

L'optimisation  
de la conception  
des procédés  
et des performances



nouvelles **A**pproches de **R**econnaissance  
des **S**ols et de **C**onception des **O**uvrages  
géotechniques avec le **P**ressiomètre



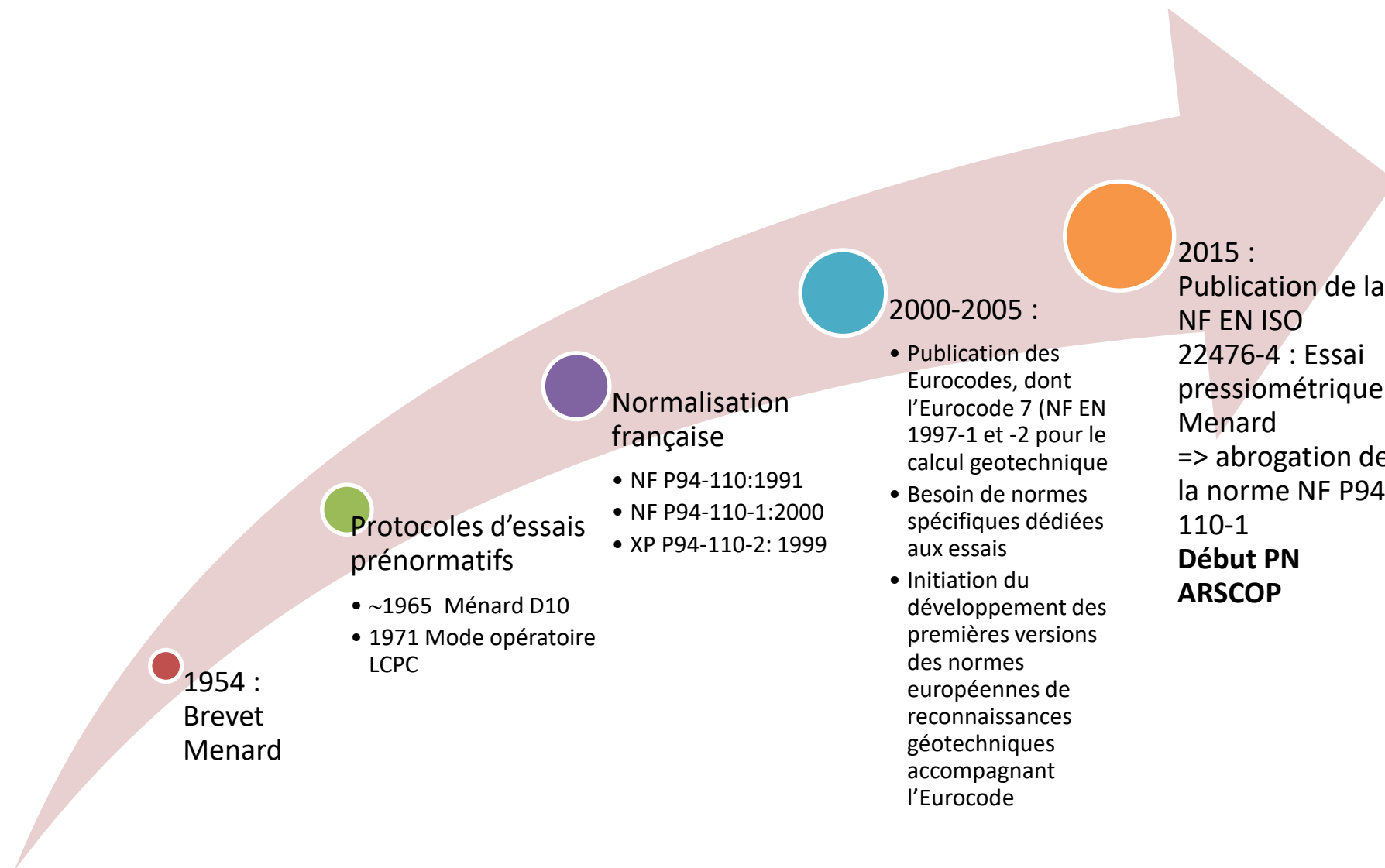
# Journée de restitution

## Essais d'expansion en forage : normalisation en France et en Europe

*Jean-Pierre BAUD (Eurogéo)*

*Julien HABERT (Terrasol)*

1. Organisation normative au début du PN ARSCOP
2. Apports du PN, mise en place de la sonde
3. Evolutions et organisation actuelle
4. Evolutions à venir



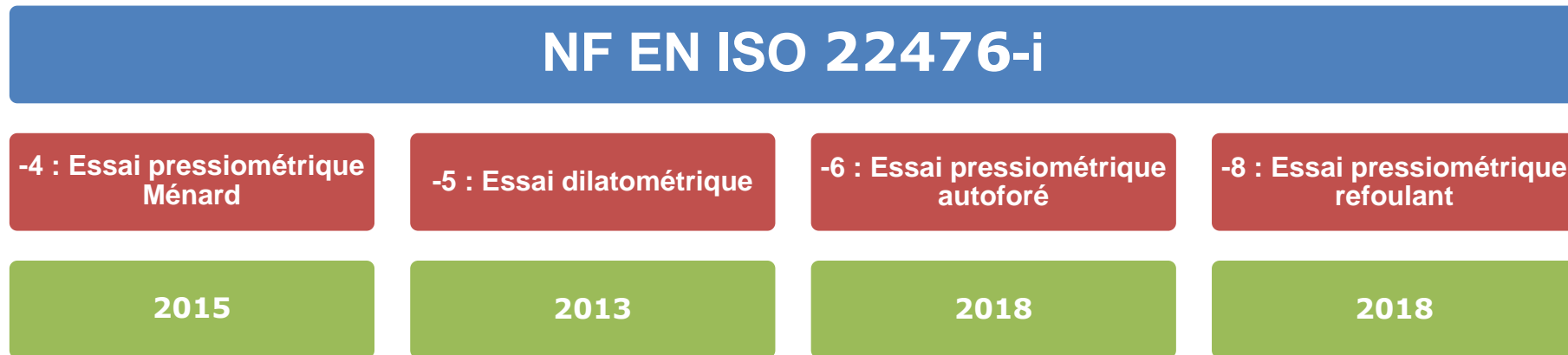
Des normes d'essais développées par le CEN (\TC341) pour accompagner l'Eurocode 7,

Reprises au niveau ISO (\TC182) : accords de Vienne

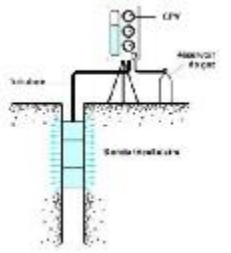
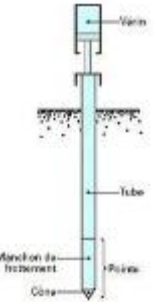
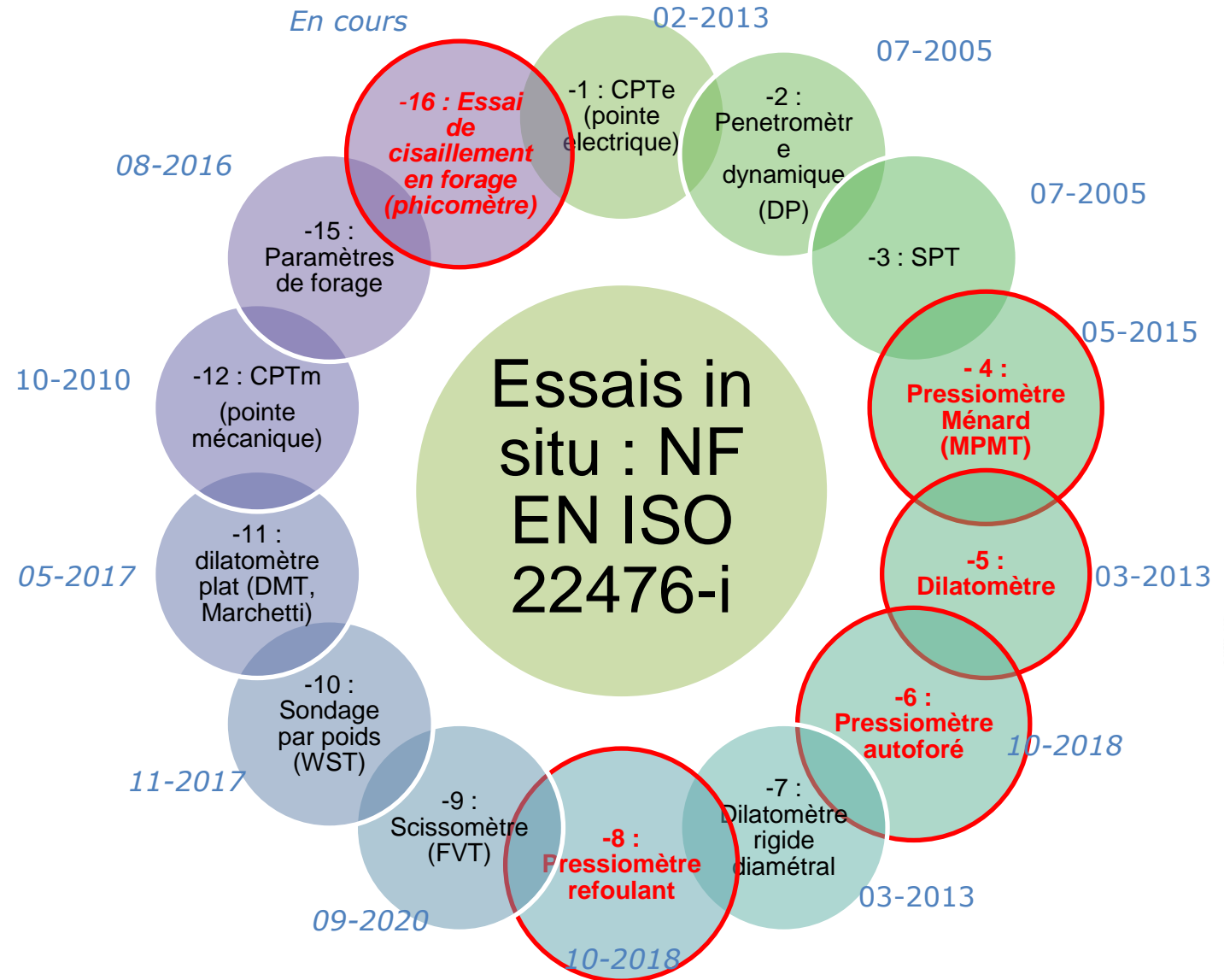
⇒ normes NF EN ISO 22476-i

Normes d'essais d'expansion en forage organisées en 4 documents :

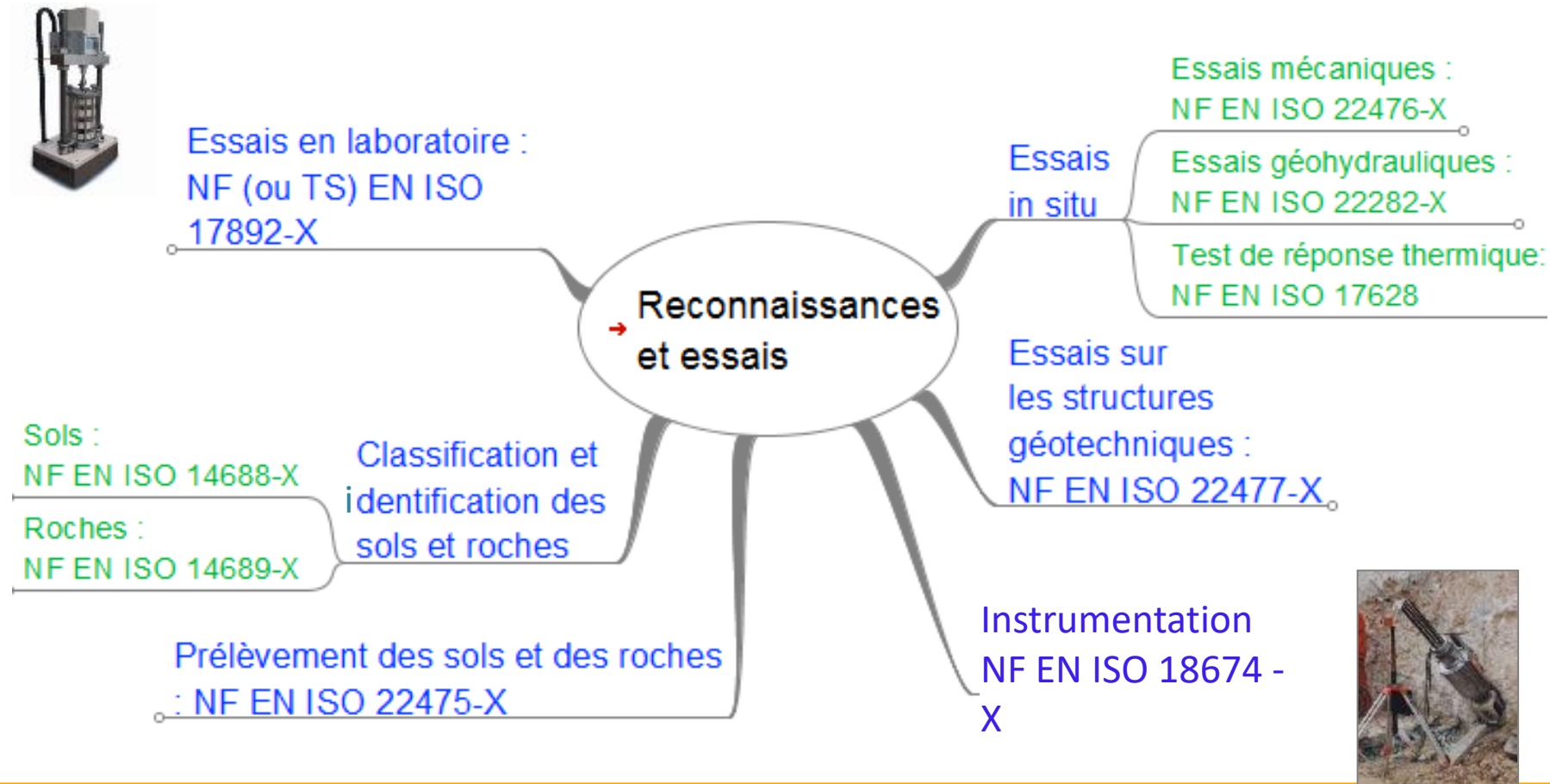
- selon la technique de mise en place de la sonde
- une spécificité (22476-5) pour les dilatomètres



Des normes d'essais d'expansion en forage qui s'inscrivent dans la série des essais in situ mécaniques



Des normes d'essais in situ s'inscrivent elles-mêmes dans le panel de normes EN ISO sur les investigations géotechniques



## Normes NF EN ISO 22476-i : différents niveaux de directivité

Norme directive, dans la continuité de la pratique française

Des normes plus ouvertes

Protocole fixé (matériel, programme de chargement, etc.)

Différents protocoles

Paramètres dérivés et méthodes de dérivation fixés

Paramètres dérivés et méthodes associées non fixés

-4 : Essai pressiométrique Ménard

-5 : ~~Essai dilatométrique~~  
→ Essai pressiométrique

-6 : Essai pressiométrique autoforé

-8 : Essai pressiométrique refoulant

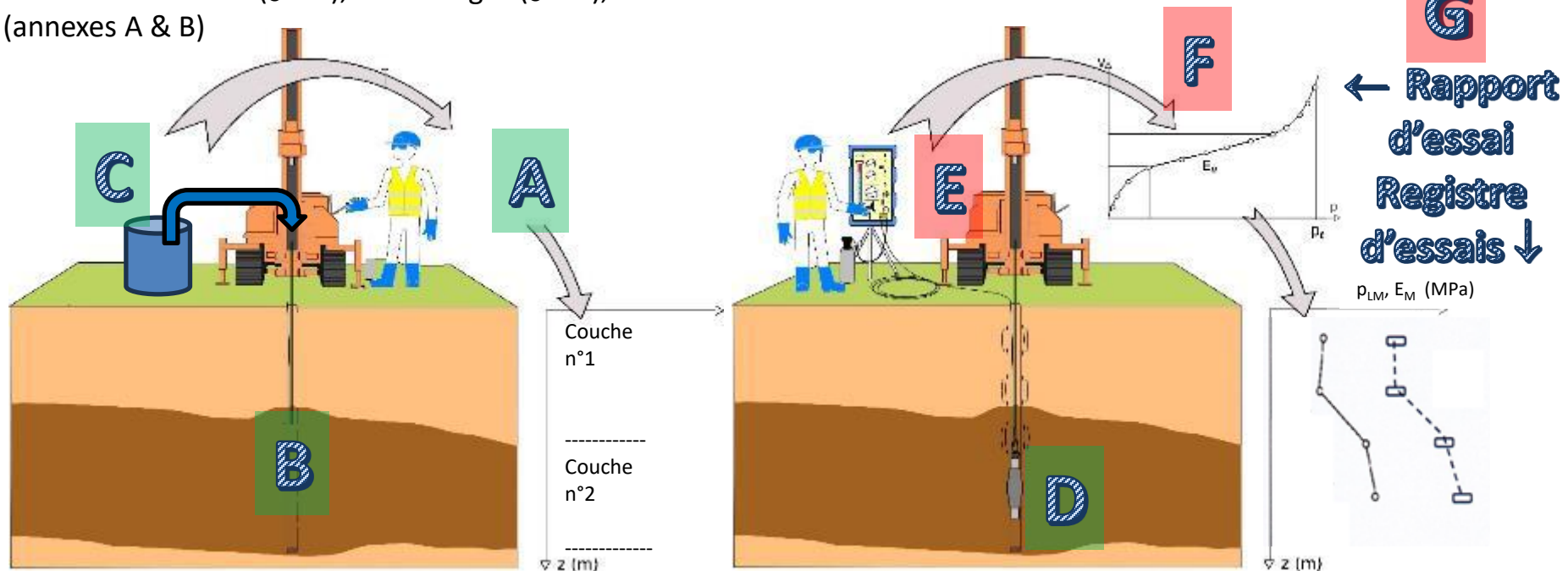
1 passe de forage de quelques mètres → 1 temps de manœuvre limité → 1 passe de 1 à 5 essais  
 (annexe C.1.2, annexe C.2 et tableau C2) (annexe C.1.3) (tableau C1)

Spécifications **conseillées** pour :

- A** Compte-rendu de forage
- B** Diamètre des outils (C.2.2)
- C** Utilisation d'une boue de forage (Avant-propos Nat.)
- D** Choix des sondes (§ 4.2), étalonnages (§ 5.2), (annexes A & B)

Spécifications **imposées** pour :

- E** Enregistrement des données d'essai, type A ou **B** (§ 1 & avant-propos, § 6.1)
- F** Protocole Ménard (§5.4 à 5.7)
- G** Calculs normatifs (§6 & annexe D)



**G** Calcul des paramètres pressiométriques et consignation dans un rapport (§6.3, 7 & annexe D)



## ► Mise en place de la sonde (1/2)

- Longueur maximale de passe
- Techniques de forage
- (Paramètres de forage)

## ► Exemple des longueurs de passe

Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté <sup>b</sup>	Roto percusion <sup>b</sup>	Battage, fonçage et vibrofonçage du tube lisse <sup>c</sup>
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>	—	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons:			
— au-dessus de la nappe	4	3	3
— sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables lâches:			
— au-dessus des eaux souterraines	3	2	—
— sous la nappe	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers: graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.  
<sup>b</sup> Se référer au Tableau C.2 pour les techniques acceptables.  
<sup>c</sup> Non applicable à la technique TFEM (voir C.2.6.3).

## ► Mise en place de la sonde (2/2)

ISO 22476-4:2012(F)		Tableau C.2—Lignes directrices pour les techniques de placement de la sonde pressiométrique														
		Placement de la sonde <b>sans refoulement</b> de sol											avec fonçage direct			
		$1 < dt/dc \leq 1.08$														
Type de sol ↓	Technique de forage →	Forage rotatif				Rotopercussion			Tube battu, foncé ou vibrofoncé			Tube fendu foncé				
		OHD	HA/HAM	CFA	CD	RP	RPM	STDTM	PT	DT	VDT	DST				
	en français	ODG	TAM/TAM+B	THC	CAR	ROTOP	ROTOP+B	TFEM	TAPM	TB	TVB-TVF	BTFD				
FINS	Vase et argile molle	**	o	***	o	—	■	■	■	■	■	■	■	■	*	■
	Argiles moyennement compactes	***	o	***	o	**	■	**	■	—	*	o	*	■	*	■
	Argiles compactes	***	o	**	o	***	■	***	■	*	■	**	o	*	■	■
	Limons secs	**	o	***	o	**	■	**	■	—	*	o	**	o	*	*
	Limons sous nappe	*	■	**	o	—	■	*	■	—	*	o	**	o	*	■
GROSSIERS	Sables lâches secs	**	o	***	o	**	■	*	■	—	*	o	*	■	—	■
	Sables lâches sous nappe	*	■	**	o	—	■	—	■	—	*	o	*	■	*	■+
	Sables moyennement compacts et compacts	***	o	***	o	***	■	*	■	*	o	**	o	*	*	■+
	Graviers, cailloux	**	o	—	o	—	■	*	■	***	o	*	■	*	*	■+
Cohérents hétérogènes		**	o	*	o	*	■	**	■	*	o	***	o	*	*	oublie de la norme ? = non couvert, ou ne convient pas ...
Sols granulaires lâches hétérogènes		**	o	*	o	*	■	*	■	**	o	**	o	*	*	**
Roches altérées, roches tendres		***	o	**	o	**	■	**	■	*	■	**	o	*	*	■
		26	25	16	15	5	19	17	2	8	5	7				

Première partie de la case (faisabilité générale) :

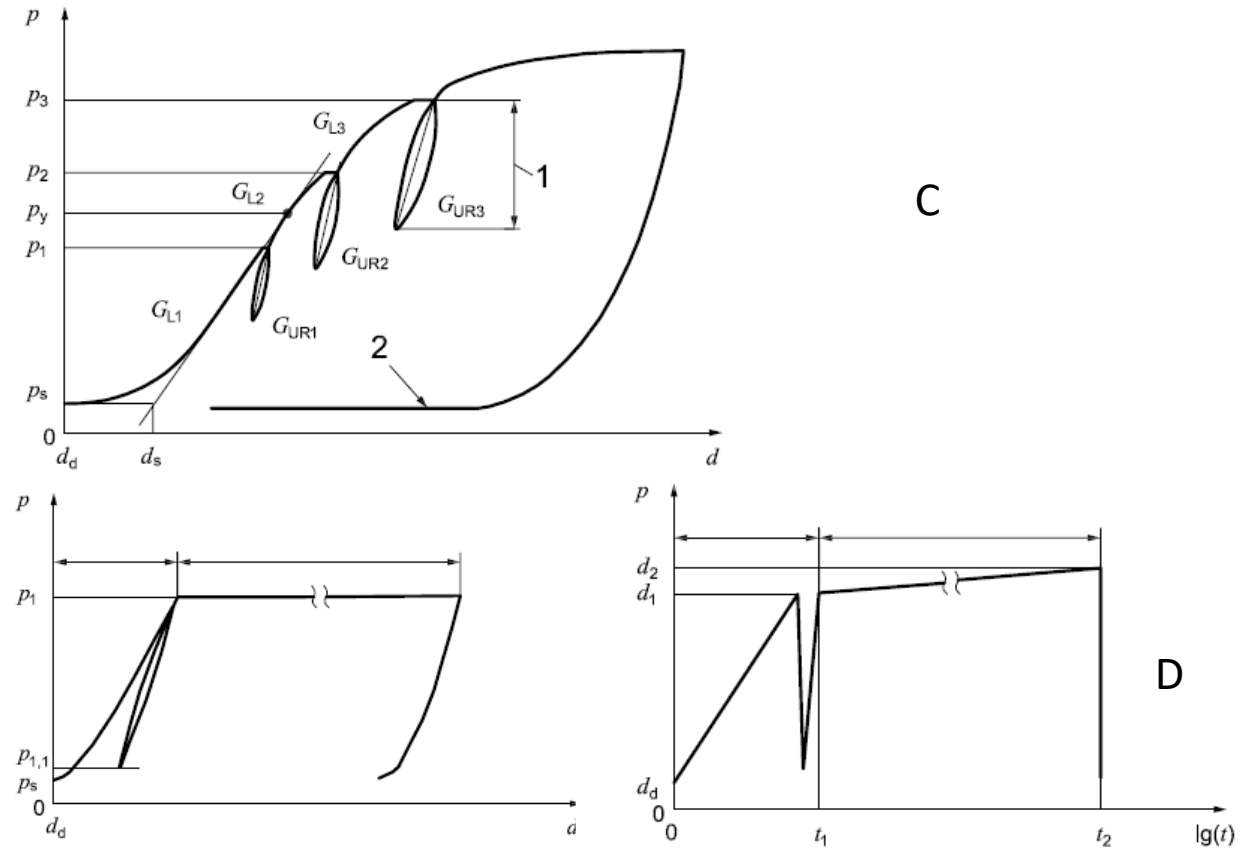
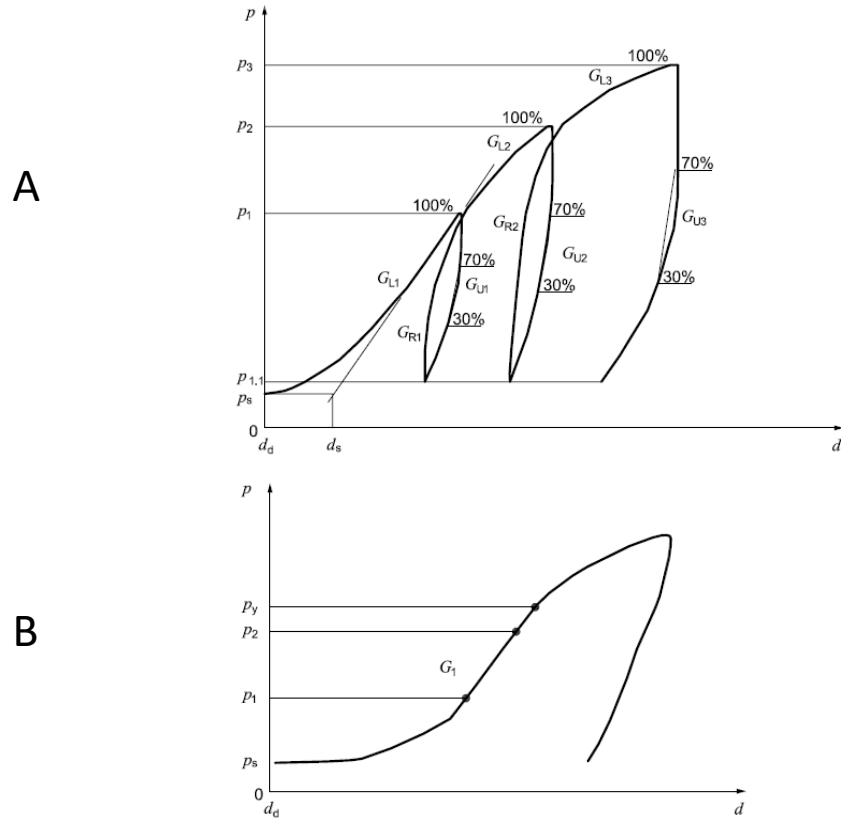
***	<b>Recommandé</b>
**	<b>Approprié</b>
*	<b>Acceptable</b>
-	<b>Ne convient pas</b>
	<b>Non couvert par la présente norme</b>

Deuxième partie de la case : précisions éventuellement cumulées sur les conditions de mise en œuvre

■	Dépend des conditions sur sites réelles et de l'évaluation de l'opérateur -
*	La vitesse de rotation ne doit pas excéder 1 s et le diamètre de l'outil ne doit pas être plus important que 1,15 dc
o	Circulation de la boue: la pression ne doit pas excéder 500 kPa et le débit 15 l/min. Le débit peut être temporairement interrompu si nécessaire.
+	Trou pilote avec des techniques de préforage possibles: DST, RP et RPM
^	Nécessite des soins particuliers: ajouter un tube de protection au bout du tube fendu ; effectuer les essais en descendant ; garder le niveau de boue dans le tubage au-dessus du niveau de la nappe phréatique

► Etat des recommandations des méthodes dans la norme 22476-5: 2014

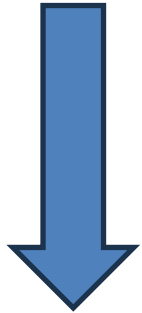
- Norme réservée au dilatomètre
- 4 modes opératoires : A, B, C, D



► Plusieurs sujets traités d PN ARSCOP

- Comparaison
  - des méthodes de forage et de mise en place de la sonde
  - des résultats fournis par les différents types de sondes, etc.
- Comparaison des méthodes d'interprétation automatiques
- Critères d'arrêt

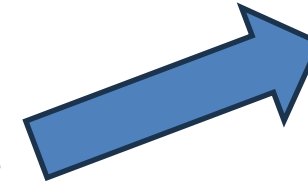
*Voir ci-dessous*



Définition des  
critères d'arrêts  
généralisés



Ouverture des  
méthodes  
d'interpolation  
Directivité pour  
le calcul de  $p_f$



Extension du  
protocole  
Ménard  
différents types  
de sonde

## ► Sondage auprès de 18 sociétés productrices d'essais

**Cumul 18 réponses (1/04/19)**

ISO 22476-4:2012(F)

Tableau C.2—Lignes directrices pour les techniques de placement de la sonde pressiométrique

Type de sol ↓	Technique de forage →  en français (sigles de l'ancienne norme NF)	Placement de la sonde sans refoulement de sol										Placement de la sonde avec fonçage direct			
		1 < dt / dc ≤ 1.08										(dt / dc ≥ 0)			
		Forage rotatif				Rotopercussion			Tube battu, foncé ou vibrofoncé			Tube fendu foncé			
		OHD	HA/HAM	CFA	CD	RP	RPM	STDTM	PT	DT	VDT	DST			
Open Hole Drilling	Hand Auger (+ Mud)	Continuous Flight Auger	Core Drilling	Rotary Percussion	Rotary Percussion + Mud	Slotted Tube + inside Drilling Tube +	Pushed Tube	Driven Tube	VibroDriven Tube	Direct Slotted Tube					
ODG	TAM/TAM+B	THC	CAR	ROTOP	ROTOP+B	TFEM	TAPM	TB	TVB-TVF	BTFD					
Outll Destructif	Tarière A Main (+Boue)	Tarière Hélicoïdale Continue	Carottier (en rotation)	Roto-percussion	Roto-percussion+ Boue	Tube Fendu (ouvert) avec Enlèvement des Matériaux	Tube (carottier) A Paroi Mince	Tube Battu	Tube VibroBattu / VibroFoncé	Battage Tube Fendu Direct (fermé)					
FINS	Vase et argile molle	1.6	2.4	1.1	0.8	-0.1	0.2	0.8	2.2	0.3	0.0	0.4	1.95-2.60	***	Recommandé
	Argiles moyennement compactes	2.3	2.1	2.1	1.7	0.3	0.9	1.3	1.3	0.9	0.4	0.0	1.30- 1.95	**	Approprié
	Argiles compactes	2.4	1.4	2.3	2.4	0.9	1.6	1.6	0.7	0.8	0.4	0.0	0.65 - 1.30	*	Acceptable
	Limons secs	1.9	2.3	2.3	1.7	0.4	1.3	1.9	1.3	0.9	0.8	0.2	0 - 0.65	-	"Ne convient pas"-Inadapté
	Limons sous nappe	1.6	1.7	0.6	1.0	0.4	1.2	1.5	1.0	0.3	0.1	0.6	< 0		Non couvert par la présente norme
	Sables lâches secs	1.8	2.0	1.6	0.9	0.6	1.5	1.8	0.4	0.4	0.4	0.6			
GROSSIERS	Sables lâches sous nappe	1.4	1.6	0.4	0.4	0.6	1.5	1.8	0.6	0.5	0.3	1.2			
	Sables moyennement compacts et compacts	2.6	1.4	2.0	1.1	1.6	2.1	2.1	0.4	0.9	0.8	1.2			
	Graviers, cailloux	1.9	-0.1	0.2	0.2	1.4	2.4	2.1	0.3	0.9	1.0	1.9			
Cohérents hétérogènes		2.0	0.4	0.8	1.2	1.1	2.4	1.3	0.0	0.6	0.8	0.4			
Sols granulaires lâches hétérogènes		1.9	0.7	0.9	0.8	1.1	2.1	1.6	0.3	0.8	1.0	1.4			
Roches altérées, roches tendres		2.6	0.5	1.1	1.6	1.8	2.3	1.7	0.0	0.6	0.5	0.1			
<b>Moyenne</b>		<b>2.0</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	<b>0.8</b>	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>			

### ► Choix des méthodes de forage et de placement de la sonde

Introduction de la sonde		SANS REFOULEMENT du sol :										AVEC REFOULEMENT du sol	
Types de sols et de roches <small>selon les normes ISO 14688 (toutes les parties), et ISO 14689</small>		Technique de forage préalable <small>1 &lt; d / d<sub>c</sub> ≤ 1,1 (V<sub>A</sub> &lt; 90 m/h ; P<sub>J</sub> &lt; 500 kPa ; Q<sub>J</sub> &lt; 15 U/min ; V<sub>r</sub> &lt; 60 tours par minute)<sup>a</sup></small>										Sonde FONCÉE / BATTUE	
		Forage par ROTATION				Forage par ROTOPERCUSSION			Forage au CAROTTIER				
		Outil rot. + boue	TAM	THC	Carottier rotation	ROTOP à sec	ROTOP + boue	TUBE AUTOFORE	Foncé	Battu / Vibrofoncé	Sonde foncée	Tube fendu vibrofoncé	
FINES	ARGILES	A très molles à molles	**	***	*	*	-	*	***	-	*	-	
		B molles à fermes	***	***	**	**	-	*	**	**	*	-	
		C raides	***	*	***	***	*	**	**	*	*	-	
	LIMONS	SECS	***	***	***	**	-	*	**	**	*	-	
		SOUS NAPPE	***	**	-	*	-	*	**	-	-	*	
GROSSIERS	SABLES A lâches	SECS	***	***	**	*	**	**	-	-	-	-	
		SOUS NAPPE	***	**	-	-	-	**	**	-	-	*	
	SABLES & GRAVES	B moyens à compacts	***	**	***	**	*	***	***	-	*	-	**
		C Graves	**	-	-	*	*	***	***	-	*	-	***
		D Cailloux	**	-	-	**	**	***	**	-	-	-	**
INTER MÉDIAIRES	GROSSIERS COHERENTS		**	-	*	**	*	***	**	-	*	-	*
	NON HOMOGENES		**	*	*	*	*	**	**	-	*	*	**
S.I.R.T.	CRAIE		***	*	**	**	**	**	**	-	*	-	-
	ROCHES TENDRES		***	-	*	***	**	**	**	-	-	-	-
ROCHE	ROCHES DURES		**	-	-	***	***	***	*	-	-	-	
		SCORE * par méthode	39	21	19	26	14	30	30	8	8	4	12

***	Recommandé
**	Autorisé
*	Possible
-	Non autorisé
-	

## Normes NF EN ISO 22476-i : évolution

-4 : Essai pressiométrique  
Ménard

-5 : Essai dilatométrique

-6 : Essai pressiométrique  
autoforé

-8 : Essai pressiométrique  
refoulant

Edition 2 en 2021

Edition 2 en 2022

non modifié à ce stade

non modifié à ce stade

Modifications citées ci-dessus

Etendu à tous les essais  
préforés

Titre modifié : essai  
pressiométrique préforé

Et des normes d'essais désormais  
développées par ISO (TC182)  
Également reprises par le CEN (TC341)  
pour accompagner l'Eurocode 7



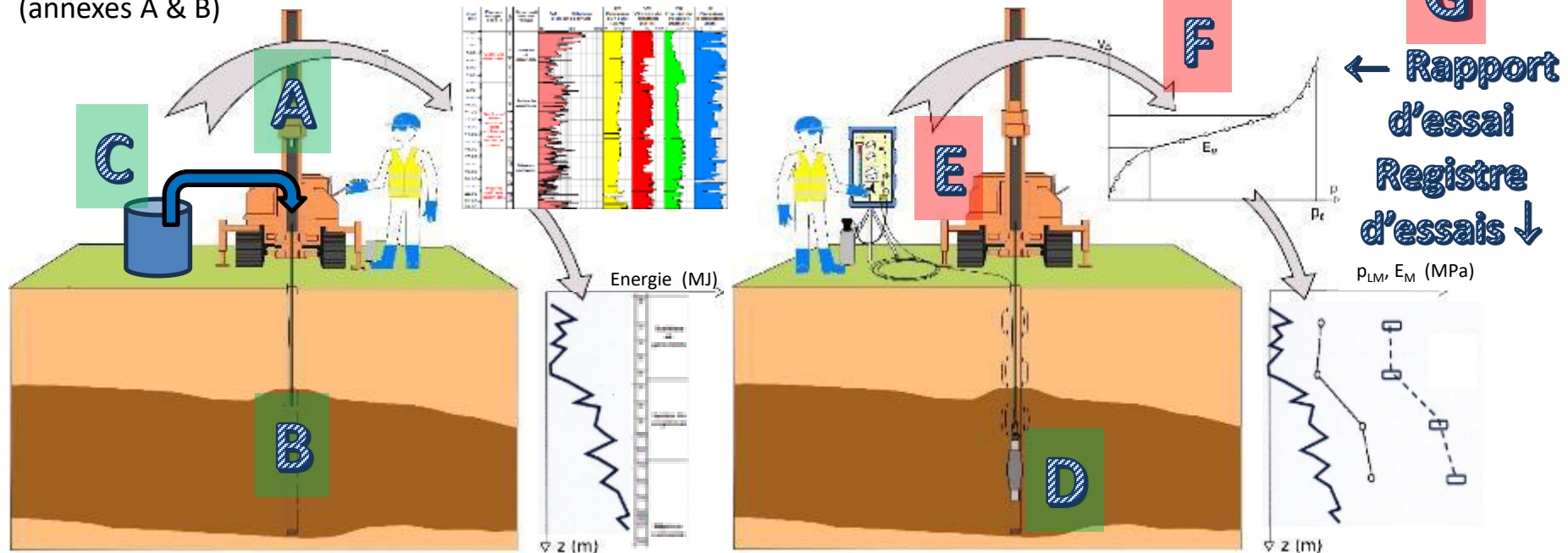
1 passe de forage de quelques mètres → 1 temps de manœuvre limité → 1 passe de 1 à quelques essais  
 (annexe C.1.3, annexe C.2 et tableau C2) (annexe C.1.4) (tableau C1)

Spécifications **conseillées** pour :

- A Enregistrement des paramètres de forage (C.2.1)
- B Diamètre des outils (C.2.2)
- C Utilisation d'une boue de forage (C.2.3)
- D Choix des sondes (§ 4.2), étalonnages (§ 5.2), (annexes A & B)

Spécifications **imposées** pour :

- E Enregistrement des données d'essai, type A, B ou C (§ 4.4 & tab. 3, § 6.1)
- F Protocole Ménard (§5.4 à 5.7)
- G Calculs normatifs



**G** Calcul des paramètres pressiométriques et consignation dans un rapport (§6.3, 7 & annexe D)



## ► Longueur des passes

- Simplification
  - Ed1\_2015

Table C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté <sup>b</sup>	Roto percussion <sup>b</sup>	Battage du tube, fonçage et vibrofonçage <sup>c</sup>
Vase et argiles molles	1a	---	1a
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons:			
- au-dessus de la nappe	4	3	3
- sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	---
Sables lâches :			
- au-dessus des eaux souterraines	3	2	---
- sous la nappe	1a	1a	---
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers : graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.  
<sup>b</sup> Se référer au Tableau C.2 pour les techniques acceptables  
<sup>c</sup> Non applicable à la technique TFEM (voir C.2.8.3).



Ed2\_2021

Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage ou de fonçage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage ou de fonçage continue (m)
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	3
Argiles raides	5
Limons :	
- au-dessus de la nappe phréatique	4
- sous la nappe phréatique	2
Sables lâches :	
- au-dessus de la nappe phréatique	3
- sous la nappe phréatique	1 <sup>a</sup>
Sables moyennement compacts et compacts	5
Sols grossiers : grave, cailloux	5
Sols grossiers cohérents	5
Sols lâches non homogènes, sols atypiques (comme par exemple moraines non consolidées, etc.)	3 à 5
Roches altérées, roches tendres	5
Roches moyennement dures et dures	5

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.

- Avant-propos national (à venir) : ajout d'une référence au même poste de travail pour les rochers

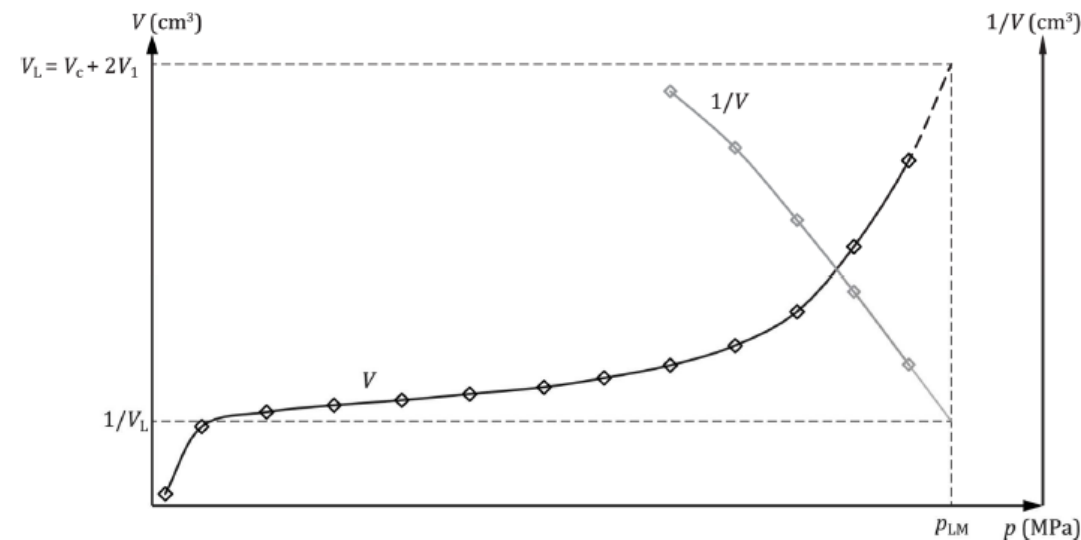
## ► Interprétation

- Régression sur les données pressiométriques
  - Au moins deux méthodes
    - Méthode « inverse »
    - Méthodes hyperboliques
  - Choix des méthodes laissé libre
  - Appréciation de la régression la plus précise

$$1/V = Ap + B$$

$$V = A_1 + A_2p + \frac{A_3}{(A_4 - p)}$$

$$V = A_1 + A_2p + \frac{A_3}{(A_4 - p)} + \frac{A_5}{(A_6 - p)}$$



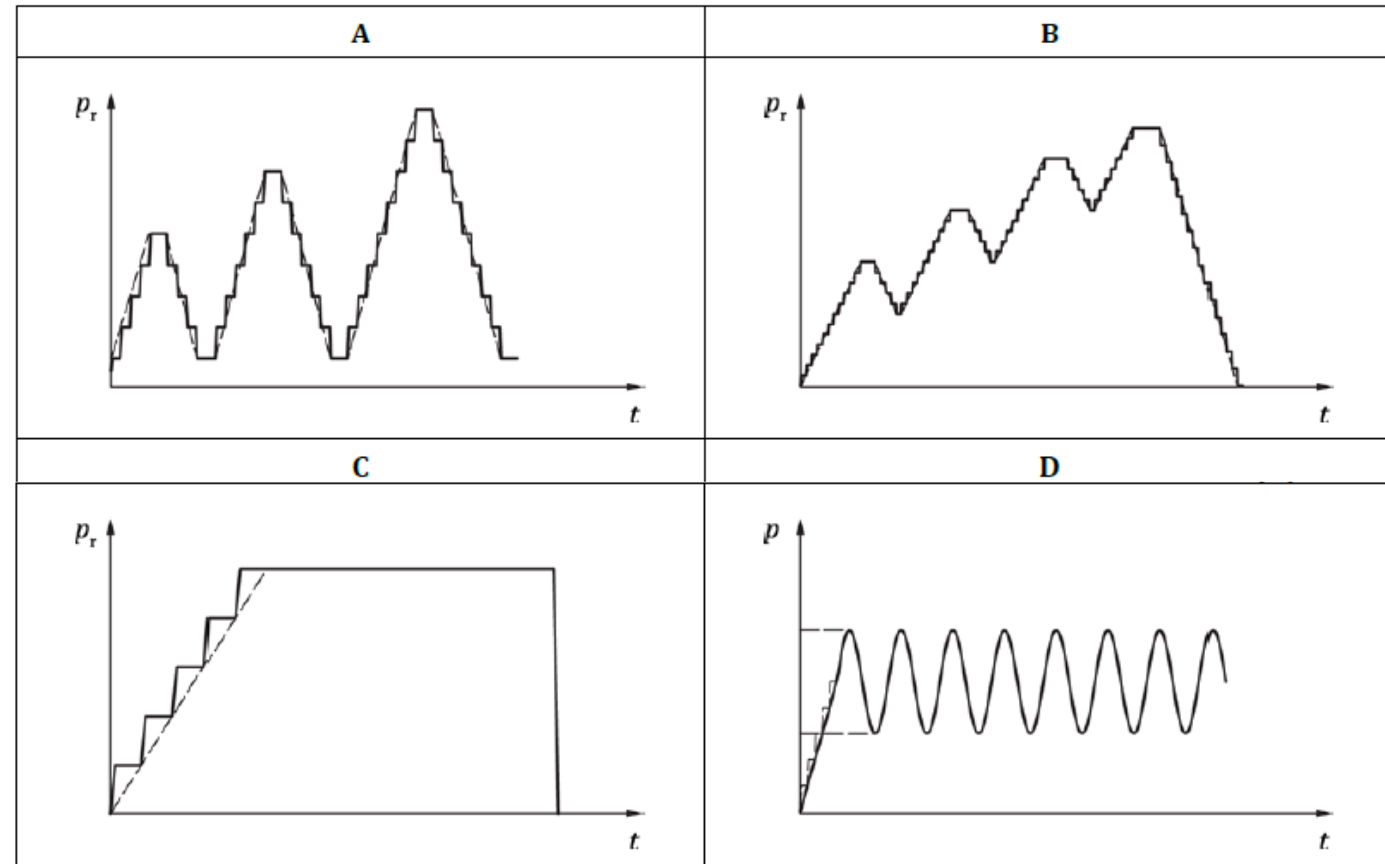
- Avant-propos national : méthode d'Hansbo recommandée pour la détermination du module pressiométrique Ménard si sonde avec tube fendu

► Evolution de la norme 22476-5:2023

- Protocoles de référence
- Etalonnage
- Commentaires sur l'interprétation

► Exemple des protocoles de référence

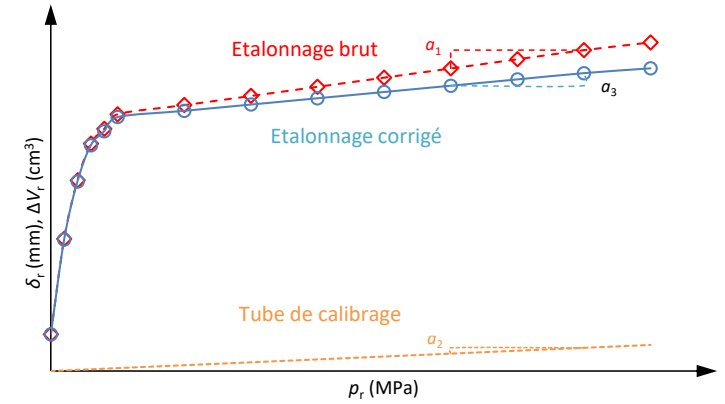
- Reprise des modes opératoires de la 22476-5:2013
- « Ajout » d'un programme de chargement cyclique



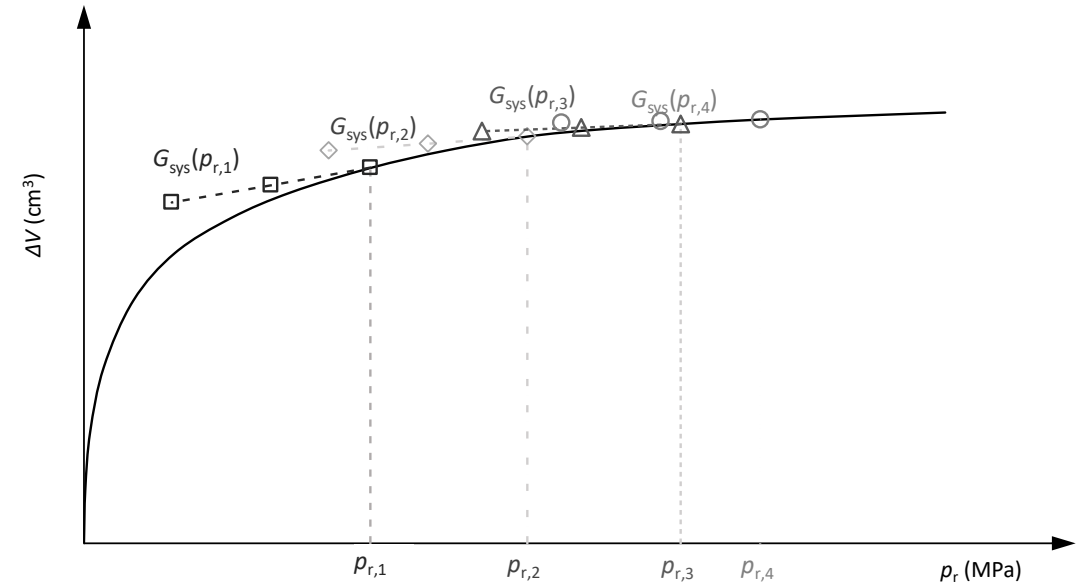
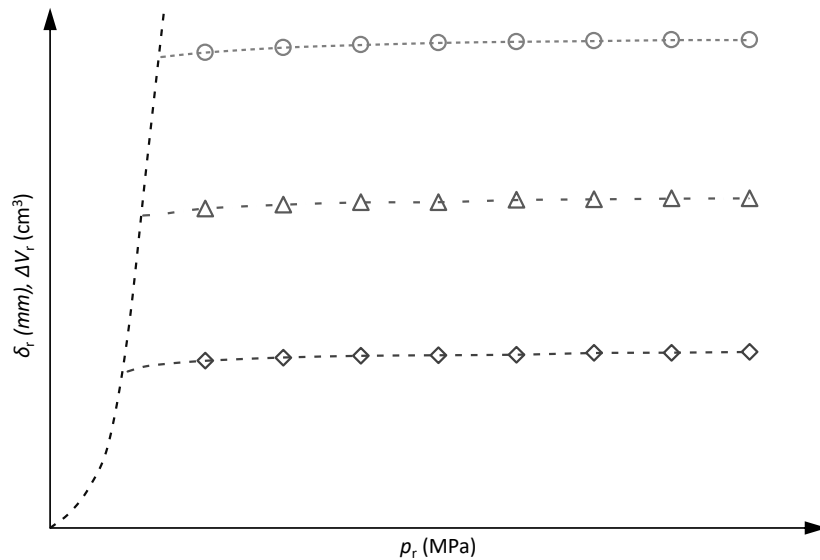
► Diversité des protocoles de la norme 22476-5 : 2022

■ Etalonnages

- Prise en compte de la déformabilité du tube



- Etalonnages supplémentaires pour modules de cisaillement G apparents supérieurs à 200 MPa



22476-5 : ESSAI PRESSIOMETRIQUE par toute méthode de forage et/ou d'essai			
<i>Insertion de la sonde</i> →	<i>Forage préalable</i>	<i>Autoforage</i>	<i>Fonçage</i>
Protocole d'essai ↓			
Pression imposée par paliers égaux	22476-4 MÉNARD		
Déformation imposée	22476-5	22476-6	22476-8
Cycles du paramètre imposé			
Hautes et très hautes pressions			
Autres formes du paramètre imposé (longue durée, sinusoïde, etc.)	22476-5 : tous autres protocoles imaginables		

## ► A venir :

- Une norme unique pour les essais pressiométriques autres que Ménard (22476-5, 6 et 8)?
- Méthodes d'interprétation ou corrélations?

Merci de votre attention