- 1. Présentation
- 2. Essais géotechniques in-situ
  - a. Essais CPT (Cone Penetration Test)
    - 1. CPT-M
    - 2. CPT-E
    - 3. CPT-u
  - b. Forages
    - 1. Prélèvements pour essais en laboratoire
      - i. Echantillons remaniés
      - ii. Echantillons non remaniés
    - 2. Forages diagraphiques
    - 3. Forages et essais pressiométriques
    - 4. Forages destinés à d'autres types d'essais
  - c. Essais à la plaque

#### d. Essais en laboratoire

- 1. Description lithologique
- 2. Détermination des limites d'Atterberg
  - i. Indice de liquidité
  - ii. Indice de plasticité
  - iii. Limite de liquidité
  - iv. Limite de plasticité
- 3. Essais triaxiaux
  - i. uu (non consolidé non drainé)
  - ii. Cd (Consolidé drainé)
  - iii. Cu+u (consolidé non drainé + mesure de la pression interstitielle)

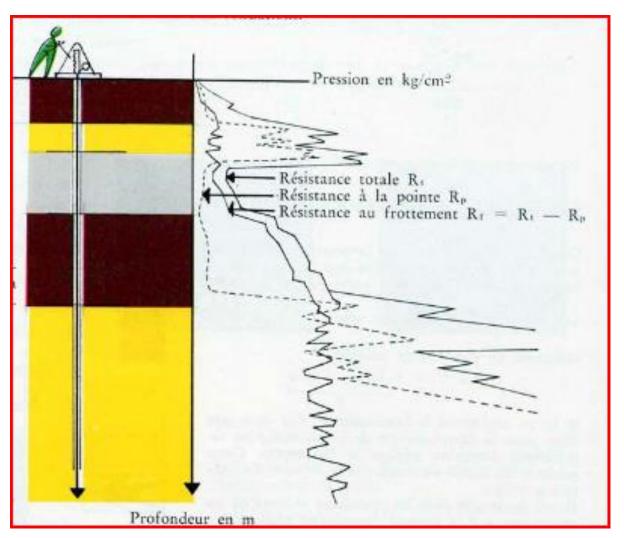
- 1. Présentation
- 2. Essais géotechniques in-situ
  - a. Essais CPT (Cone Penetration Test)
    - 1. CPT-M
    - 2. CPT-E
    - 3. CPT-u
  - b. Forages
    - 1. Prélèvements pour essais en laboratoire
      - i. Echantillons remaniés
      - ii. Echantillons non remaniés
    - 2. Forages diagraphiques
    - 3. Forages et essais pressiométriques
    - 4. Forages destinés à d'autres types d'essais
  - c. Essais à la plaque

- 1. Présentation
- 2. Essais géotechniques in-situ
  - a. Essais CPT (Cone Penetration Test)
    - 1. CPT-M
    - 2. CPT-E
    - 3. CPT-u
  - b. Forages
    - 1. Prélèvements pour essais en laboratoire
      - i. Echantillons remaniés
      - ii. Echantillons non remaniés
    - 2. Forages diagraphiques
    - 3. Forages et essais pressiométriques
    - 4. Forages destinés à d'autres types d'essais
  - c. Essais à la plaque

# Essai de penetration CPT (Cone Penetration Test)

- Enfoncement d'une pointe normalisée à vitesse constante (2 cm/s)
- Pointe : cône de 60° d'ouverture -section de 10 cm²
- CPT-M
- CPT-E
- CPT-u

## **CPT**





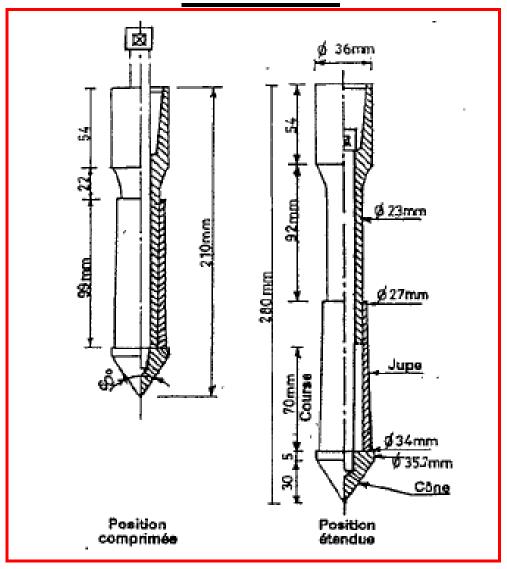
## <u>CPT</u>



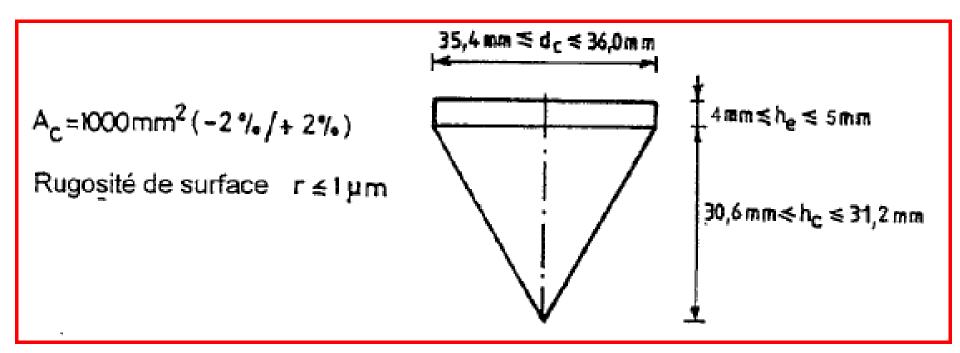
- Normes:
  - Mode opératoire 514 A-50
  - ISSMGE 1999

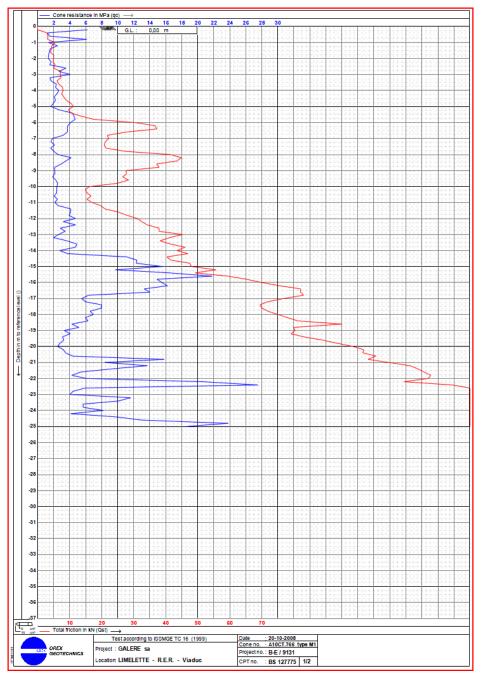
- Paramètres mesurés :
  - q<sub>c</sub>: résistance à la pointe (Mpa)
  - Q<sub>t</sub>: résistance totale à l'enfoncement (kN)

- Paramètres déduits :
  - Q<sub>st</sub>: résistance totale au frottement latéral(kN)
    - $Q_{st} = Q_t q_c$
    - $q_c = \frac{Q_c}{A_c}$  Avec  $Q_c$ =Force appliquée sur la pointe (kN) et  $A_c$ =Section de la pointe (10 cm²)

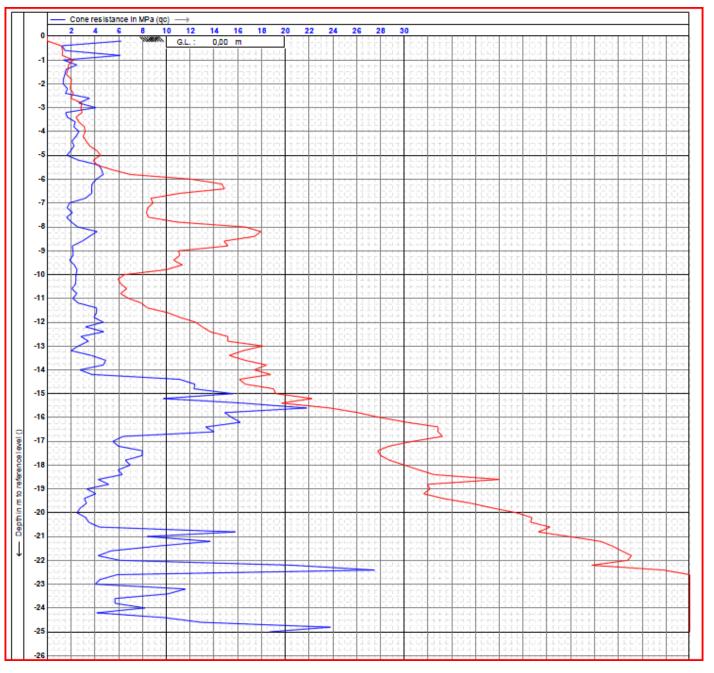


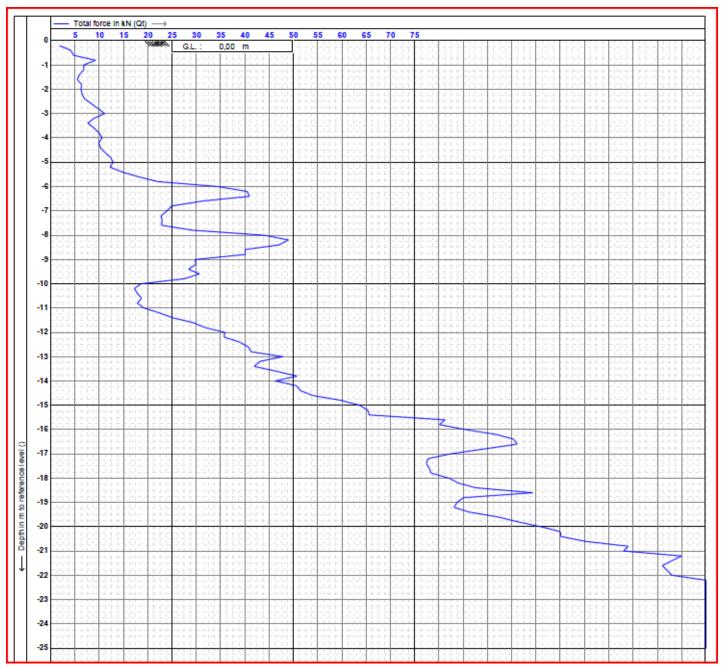
#### <u>CPT-M</u>



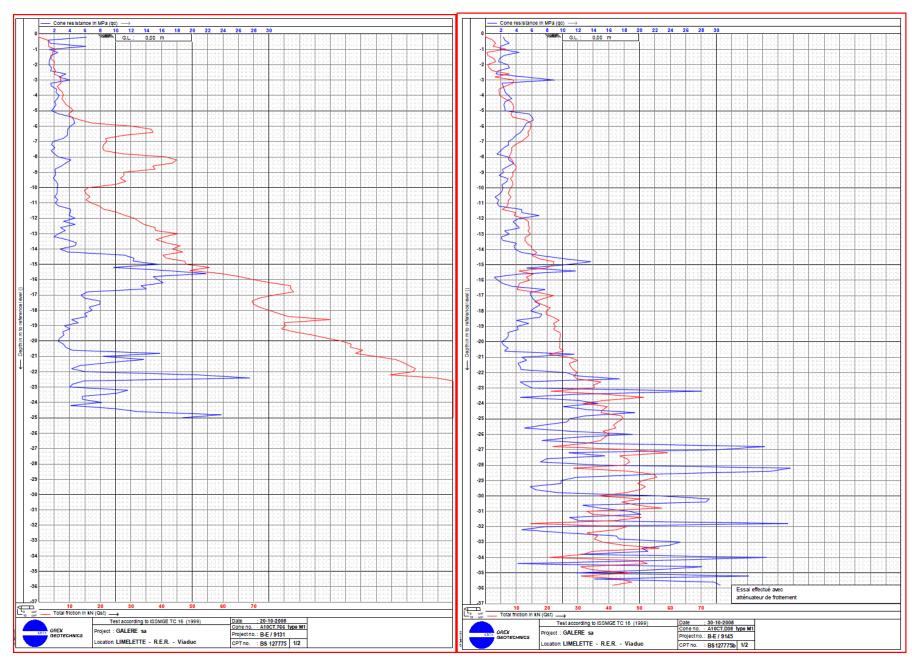


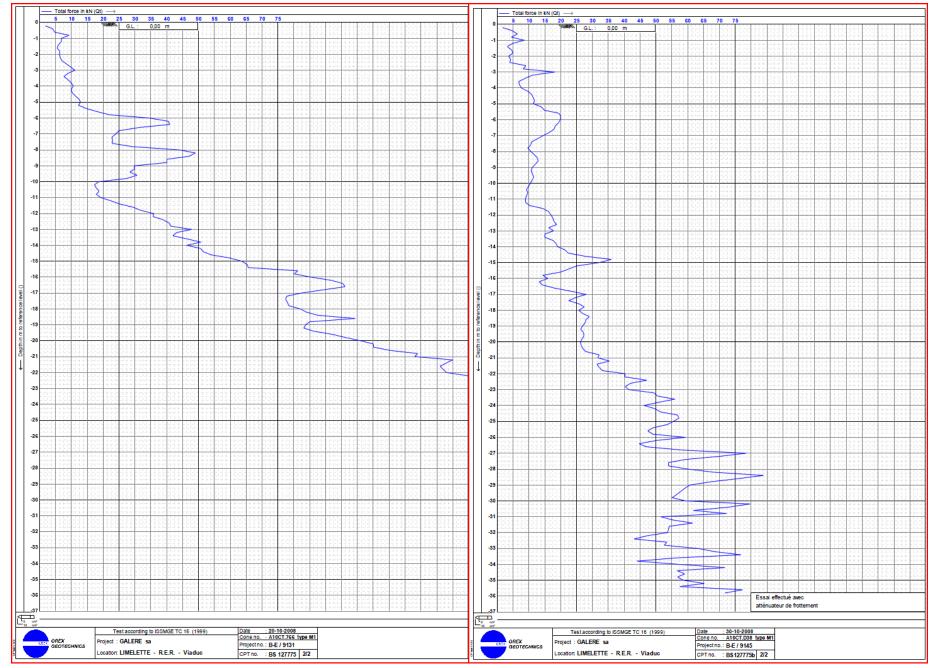
FEDEXSOL – 27 mai 2015





- Limitation d'un essai CPT-M :
  - Résistance à la pointe : q<sub>c</sub> ≤ 60 Mpa
  - Résistance à l'enfoncement totale : Q<sub>1</sub>≤ 200kN (20 tonnes) !
- Utilisation d'un anneau <u>anti-frottement</u> permet d'atteindre des profondeurs plus importantes dans le cas d'un arrêt à cause du frottement
- Si arrêt dû à la résistance à la pointe :
  - Préforage
  - Autre technique





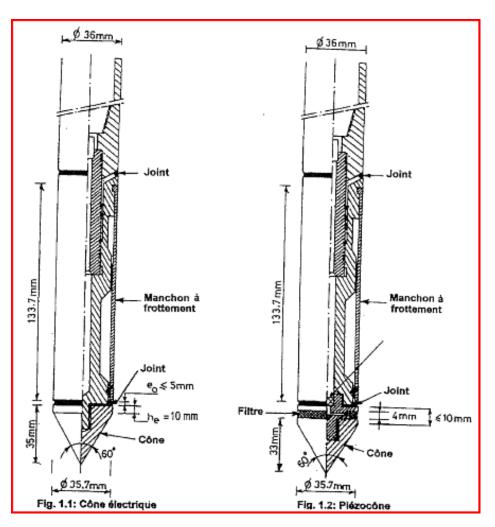
## CPT-E

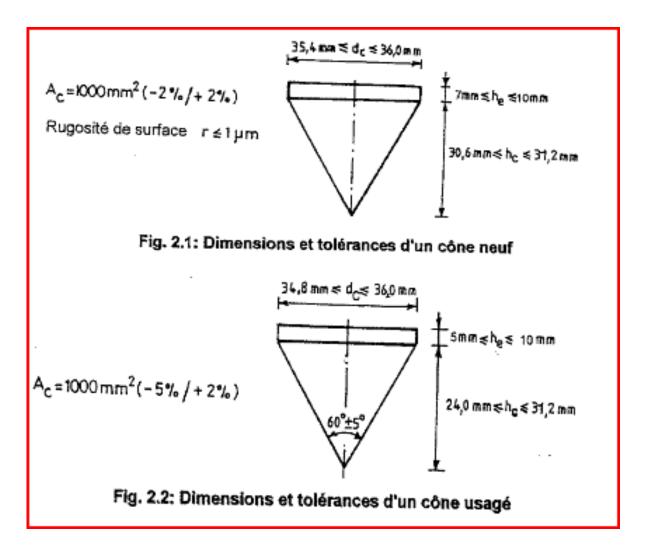
- Normes:
  - Mode opératoire 514 A-51
  - ISSMGE 1999

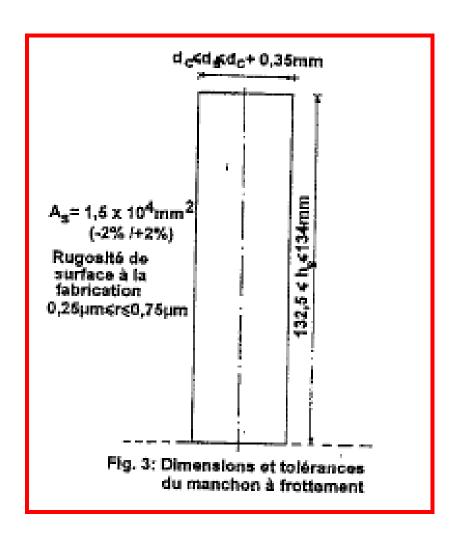
- Paramètres mesurés :
  - q<sub>c</sub>: résistance à la pointe (Mpa)
  - f<sub>s</sub>: résistance au frottement latéral local (MPa)
  - i : l'inclinaison (en °)

## CPT-E

- Paramètres déduits :
  - FR: Friction Ratio (adimensionnel exprimé en %)
    - $FR = \frac{f_s}{q_c}$
    - $q_c = \frac{Q_c}{A_c}$  Avec  $Q_c$ =Force appliquée sur la pointe (kN) et  $A_c$ =Section de la pointe (10 cm²)







- Normes:
  - Mode opératoire 514 A-51
  - ISSMGE 1999

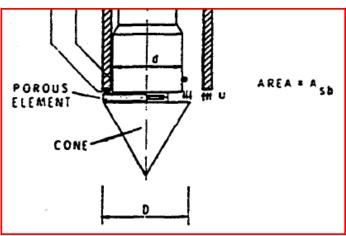
- Paramètres mesurés :
  - q<sub>c</sub>: résistance à la pointe (Mpa)
  - f<sub>s</sub>: résistance au frottement latéral local (MPa)
  - i : l'inclinaison (en °)
  - u : pression interstitielle (kPa)

- Paramètres déduits :
  - FR: Friction Ratio (adimensionnel exprimé en %)

• 
$$FR = \frac{f_s}{q_c}$$

• $q_t = q_c + (1-a)u$  avec  $q_t$ : résistance à la pointe corrigée

a : paramètre adimensionnel :  $a = \frac{d^2}{D^2}$ 



• Paramètres déduits :

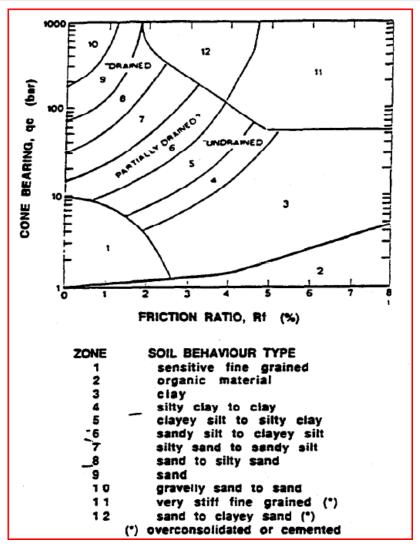
- 
$$B_q = \frac{u - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}$$
 avec u pression interstitielle mesurée

Et u<sub>0</sub> pression interstitielle à l'équilibre.

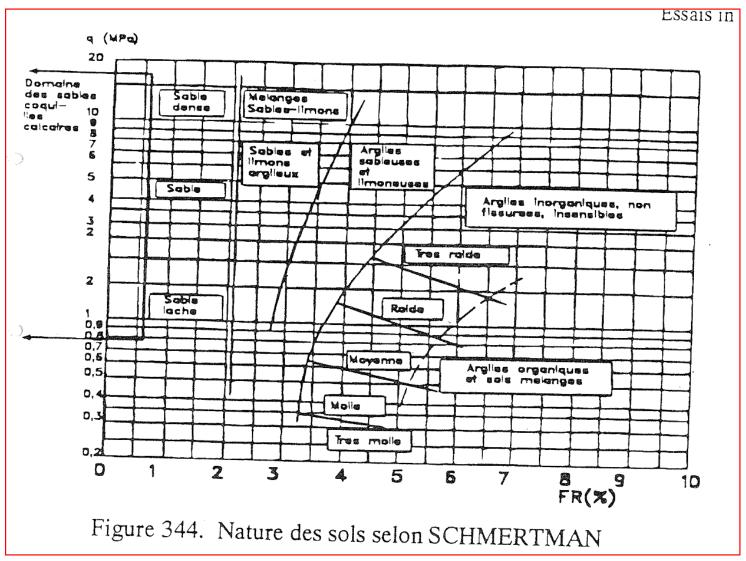
 $\sigma_{v0}$ : contrainte verticale totale

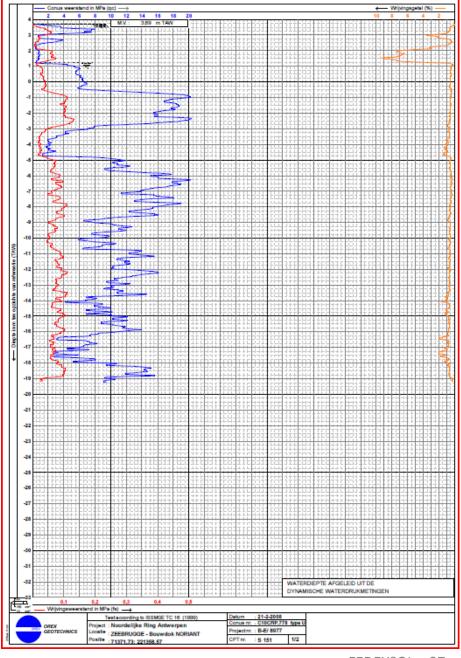
A partir de ces paramètres, il existe bon nombre d'interprétation (cfr. littérature)

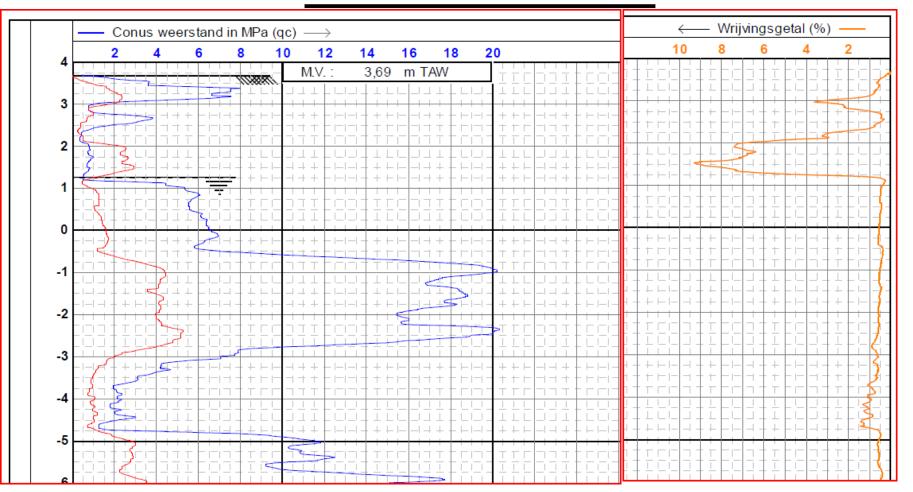
## CPT-E (Robertson 1990)

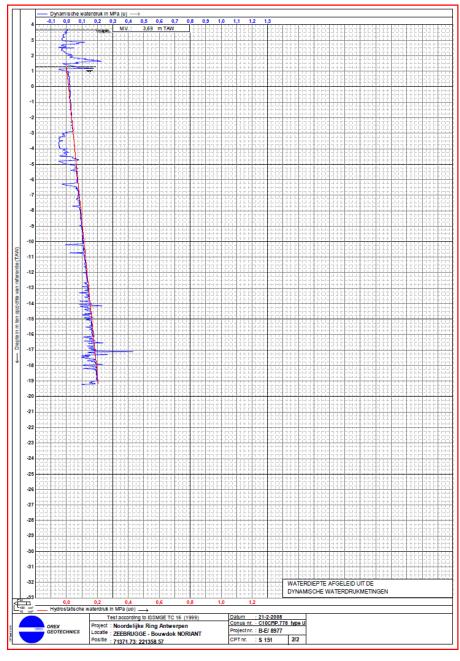


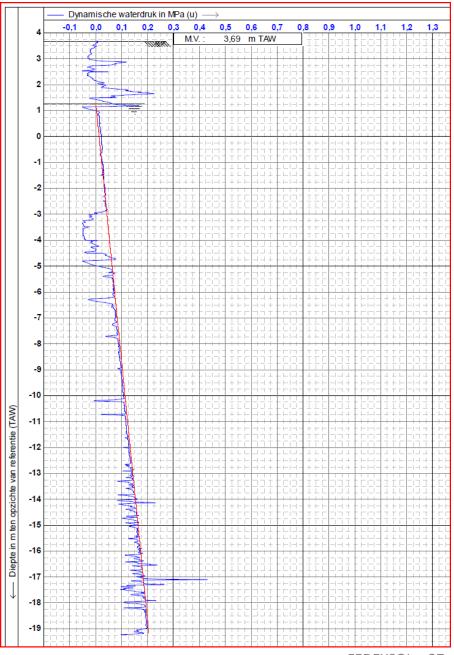
#### CPT-E











- 1. Présentation
- 2. Essais géotechniques in-situ
  - a. Essais CPT (Cone Penetration Test)
    - 1. CPT-M
    - 2. CPT-E
    - 3. CPT-u
  - b. Forages
    - Prélèvements pour essais en laboratoire
      - i. Echantillons remaniés
      - ii. Echantillons non remaniés
    - 2. Forages diagraphiques
    - 3. Forages et essais pressiométriques
    - 4. Forages destinés à d'autres types d'essais
  - c. Essais à la plaque

## Les Machines de Forage



Les Machines de Forage

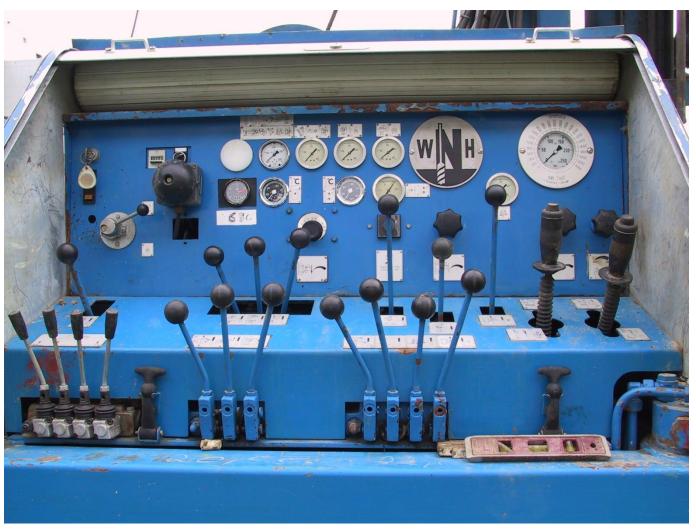


FEDEXSOL - 27 mai 2015

## Les Machines de Forage



# Les Machines de Forage



### Techniques et outils de forage

#### Géotechnicien

#### Objectif recherché

- -Paramètres requis
- méthode de détermination des paramètres

#### Classe requise de prélèvement

Choix des techniques de prélèvement

- -Outils
- Procédure de mise en œuvre

# Organisme de sondage

Laboratoire d'essais

Exécution des prélèvements

Transport des prélèvements Réception au laboratoire

**Essais** 

Connaissance antérieure

### Techniques et outils de forage

Les principaux éléments déterminant la qualité de prélèvement sont :

- a) Le matériau : en fonction de sa nature (sols fins argileux, limoneux, sols grenus sableux ou graveleux, sols hétérogènes, roches etc.), son état (hors nappe ou sous nappe phréatique, avec ou sans gaz, résistance mécanique, etc.) et sa profondeur
- b) La technique de prélèvement : combinaison du procédé utilisé pour la mise en œuvre de l'outil de prélèvement et le choix de l'outil
- c) La compétence et le savoir-faire du personnel

### Techniques et outils de forage

#### Définition des classes de prélèvements de matériau

Classes	Principaux paramètres obtenus à partir de l'échantillon						
Glasses	Caractéristique de nature	Caractéristique d'état					
1	D, w <sub>L</sub> , w <sub>P</sub> , e <sub>max</sub> , e <sub>min</sub> , ρ <sub>s</sub> , MO, C <sub>c</sub> , C <sub>s</sub> , Z <sup>+</sup>	Z <sup>+</sup> , I <sub>D</sub> , e, w <sub>nat</sub> , ρ <sub>d</sub> , τ <sub>f</sub> [φ', c', c <sub>u</sub> , φ <sub>uu</sub> , c <sub>uu</sub> , ], E, R <sub>c</sub> , RTB, RQD, σ' <sub>p</sub> , k, c <sub>v</sub>					
2	D, w <sub>L</sub> , w <sub>P</sub> , e <sub>max</sub> , e <sub>min</sub> , ρ <sub>s</sub> , MO, Z <sup>+</sup>	Z <sup>+</sup> , e, w <sub>nat</sub> , ρ <sub>d</sub> , RQD, I <sub>D</sub> , k					
3	D, w <sub>L,</sub> w <sub>P</sub> , e <sub>max</sub> , e <sub>min</sub> , ρ <sub>s,</sub> MO, Z <sup>o</sup>	Z°, w <sub>nat</sub>					
4	D, w <sub>L,</sub> w <sub>P,</sub> e <sub>max</sub> , e <sub>min</sub> , ρ <sub>s</sub> , MO, Z <sup>o</sup>	Zº					
5	Prélèvement incomplet, Z'	Z <sup>-</sup>					

De la classe 1 à la classe 4, on passe de l'échantillon non remanié à totalement remanié

-Orientation du choix des techniques de prélèvement d'après la XP P94-202 (décembre 95) (voir plus loin)

### **Quelques définitions**:

**Carotte**: prélèvement effectué à l'aide d'un carottier **Carottier**: outil de prélèvement cylindrique destiné à obtenir une carotte (mise en œuvre par rotation, fonçage ou battage)

**Coupe technique du forage** : ensemble des informations sur le forage (caractéristiques, détails d'exécution, observations, etc.)

### Quelques définitions (suite):

Couronne : extrémité du carottier rotatif au contact du

matériau à prélever

**Echantillon** : Résultat du prélèvement

**Echantillon non remanié**: Echantillon prélevé dans des conditions modifiant le moins possible la nature et l'état du terrain qui, au laboratoire, sous un chemin de contrainte approprié, fournit des résultats applicables à la prévision de la résistance en place, de l'amplitude et la vitesse de déformation. Selon les propriétés à déterminer sur l'échantillon, un remaniement plus ou moins important peut être accepté s'il n'affecte pas les résultats recherchés

Trousse: Extrémité basse effilée d'un carottier

Classification des sols cohérents suivant leur résistance mécanique à court terme

Sol	Essai simplifié	Cohésion non drainée C <sub>u</sub> (kPa)
Très mou	S'échappe des doigts sous une pression	<20
Mou	Peut être pétri par une légère pression des doigts	20 à 40
Ferme	Peut être pétri par une forte pression des doigts	40 à 75
Raide	Ne peut être pétri par les doigts, le pouce y marque une empreinte	75 à 150
Très raide	Rayé à l'ongle	150 à 300
Dur		>300

-Une roche, c'est quoi ? D'après la XP P94-202 (décembre 95) :

Description	Résistance en compression simple R <sub>c</sub> (Mpa)
Résistance très faible	<6
Résistance faible	6 à 20
Résistance moyenne	20 à 60
Résistance élevée	60 à 200
Résistance très élevée	>200

#### Puits, tranchée, fouille et galerie

Creusé mécaniquement ou manuellement (attention aux règle de sécurité)

#### Forage manuel

Forage réalisé manuellement (généralement à l'aide d'une tarière à main)

#### Forage par poinçonnement

Réalisé sans rotation :

- soit par battage (fréq. frappe < 2Hz)</li>
- percussion (fréq. frappe >2 Hz)
- vibro-percussion (idem. percussion mais compression/extension)
- soit par fonçage à vitesse cte (v≥2cm/s et cte)

#### Forages par rotation

Avec ou sans fluide d'injection (fluide de forage)

#### Avec fluide d'injection

Le matériau est découpé au moyen d'un outil spécifique terminé par une couronne, entraîné en rotation et avec injection d'un fluide (eau, air, boue à la bentonite, autres additifs) jusqu'à la couronne

#### Sans fluide d'injection

Le matériau est découpé à l'aide d'un outil désagrégateur

#### **Carottiers poinçonneurs**

Les carottiers poinçonneurs sont caractérisés par divers paramètres (cfr. XP 94-202) :

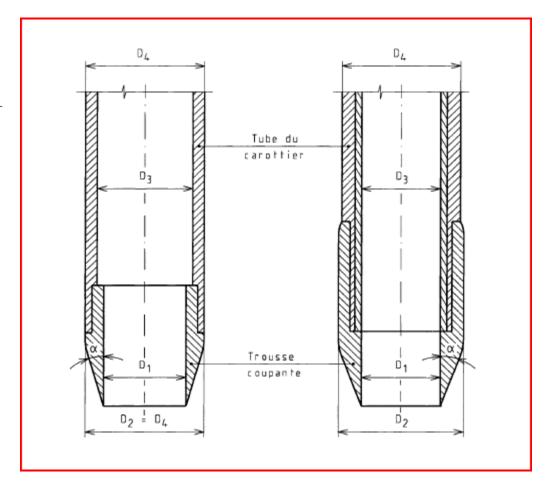
- carottiers à paroi mince sans étui intérieur
   (C<sub>a</sub>≤15% : indice de surface)
- carottiers à paroi mince avec étui intérieur  $(C_a \le 15\%)$  : indice de surface
- carottier à piston stationnaire : idem paroi mince avec étui mais piston coulissant
- carottier à paroi épaisse ( $C_a > 15\%$  : indice de surface) Généralement par battage dans les sables et graves
- présence éventuelle d'un extracteur

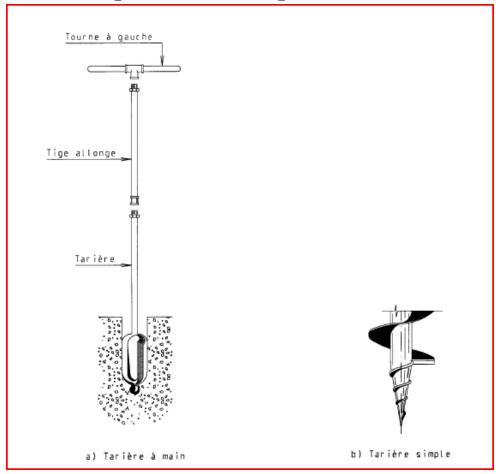
#### Paramètres carottier

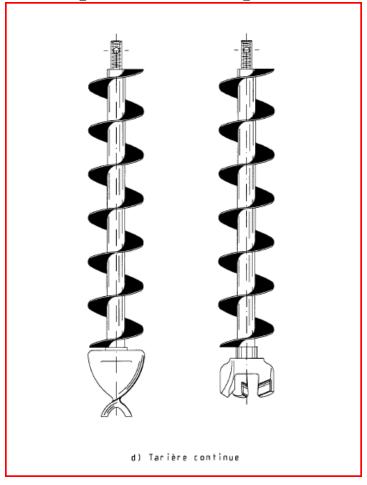
Indice de jeu extérieur :  $C_0 = \frac{D_2 - D_4}{D_4}$ 

Indice de jeu intérieur :  $C_i = \frac{D_3 - D_1}{D_1}$ 

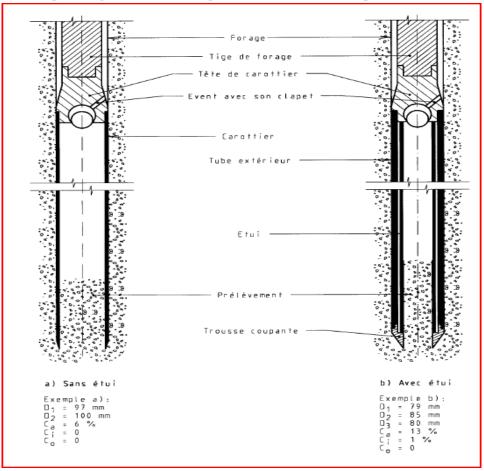
Indice de surface :  $C_a = \frac{{D_2}^2 - {D_1}^2}{{D_1}^2}$ 

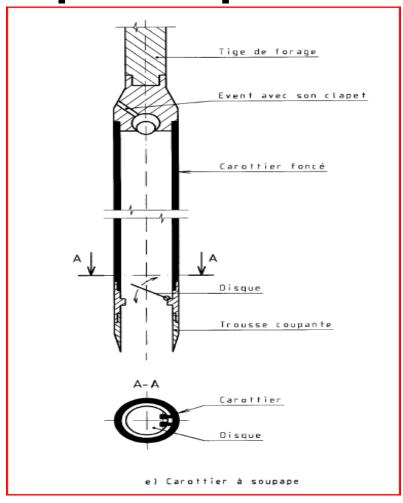


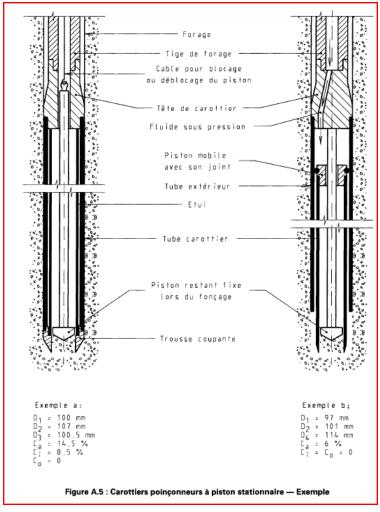


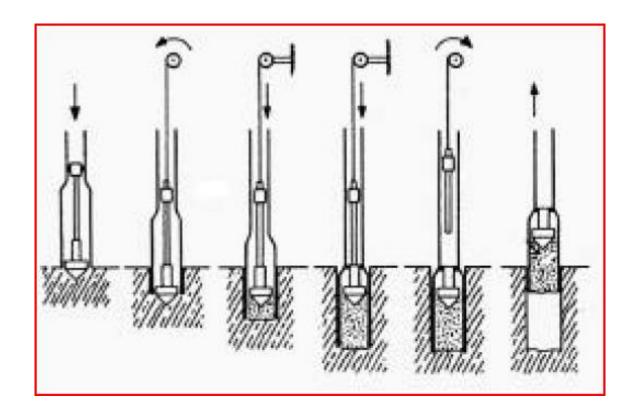


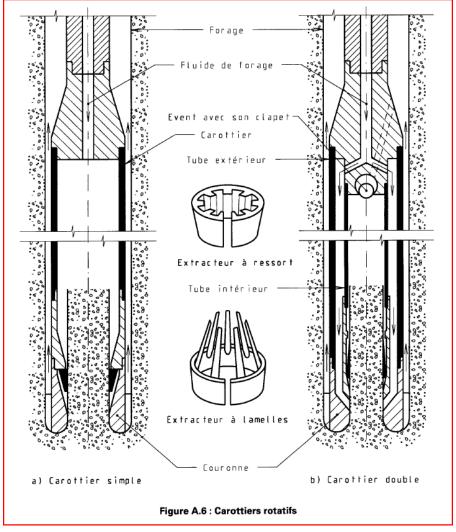
Carottier poinçonneur à parois minces (avec ou sans étui)

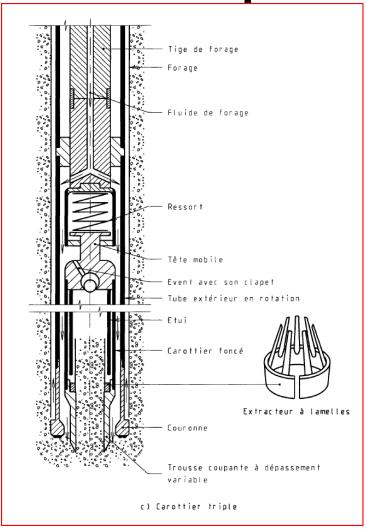


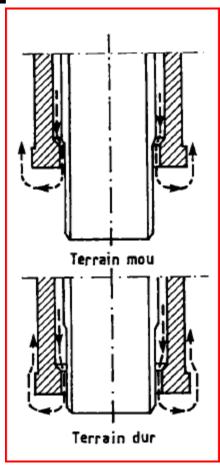












Outils destructifs (cfr. Fondations et ouvrages en terre : G. PHILIPONNAT et B. HUBERT aux éditions EYROLLES

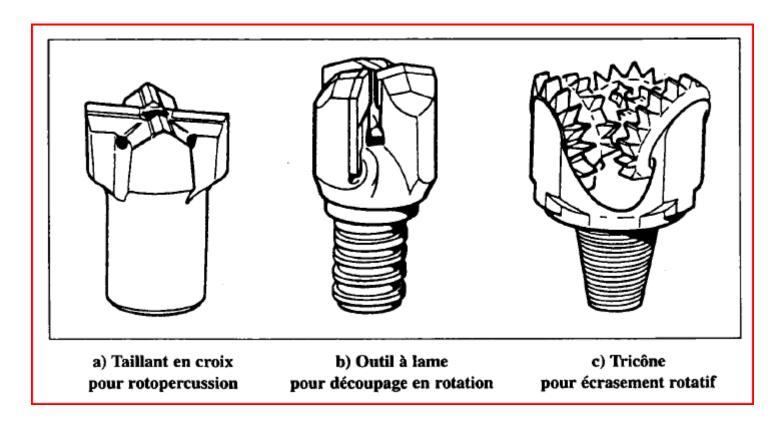


Tableau C.1 : Matériau —	Technique de	prélèvement —	Classe de	prélèvement
--------------------------	--------------	---------------	-----------	-------------

Matériau à prélever (voir tableau 1)		Techniques de prélève	ment		Classe des prélèvements		
	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques	
Sol fin très mou à mou	— carottier à piston stationnaire	— fonçage continu par pression (v ≥ 2 cm/s)	non	recommandé	1	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm	
	— carottier à paroi mince avec étui	— fonçage continu par pression (v ≥ 2 cm/s)	boue	adapté	1 2 (si extracteur)	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm — forage tubé, nettoyé, sous boue	
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	inadapté sous nappe	3	classe 4 pour les sols fine très mous	

Tableau C.1: Matériau — Technique de prélèvement — Classe de prélèvement (suite)

Matériau à prélever		Techniques de prélève	ment		Classe	des prélèvements
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Sol fin ferme	— carottier à piston stationnaire	— fonçage continu par pression (v ≥ 2 cm/s)	non	recommandé	1	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
	— carottier à paroi mince avec ou sans étui	— fonçage continu par pression (v ≥ 2 cm/s)	boue	adapté	1	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
		— battage	non	adapté	2	— D1 ≥ 75 mm
	— carottier triple à trousse dépassante	— rotation	eau ou boue	adapté	1	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
	— carottier triple	— rotation	eau ou boue	toléré	2	D <sub>1</sub> ≥ 85 mm
	carottier double	— rotation	eau ou boue	toléré	2	— D <sub>1</sub> ≥ 85 mm
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	adapté	3	Les tarières simples sor remontées tous les 0,3 au plus et les tarière continues tous les 1 m a plus.
	— prélèvement de blocs à la main	— à la main	non	recommandé	1	
	prélèvement de blocs     à la boîte	— à la main ou fonçage par pression	non	recommandé	1	
	— en vrac	- pelle mécanique	non	toléré	3	

Natériau à prélever		Techniques de prélèver	Classe des prélèvements			
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Sol fin raide à très raide	— carottier à paroi mince	— fonçage continu par pression	non	adapté	1	— D₁≥ 75 mm
4 1100 10100		— battage	non	adapté	2	
	— carottier à paroi épaisse	— fonçage par pression — battage	non non	toléré toléré	3 3	— D <sub>1</sub> ≥ 90 mm
	— carottier triple à trousse dépassante	— rotation	eau ou boue	recommandé	1	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
	— carottier triple	— rotation	eau ou boue	adapté	1	— D <sub>1</sub> ≥ 85 mm
	— carottier double	— rotation	eau ou boue	adapté	2	— D <sub>1</sub> ≥ 85 mm classe 1 *)
	— carottier simple	— rotation	non	toléré à sec et passe courte	3	— D <sub>1</sub> ≥ 85 mm classe 2 *} et usage exceptionnel.
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	adapté	3	
	— prélèvement de blocs à la main	— manuelle	non	adapté	1	Pour obtenir une coupe les tarières simples s remontées tous les 0,3 et les tarières continu tous les 1 m au plus.
	— prélèvement de blocs à la boîte	— à la main ou fonçage par pression	non	adapté	1	
	— en vrac	— pelle mécanique	non	toléré	3	

Matériau à prélever		Techniques de prélève	Classe	des prélèvements		
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Sol fin dur	— carottier triple à trousse dépassante	— rotation	eau	inadapté pour les sols les plus durs	1	— D <sub>1</sub> ≥ 75 mm la limitation est due à la non-pénétration de la trousse
	— carottier triple	— rotation	eau	recommandé	1	D <sub>1</sub> ≥ 85 mm
	— carottier double	— rotation	eau	adapté	2	D1 ≥ 85 mm — classe 1 *)
	— carottier simple	— rotation	non	toléré	3	— classe 1 *)
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	adapté	3	Les tarières simples son remontées tous les 0,3 n au plus et les tarière continues tous les 1 m au plus.
	— prélèvement de blocs à la main	— manuelle	non	adapté	1	
	— prélèvement de blocs à la boîte	— à la main ou fonçage par pression	non	adapté	1	
	— en vrac	— pelle mécanique	non	toléré	3	

Matériau à prélever		Techniques de prélève	ment		Classe o	des prélèvements
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Sol grenu propre						
sable	— carottier à piston — fonçage par pression stationnaire			recommandé pour sable lâche	2	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
	— carottier à paroi mince avec étui — fonçage par pression — battage			recommandé recommandé	2 3	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm
	— carottier triple	— rotation	boue	recommandé	2	D <sub>1</sub> ≥ 85 mm
	— carottier à soupape	— battage	non	adapté	5	
	— tarière-seau rotatif	rotation	non	toléré (hors d'eau) adapté (sous l'eau)	3 5	Les tarières simples sont remontées tous les 0,3 m au plus et les tarières continues tous les 1 m au plus.
gravier	— carottier à paroi épaisse	— battage ou vibro-fonçage	non	recommandé	4	tubage à l'avancement D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub>
	— carottier à soupape	— battage	non	adapté	5	
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	toléré (hors d'eau) adapté (sous l'eau)	3 5	

Matériau à prélever		Techniques de prélève	ment		Classe	des prélèvements
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Sable argileux						
Sable limoneux	— carottier à piston stationnaire	— fonçage continu par pression	non	recommandé	1	
	— carottier à paroi mince avec étui	— fonçage continu par pression	non	recommandé	1	
		— battage	non		2	
	— carottier à paroi épaisse	- battage ou percussion	non	toléré	3	
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	adapté	3 (hors d'eau) 5 (sous l'eau)	Les tarières simples sont remontées tous les 0,3 m au plus et les tarières continues tous les 1 m au plus.
Argile graveleuse (gravier dans une matrice de sols fins)	— carottier à paroi épaisse et étui	— battage	non	adapté	3	— pour sol hors d'eau D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub>
matrice de sois mis,	— carottier double	— rotation	boue	toléré	3	D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub>
	— tarière et seau rotatif	— rotation	non	adapté	3 hors nappe 4 sous nappe	D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub> Les tarières simples sont remontées tous les 0,3 m au plus et les tarières continues tous les 1 m au plus.
						(à suivre)

Matériau à prélever		Techniques de prélèver	ment		Classe	des prélèvements
(voir tableau 1)	Désignation de l'outil	Mise en œuvre	Fluide	Aptitude de la technique	Classe optimale possible	Remarques
Argile sableuse	(voir sols fins)					
Sol très hétérogène et ayant une forte granularité	— carottier à paroi épaisse	battage ou percussion ou roto-percussion	non	recommandé	3	— risque de refus prématuré
(alluvions	— outil à benne preneuse	— battage	non	recommandé	4	
grossières, éboulis, moraines, remblais)	— tarière	— rotation	non		3 hors nappe 4 sous nappe	D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub> Les tarières simples so remontées tous les 0,3
				}		au plus et les tariè continues tous les 1 m plus.
Roche	— carottier simple	— rotation	eau eau + additif boue	adapté	1	
	— carottier double	— rotation	eau eau + additif boue	adapté	1	
	— carottier triple	rotation	eau eau + additif boue	adapté	1	
	— outil désagrégateur	- rotation ou roto-percussion	oui	adapté	5	si remontée des copes en surface

<sup>\*)</sup> Éventuelle, si élimination des parties latérales remaniées et conditionnées immédiatement sous enveloppe étanche.

C	Outils de prélèvement		Proc	édés de forage			CI	asse des prélèvements
Désignation	Caractéristiques	Dimensions de l'échantillon	Mode de pénétration	Découpage et extraction	Fluide	Matériaux prélevables	Classe optimale possible	Remarques
Prélèvement en pleine masse								
— en vrac		quelques dm <sup>3</sup>		pelle	non	sols fins     sols grenus hors d'eau     sols grenus dans l'eau	3 3 5	
en bloc à la main		quelques dm <sup>3</sup>	— décou- page à la main	outil à main, scies	non	— sols fins fermes à durs, hors d'eau	1	précautions particulières à prendre pour l'emballage et le transport
— à la boîte		quelques dm <sup>3</sup>	prédécou- page à la main		non	— sols fins fermes à durs, hors d'eau	1	
— au carottier à paroi mince de laboratoire	$C_a \le 15 \%$ $\alpha \le 10^{\circ}$ $C_i = 0.5 \% à 1.5 \%$	D <sub>1</sub> = suivant essais labo	— fonçage par pression		non	— sols fins mous à fermes, hors d'eau	1 (fonçage)	jeu intérieur $C_i = 0$ acceptable pour les carottiers courts $(L_i/D_1 \le 6)$
	C <sub>0</sub> = 0	L <sub>2</sub> /D₁ = 2 à 3	— battage		non	— sols fins fermes à durs, hors d'eau	2 (battage)	

Outils de prélèvement		Procédés de forage			'		Classe des prélèvements	
Désignation	Caractéristiques	Dimensions de l'échantillon	Mode de pénétration	Découpage et extraction	Fluide	Matériaux prélevables	Classe optimale possible	Remarques
Carottiers poinçonneurs								
— à paroi mince (avec ou sans étui intérieur)	$C_a \le 15 \% \text{ et } \alpha \le 10^{\circ}$ $C_i = 0.5 \% \text{ à 1.5 \%}$ $C_o = 0 \% \text{ à 2 \%}$ $S_e \ge 0.1.D^2_1$	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm et H/D <sub>1</sub> ≤ 10	fonçage continu par pression (H/Lt < 0,9)     battage	trousse coupante + parfois un extracteur	non	sols fins très mous à raides      sables argileux      argiles graveleuses	1 (fonçage) 2 (battage) 2	— augmentation possible de 1 point de la classe si présence d'un extracteur, — voir tableau C.1 pour plus de précision sur les sols prélevables et l'aptitude du procédé,
			— vibro- percussion			— sols grenus propres	2	— jeu intérieur C <sub>i</sub> = 0 acceptable pour les carottier courts (L <sub>4</sub> /D <sub>1</sub> ≤ 6)
— à paroi épaisse (et étui intérieur)	C <sub>a</sub> > 15 % 10° < α < 40° C <sub>i</sub> = 0 % à 4 %	D <sub>1</sub> ≥ 90 mm H/D <sub>1</sub> ≤ 15	— fonçage par pression (H/L <sub>t</sub> < 0,95)	trousse coupante + parfois un	non	sols fins raides à durs et argiles sableuses	3	
	C <sub>o</sub> = 0 % à 4 %		— battage	extracteur	non	— sables argileux	3	
	S <sub>e</sub> ≥ 0,1.D <sup>2</sup> 1		— vibro-		non	— argiles	3	
			percussion			graveleuses  — sables graviers et galets	4	D <sub>1</sub> ≥ 3.D <sub>max</sub>
<ul> <li>Carottier de pénétration (SPT)</li> </ul>	$C_a = 112 \% \text{ et}$ $\alpha \approx 20^{\circ}$ $C_i = C_o = 0$ (voir norme NF P 94-116)	D <sub>1</sub> = 35 mm	— battage	trousse	non		4	cet outil est d'abord u matériel d'essai de pénétratio dynamique
(à suivr								

Outils de prélèvement			Procédés de forage				Classe des prélèvements	
Désignation	Caractéristiques	Dimensions de l'échantillon	Mode de pénétration	Découpage et extraction	Fluide	Matériaux prélevables	Classe optimale possible	Remarques
Carottier à piston stationnaire	$C_a \le 15 \% \text{ et}$ $\alpha \le 10^{\circ}$ $C_i = 0.5 \% \text{ à 1.5 \%}$ $C_o = 0 \% \text{ à 2 \%}$	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm H/D <sub>1</sub> ≤ 10	Fonçage continu par pression H/L <sub>t</sub> < 0,9	trousse	non	— sols fins très mous à fermes	1	une grande vitesse de fonçage, dans les sols fins mous, est favorable     jeu intérieur C <sub>i</sub> = 0 acceptable pour les carottiers courts (L <sub>t</sub> /D <sub>1</sub> ≤ 6)
Carottiers rotatifs — carottier simple industriel			rotation	couronne	eau, eau + additif, boue	— (couches de chaussées traitée)	1	la classe maximale es fonction du diamètre de la carotte et de la nature du terrain (voir tableau C.1)
— carottier simple minier			rotation	couronne	eau, eau + additif, boue	— roches saines	1	Exceptionnellement peut êtr utilisé sans fluide pour un passe courte
— carottier double		D <sub>1</sub> ≥ 85 mm	rotation	couronne	eau, eau + additif, boue	— sols fins, fermes à durs — argiles graveleuses, rocher	1	la classe d'échantillon peut être obtenue avec de sols fins raides à durs avec de carottes, grattées et paraffinées, dès le prélèvement
— carottier dou- ble à trousse dépassante	trousse : $C_a \le 15 \%$ $\alpha < 10^{\circ}$ $C_i = 1,5 \% à 3,5 \%$	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm H/D <sub>1</sub> ≤ 10	rotation (et fonçage par pression sur la trousse) H/Lt < 0,9	couronne + trousse coupante	eau, eau + additif, boue	sols fins raides à durs,     roches tendres	1	

(a suivre)

Outils de prélèvement			Procédés de forage			Classe des prélèvements		
Désignation	Caractéristiques	Dimensions de l'échantillon	Mode de pénétration	Découpage et extraction	Fluide	Matériaux prélevables	Classe optimale possible	Remarques
— carottier triple		D <sub>1</sub> ≥ 85 mm H/D <sub>1</sub> ≤ 10	rotation	couronne	eau, eau + additif, boue	— sols fins fermes à durs — roches	1	
carottier triple à trousse dépas- sante	trousse : $C_a \le 15 \%$ $\alpha < 10^{\circ}$ $C_i = 1,5 \% à 3,5\%$	D <sub>1</sub> ≥ 75 mm H/D <sub>1</sub> ≤ 10	rotation (et fonçage par pression sur la trousse) H/L <sub>t</sub> < 0,9	couronne + trousse coupante	eau, eau + additif, boue	— sols fins fermes à durs — roches tendres	1	I'emploi d'un extracteur peut augmenter la classe d'un point
Autres outils — tarières à main		diamètre du forage ≥ 40 mm	rotation		non	— sols fins, sables hors d'eau	3 (4 si tourbe et sol très mou)	
— tarières continues	d <sub>āme</sub> ≤ 0,33 d <sub>ext</sub> pas de l'hélice = diamètre extérieur	≥ 60 mm	rotation		non	— sols fins — sols grenus hors d'eau	3 (4 si tourbe et sol très mou)	Les tarières simples sont remontées tous les 0,3 m au plus et les tarières continues tous les 1 m au plus.
— carottier à soupape						— graves	5	
outil à benne preneuse, à curette						— sols très hétérogènes	3 (hors d'eau) 5 (dans l'eau)	
— tarière simple et seau rotatif		≥ 300 mm	rotation		non	— sols fins, — sols grenus hors d'eau	3	Les tarières simples sont remontées tous les 0,3 m au plus et les tarières continues tous les 1 m au plus.

# Essais en forage Reconnaissance géotechnique ou Géophysique

- Pressiomètres : NF P94-110-1 et 2 + EN ISO 22476-4 procédure B

- Dilatomètres : XP P94-443-1

- Phicomètre : XP P94-120

- Diagraphies instantanées: absence de norme

- SPT (essai de pénétration au carottier) : NF P94-116

### Essais en forage

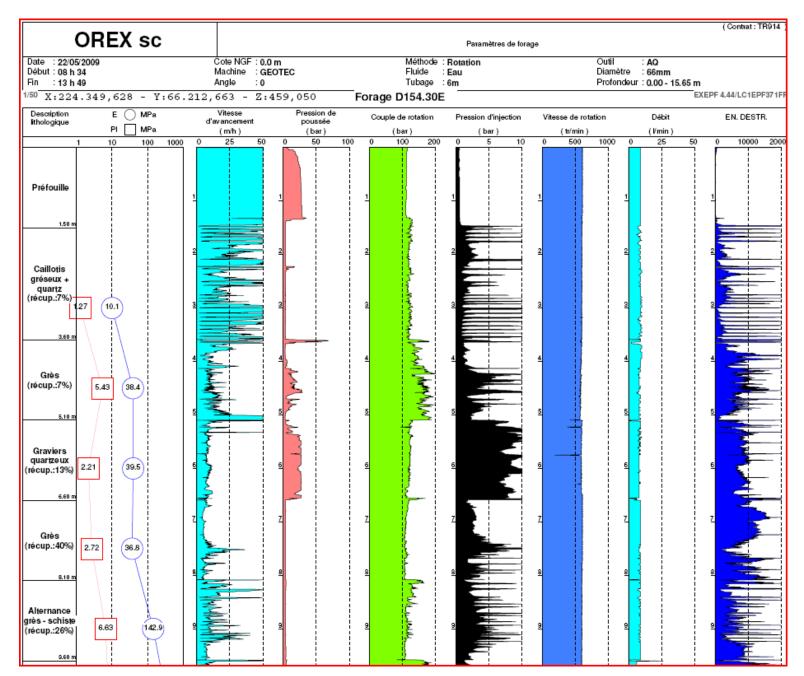
L'enregistrement des paramètres de forage en fonction de la profondeur ou diagraphie instantanée permet de compléter les informations sur les variations de nature des sols traversés par le forage.

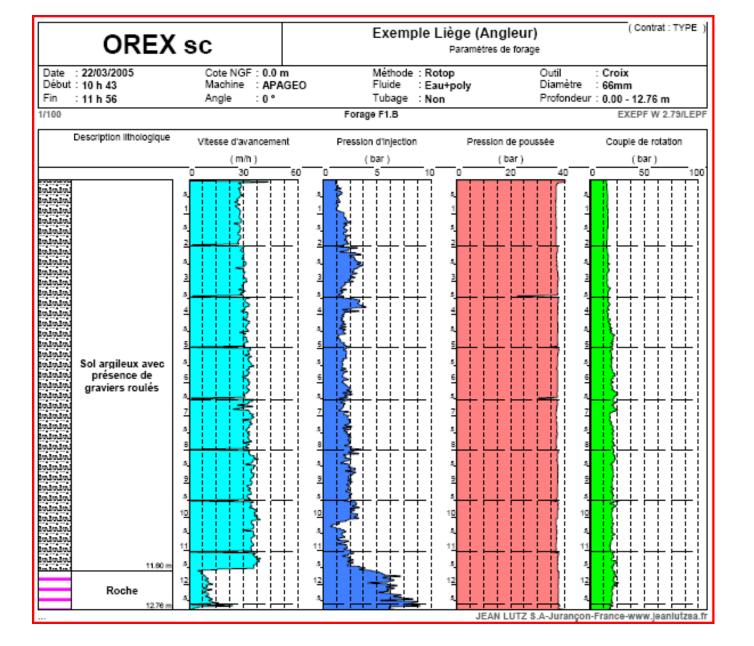
#### Nombre de paramètres à enregistrer : minimum 3

- V.A. (m/h): vitesse d'avancement instantanée
- P.O. (bars): pression sur outil
- C.R. (bars): couple de rotation
- P.I. (bars): pression d'injection du fluide de forage
- Vibralog ou percussion réfléchie : m/s<sup>2</sup>

#### Diagraphie instantanée dans quels cas?

- forages destinés aux essais in-situ : pressiomètres,





#### Diagraphies instantanées dans quels cas?

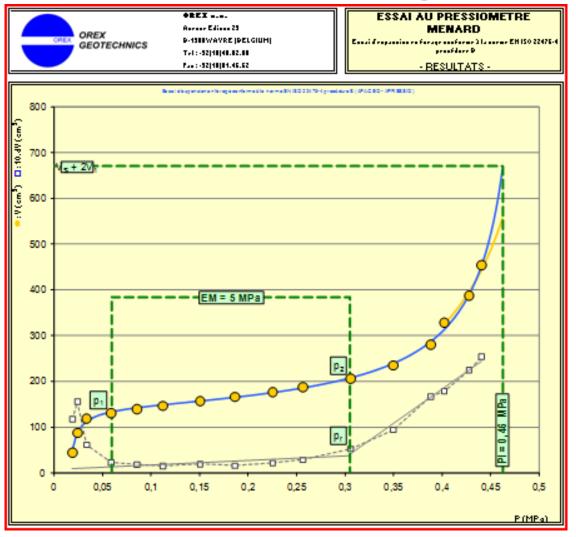
- forages destinés aux essais in-situ : pressiomètres, dilatomètres, etc.
- recherches des cavités naturelles ou artificielles
- corrélations avec d'autres types d'investigations (sondages carottés, profils pressiométriques, CPT, etc.)
- contrôle de la qualité de travaux d'injection

#### Essai au pressiomètre Ménard

- L'essai consiste à descendre, à une profondeur donnée, une sonde gonflable dans un forage soigneusement calibré.
- Les variations de volume du sol au contact de la sonde sont mesurés en fonction de la pression radiale appliquée
- C'est le seul essai *in situ* fournissant à la fois un *critère de rupture* et un *critère de déformabilité*
- Essai praticable dans tous les types de sols et de roches

Essai au pressiomètre Ménard





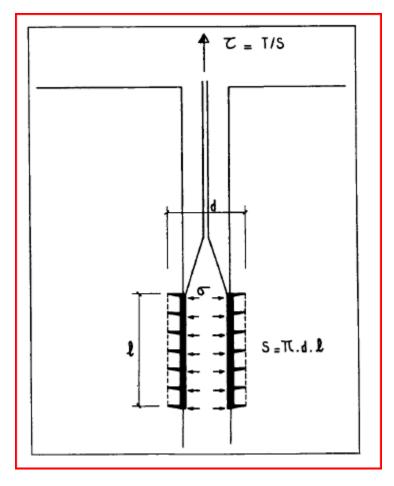
Nature-	Forage préalable								Refoule-
des	Rotation *					Battage et autres			ment
terrains	T.s.	° MLT	тнс	0. DG, IN	CAR.	ROTOP.	CAR. BAT.	CAR.V8F	TF BAT/VBF
Vase et argile molles	_	R	_	o°			O		_
Argiles moyennement compactes	R	R	R	R°	_	O,	_	_	_
Argiles compactes marnes raides			R	R	R°	o°	_	_	_
Limons  — au-dessus  de la nappe	R	O	R	O°	_	o°	О	О	
— sous la nappe		R	_	o°	o°	o°		_	
Sables läches 	R	R	O	o°		$\mathbf{o}^{\circ}$			
– sous la nappe		R	_	o°	_	o°	_	_	O
novennement ompacts at compacts	R	R	R	R°	_	$\mathbf{R}^{\circ}$	O	О	$\mathbf{O}^{\star}$
iols grossiers : graviers, galets ; argilles à sillex, etc.	$\angle$		O	O°		R°	О	0	$\mathbf{O}^{\star}$
loches – altérées	/,		R	R	0	R°	O	O	$\mathbf{O}^{\star}$
- saines				R	R	R			/
_		1		Légende :		_			
R Recommandé O Toléré Non toléré		OR	T.S. Tarière à sec THC Tarière hélécoïdale continue à sec O. DG. Outil désagrégateur ROTOP. Rotopercussion BAT. Battage			TJN. Tarière avec injection de boue de forage CAR. Carottier IN Avec injection de boue poinç Carottier à parois minces fonçé			

- \* Vitesse de rotation < 60 tr/min
- + Éventuellement forage préalable en petit diamètre  $(d_{t} < d_{s})$
- O Injection avec boue (pression < 500 kPa débit < 15 l/min) Si rotation = pression sur l'outil < 200 kPa

#### Essai au Phicomètre

- Les difficultés, voire l'impossibilité de prélever des E.N.R. dans certains sols, ont conduits à la mise au point d'un essai *in situ* pour déterminer les paramètres de cisaillement.
- Détermination de C<sub>i</sub> et de φ<sub>i</sub>
- Essai réalisé en place dans un forage préalable identique au forage pressiométrique
- Applicable à tous type de sols à l'exception des vases et argiles molles et autres sols lâches, des roches et sols raides et des sols grossiers

### Essai au Phicomètre



Essai de pompage (NF P 94-130)

- Domaine d'application :
  - Sols grenus
  - Sols fin ou rocheux traversés par un réseau de discontinuités
- L'essai de pompage = essai destiné à déterminer les caractéristiques hydrauliques du sol. Il consiste à abaisser par pompage la surface piézométrique de la nappe et à mesurer, en fonction du temps, les variations du niveau de cette surface ainsi que le débit pompé.
- L'essai va permettre de déterminer :
  - Le coefficient de perméabilité de la couche (ou horizon) testé (k)
  - Le facteur d'emmagasinement
  - Le rayon d'action du pompage

#### Essai de pompage (NF P 94-130)

#### - <u>Coefficient de perméablité</u> :

 Le coefficient de perméabilité k obtenu à partir de l'essai de pompage est le coefficient de perméabilité horizontale du sol. C'est un coefficient global ou « en grand », représentatif du comportement hydraulique moyen du volume de sol intéressé par l'essai.

#### - <u>Facteur d'emmagasinement</u>:

 Ce coefficient S est adimensionnel. Il fournit la variation du volume d'eau contenu dans un prisme vertical de section horizontale d'aire unité pour une variation unitaire de la charge hydraulique

#### - Rayon d'action d'un pompage :

- Le rayon d'action R(t) à un instant donné est la distance, comptée à partir de l'axe du puits, au-delà de laquelle le rabattement de la surface piézométrique de la nappe est nul. En régime permanent R(t) devient constant, il est alors désigné par R<sub>a</sub>

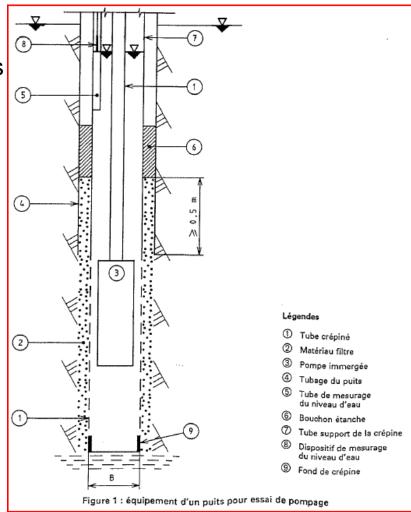
#### Essai de pompage (NF P 94-130)

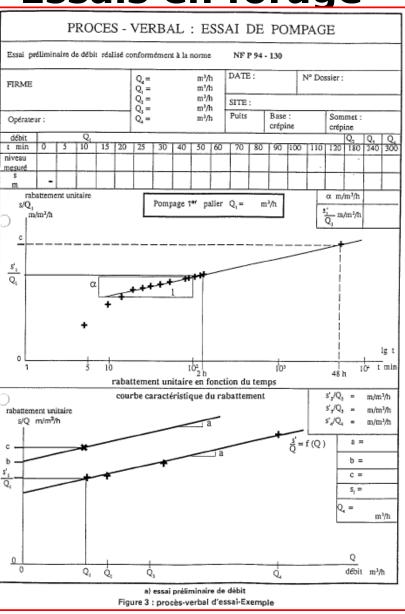
#### - <u>Principe de l'essai</u>:

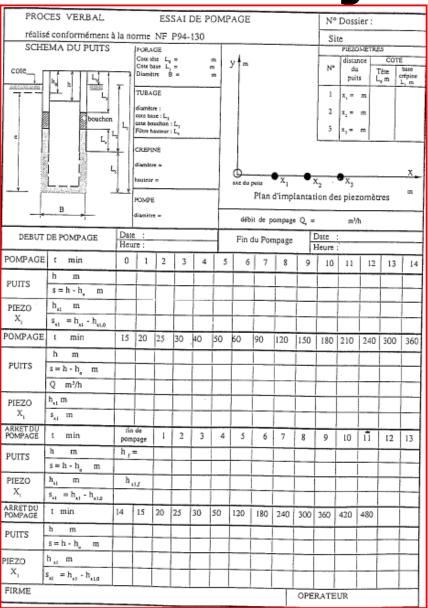
- L'essai consiste
  - à rabattre, par pompage dans un puits filtrant la surface piézométrique d'une nappe
  - À mesurer en fonction du temps, pendant et après le pompage, le débit pompé ainsi que le niveau d'eau dans le puits et dans les piézomètres
- Il faut avant tout connaître:
  - La coupe géologique du sol
  - La nature et caractéristiques d'identification des différentes couches
  - Régime hydrogéologique

Essai de pompage (NF P 94-130)

Schéma du puits







#### Essai de pompage (NF P 94-130)

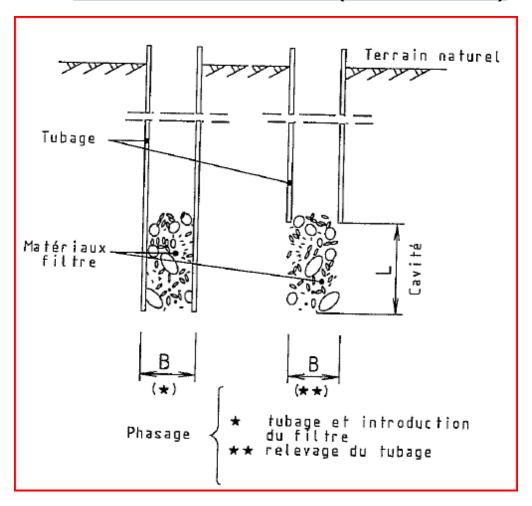
#### – Conclusions :

- On déterminera en phase de pompage et en phase de remontée :
  - Au droit du puits :
    - » K en régime transitoire et permanent
  - Au droit des piézomètres :
    - » T (cfr. ci-dessous) et S (est le facteur d'emmagasinement) en régime transitoire et permanent
- En phase de pompage :
  - Tet R<sub>a</sub>
    - » T étant la transmissivité = k.H (H étant l'épaisseur de la couche aquifère)
    - » Ra étant le rayon d'action en régime permanent

Essai d'eau LEFRANC (NF P 94-132)

- Domaine d'application :
  - Essai en place
  - Sols fins ou grenus sous la nappe
  - Permet de déterminer un coefficient de perméabilité locale (qui peut être nettement différent du coefficient en grand cfr. pompage)
  - Cet essai ne doit pas être utilisé pour dimensionner un rabattement important de nappe

Essai d'eau LEFRANC (NF P 94-132)

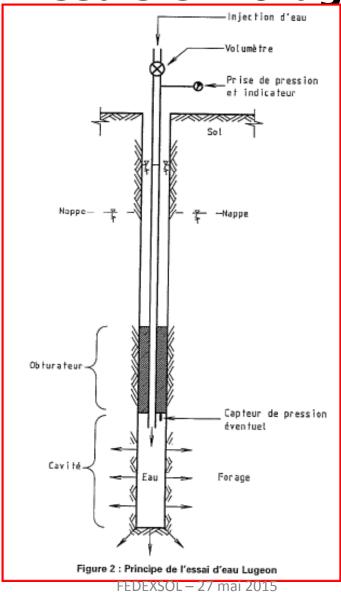


#### Essai d'eau LEFRANC (NF P 94-132)

- L'essai LEFRANC consiste à :
  - Créer une variation de charge, soit par pompage (ce qui souvent préférable), soit par apport d'eau, dans une cavité, préalablement réalisée dans le terrain et de dimensions connues
  - À mesurer l'évolution de la charge en fonction du temps tout en maintenant constant le débit injecté ou pompé (ce débit peut être nul)
  - On crée donc une cavité à l'intérieur du sol à l'aide d'un forage tubé. La cavité est limitée par le fond et une partie de la paroi du forage
  - On produit une variation h(t) de la charge hydraulique à l'intérieur du forage avec un débit constant
  - On mesure la charge d'eau h(t) dans le forage en fonction en du temps
  - On déduit  $k_L=Q(t)/[m.h(t).B]$

#### Essai LUGEON(NF P 94-131)

- L'essai LUGEON est un essai en place réalisé en sondage. Il s'applique aux rochers et aux sols cohérents de résistance mécanique compatible avec la pression d'eau imposée pendant l'essai.
- L'essai LUGEON permet d'évaluer la possibilité de circulation d'eau dans le sol mais également de déceler des hétérogénéités ou des fissurations.
- Claquage (ou débourrage): ouverture des fissures dans le terrain se traduisant par une augmentation sensible du débit à pression d'injection constante ou une chute de pression à débit d'injection constant.
- Colmatage (ou bourrage): phénomène se traduisant par une diminution sensible du débit à pression d'injection constante ou augmentation de pression à débit d'injection constant.

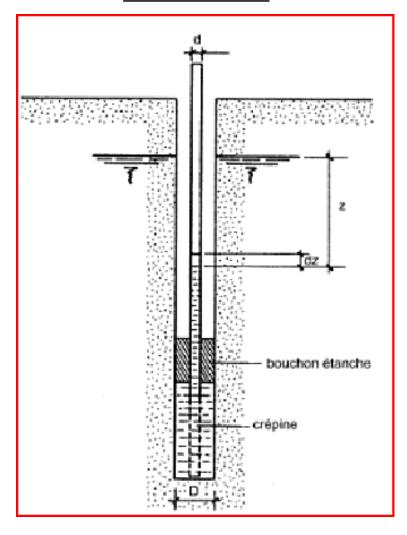


#### Essai LUGEON(NF P 94-131)

#### – Principe de l'essai :

- Réaliser à l'intérieur du sol, par extraction, une cavité à la base du forage, puis à relier cette cavité à la surface du sol par un tube d'injection. La cavité est constituée d'une portion de forage comprise entre le fond et d'un obturateur qui la limite en partie haute
- On produit et maintient constante une charge hydraulique à l'intérieur de la cavité en injectant de l'eau sous pression
- On mesure le volume injecté dans la cavité en fonction du temps
- On en déduit le nombre d'unité LUGEON.
- L'unité LUGEON traduit dans les conditions du processus opératoire le débit moyen injecté sous une pression de 1MPa, exprimé en litres par minute et ramené à un mètre de forage.

#### <u>Piézomètres</u>



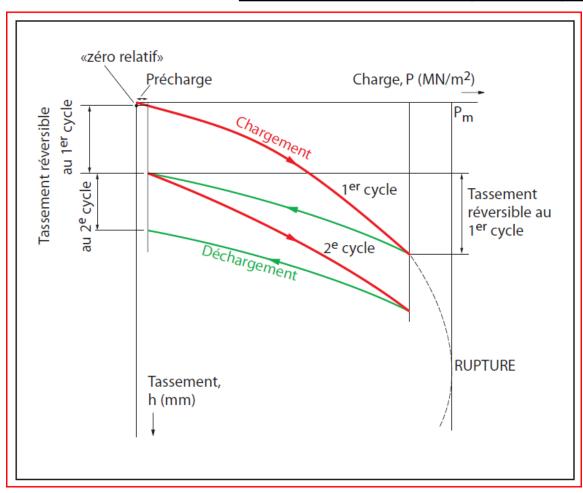
# **PROGRAMME**

- 1. Présentation
- 2. Essais géotechniques in-situ
  - a. Essais CPT (Cone Penetration Test)
    - 1. CPT-M
    - 2. CPT-E
    - 3. CPT-u
  - b. Forages
    - 1. Prélèvements pour essais en laboratoire
      - i. Echantillons remaniés
      - ii. Echantillons non remaniés
    - 2. Forages diagraphiques
    - 3. Forages et essais pressiométriques
    - 4. Forages destinés à d'autres types d'essais
  - c. Essais à la plaque

# <u>Essai de chargement à la plaque</u>

- <u>But</u>: contrôle du compactage en technique routière
- <u>Théorie</u> basée sur la théorie de l'élasticité relation entre tassement vertical du matériau et la pression appliquée sur la plaque
- Relation pression-tassement non linéaire
- Tassement permanent ou résiduel
- Pression maximum au-delà de laquelle le matériau se rompt par cisaillement

# <u>Dia gramme de chargement d'un</u> <u>essai à la plaque</u>



 $ME=D.\Delta p/\Delta h$ 

Avec:

D : diamètre de la plaque

 $\Delta p$ : accroissement de pression

sur la plaque

 Δh : accroissement du tassement de la plaque correspondant

à  $\Delta p$ 

Image CRR

# Essai de chargement à la plaque

Image CRR

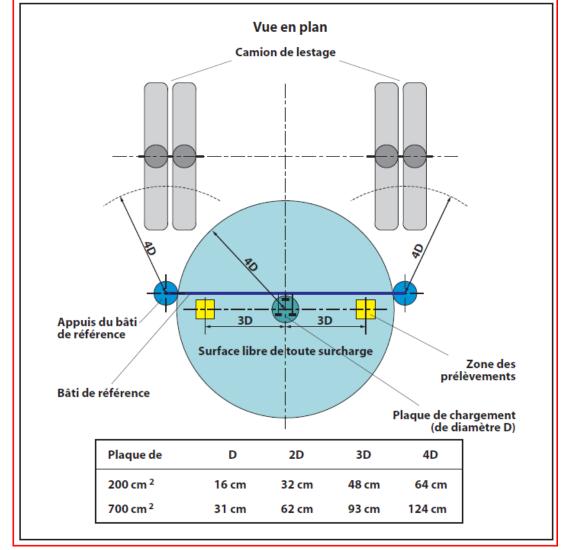


Image CRR

# <u>Essai de chargement à la plaque</u>

- Chargement effectué par palier normalisés en fonction du type de matériau
- On mesure le tassement (ou l'enfoncement de la plaque) en fonction de l'accroissement de charge
- On calule ME qui doit être supérieur à :
  - 11 MN/m² dans les corps de remblai
  - 17 MN/m<sup>2</sup> au sommet des remblai
  - 35 MN/m<sup>2</sup> en surface des sous-fondations
  - 110 MN/m<sup>2</sup> en surface des fondations

# <u>Essai de chargement à la plaque</u>

- Dans le cas d'essais avec 2 cycles de chargement :
  - On calcule  $m=ME_2/ME_1$
  - Si m est élevé, mauvais compactage du matériau
  - Si m<2 et que ME est faible, mauvaise qualité du matériau lui-même

# Essai de chargement à la plaque



Image CRR

# **PROGRAMME**

#### d. Essais en laboratoire

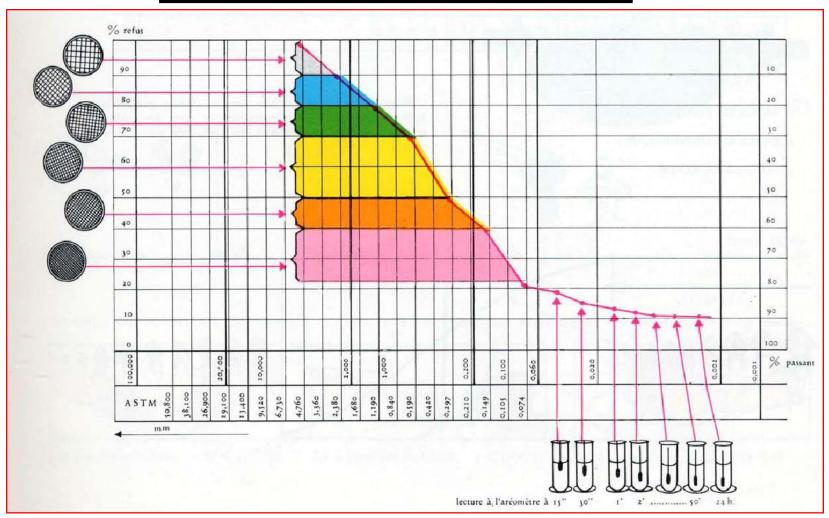
- 1. Description lithologique
- 2. Détermination des limites d'Atterberg
  - i. Indice de liquidité
  - ii. Indice de plasticité
  - iii. Limite de liquidité
  - iv. Limite de plasticité
- 3. Essais triaxiaux
  - i. uu (non consolidé non drainé)
  - ii. Cd (Consolidé drainé)
  - iii. Cu+u (consolidé non drainé + mesure de la pression interstitielle)

# Description lithologique

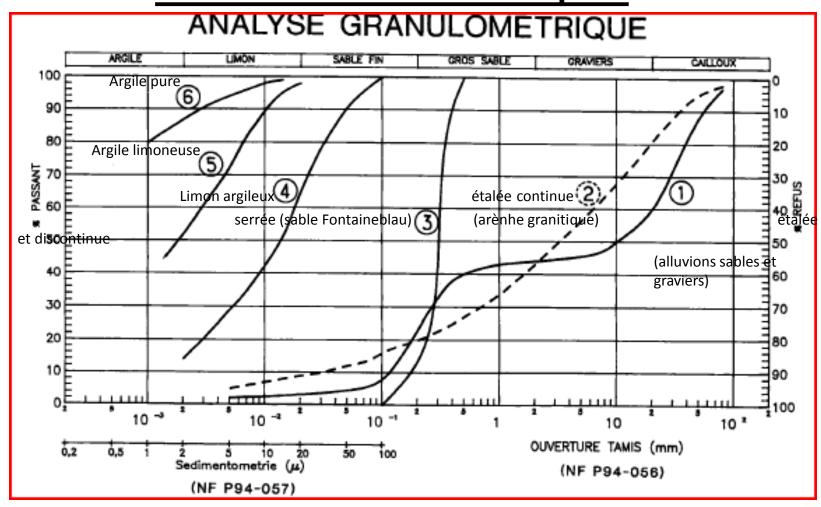
DIAGENESE Enfouissement, perte d'eau, cimentation METAMORPHISME Haute Température - Haute Pression Recristallisation

FORMATIONS MEUBLES		ROCHES SEDIMENTAIRES	ROCHES METAMORPHIQUES	ROCHES MAGMATIQUES
GRAVIER	> 2 mm	Roches détritiques  POUDINGUE, CONGLOMERAT (éléments arrondis et ciment varié)  BRECHE (éléments angulaires et ciment varié)	QUARTZITES	Roches volcaniques  BASALTE OBSIDIENNE COTICULE
SABLE	2 mm - 63 μ	GRES à ciment varié: silice, calcite, dolomie, argile, fer PSAMMITE: grès à fins lits micacés ARKOSE - GRAUWACKE - MACIGNO	QUARTZO-PHYLLADES	TUFF  Roches plutoniques  GRANITE
SILTS LOESS	63 μ - 2 μ (3,9 μ) < 20 μ	SILTITE, PELITE		PORPHYRE (de Quenast)
ARGILE	< 2 μ (< 3,9 μ)	ARGILITE, SHALE, SCHISTE (si schistosité)	PHYLLADES, SCHISTES ARDOISIERS	
		Roches carbonatées  CALCAIRE CaCO <sub>3</sub> DOLOMIE [(Ca, Mg)CO <sub>3</sub> ] <sub>2</sub> CRAIE CaCO <sub>3</sub> (squelettes µ-organismes marins) + un peu d'argile  MARNE: calcaire + argile (35% - 65%)  Roches siliceuses  OPALE , CALCEDOINE, PHTANITES, CHERTS, SILEX  'Roches' carbonées ( CO < végétaux)  TOURBE - LIGNITE - CHARBON/HOUILLE - ANTHRACITE - GRAPHITE  Roches évaporitiques  SEL GEMME (HALITE), GYPSE, ANHYDRITE, BARYTE		

# Analyse granulométrique et sédimentométrique



# Analyse granulométrique et sédimentométrique



- Argiles: propriété d'absorber beaucoup d'eau (fonction de leur stucture) ou au contraire de se dessécher.
- Kaolinites n'absorbent qu'une quantité d'eau modérée
- Montmorillonites sujettes au retrait et au gonflement.

- Quelle que soit la nature de l'argile, lorsqu'elle est malaxée avec des quantités d'eau importantes, elle se transforme en boue.
   L'argile a un comportement liquide
- Au contraire, si l'argile est desséchée, les grains sont très refermés et les liaisons entre grains deviennent intense. L'argile a un comportement solide

- Entre ces deux états extrêmes, l'argile est malléable. L'argile a un comportement plastique
- But des limites d'ATTERBERG : définir les états d'humidité correspondant aux limites entre ces trois états. L'état d'humidité du sol étant exprimé par sa teneur en eau (w en %)

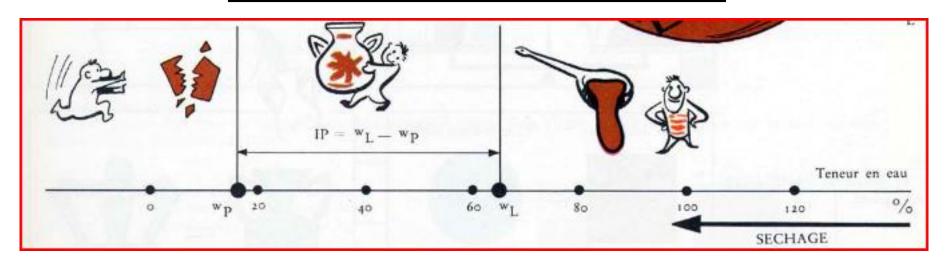
$$w(\%) = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_d}$$
 avec  $\gamma$  qui est la densité

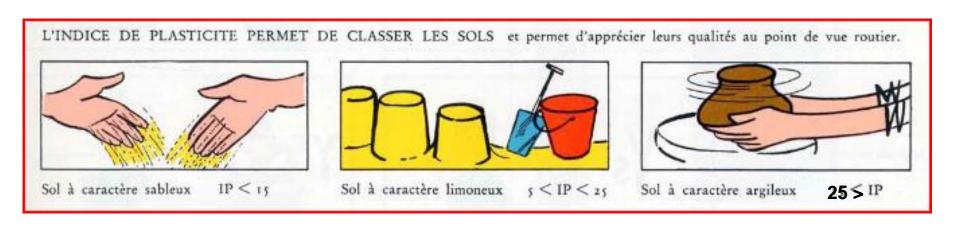
- Limite de liquidité  $w_L$  traduit le passage entre l'état liquide et l'état plastique
- Limite de plasticité  $w_p$  traduit le passage entre l'état plastique et l'état solide
- On définit l'indice de plasticité : $I_p = w_L w_p$
- On définit l'indice de consistance :  $I_c = \frac{w_L w}{I_p}$
- On définit l'indice de liquidité :  $I_L = \frac{w w_p}{I_p}$

#### Limites d'ATTERBERG



#### Limites d'ATTERBERG



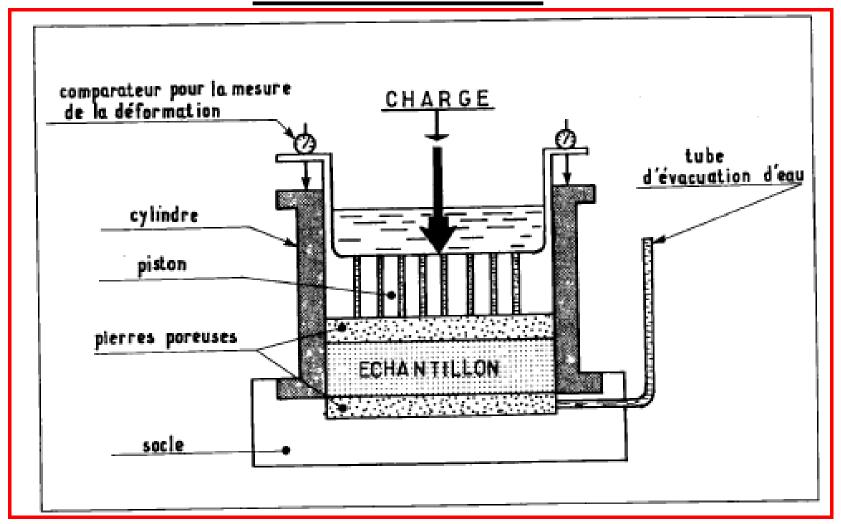


#### Limites d'ATTERBERG

- Si  $I_c > 1$  le sol est a l'état solide
- Si  $0 < I_c < 1$  le sol est à l'état plastique
- Si  $I_c < 0$  le sol est a l'état liquide

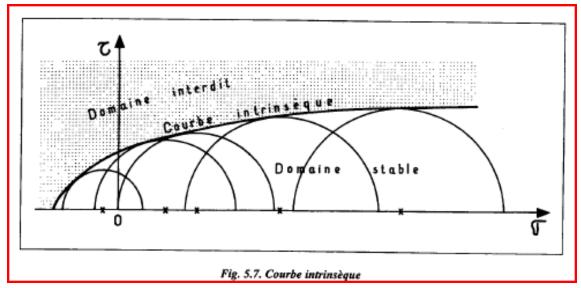
limon:	$w_L = 24$
	$w_P = 17$
	$I_P = 7$
argile limoneuse peu plastique :	$w_L = 40$
	$w_P = 24$
	$I_P = 16$
argile très plastique :	$w_L = 130$
	$w_P = 45$
	$I_P = 85$

# Essais de compressibilité à l'oedomètre



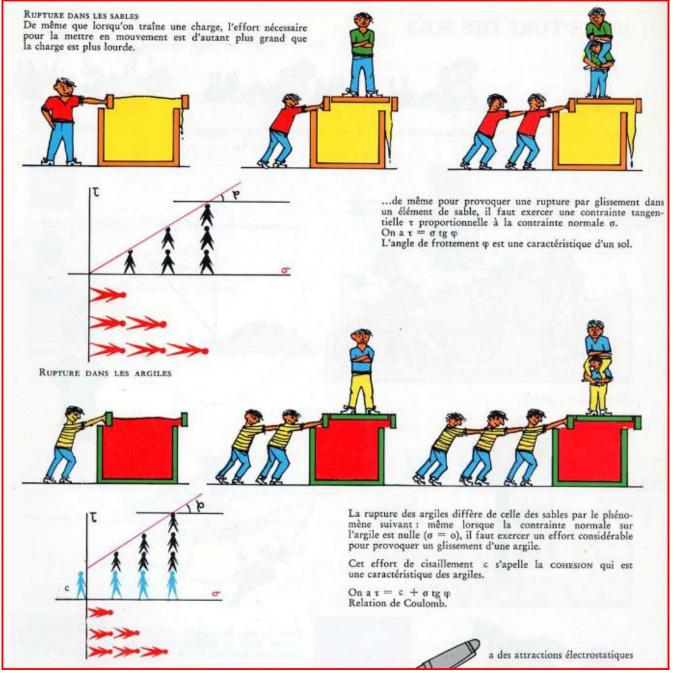
#### Critère de Mohr-Coulomb :

Considérons un matériau solide quelconque. Si pour différentes valeurs de la contrainte moyenne, le déviateur des contraintes est progressivement augmenté jusqu'à ce que la rupture se produise, il apparaît que les cercles correspondant au déviateur maximum admettent une même courbe enveloppe appelée courbe intrinsèque.



- Il n'existe pas d'état stable de contraintes qui corresponde à un cercle de Mohr recoupant la courbe intrinsèque. En effet, lorsqu'un cercle devient tangent à la courbe intrinsèque, il y a rupture localisée au point correspondant (il y a plastification).
- Pour les sols, la courbe intrinsèque peut être assimilée à une droite dans un champs de contrainte assez vaste. Cette propriété est une simplification considérable.
- Cette droite est appelée la droite de Mohr-Coulomb et est d'équation :

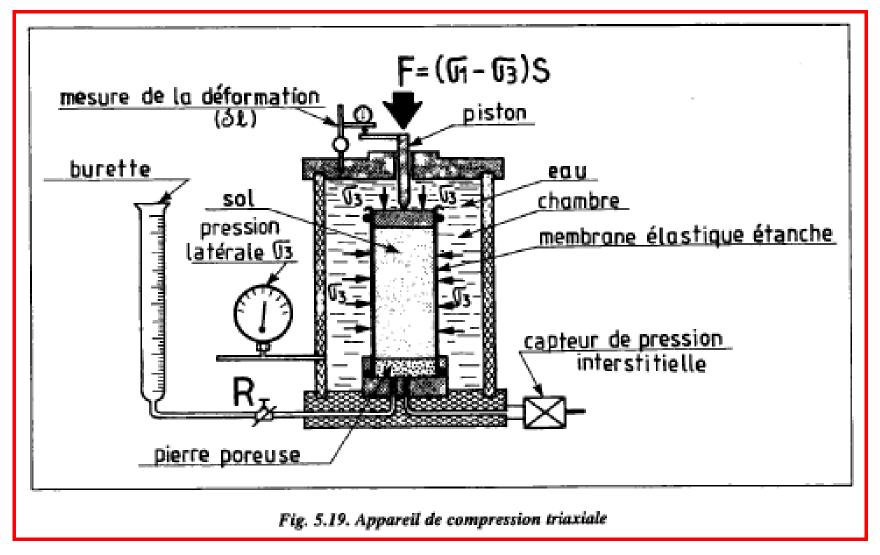
$$au = c + \sigma . \tan \phi$$
cohésion angle de frottement interne

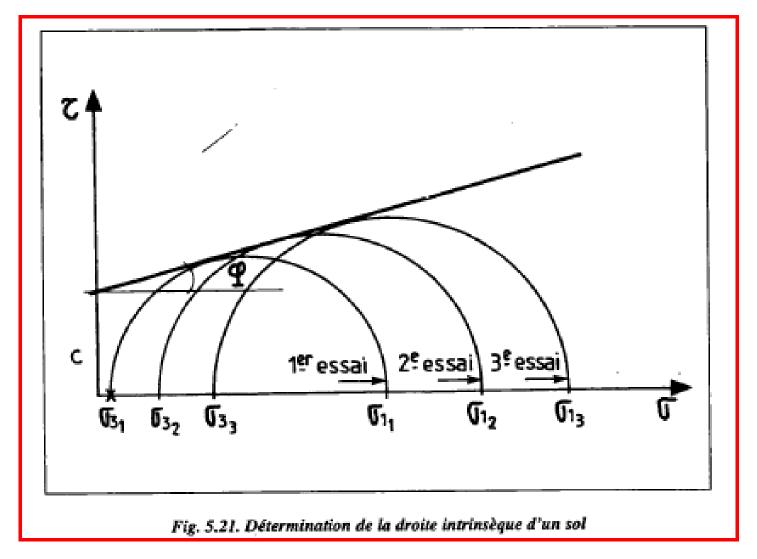


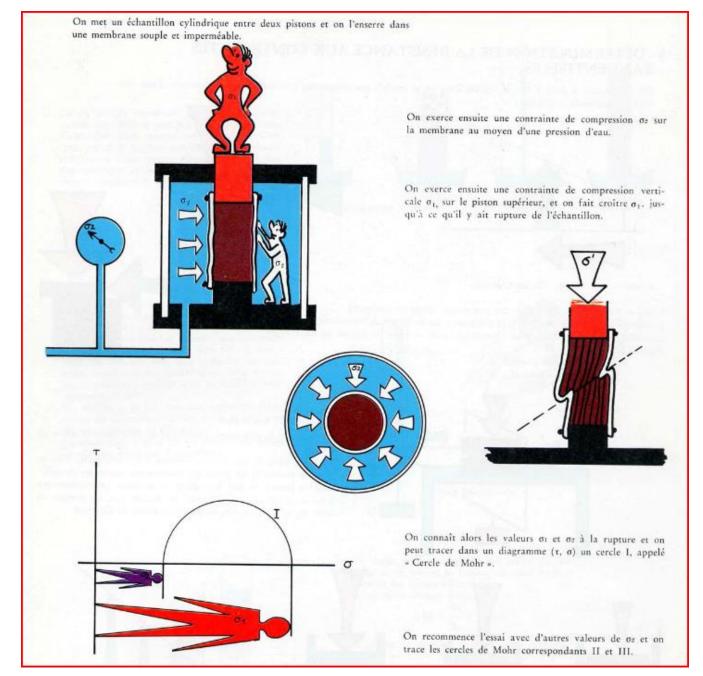
 Si les axes du diagramme de Mohr sont représentés en contraintes effectives et non plus totales alors on a :

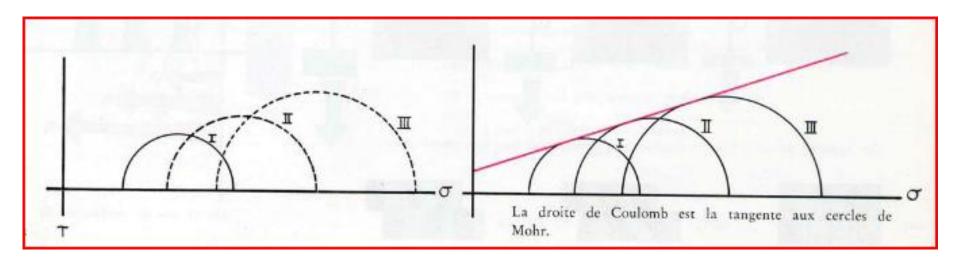
$$au' = au$$
 
$$\sigma' = \sigma - u$$
 L'équation s'écrit alors :  $au' = c' + \sigma' . an \phi'$ 

- Un sol est dit pulvérulent lorsque sa cohésion est nulle (la droite passe par l'origine)
- On va donc essayer de retrouver la droite de Mohr-Coulomb en plaçant un même sol dans des états de contraintes différents.







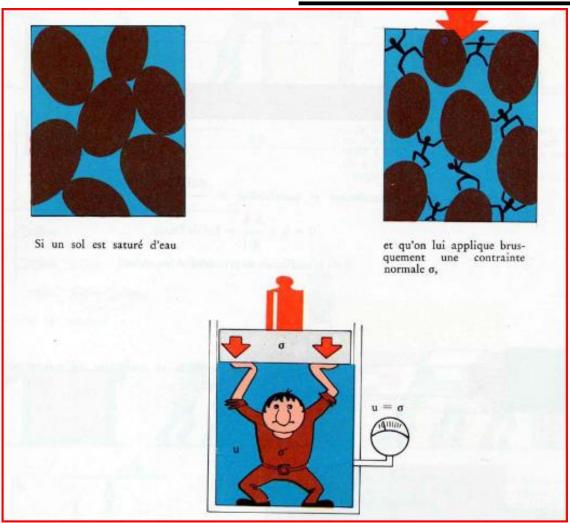


#### Conditions particulières de l'essai

- Consolidation : cette phase consiste à appliquer, préalablement à l'essai, une contrainte normale à l'échantillon. Celui est saturé, puis mis en consolidation sous cette contrainte.
   Un essai triaxial peut être du type consolidé ou non consolidé.
- Drainage: L'essai est non drainé si l'éprouvette ne peut expulser d'eau en cours de chargement, donc si le robinet R est fermé dans l'essai triaxial. L'essai est de type drainé lorsque le sol a la possibilité de se drainé et que la vitesse de l'essai est telle que le drainage s'effectue au fur et à mesure du chargement, c'est-à-dire que la pression interstitielle reste pratiquement nulle.

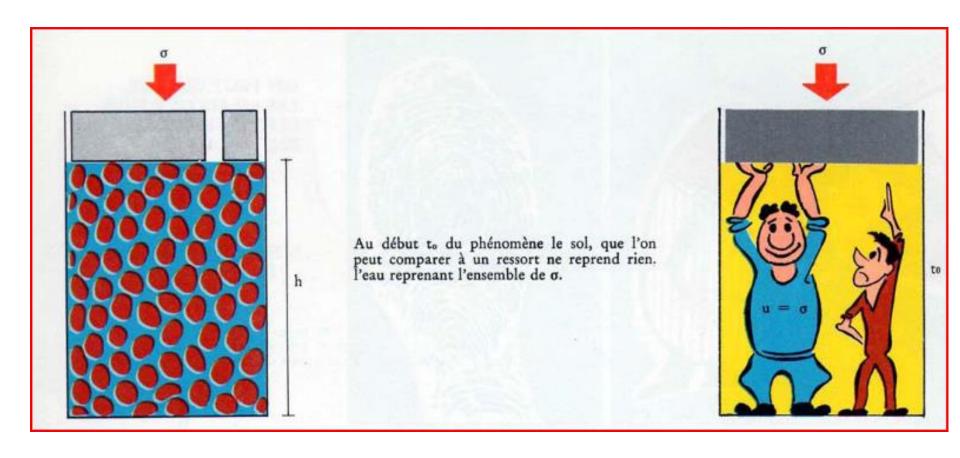
#### Essais Triaxiaux – Phénomène de

#### consolidation

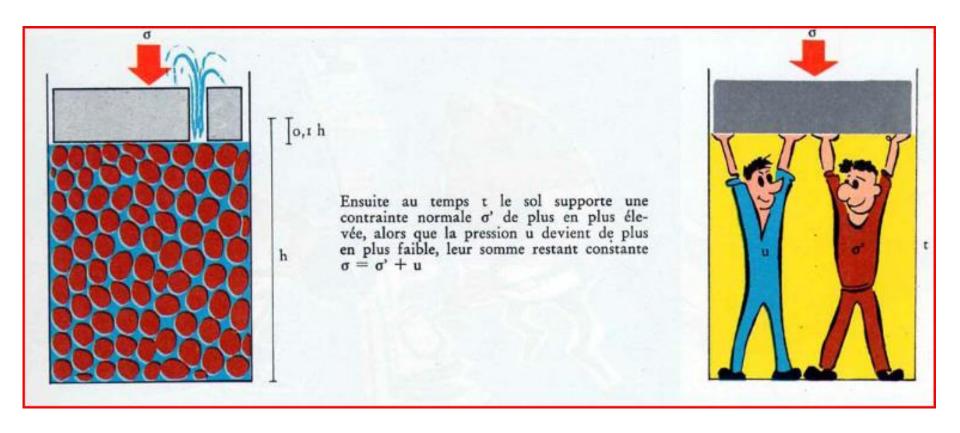


Au début, l'eau ne peut pas s'échapper et elle prend une pression u qui égale σ.
Ensuite les grains changent de position et l'eau s'échappe jusqu'à ce que la pression u soit nulle ou égale à la pression hydrostatique (si elle est sous eau). C'est la consolidation.

## <u>Essais Triaxiaux – Phénomène de</u> <u>consolidation</u>



## <u>Essais Triaxiaux – Phénomène de</u> <u>consolidation</u>



# Essais Triaxiaux – Phénomène de consolidation

