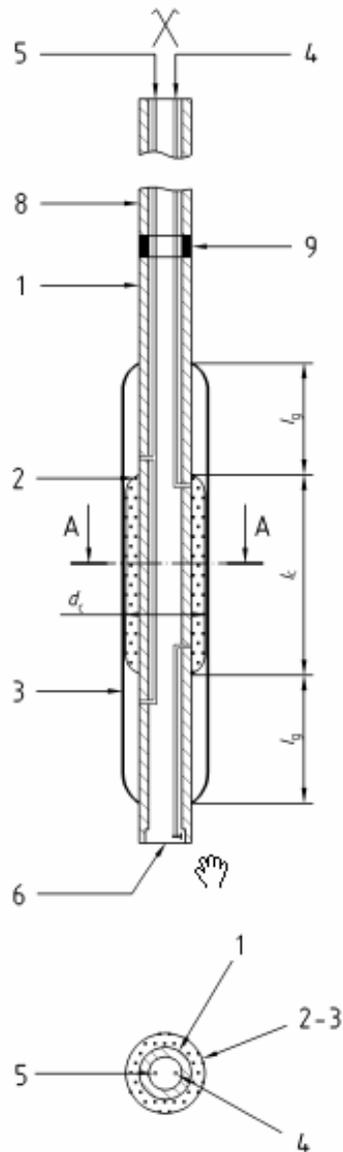


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Sonde à membrane souple



La sonde de type G :  
cellule centrale + membrane extérieure → 2  
cellules de garde.

Pression dans la cellule centrale,  
plus élevée que celle des cellules de garde.

Pression différentielle maintenue constante

1. Corps de sonde
2. Cellule centrale, membrane intérieure
3. Cellules de garde, Gaine ou extérieure
4. Arrivée d'eau, uniquement vers la cellule centrale
5. Arrivée d'air, uniquement vers les cellules de garde
6. Purge de la cellule centrale
7. Pas d'application
8. Train de tiges
9. Accouplement tiges/sonde pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

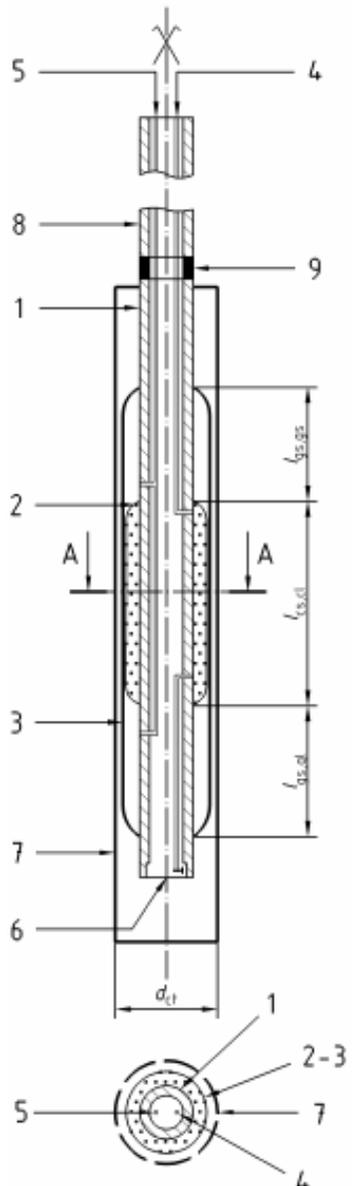


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Sonde à tube fendu



1. Corps de sonde
2. Cellule centrale, membrane intérieure
3. Cellules de garde, Gaine ou extérieure
4. Arrivée d'eau, uniquement vers la cellule centrale
5. Arrivée d'air, uniquement vers les cellules de garde
6. Purge de la cellule centrale
7. Tube fendu
8. Train de tiges
9. Accouplement tiges/sonde pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Sonde à tube fendu



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

7 JE SBGIMR-GBMS – LLN – 24 février 2011 – PHW - VF



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Contrôleur pression volume CPV

Mano 0 – 25 bars: cellule de garde

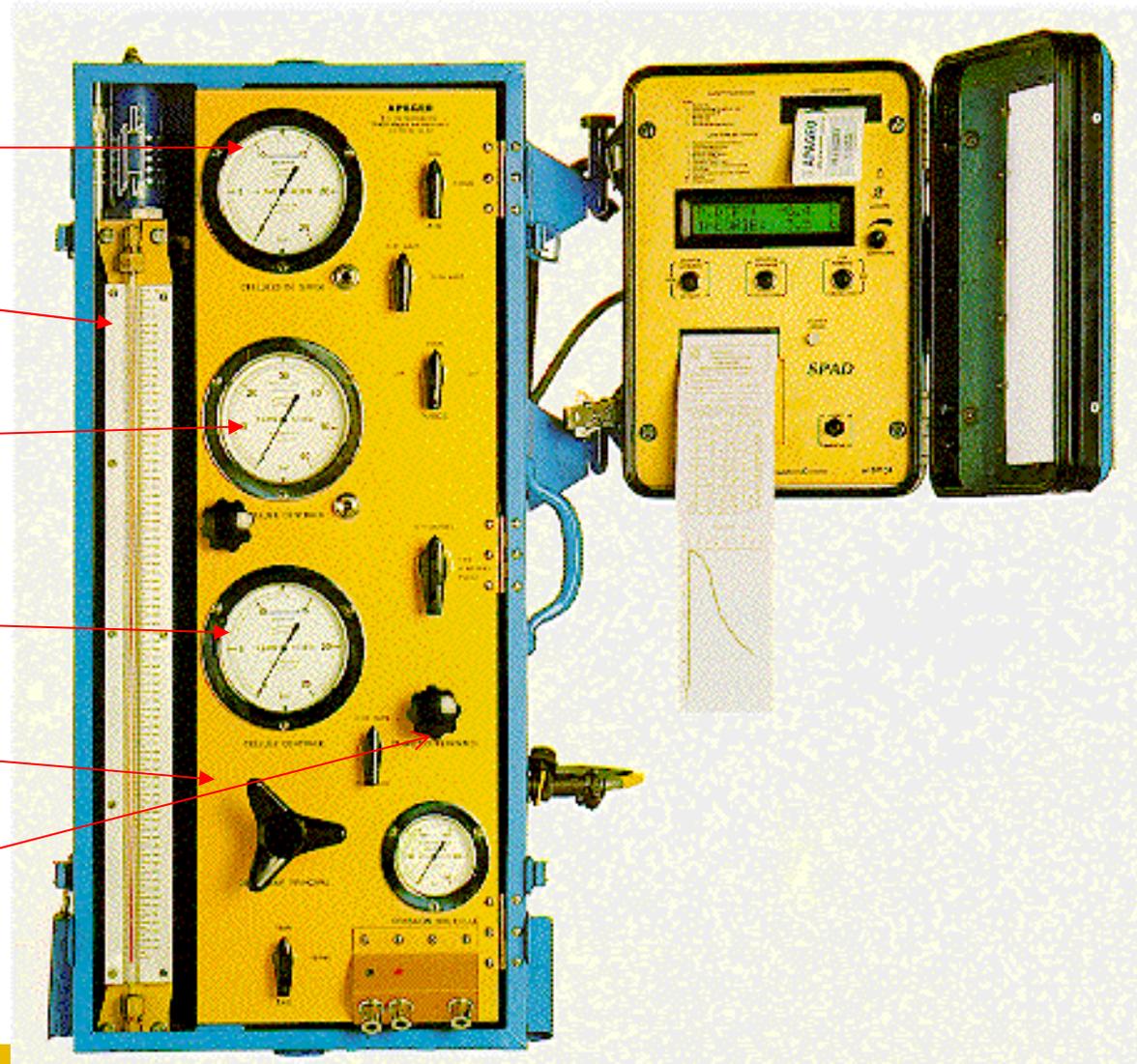
Volumètre 800cc + voyant de mesure

Mano 0 – 60 bars: cellule centrale

Mano à – 25 bars: cellule centrale

Détendeur principal

Molette de réglage de la Pression différentielle



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Le GeoSPAD

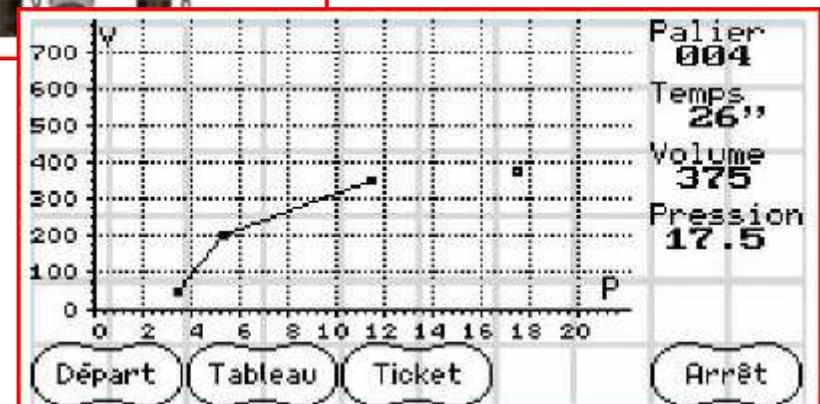
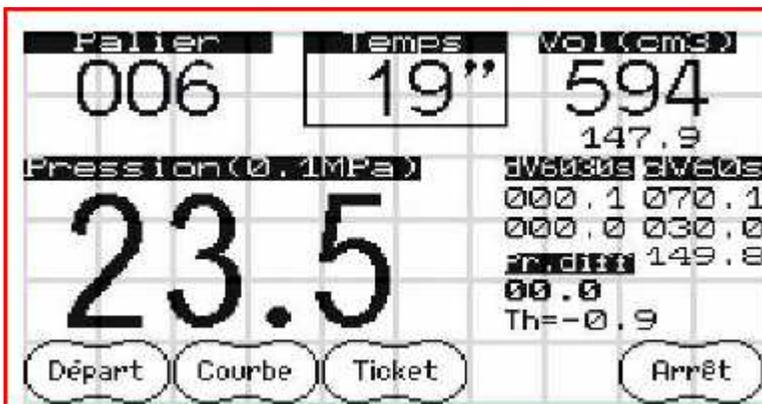
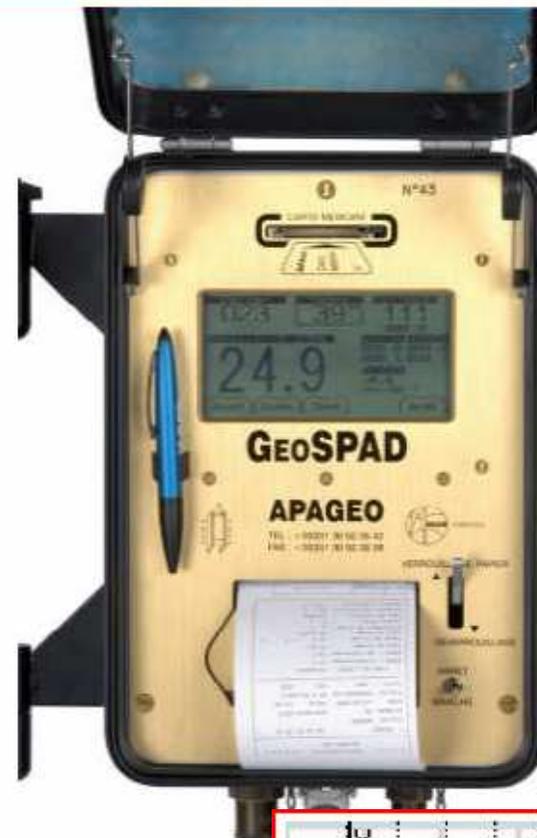
Le SPAD : enregistreur de données imposé par la norme NF P 94-110-1 pour empêcher la fraude.

Les résultats sont fournis dans un fichier qui NE peut PAS être modifié.

Garantie que les essais ont bien été exécutés.

Résultats bruts ou minute d'essai imprimés en cours d'exécution

Contrôle possible en cours d'exécution.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Le Prevo ou Geopac

Idem que GeoSPAD mais automatique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

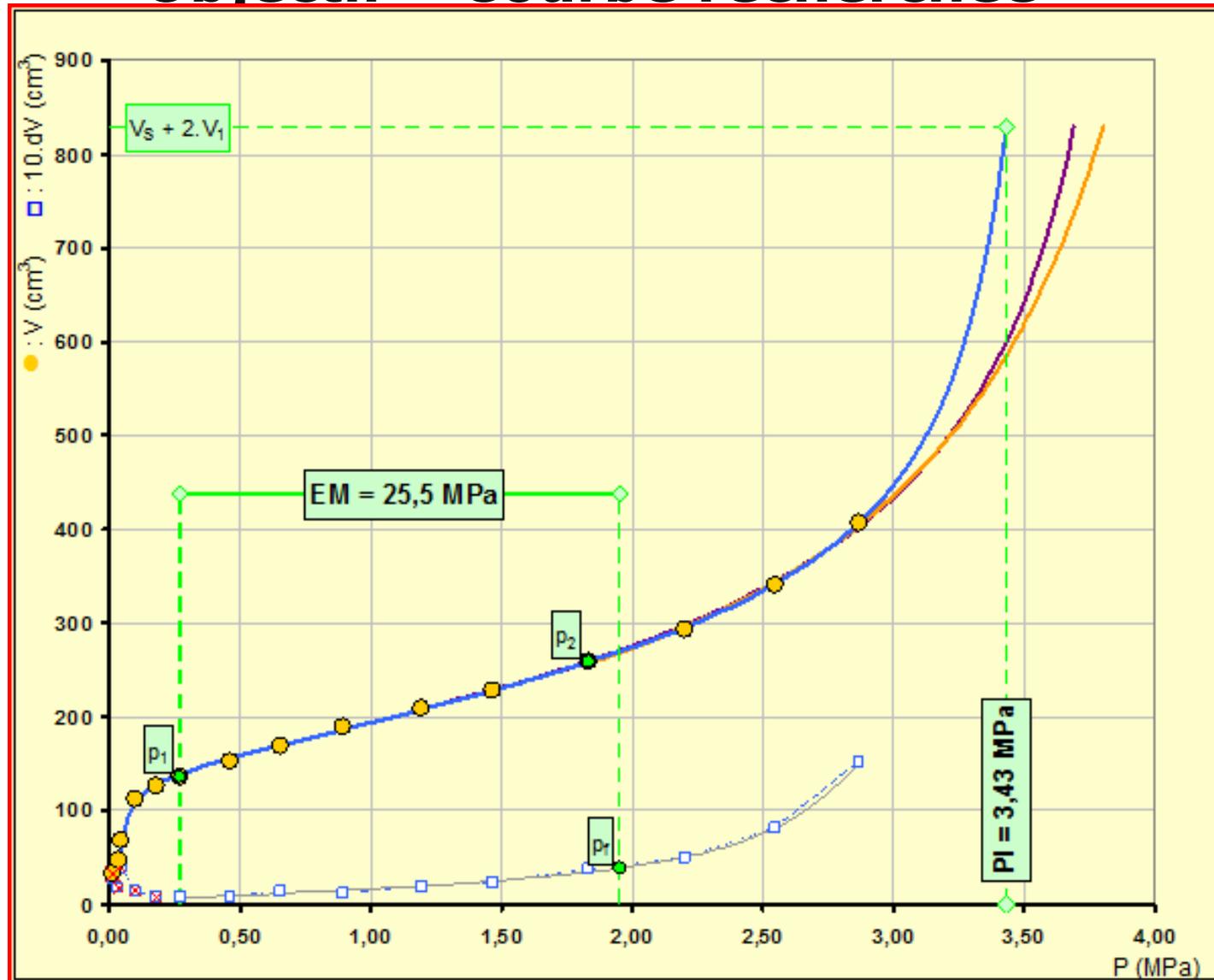


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Objectif – Courbe recherchée



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

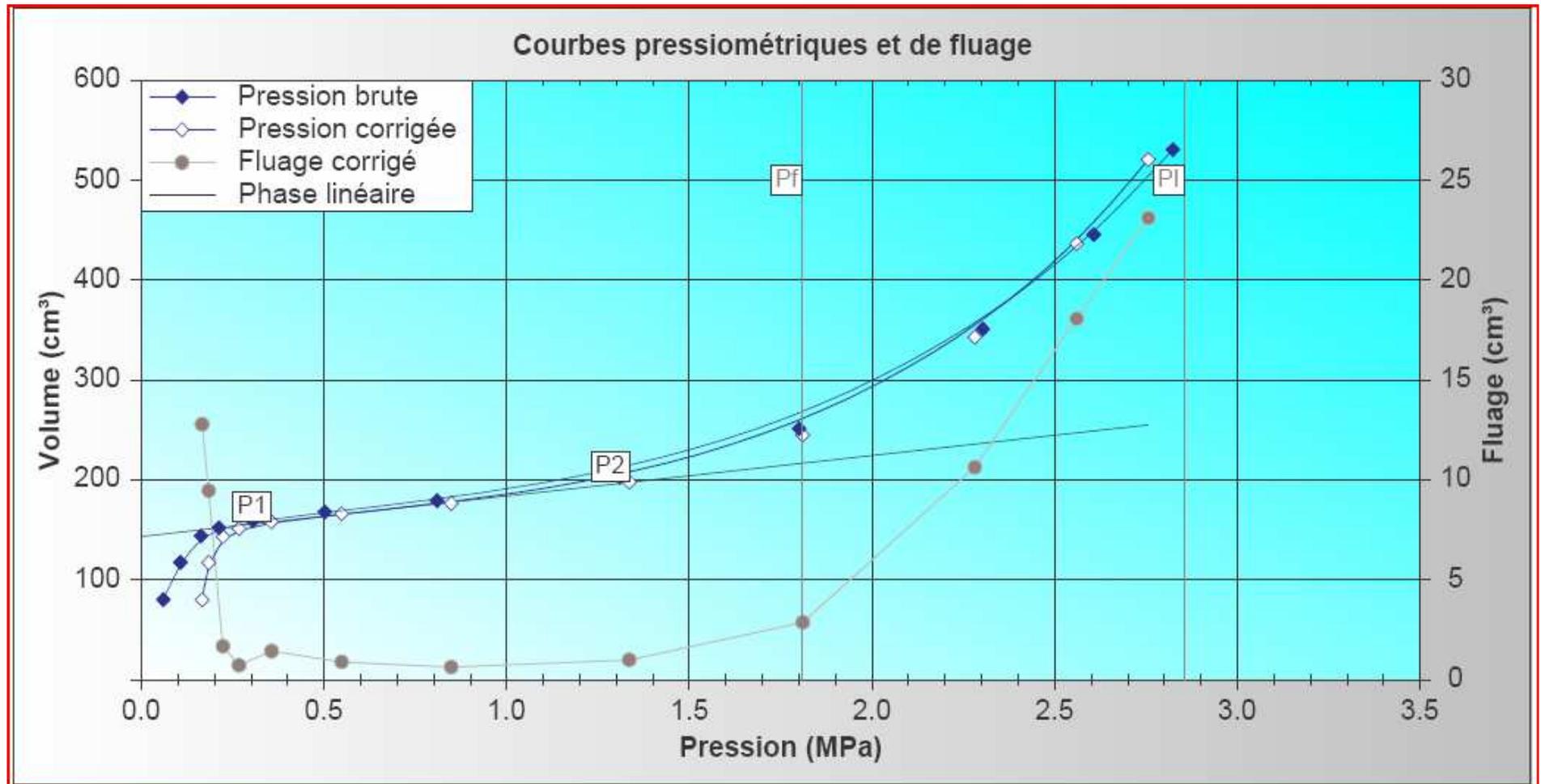


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Objectif – Courbe recherchée



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Table des matières

1. Le pressiomètre
2. Procédure d'essai et présentation des résultats
3. Calcul de  $p_f$ ,  $p_l$  et  $E_M$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



## 2. Procédure d'essai et présentation des résultats

1. Les normes
2. Mesure du volume de la sonde et correction de volume
3. Mesure de la résistance propre de la sonde
4. Sondage pressiométrique
5. Forage pressiométrique
6. Mise en place
7. Mise en pression
8. Mesure
9. Corrections
10. Courbe pressiométrique
11. Courbe de fluage





# Les normes

## ■ NF P 94-110-1

**Norme encore en vigueur en France aujourd'hui. Elle rend obligatoire l'utilisation du SPAD**

## ■ EN\_ISO\_22476\_4

**Projet de Norme européenne actuellement soumis à enquête. L'utilisation du SPAD est facultative (procédure B).**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Réglage de la pression différentielle

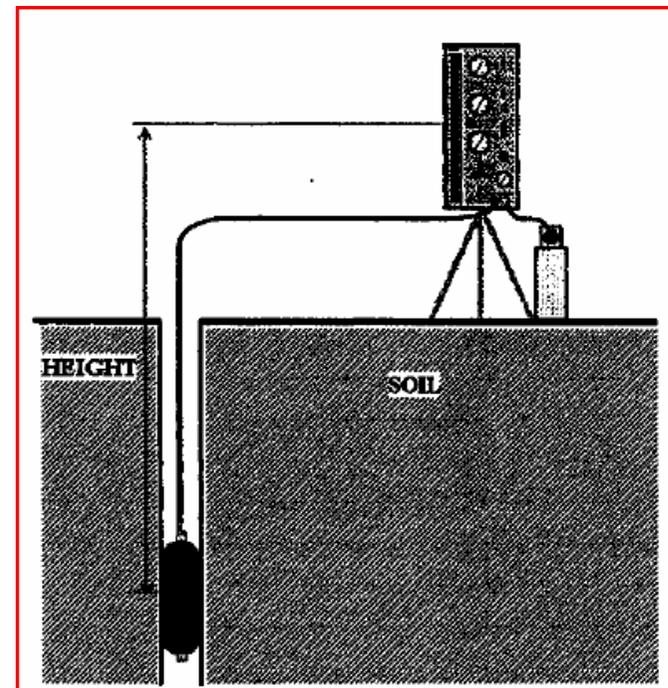
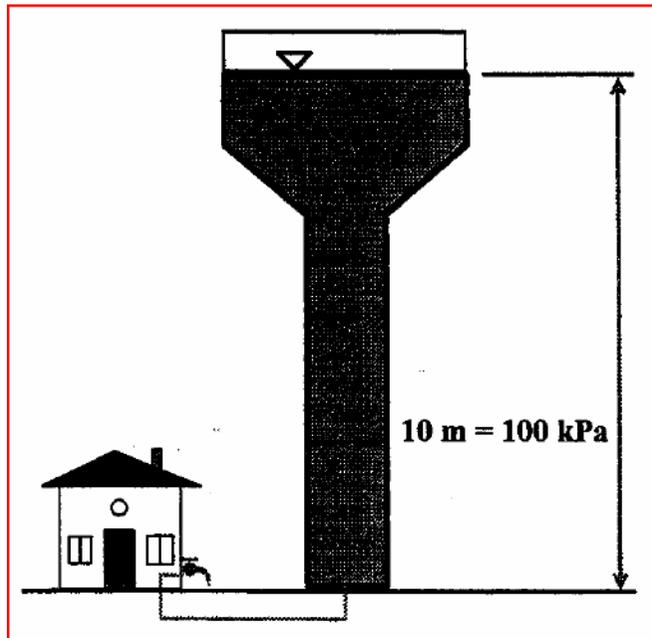
- **La notion de pression différentielle résulte de :**
  - Pour que la cellule centrale, emboîtée dans les cellules de garde, puisse se dilater, il faut une pression additionnelle dans la cellule centrale par rapport à la pression dans les cellules de gardes. Comme de plus, il faut maintenir la longueur de la cellule centrale constante, on doit mettre en jeu une pression additionnelle bien définie.
  - En raison de la pression hydrostatique (1 bar/10mètres dans le cas d'eau pure) régnant dans la cellule centrale , pour des pressions constantes dans les circuits au niveau du CPV, la différence de la pression entre la cellule centrale et les cellules de garde croît en fonction de la profondeur



# Réglage de la pression différentielle

- **Objectif :**
  - Pour chaque essai, donc à chaque profondeur

$$p_{\text{diff}} = p_{\text{cell.cent}} - p_{\text{cell.garde}} = 1 \text{ bar}$$



# Réglage de la pression différentielle

$$Z_c = +2\text{m}$$

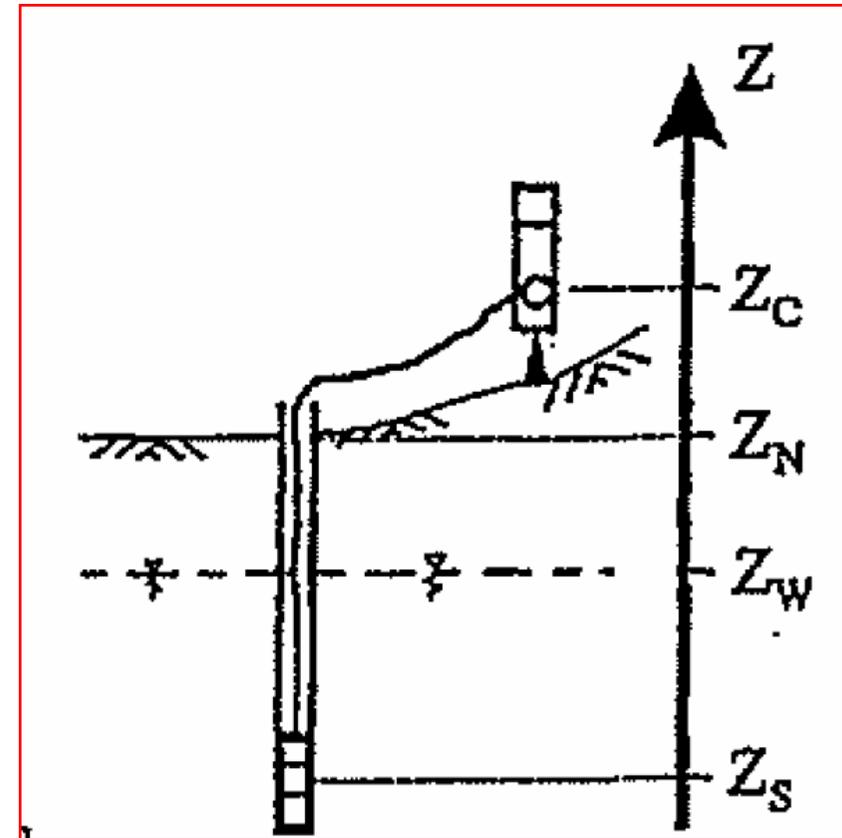
$$Z_N = 0\text{m}$$

$Z_s = -5\text{m} \rightarrow p_{\text{diff}} = +0,3 \text{ bar}$  (0,3 bars en plus dans la cellule centrale)

$Z_s = -8\text{m} \rightarrow p_{\text{diff}} = 0,0 \text{ bar}$  ( $p_{\text{cell. centr.}} = p_{\text{cell. garde}}$ )

$Z_s = -12\text{m} \rightarrow p_{\text{diff}} = -0,4 \text{ bar}$  (0,4 bars en plus dans les cellules de garde)

$Z_s = -28\text{m} \rightarrow p_{\text{diff}} = -2,0 \text{ bar}$  (2,0 bars en plus dans les cellules de garde)



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

18 JE SBGIMR-GBMS – LLN – 24 février 2011 – PHW - VF



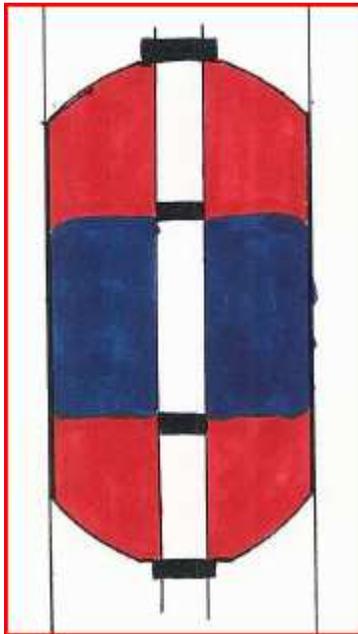
OREX  
GEOTECHNICS



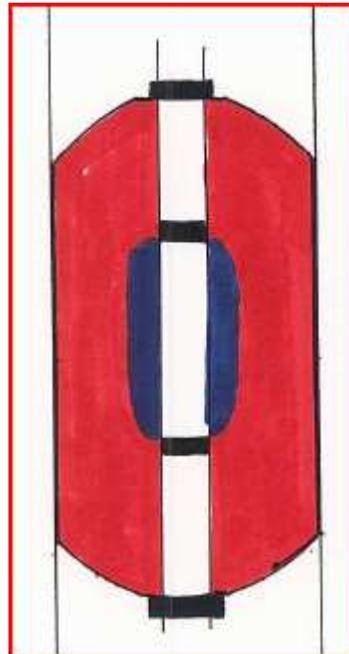
Service public de Wallonie

# Réglage de la pression différentielle

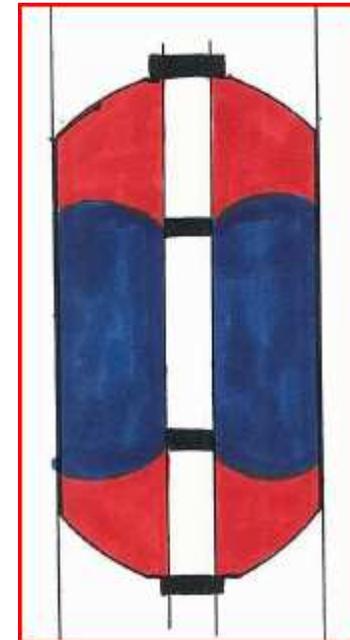
$P_{diff}=1\text{bar}$  (ok)



$P_{diff}<>1\text{bar}$  (centr.<garde)



$P_{diff}<>1\text{bar}$  (centr.>garde)



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

19 JE SBGIMR-GBMS – LLN – 24 février 2011 – PHW - VF



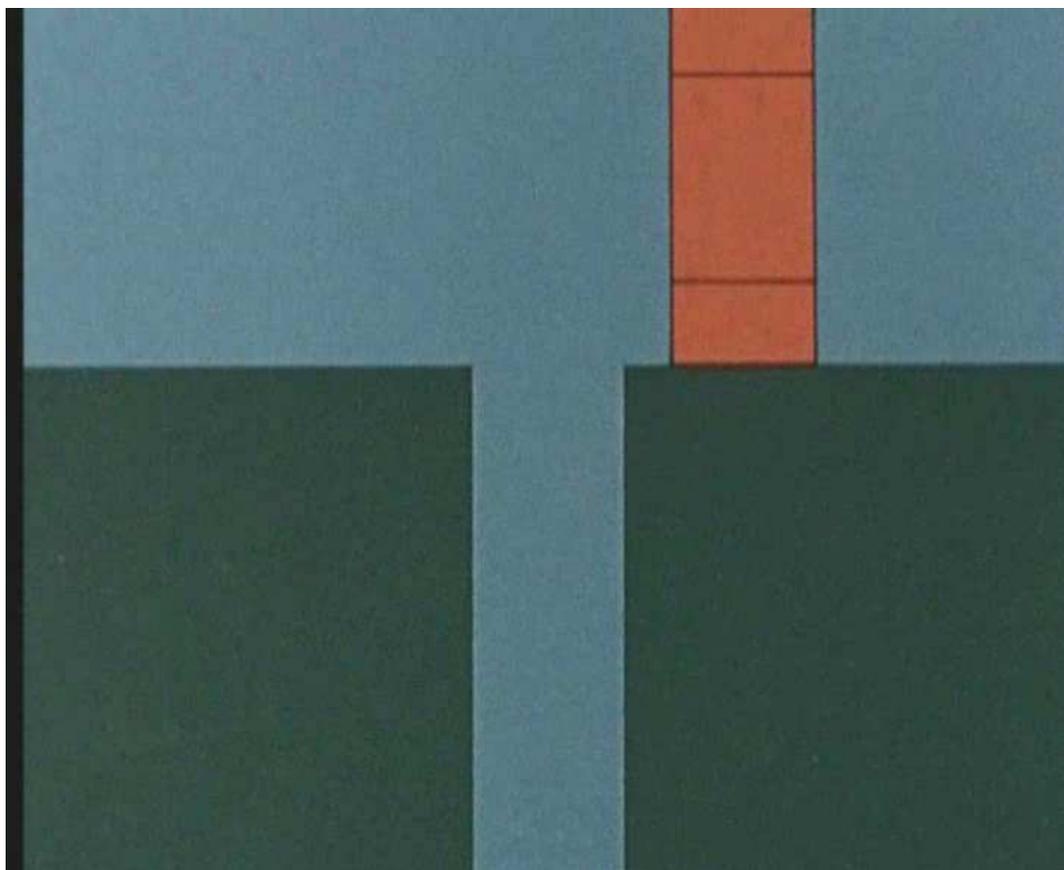
OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Mise en place de la sonde

1. **Procédure normale** : sonde descendue dans le trou de forage
2. **Exceptionnellement** : parois du trou de forage s'éboulent, sonde foncée directement et précédée d'une pointe
3. Le **forage d'un pré-trou** de plus petit diamètre peut faciliter le fonçage dans les sols durs.
4. **Sinon** : sonde battue grâce au tube fendu
5. Le tube fendu **NE doit PAS** être utilisé pour empêcher l'éboulement du trou dans les sols mous. Sa résistance à la dilatation de la sonde est trop élevée par rapport à celle du sol.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

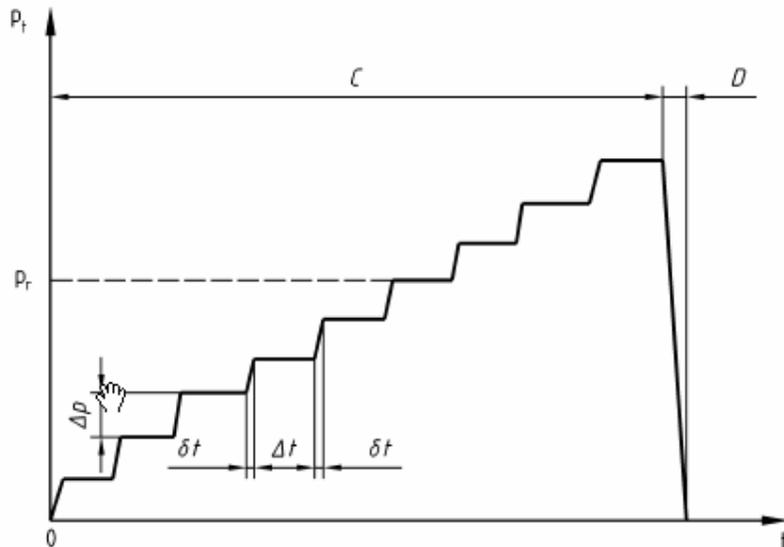
# Programme de mise en pression du MPT

Programme de mise en charge par paliers:

Le premier palier est choisi en fonction:

- des paramètres de forage,
- des débris de sol/roche ramenés en surface,
- de l'expérience de l'opérateur,

- 1) de manière à obtenir un nombre total proche de 10 (max 18 prévu dans le SPAD)
- 2) En essayant d'obtenir au moins 3 points au-delà de  $p_f$



A chaque palier, les mesures se font à 15, 30 et 60 secondes.

Les paliers sont espacés de moins de 20 secondes lorsque les tubulures ne dépassent pas 50m, plus au-delà de 50m



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



# Mesures enregistrées

1. Mise en pression
2. Correction de  $p$
3. Détermination de

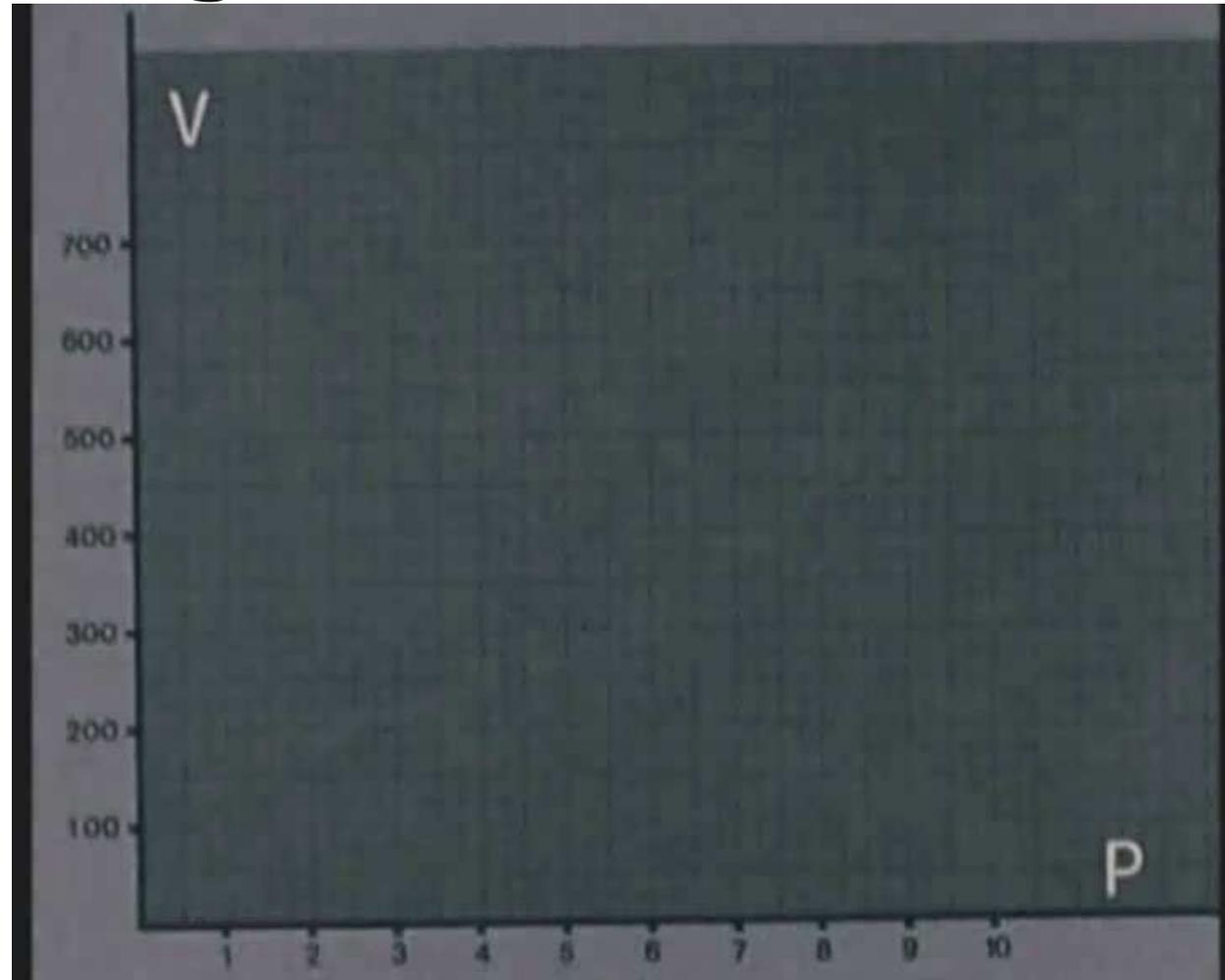
$p_0$

$p_F$

$p_L$

$E_M$

La pression limite  $p_L$  correspond par définition au doublement de volume de la sonde



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

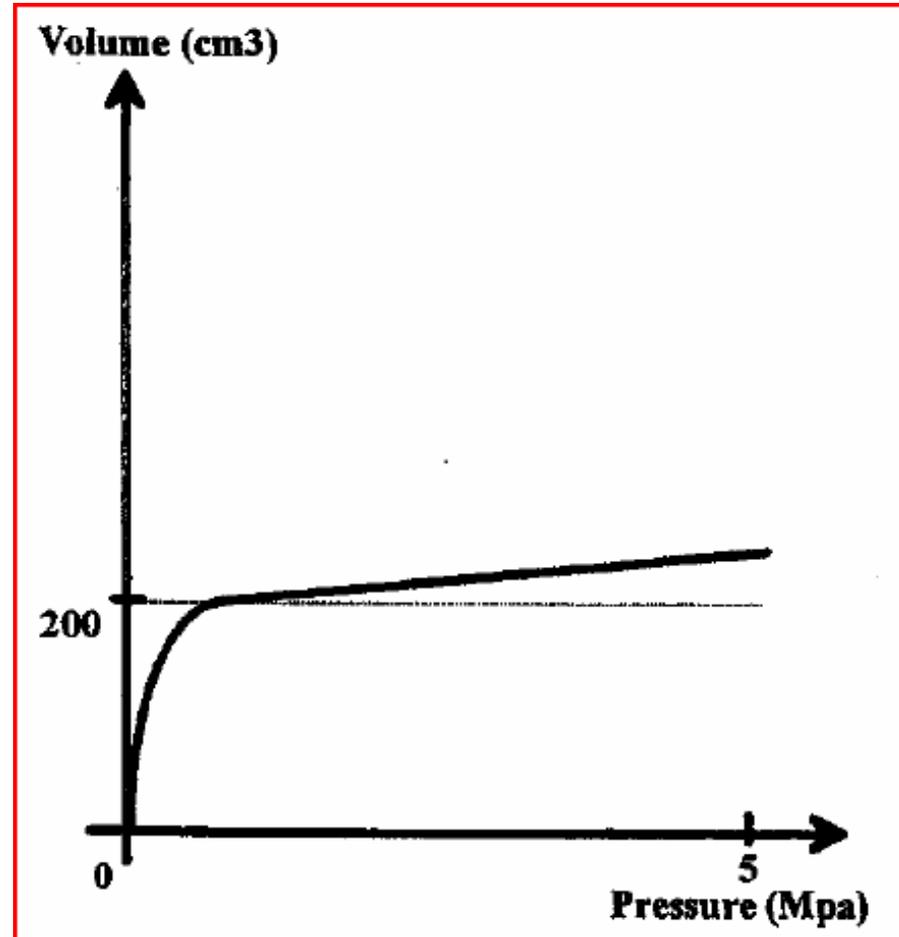
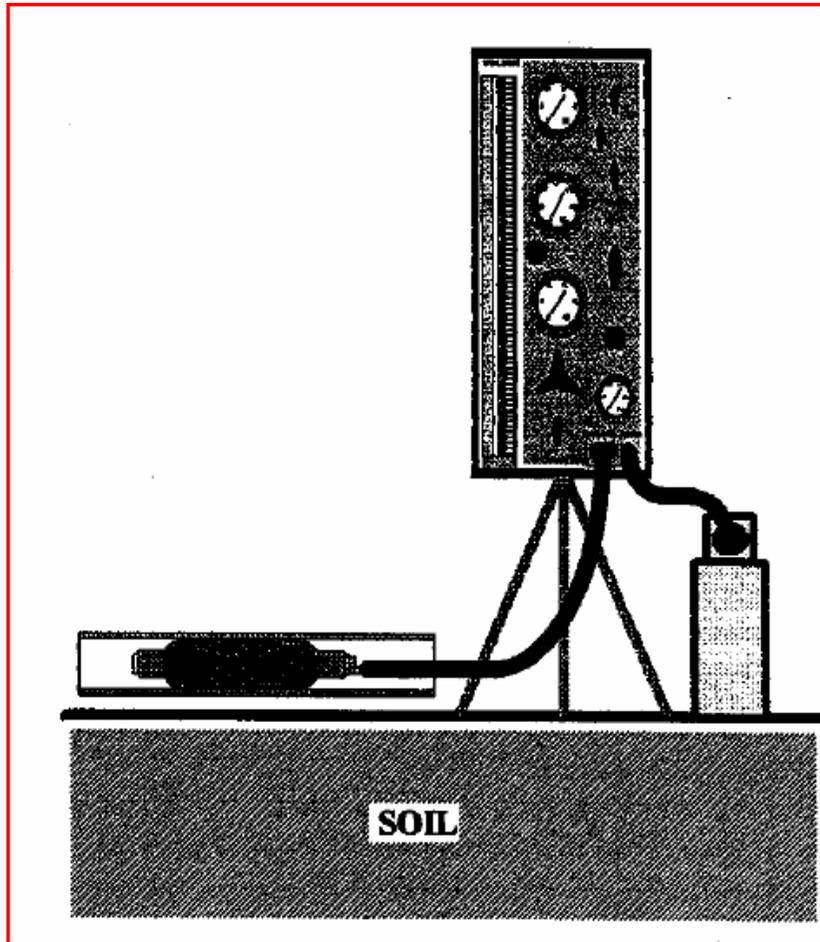


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Mesure du volume de la sonde et correction de volume



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



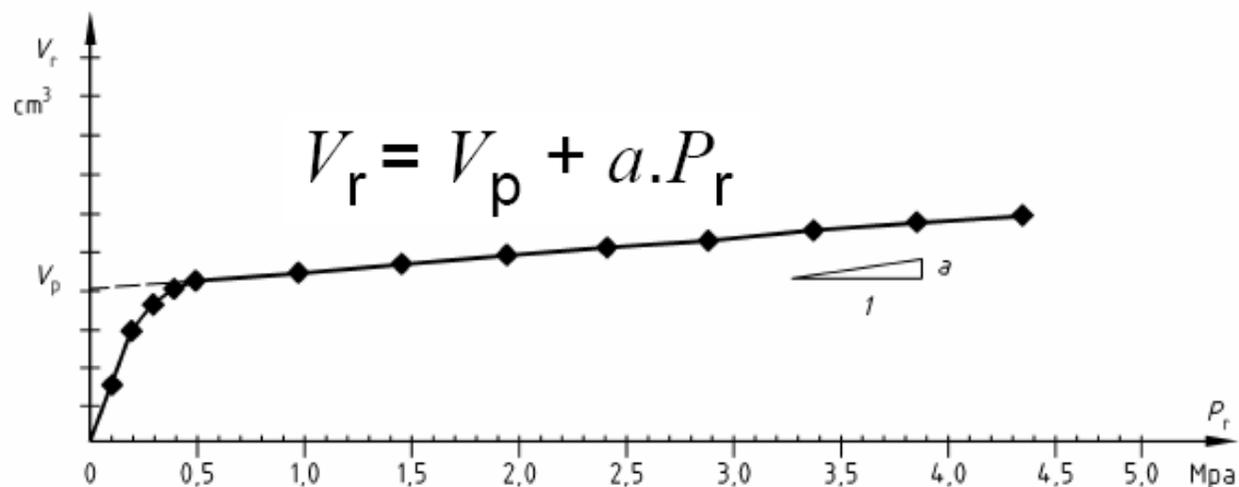
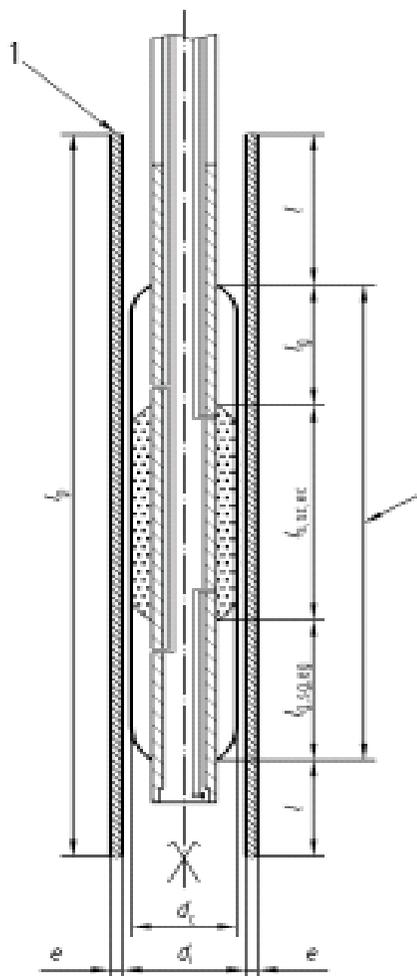
OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Mesure du volume de la sonde et correction de volume

La sonde est gonflée dans un tube épais 'indéformable' en acier.



$$V_p \longrightarrow V_c = 0,25 \pi I_c d_i^2 - V_p$$

Volume de la sonde

a = coefficient de dilatation de l'équipement CPV + tubulures



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Correction de volume

$V_r(p_r)$  = accroissement de volume occupé par l'eau dans l'appareillage et dans la sonde, comme si c'était un accroissement de volume de la sonde seule.

$a.p_r$  doit être soustrait de cette mesure afin d'obtenir l'accroissement de volume de la sonde seule.

$$V = V_r(p_r) - a.p_r$$

## Sols indurés et roches

pressions élevées → corrections élevées → droite de régression → bonne approximation de la courbe de correction.

## Sols mous

La droite de régression s'écarte d'autant plus de la courbe que la pression est faible.

Les corrections pour les faibles valeurs de pression sont sous-estimées.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



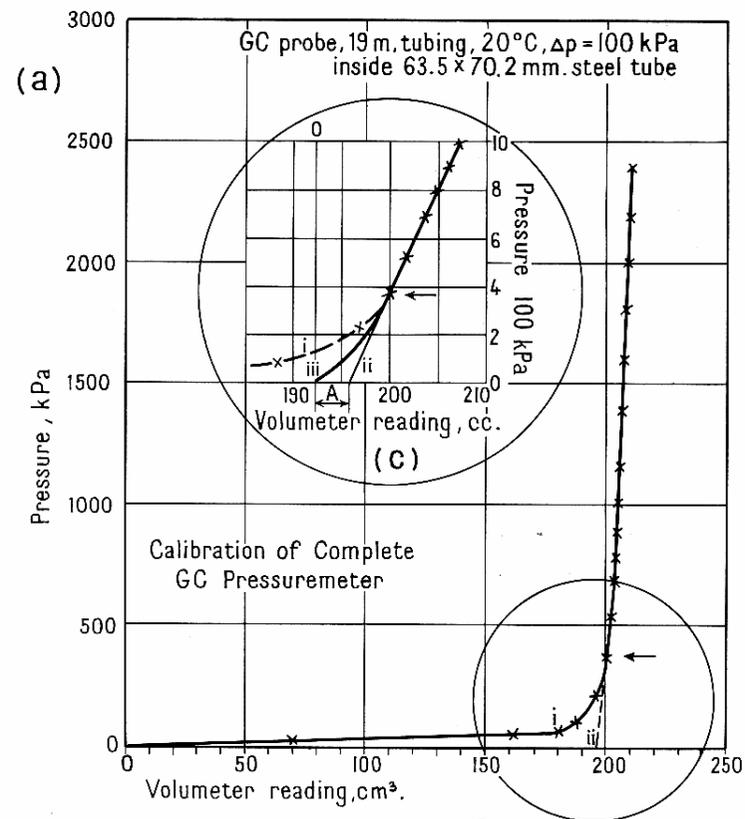
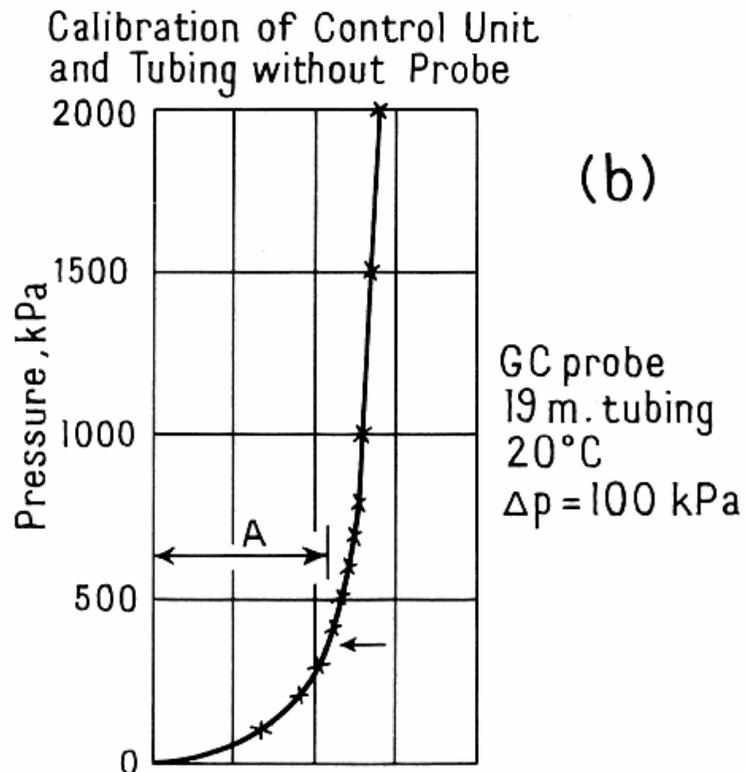
# Correction de volume dans les sols mous

## Courbe type (i) de calibration (fig a)

Le contact réel se fait au début de la partie linéaire de la courbe ( ici → 360 kPa ).

Sols mous → pressions faibles → comment calculer la correction entre 0 et 360 kPa?

1. Calibration du système,  **sans la sonde (fig b)**. Entre 0 et 360 kPa, environ 4 cm<sup>3</sup> (A) sont perdus dans la mise en pression du système.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



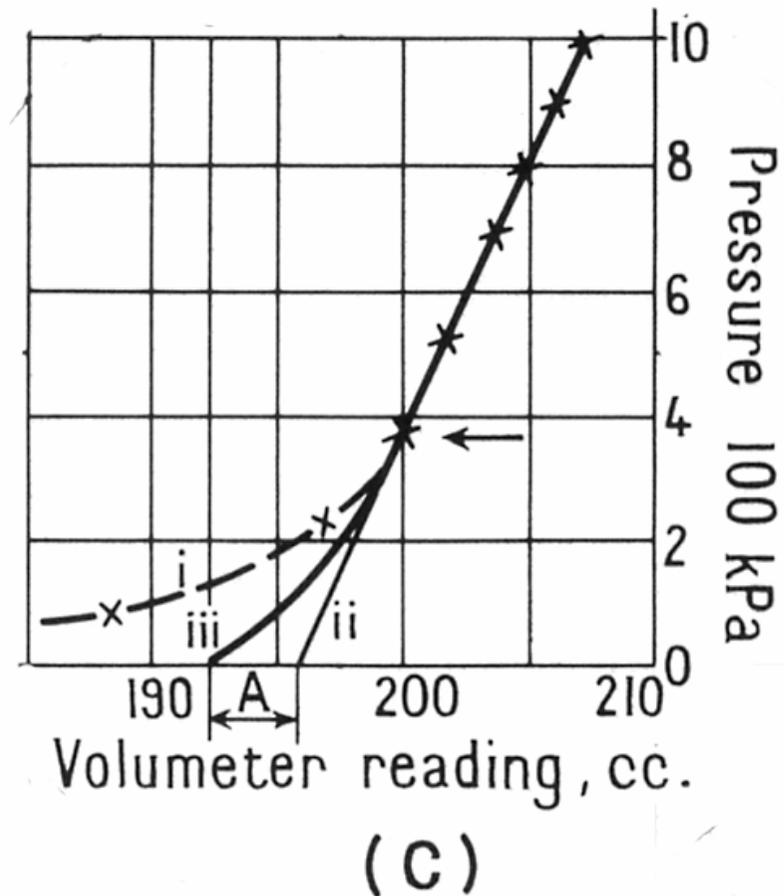
OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Correction de volume dans les sols mous

2. On peut donc prolonger la droite de régression **ii** (**fig c**) par la courbe **iii** dont le point d'abscisse se trouve à la distance **A** ( $4 \text{ cm}^3$ ) sous la droite **ii**.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS

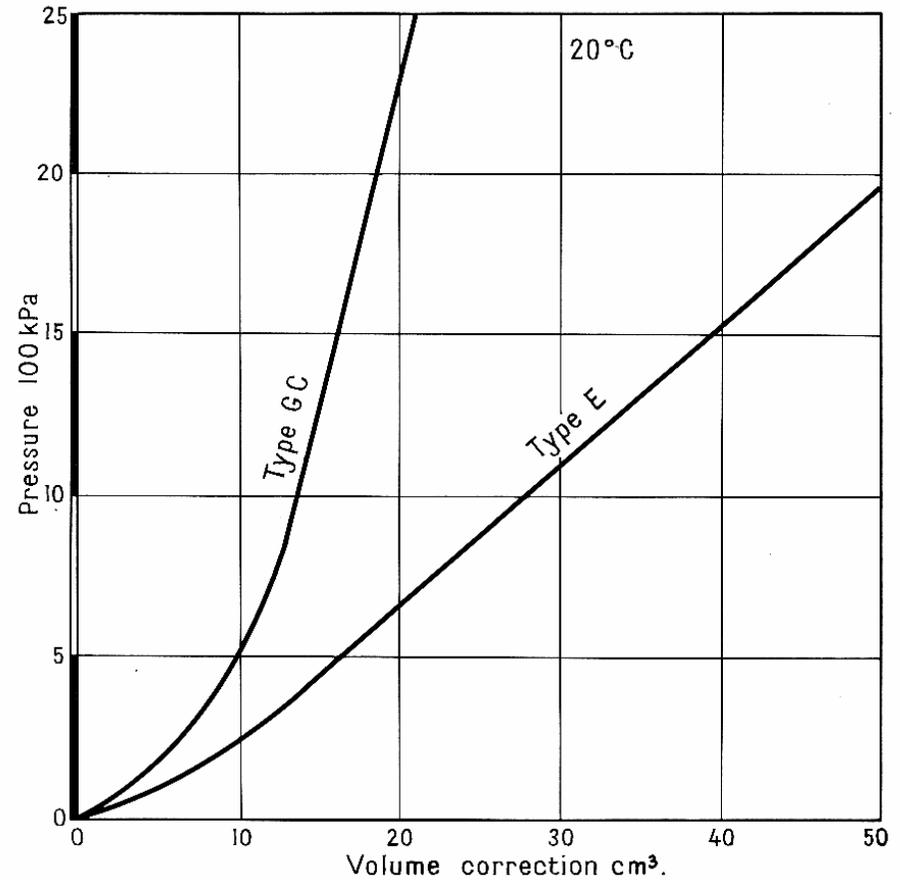
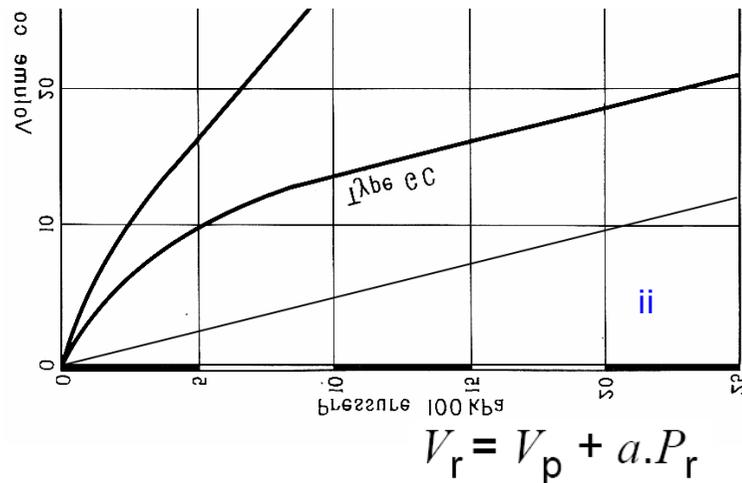


Service public de Wallonie

# Correction de volume dans les sols mous (suite)

3. On trace alors la **courbe GC** dans un diagramme où on a pris l'origine au point d'origine de la courbe **iii**.

La courbe de correction est appréciablement plus élevée que la droite **ii**.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

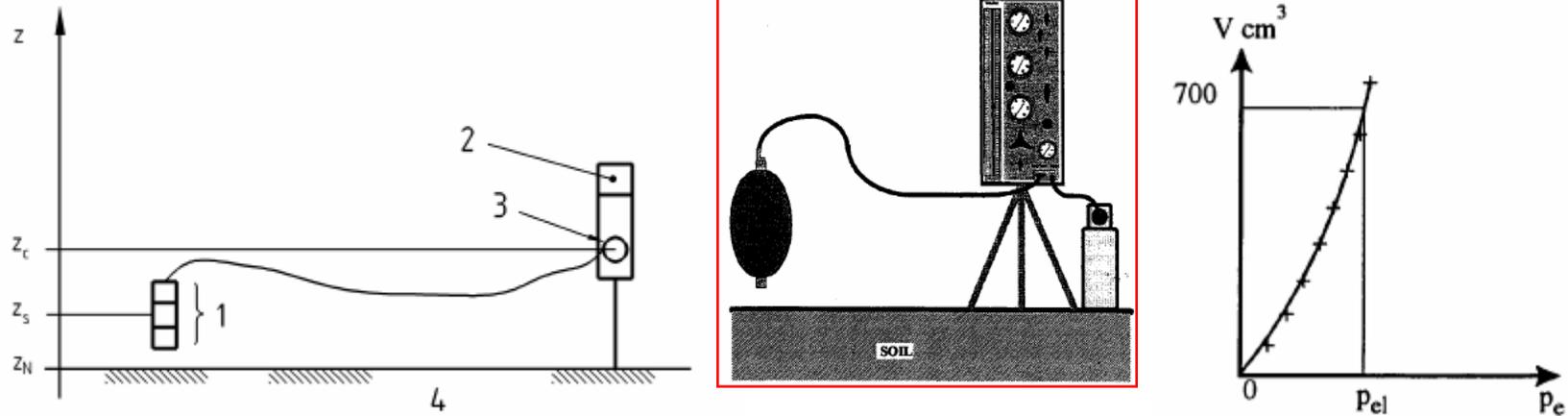


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Mesure de la résistance propre de la sonde



- 1 Pressuremeter probe
- 2 Pressure measuring device
- 3 Pressure regulator
- 4 Ground surface
- z Elevation

- 1. Nouvelle sonde gonflée au moins trois fois (700cc)
- 2. Sonde gonflée selon un programme analogue au programme de chargement de l'essai pressiométrique
- 3. Courbe de résistance donne les pressions de résistance de la sonde  $p_e$
- 4. Soustraire les pressions  $p_e$  de l'essai pressiométrique pour chaque volume mesuré



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Corrections

## Les corrections portent sur

### ■ Les volumes

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

à partir du calibrage de volume

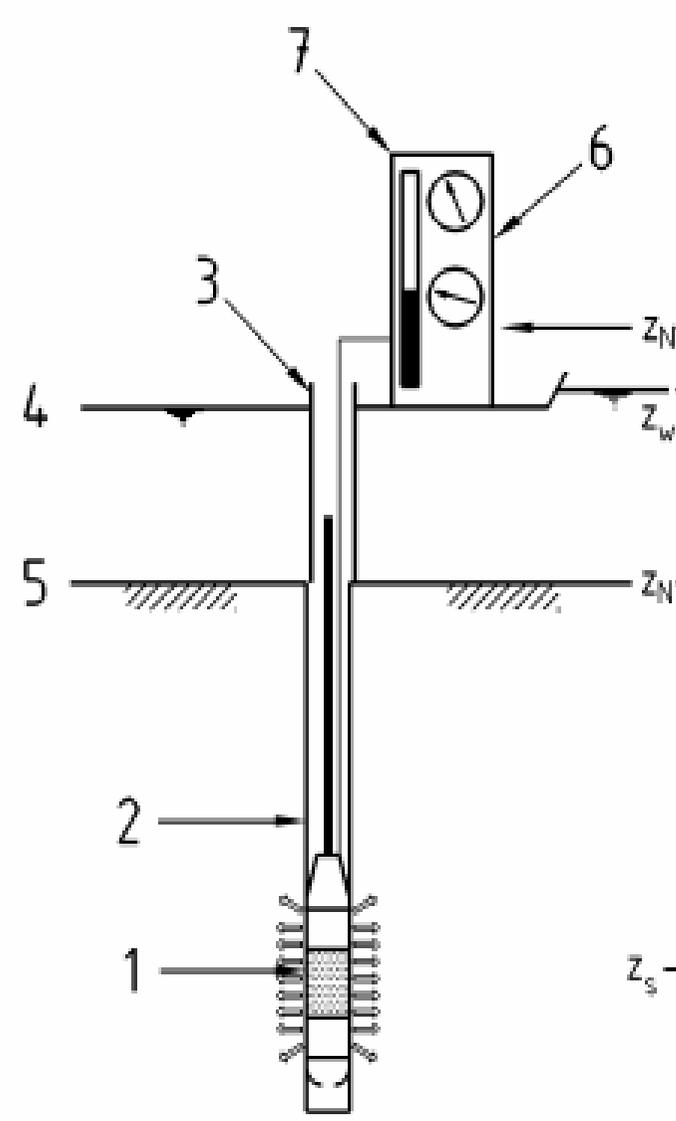
### ■ Les pressions

$$p = p_r + p_h - p_e(V_r) \quad \text{où}$$

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

$P_h$  pression dans la sonde due à la colonne d'eau dans les tubulures

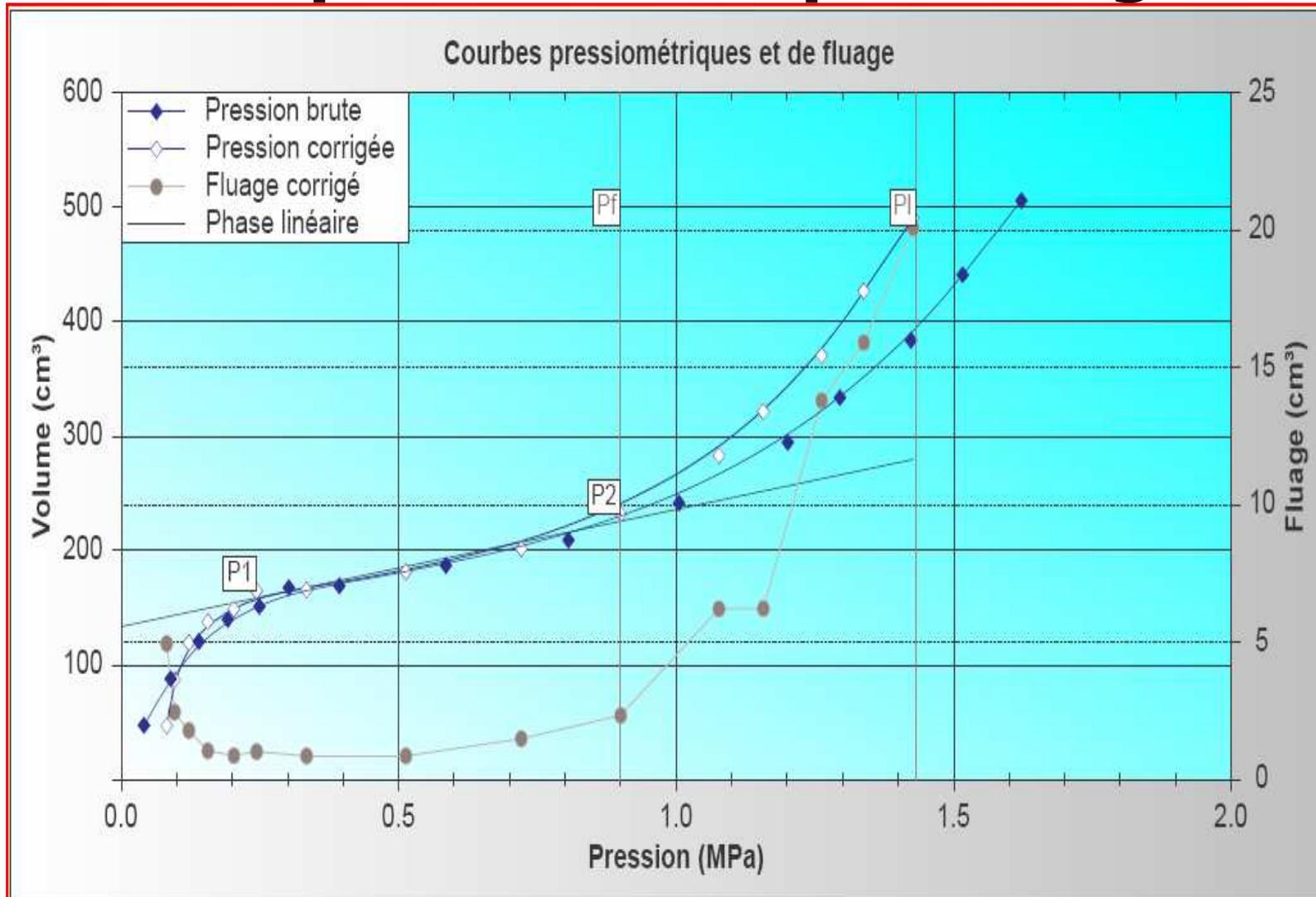
$P_e(V_r)$  est la correction de résistance de la membrane



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



# Courbe pressiométrique corrigée



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Sondage pressiométrique

## ***Sondage pressiométrique*** **(EN\_ISO\_22476\_4) :**

- **réalisation d'un trou de forage et exécution d'essais pressiométriques dans ce forage.**
- **Dans la pratique, cette expression désigne aussi le profil des paramètres obtenus.**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Forage pressiométrique

■ ***forage pressiométrique*** : exécution du trou de forage.

■ **Contrairement aux forages d'exploration, priorité :**

- qualité
- précision du diamètre du trou de forage
- **NON** la qualité des échantillons prélevés



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Passes de forage suivant NF P 94-110-1

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 <sup>***</sup>
Argiles moyennement compactes	3 <sup>+</sup>
Argiles compactes, marnes raides	5
<b>Limons :</b>	
— au-dessus de la nappe	5
— sous la nappe	3 <sup>+</sup>
<b>Sables lâches :</b>	
— au-dessus de la nappe	3
— sous la nappe	1 <sup>***</sup>
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.	

Qualité du trou de forage :

$$1 < d_t/d_c < 1,15$$

$d_t$  diamètre de l'outil de forage  
 $d_c$  diamètre extérieur de la sonde.

Passes de forage trop longues détériorent les parois du trou de forage:

- flexion des tiges de forage,
- flambage des tiges de forage
- pression d'injection.



# Passes de forage

Table C.1 — Maximum continuous drilling or driving stage length before testing

Soil type	Maximum continuous drilling stage length (m)		
	Rotary drilling	Rotary percussion	Pushing, driving and vibrodri <sup>b</sup>
Sludge and soft clay, soft clayey soil	1 <sup>a</sup>	—	1 <sup>a</sup>
Medium stiff clayey soils	2	2	3
Stiff clayey soils	5	4	4
Silly soils:			
- above ground water table	4	3	3
- below water table	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Loose sandy soils:			
- above ground water table	3	2	—
- below water table	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Medium dense and dense sandy soils	5	5	4
Coarse soils: gravels, cobbles	3	5	3
Coarse soils with cohesion	4	5	3
Loose non homogeneous soils, non text book soils	2	3	2
Weathered rock, soft rock	4	5	3
Solid rock	e	e	—

<sup>a</sup> Or the required interval between two successive tests.  
<sup>b</sup> Not applicable to STD/TM technique.  
<sup>c</sup> Maximum length is a function of the number of tests in a working shift.

Qualité du trou de forage :

$$1 < d_t/d_c < 1,15$$

$d_t$  diamètre de l'outil de forage  
 $d_c$  diamètre extérieur de la sonde.

Passes de forage trop longues détériorent les parois du trou de forage:

- flexion des tiges de forage,
- flambage des tiges de forage
- pression d'injection.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



# Techniques de forage autorisées suivant NF P 94-110-1

Tableau C.1 — Méthodes de réalisation des forages pressiométriques

Nature des terrains	Forage préalable									Refoulement
	Rotation *					Battage et autres				
	TAM	TIN	THC	O DG IN	CAR	ROTOP	CAR BAT	CAR VBF	TF EM	
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+



# Techniques de forage autorisées suivant NF P 94-110-1

## 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<sub>s</sub>.*
- + *Éventuellement, forage préalable en petit diamètre (d<sub>i</sub> < d<sub>s</sub>).*
- *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)
T IN	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



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

37 JE SBGIMR-GBMS – LLN – 24 février 2011 – PHW - VF



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Techniques de forage autorisées

Table C.2 — Guidelines for pressuremeter probe placement techniques

		Probe placing without soil displacement											Probe placing with full soil displacement		
Boring technique		$1 < d_p/d_c \leq 1,15$													
		Rotary Drilling					Rotary percussion			Pushing, driving or vibrodriving			-		
Soil Type		HA	CFA *	ADM*	DTM	CD	RP	RPM	STDT M	PS	DS	VDS			DST
Sludge and soft clay		-	-	*** <sup>o</sup>	*** <sup>o</sup>	- <sup>■</sup>		-	-	*** TWS	-				■ *
Soft to medium stiff clayey soils		*** <sup>■</sup>	*** <sup>■</sup>	*** <sup>o</sup>	*** <sup>o</sup>	*** <sup>■</sup>	-	* <sup>o</sup>	* <sup>o</sup>	* <sup>■</sup>	* <sup>■</sup>	-		-	
Stiff clayey soils			***	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	*** <sup>o</sup>	*** <sup>o</sup>	* <sup>■</sup>	* <sup>o</sup>	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	-	* <sup>■</sup>	-		-	
Silty soils:															
- above water table		**	**	*** <sup>o</sup>	** <sup>o</sup>	* <sup>■</sup> <sup>o</sup>	-	* <sup>o</sup>	** <sup>o</sup>	* <sup>■</sup>	* <sup>■</sup>	*		-	-
- below water table		-	-	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	* <sup>■</sup> <sup>o</sup>	* <sup>■</sup> <sup>o</sup>	-	* <sup>o</sup>	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	-	-	-			■ *
Loose sandy soils:															
- above water table		**	**	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	** <sup>o</sup>	* <sup>■</sup>	-	* <sup>o</sup>	* <sup>o</sup>	- <sup>■</sup>	-	-		-	-
- below water table		-	-	*** <sup>o</sup>	* <sup>■</sup> <sup>o</sup>	- <sup>■</sup>	-	* <sup>o</sup>	*** <sup>■</sup> <sup>o</sup>	- <sup>■</sup>	-	-			■ * +



## Techniques de forage autorisées (suite)

Medium dense and dense sandy soils	♦♦	♦♦♦	♦♦♦○	♦♦♦○	♦○	♦	♦♦○	♦♦○	-	♦	♦				♦♦♦+
Coarse soils: gravels, cobbles		■	■○	♦♦○	■	♦	♦♦♦	♦♦		♦	♦				♦♦♦■+
Coarse soils with cohesion (e.g. boulder clay)		♦	♦○	♦♦○	♦♦■○	♦	♦♦♦	♦♦		♦	♦				
Loose non homogeneous soils, non textbook soils (e.g. tills, some alluvial deposits, man made soils, treated or untreated fills ...)		♦	♦○	♦♦○	♦○	♦	♦♦○	♦♦■	-	♦	♦				♦♦■+
Weathered rock, Soft rock		♦♦	♦♦○	♦♦♦○	♦♦■○	♦■	♦♦○	♦♦■		♦■	♦■			-	
Rock (see note below)				♦♦♦○	♦♦♦○	♦♦♦	♦♦♦○					♦■			

NOTE In rocks or any material with creep pressure exceeding 5 MPa, Ménard pressuremeter tests can be carried out ... However the corresponding test procedure and test interpretation are not covered by this standard.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



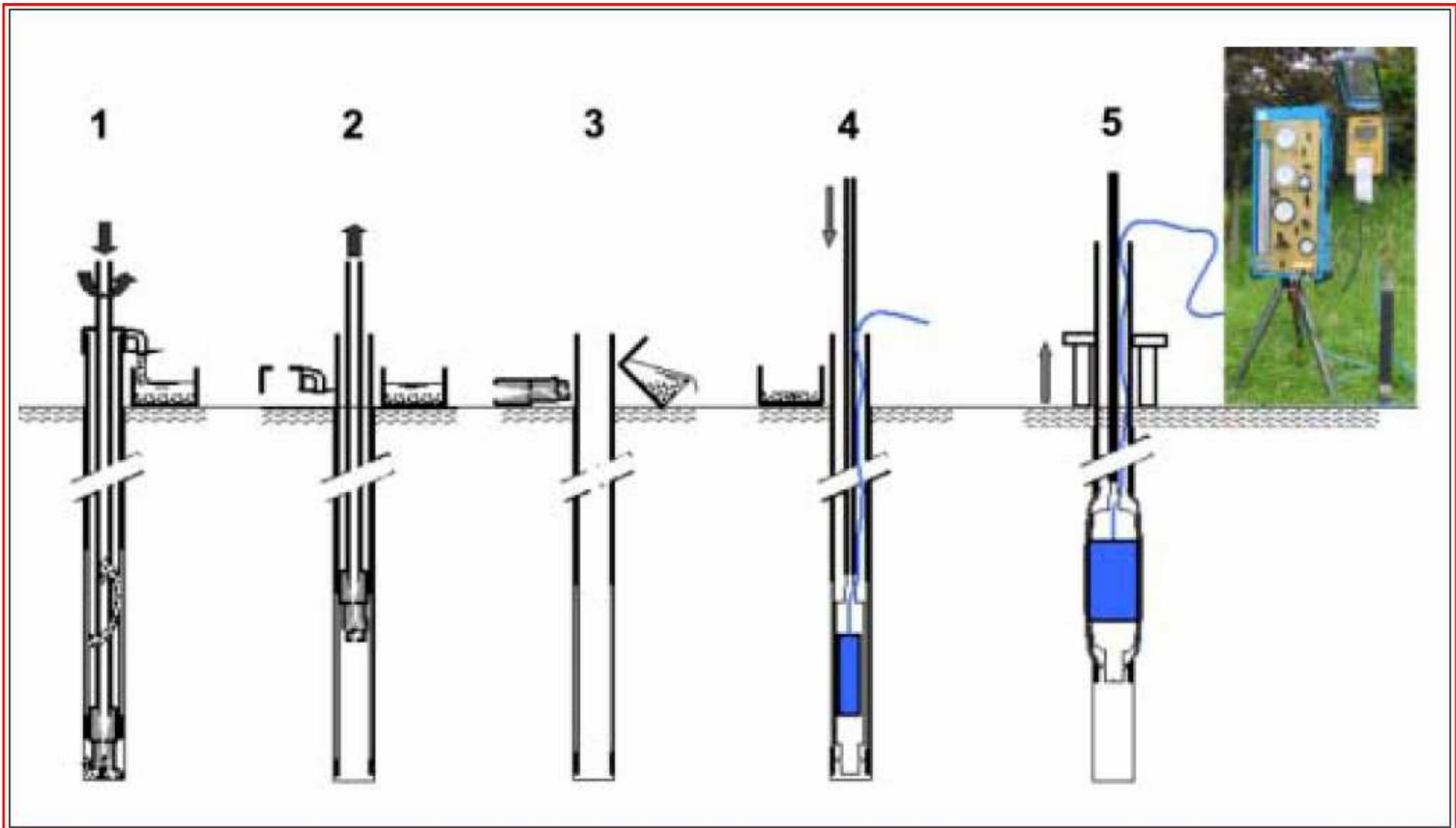
Service public de Wallonie

## Légende

***	Recommended	ADM	Auger with drilling mud	PS	Pushed sampler
**	Suited	HA	Hand auger (post-hole or small helical type)	DS	Driven sampler
*	Acceptable			VDS	Vibro driven sampler
-	Not suited	CFA	Continuous flight auger (in the dry)	STDTM	Slotted tube with inside disintegrating tool and mud circulation
	Not covered by this standard	DTM	Disintegrating tool (e.g. drag bit, rock roller bits,...) with mud circulation	DST	Driven slotted tube
		CD	Core drilling	TWS	Thin wall sampler
		RP	Rotary percussion	PFCO	Probe with flexible cover and open tapered shoe
		RPM	Rotary percussion with mud		

- Depending on the actual site conditions and on the evaluation of the operator -
- \* Rotation speed should not exceed 60 rpm and tool diameter not be more than  $1,15 d_c$
- Slurry circulation: pressure should not exceed 500 kPa and the flowrate 15 l/min. The flow may be temporarily interrupted if necessary.
- ▲ With special care meaning add a guard tube at the toe of the slotted tube, carry out the tests while going down, keep slurry level in casing higher than water table level.
- + Pilot hole with possible preboring techniques: DTM, , RP,RPM,

# Techniques de forage- STAF ® - Système de tubage autoforé



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Distance verticale entre essais

- **Dist. minimale entre essais successifs = 0,75m**
- **Distance habituelle = 1m**
- **Distance minimale entre le premier essai et la surface du sol = 0,75m**
- **Distance minimale entre fond de trou plus large (<0,60m) et haut de l'essai = 0,5m**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Table des matières

- 1. Le pressiomètre**
- 2. Procédure d'essai et présentation des résultats**
- 3. Calcul de  $p_f$ ,  $p_l$  et  $E_M$**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



## **3 : Calcul de $p_f$ , $p_l$ et $E_M$**

### **1. Modélisation de la courbe pressiométrique**

### **2. Pression de fluage**

### **3. Pression limite**

1. Solution directe

2. Méthodes d'extrapolation

**1. Méthode réciproque ( $1/V$ )**

**2. Méthode hyperbolique simple**

**3. Méthode de la double hyperbole**

**4. Choix de la valeur la mieux adaptée**

### **4. Module pressiométrique Ménard**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

### 3.1. Modélisation de la courbe pressiométrique (double hyperbole)

- Modélisation complète faisant intervenir les trois paramètres  $p_f$  ,  $p_l$  et  $E_M$
- Droite tangente à deux segments d'hyperboles définis par l'équation

$$V = A_1 + A_2 \times p + \frac{A_3}{(A_5 - p)} + \frac{A_4}{(A_6 - p)}$$

Coefficients  $A_5$  et  $A_6$  = abscisses des asymptotes verticales de chaque hyperbole.



# Double hyperbole (suite)

- Matrice de 4 coefficients  $[A] = [A_1, A_2, A_3, A_4]$  obtenue pour des valeurs de  $A_5$  et  $A_6$ , par la transformation matricielle

$$[A] = [X^t \times X]^{-1} \times [X^t \times V]$$

- Avec

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \quad [X] = \begin{bmatrix} 1 & p_1 & 1/(A_5 - p_1) & 1/(A_6 - p_1) \\ 1 & p_i & 1/(A_5 - p_i) & 1/(A_6 - p_i) \\ 1 & \dots & \dots & \dots \\ 1 & p_n & 1/(A_5 - p_n) & 1/(A_6 - p_n) \end{bmatrix}$$

- $A_5$  et  $A_6$  obtenus par une analyse de moindres carrés sur  $[V]$  basée sur la méthode de Gauss/Newton



## Rappel : Calcul de $p_f$ , $p_l$ et $E_M$

- Modélisation de la courbe pressiométrique
- **Module pressiométrique Ménard**
- Pression de fluage
- Pression limite
  - Solution directe
  - Méthodes d'extrapolation
    - Méthode réciproque ( $1/V$ )
    - Méthode hyperbolique simple
    - Méthode de la double hyperbole
    - Choix de la valeur la mieux adaptée





# Module pressiométrique Ménard

- **Plage pseudo-élastique**
- **Module pressiométrique**
  - Gaine souple
  - Tube fendu
  - Relation entre  $E_M$  et  $p_L$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



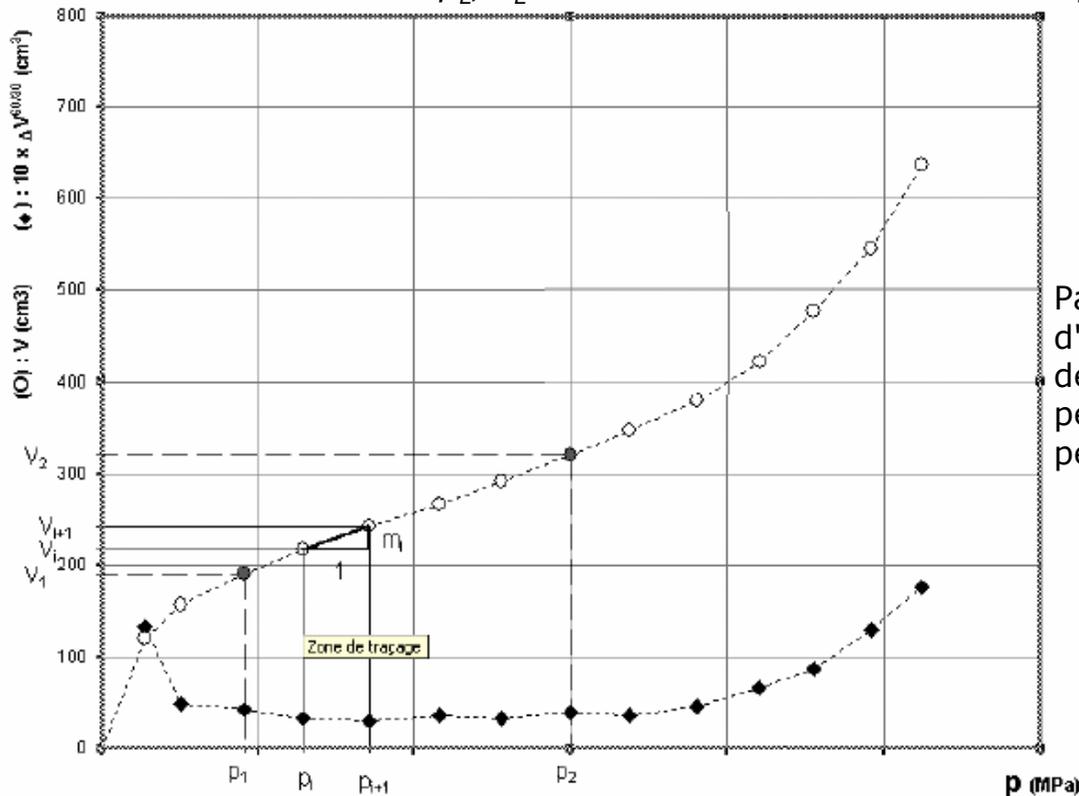
Service public de Wallonie

# Détermination conventionnelle de la plage pseudo-élastique

La courbe pressiométrique corrigée est constituée d'une succession de segments de pente

$$m_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{p_i - p_{i-1}}$$

$p_i, v_i$  coordonnées de l'extrémité du segment  $i$   
 $m_E$  valeur  $m$ , non nulle, la plus faible ( $E_M$  le plus grand)  
 $p_{E'}, v_{E'}$  coordonnées de l'origine du segment de pente  $m_E$   
 $p_{E''}, v_{E''}$  coordonnées de l'extrémité  $p_{E'}, v_{E'}$



Par définition, la plage pseudo élastique d'un essai pressiométrique est constituée de l'ensemble des segments qui ont une pente  $m$  inférieure ou égale à  $\beta$  fois la pente  $m_E$  la plus faible

$$m \leq \beta m_E$$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Détermination conventionnelle de la plage pseudo-élastique (suite)

- $\beta$  est un coefficient qui tient compte des incertitudes sur les mesures. Il s'exprime par

$$\beta = 1 + \delta p \cdot \frac{p_{E'} + p_E}{p_{E'} - p_E} + \frac{2\delta v}{v_{E'} - v_E}$$

En pratique, les valeurs retenues sont les suivantes

$\delta p$  = erreur relative sur la mesure de la pression = 1/100

$\delta v$  = erreur absolue sur la mesure du volume de liquide injecté = 3cm<sup>3</sup>

Par convention, les coordonnées de l'origine de la plage pseudo élastique sont notées  $p_1, v_1$  et celles de son extrémité  $p_2, v_2$ .



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



# Module pressiométrique Ménard

- Phase pseudo-élastique
- **Module pressiométrique**
  - Gaine souple
  - Tube fendu
  - Relation entre  $E_M$  et  $p_L$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

## Module pressiométrique Gaine souple

On en déduit le module pressiométrique qui, par définition dans le cas d'une gaine souple, s'exprime par

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

$\nu$  = coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33

$V_s$  = volume de la cellule centrale de mesure de la sonde

$p_2, V_2$  = pression et volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudo élastique

$p_1, V_1$  = pression volume correspondant à l'origine de la plage pseudo élastique

$p_2$  doit être inférieur ou égal à  $p_f$  .



# Module pressiométrique

## Tube fendu

Bien que le calcul précédent soit couramment utilisé dans le cas du tube fendu, certains auteurs utilisent l'expression suivante

$$E_M = 2(1 + \nu) \sqrt{(V_m + V_c)(V_m + V_t)} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$

Avec

$$V_c = \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \cdot l_c$$

**volume de la cellule centrale après calibrage**

$$V_t = \pi \cdot \frac{d_{pf}^2}{4} \cdot l_c$$

**volume intérieur du tube fendu et**  $V_m = (V_1 + V_2) / 2.$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie



## Rappel : Calcul de $p_f$ , $p_l$ et $E_M$

### ■ Modélisation de la courbe pressiométrique

### ■ **Pression de fluage**

### ■ **Pression limite**

#### ■ Solution directe

#### ■ Méthodes d'extrapolation

##### ■ **Méthode réciproque ( $1/V$ )**

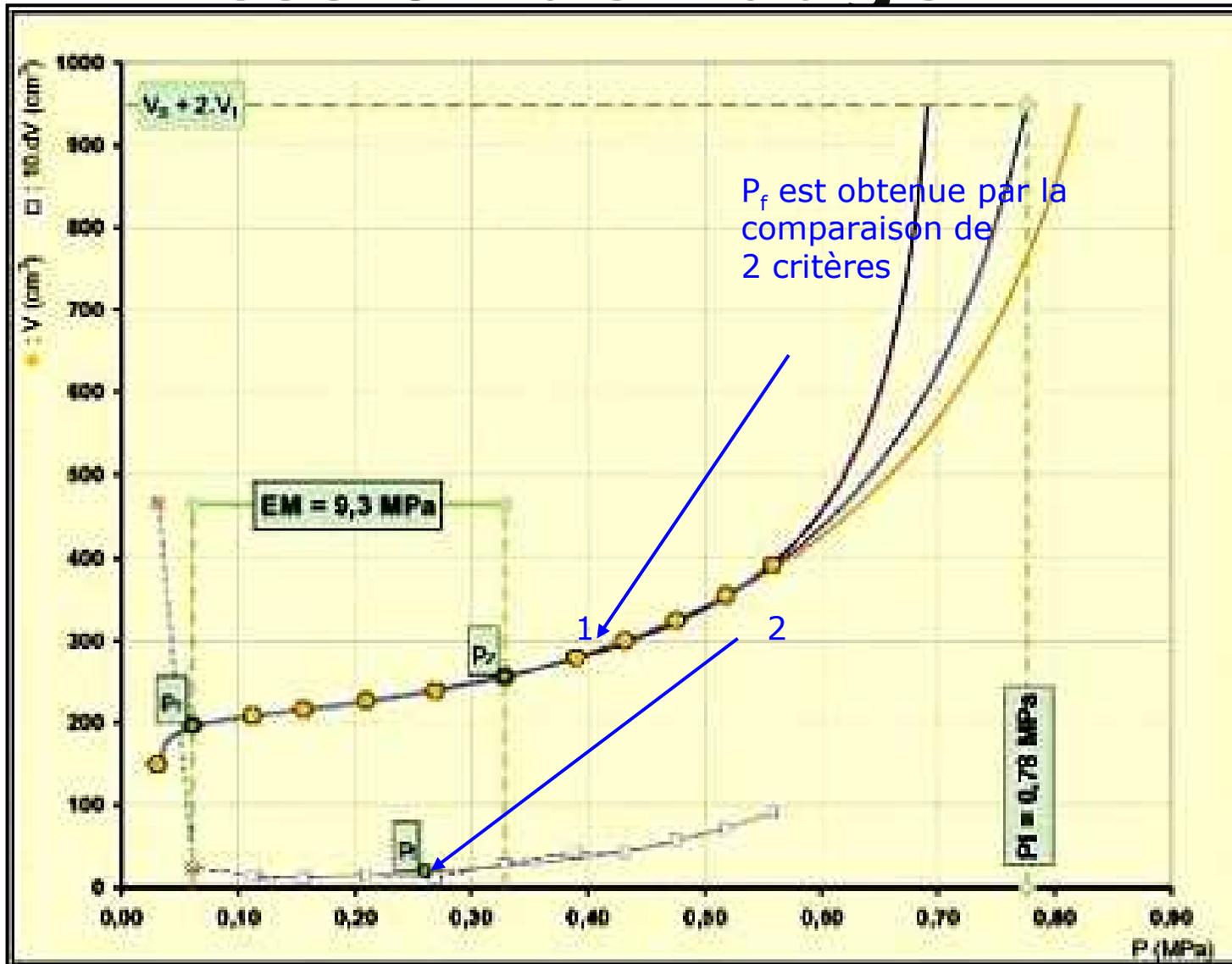
##### ■ **Méthode hyperbolique simple**

##### ■ **Méthode de la double hyperbole**

##### ■ **Choix de la valeur la mieux adaptée**



# 3.2. Pression de fluage



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Rappel : Calcul de $p_f$ , $p_l$ et $E_M$

## ■ Modélisation de la courbe pressiométrique

## ■ Pression de fluage

## ■ **Pression limite**

### ■ Solution directe

### ■ Méthodes d'extrapolation

#### ■ Méthode réciproque ( $1/V$ )

#### ■ Méthode hyperbolique simple

#### ■ Méthode de la double hyperbole

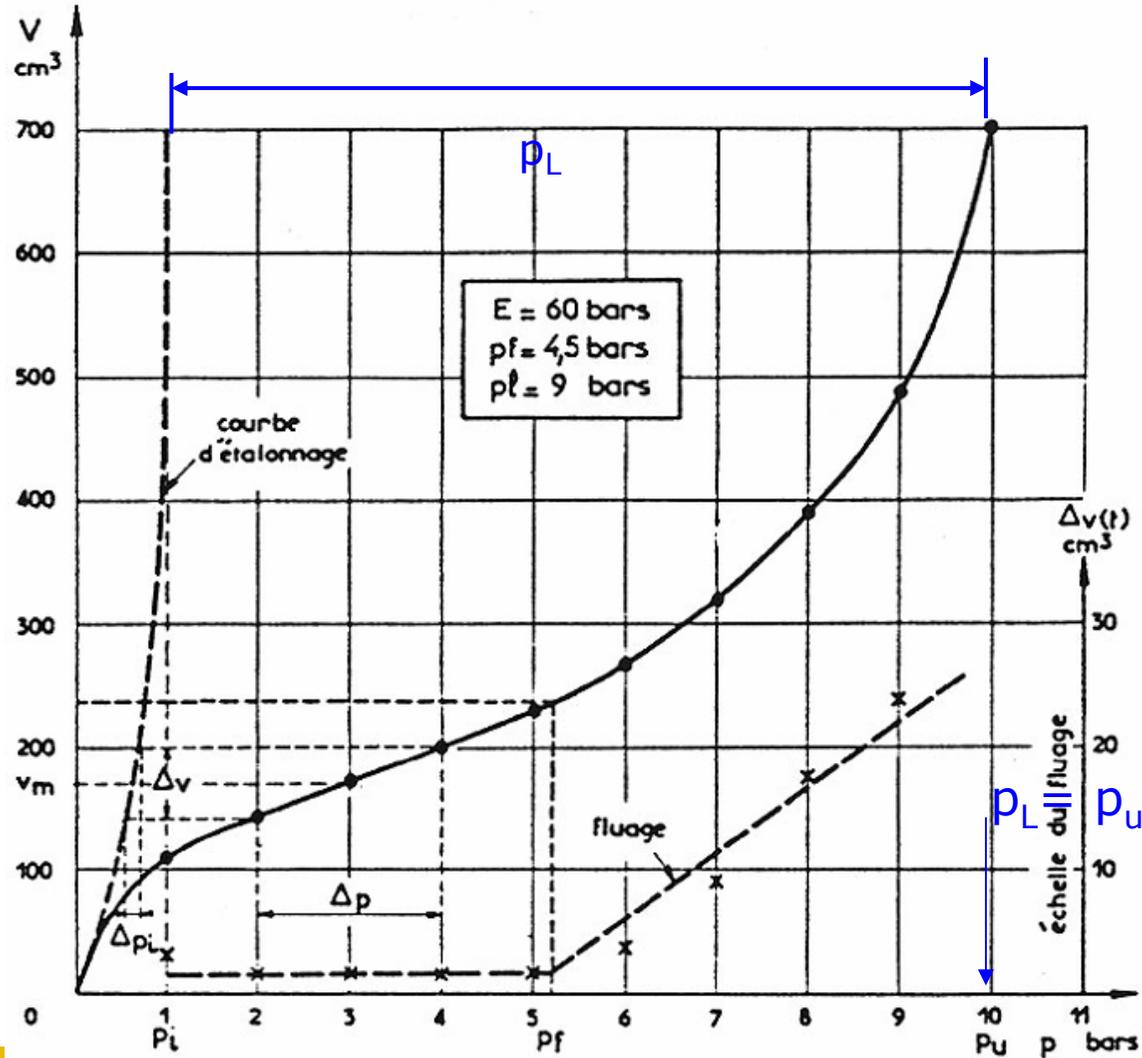
#### ■ Choix de la valeur la mieux adaptée

## ■ Module pressiométrique Ménard



# Pression limite : méthode directe

Attention:  
Courbe non  
corrigée



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

## $p_L$ : Méthode réciproque (courbe inverse)

1. Transformer les lectures de couples  $(p, V)$  en  $(p, 1/V)$
2. Appliquer une régression linéaire sur au moins 3 lectures.
3. La pression limite est donnée par

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



# Méthode hyperbolique simple

- On utilise la transformation  $Y = CX - D$  dans laquelle

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

- C et D sont obtenus par une analyse des moindres carrés de X sur Y.
- La pression limite est obtenue pour

$$V_L = V_c + 2 V_1$$

$$p_{LMH} = \frac{p_E (V_E^2 + D) + C (V_1^2 - V_E^2)}{(V_1^2 + D)}$$



# Méthode de la double hyperbole

La pression limite  $P_{LMDH}$  est obtenue pour

$$V_L = V_c + 2 V_1$$

à partir de l'équation de la double hyperbole.

On cherche l'unique solution positive telle que

$$0 < p_{LMDH} < A_6$$

de l'équation du troisième degré

$$-A_2 \cdot p_{LMDH}^3 + [V - A_1 + A_2(A_5 + A_6)] \cdot p_{LMDH}^2 + [(A_1 - V)(A_5 + A_6) - A_5 \cdot A_6 \cdot A_2 + A_3 + A_4] \cdot p_{LMDH} + [(V - A_1) \cdot A_5 \cdot A_6 - A_3 \cdot A_6 - A_4 \cdot A_5] = 0$$



# Choix de la meilleure valeur de $p_L$

La différence entre chaque valeur  $p_{ix}$  et la moyenne

$$\bar{p}_l = (p_{li} + p_{lh} + p_{ldh}) / 3$$

est utilisée pour éliminer une valeur si

$$|(p_{ix} - p_l) / p_l| > 0,2$$

La somme des erreurs  $\sum_i (V_{\text{calculé}} - V_{\text{mesuré}})$  pour chaque courbe est calculée et divisée par le nombre de points utilisés.

La pression limite retenue  $p_{LM}$  est celle qui donne l'erreur moyenne la plus faible.



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

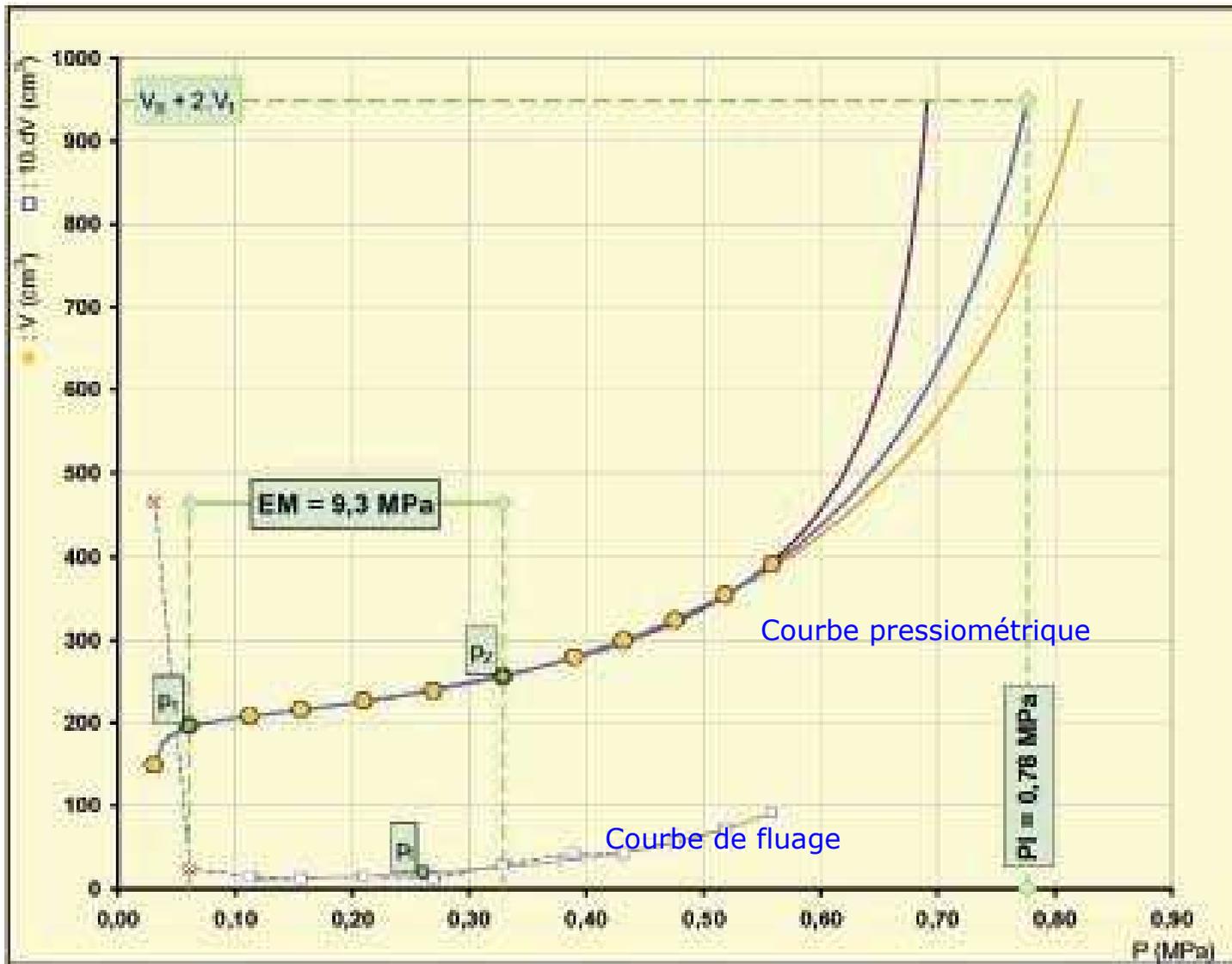


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Résultat final



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Pression limite et de fluage nette

C'est la pression limite nette comptée par rapport à la contrainte totale horizontale dans le terrain avant introduction de la sonde au même niveau :

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

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



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS



OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Pression limite et de fluage nette

Contraintes dans le terrain au repos avant essai :

$\sigma_{vs}$  est la contrainte totale verticale au niveau de l'essai

$\sigma_{hs}$  est la contrainte totale horizontale au niveau de l'essai

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

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

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

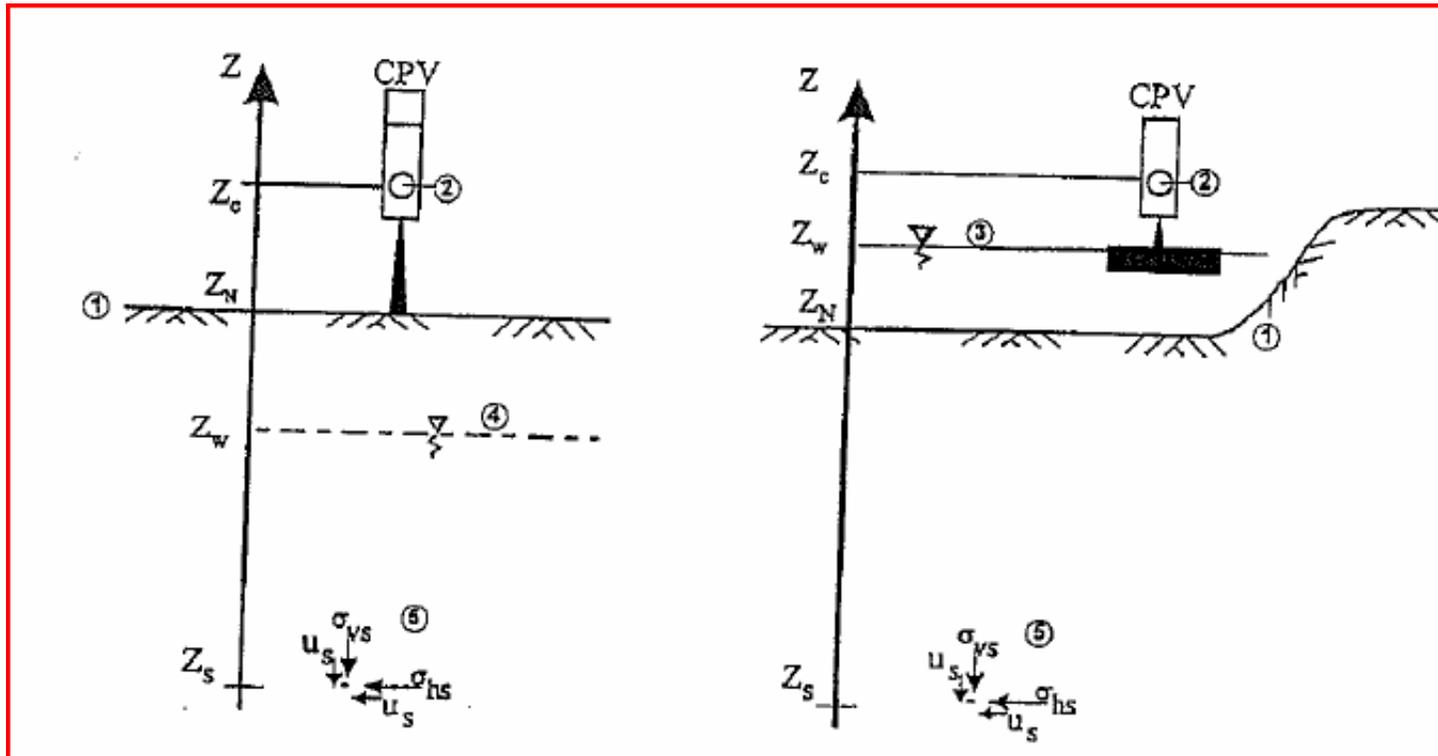
$K_0$  étant le coefficient de poussée des terres dans le terrain au repos au niveau de l'essai (conventionnellement = 0,5)

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

$\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau interstitielle



# Pression limite et de fluage nette



En site **terrestre** (figure de gauche) :  $\sigma_{vs} = \gamma(z_N - z_s)$

On adopte généralement :  $u_s = \gamma_w(z_w - z_s)$

En site **aquatique** (figure de droite) :  $\sigma_{vs} = \gamma_w(z_w - z_N) + \gamma(z_N - z_s)$



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

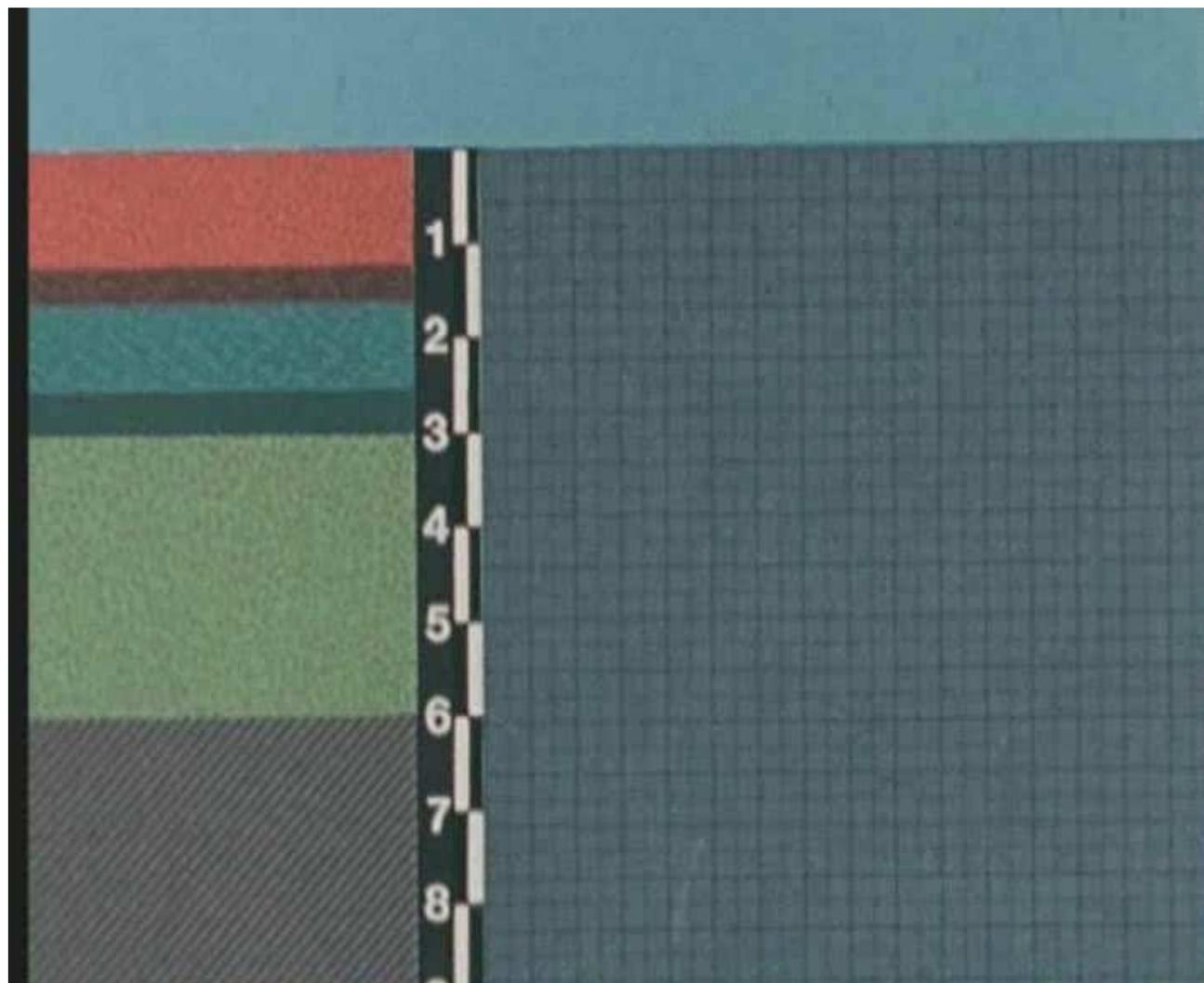


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Procès-verbal de sondage pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

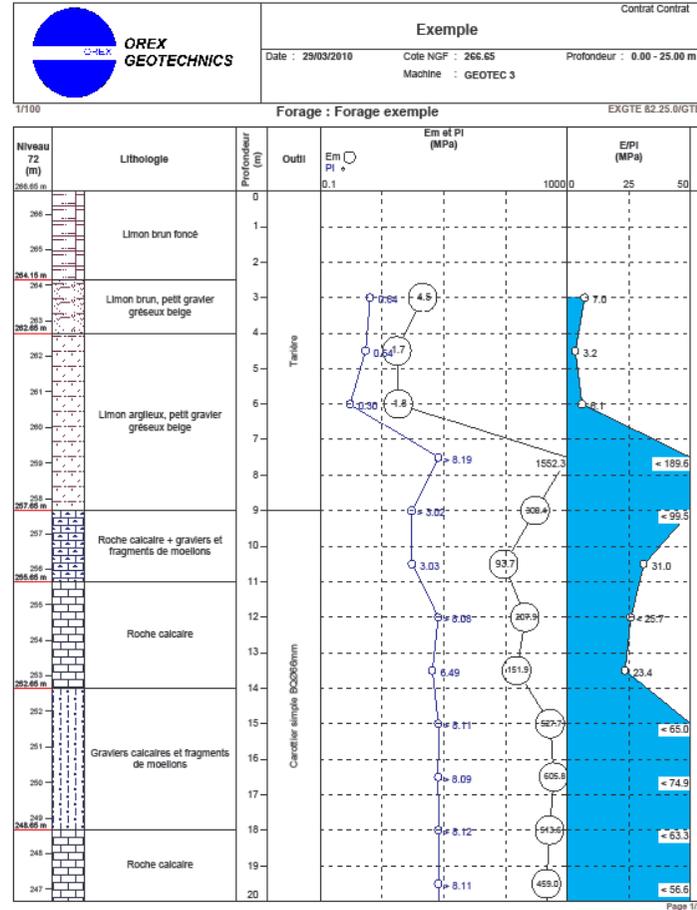


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Procès-verbal de sondage pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

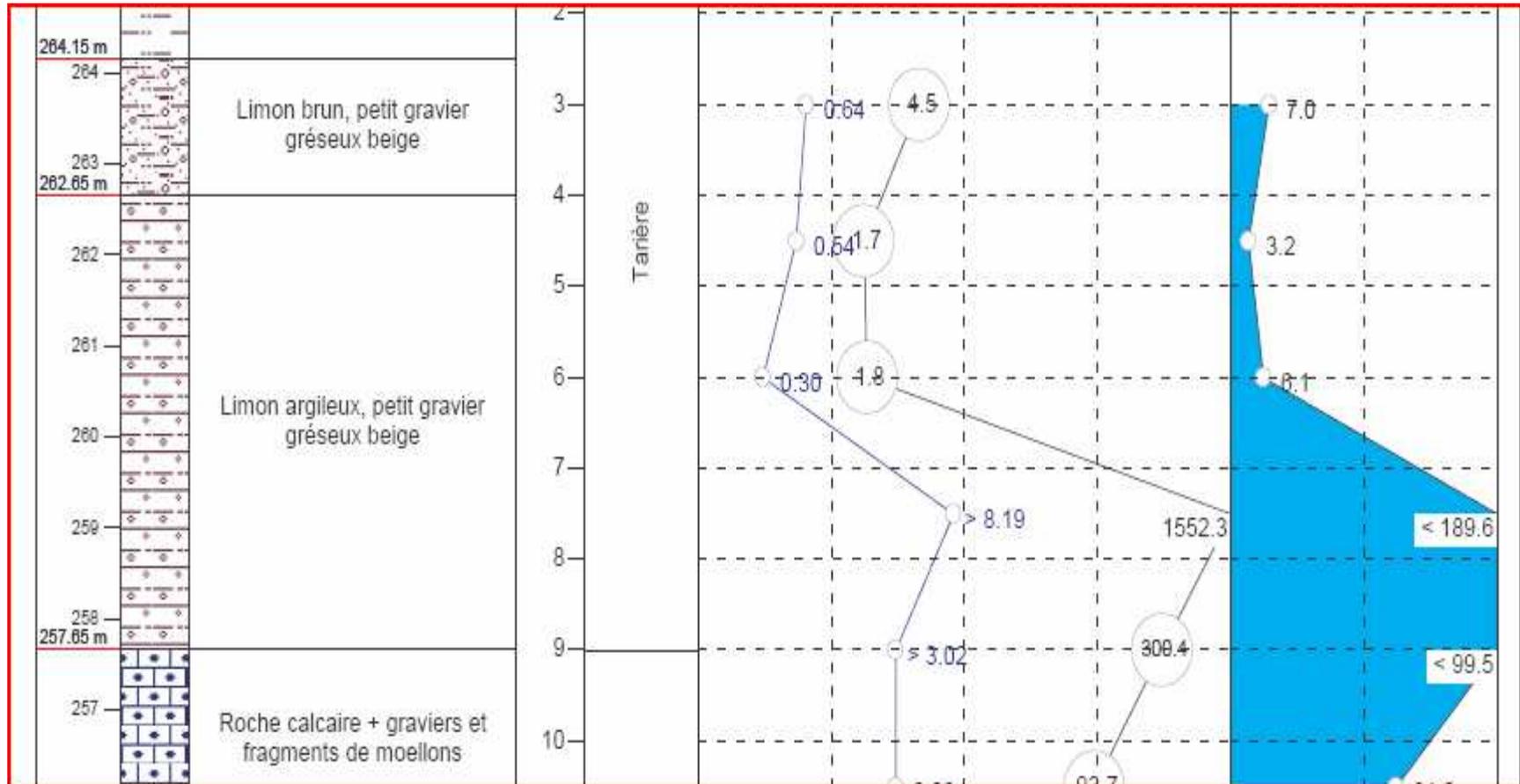


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Procès-verbal de sondage pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

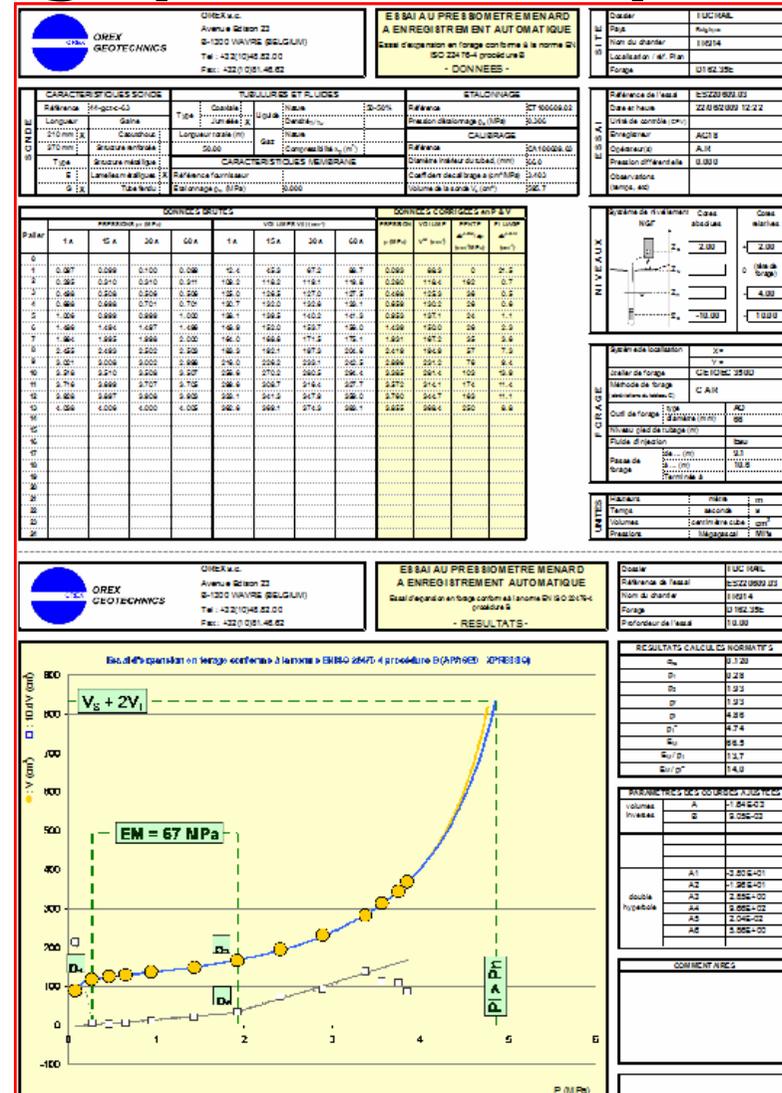
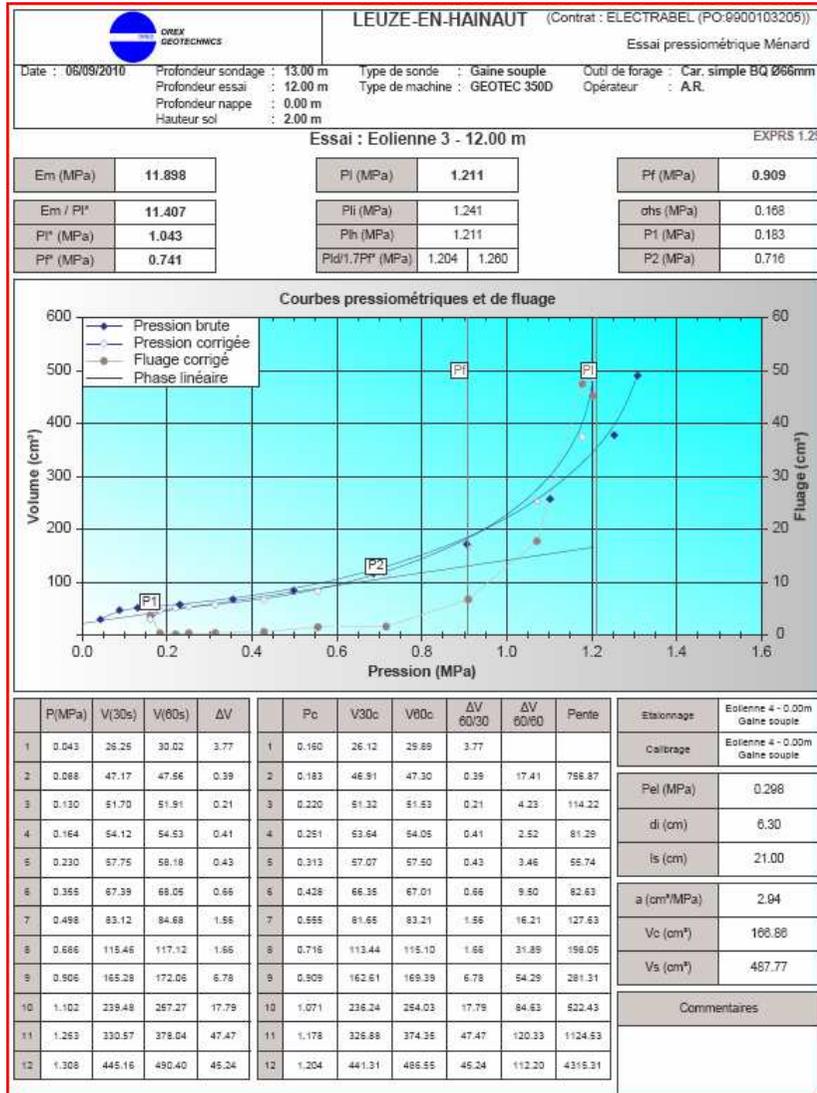


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Procès-verbal de sondage pressiométrique



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DES ROUTES ET DES BÂTIMENTS

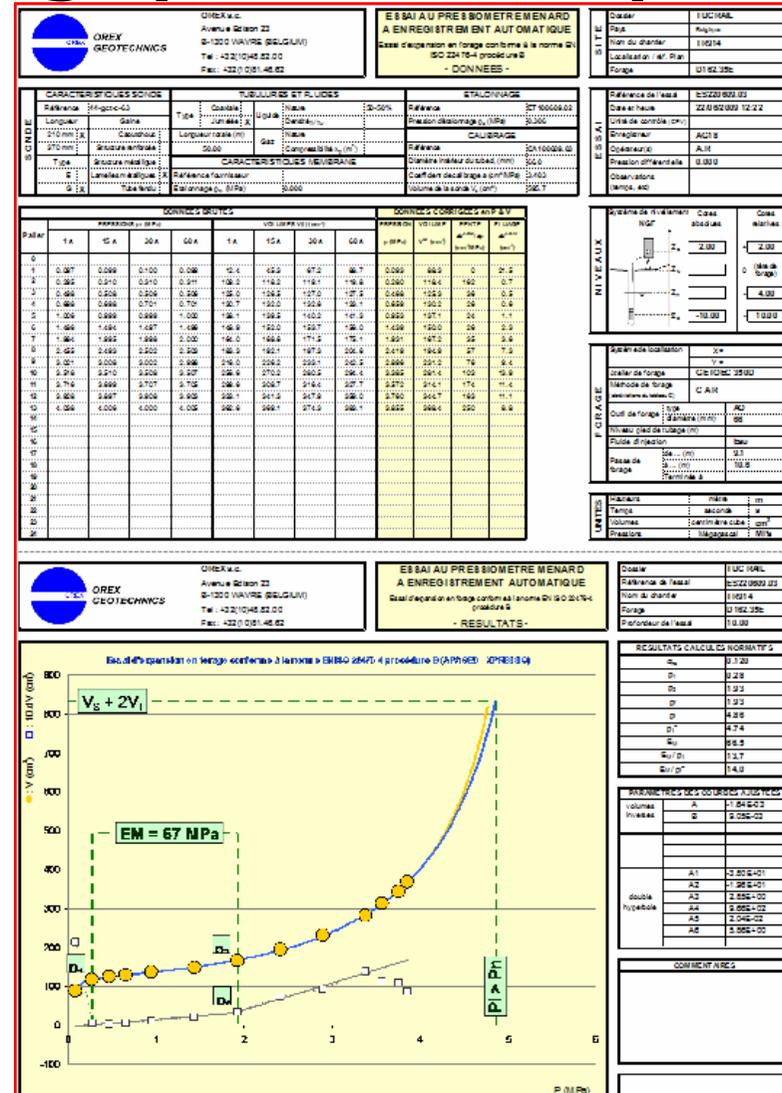
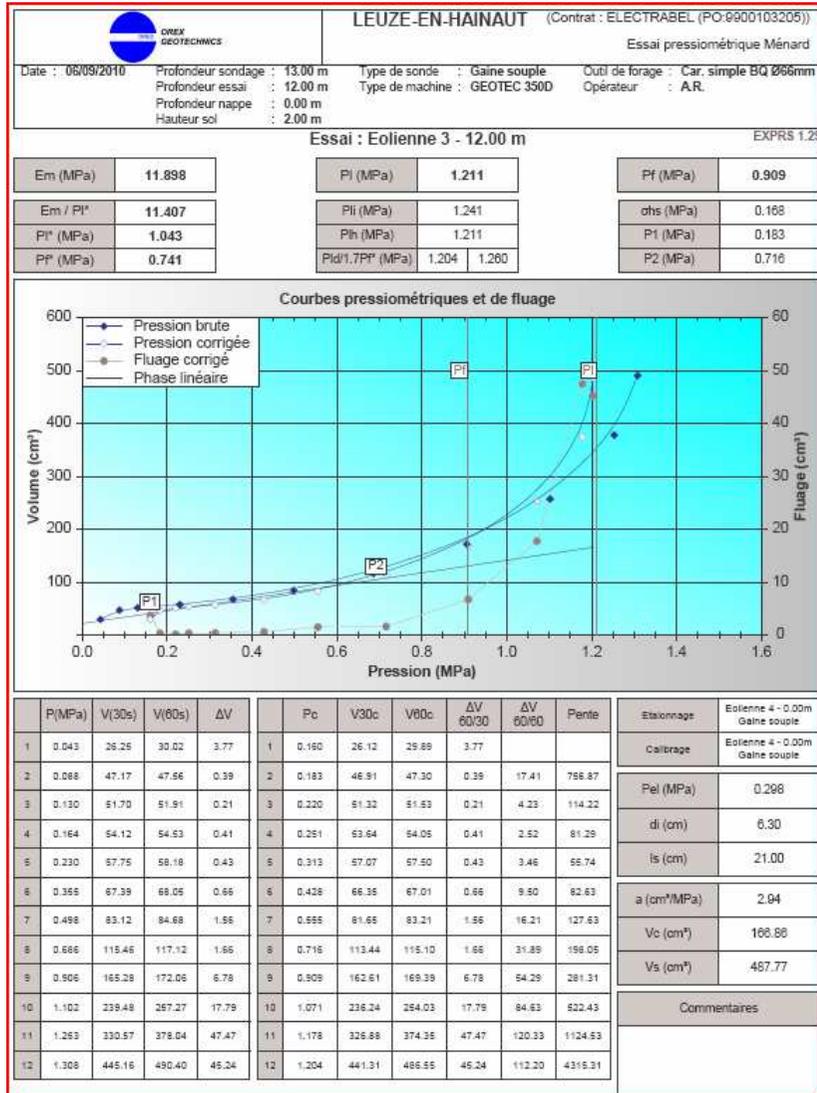


OREX  
GEOTECHNICS



Service public de Wallonie

# Procès-verbal de sondage pressiométrique



# Procès-verbal de sondage pressiométrique

	<b>LEUZE-EN-HAINAUT</b> (Contrat : ELECTRABEL (PO:9900103205))		
	Essai pressiométrique Ménard		
Date : <b>15/09/2010</b>	Profondeur sondage : <b>4.00 m</b>	Type de sonde : <b>Gaine souple</b>	Outil de forage : <b>Car. simple BQ Ø66mm</b>
	Profondeur essai : <b>3.00 m</b>	Type de machine : <b>GEOTEC 350D</b>	Opérateur : <b>A.R.</b>
	Profondeur nappe : <b>0.00 m</b>		
	Hauteur sol : <b>2.00 m</b>		
<b>Essai : Eolienne 1 - 3.00 m</b>			<b>EXPRS 1.29</b>
Em (MPa)	<b>3.718</b>	PI (MPa)	<b>0.461</b>
Em / PI*	<b>8.874</b>	Pli (MPa)	0.461
PI* (MPa)	<b>0.419</b>	Plh (MPa)	0.461
Pf* (MPa)	<b>0.297</b>	Pld/1.7Pf* (MPa)	0.461   0.505
		Pf (MPa)	<b>0.339</b>
		σhs (MPa)	0.042
		P1 (MPa)	0.086
		P2 (MPa)	0.271

	P(MPa)	V(30s)	V(60s)	ΔV		Pc	V30c	V60c	ΔV 60/30	ΔV 60/60	Pente	Etalonnage	Eolienne 2 - 0.00m Gaine souple
1	0.033	6.27	6.55	0.28	1	0.086	6.15	6.43	0.28			Calibrage	Eolienne 2 - 0.00m Gaine souple
2	0.059	10.56	11.16	0.60	2	0.107	10.35	10.95	0.60	4.52	215.14	PeI (MPa)	0.266
3	0.095	17.02	17.79	0.77	3	0.137	16.69	17.46	0.77	6.50	216.77	di (cm)	6.30
4	0.124	25.45	25.60	0.15	4	0.158	25.01	25.16	0.15	7.71	367.05	Is (cm)	21.00
5	0.167	34.47	35.38	0.91	5	0.191	33.88	34.79	0.91	9.63	291.76	a (cm³/MPa)	3.53
6	0.224	49.02	51.08	2.06	6	0.232	48.23	50.29	2.06	15.50	378.02	Vc (cm³)	158.68
7	0.291	75.51	78.66	3.15	7	0.271	74.48	77.63	3.15	27.34	701.13	Vs (cm³)	495.94
8	0.400	126.07	134.26	8.19	8	0.339	124.66	132.85	8.19	55.22	812.00	Commentaires	
9	0.500	201.69	222.67	20.98	9	0.392	199.93	220.91	20.98	88.06	1661.45		
10	0.601	320.94	374.56	53.62	10	0.445	318.82	372.44	53.62	151.53	2859.13		
11	0.656	475.21	539.04	63.83	11	0.461	472.90	536.73	63.83	164.29	10267.88		



