



Cerema

Fondations superficielles et profondes

Reconnaissances géotechniques

Anne DUCHEZ, Nathalie DUFOUR

Cerema Méditerranée – Aix-en-Provence

Plan

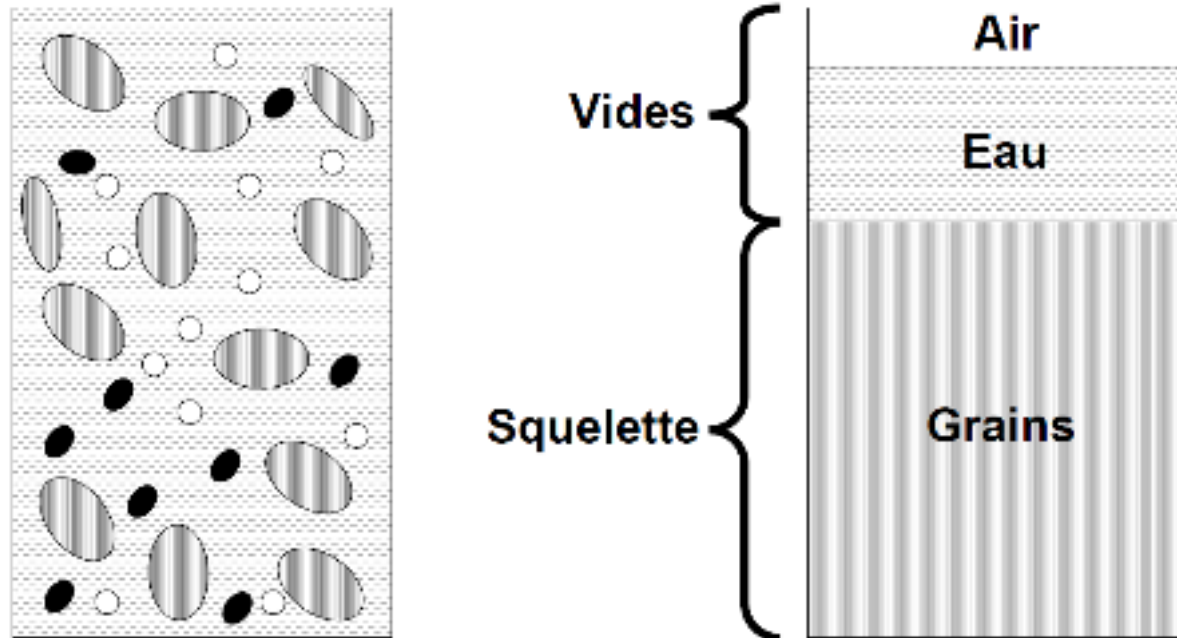
I. Caractéristiques du sol

1. Eléments constitutifs du sol
2. Caractéristiques physiques
3. Caractéristiques dimensionnelles
4. Essais d'identification
5. Contrainte effective
6. Résistance au cisaillement

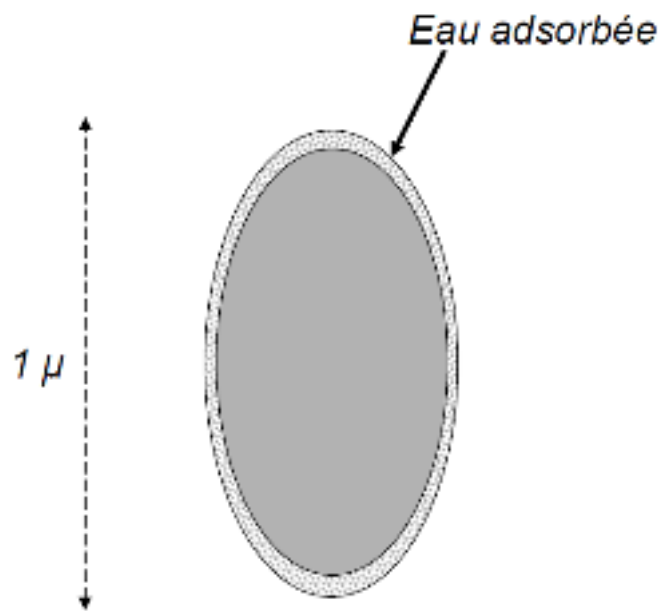
II. Profil géologique et reconnaissances

1. Cartes géologiques
2. Prélèvement d'échantillons
3. Essais in situ
4. Reconnaissances en site sismique

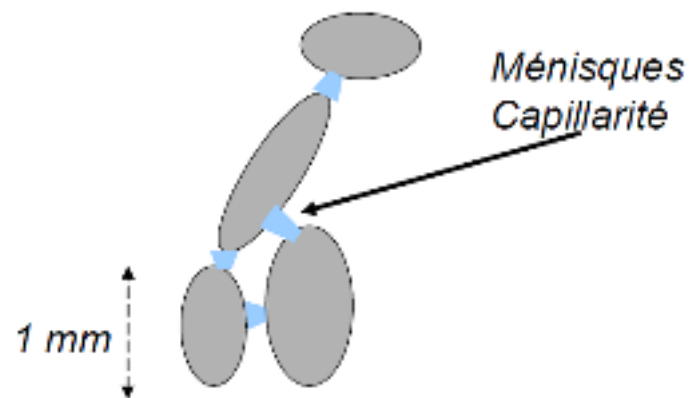
Éléments constitutifs du sol



Éléments constitutifs du sol



Particule de sol très fin

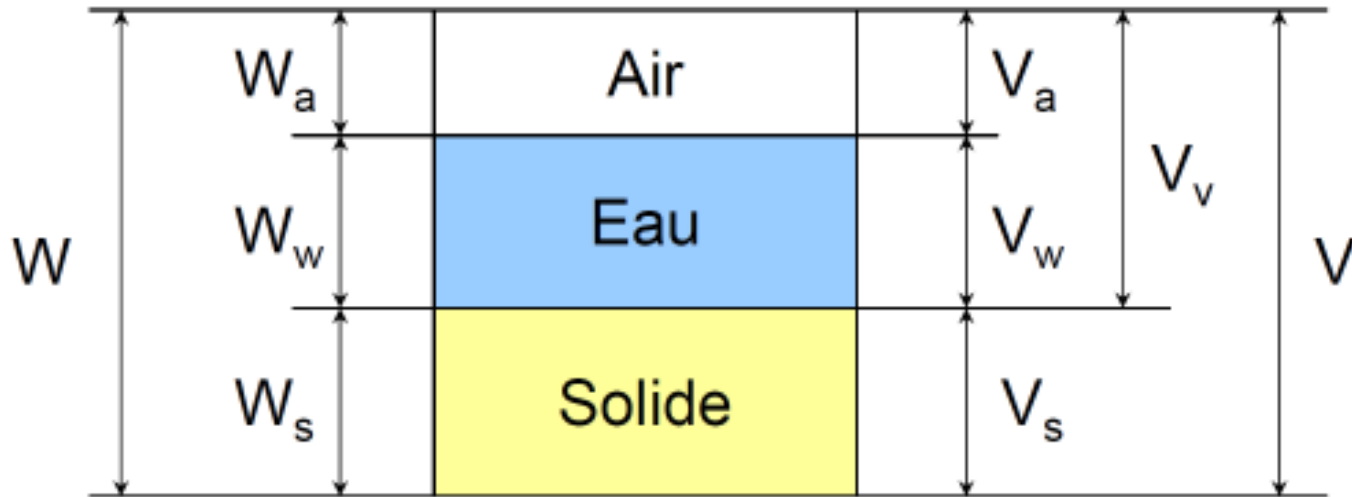


Particules de sol grenu

Caractéristiques physiques

W - Poids

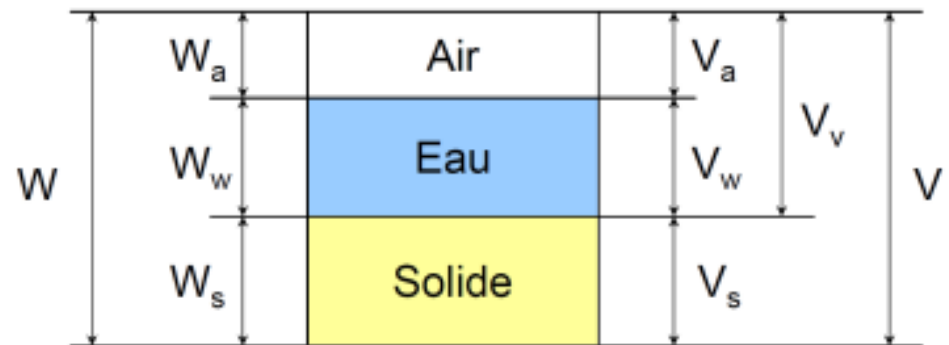
V - Volume



Caractéristiques physiques

Poids volumiques :

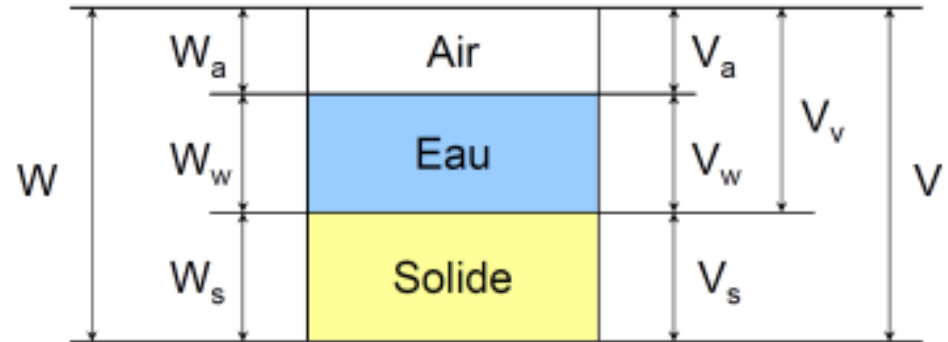
- Des grains solides : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$
- De l'eau : $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$
- Total du sol: $\gamma = \frac{W}{V}$
- Du sol sec: $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$
- Du sol saturé: $\gamma_{sat} = \frac{W_s + \gamma_w V_v}{V}$



Caractéristiques physiques

Paramètres sans dimensions:

- Porosité: $n = \frac{V_v}{V}$
- Indice des vides: $e = \frac{V_v}{V_s}$
- Degré de saturation: $S_R = \frac{W_w}{V_v} \cdot 100$
- Teneur en eau: $w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$



Caractéristiques physiques

Des grains solides : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

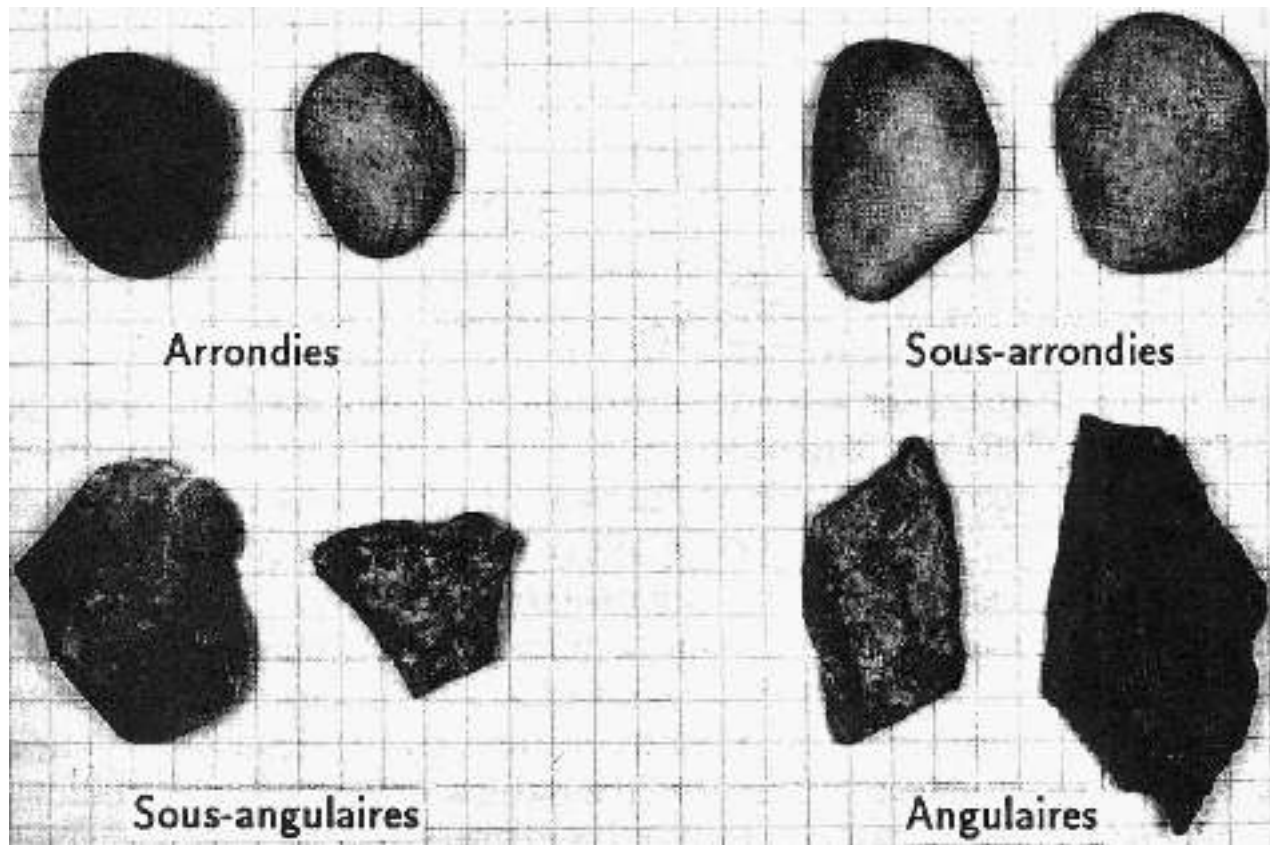
Teneur en eau: $w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$

Total du sol: $\gamma = \frac{W}{V}$

SOL	γ_s	e	w	$\gamma = \frac{1+w}{1+e} \gamma_s$
<i>Sable de Fontainebleau</i>	27 kN/m³	0,86	10%	16 kN/m³
<i>Argile verte du Sannoisien</i>	26,7 kN/m³	0,77	30%	19,7 kN/m³
<i>Limon d'Orly</i>	26,2 kN/m³	0,49	16%	18,0 kN/m³
<i>Tourbe (organique)</i>	N.C.	N.C.	200%	13,5 kN/m³
<i>Vase de Martrou (organique)</i>	18,0 kN/m³	1,22	82%	15,0 kN/m³

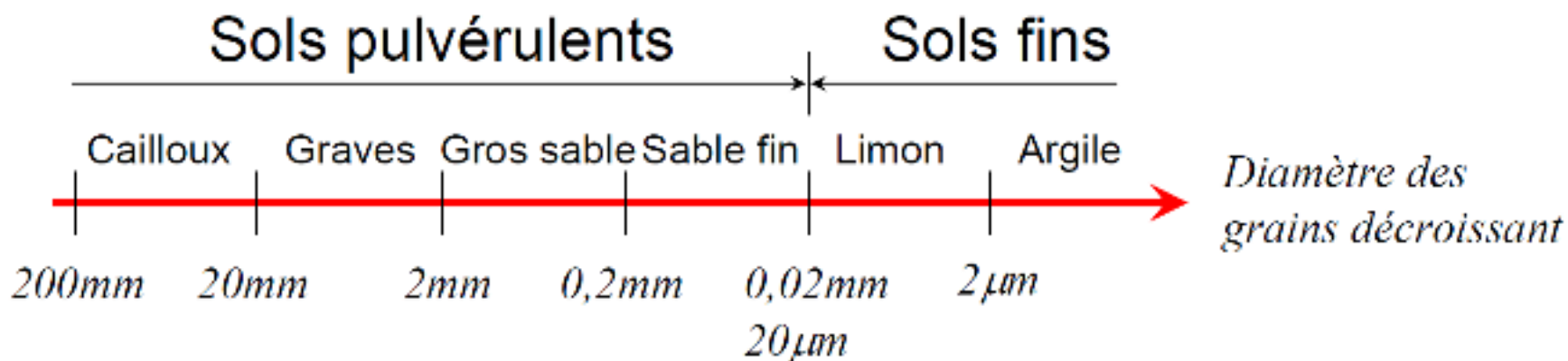
Caractéristiques dimensionnelles

Forme des grains



Caractéristiques dimensionnelles

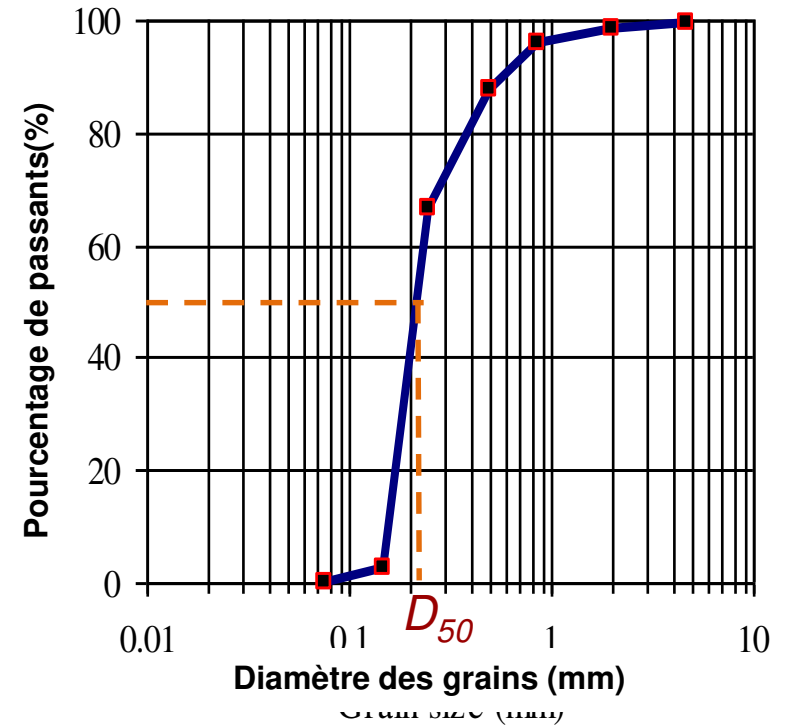
Dimension des grains – sol à granulométrie uniforme



Caractéristiques dimensionnelles

Courbes granulométriques

Tamis (mm)	Masse retenue (g)	Masse passante (g)	Passant (%)
4,750	0,00	190,20	99,53
2,000	2,10	188,10	98,43
0,850	4,60	183,50	96,02
0,500	15,80	167,70	87,76
0,250	40,90	126,80	66,35
0,150	122,00	4,80	2,51
0,075	4,70	0,10	0,05
fond	0,10	0,00	0,00



D_{50}

Diamètre moyen (mm)

D_{10}

Diamètre efficace (mm)

$C_u = D_{60}/D_{10}$

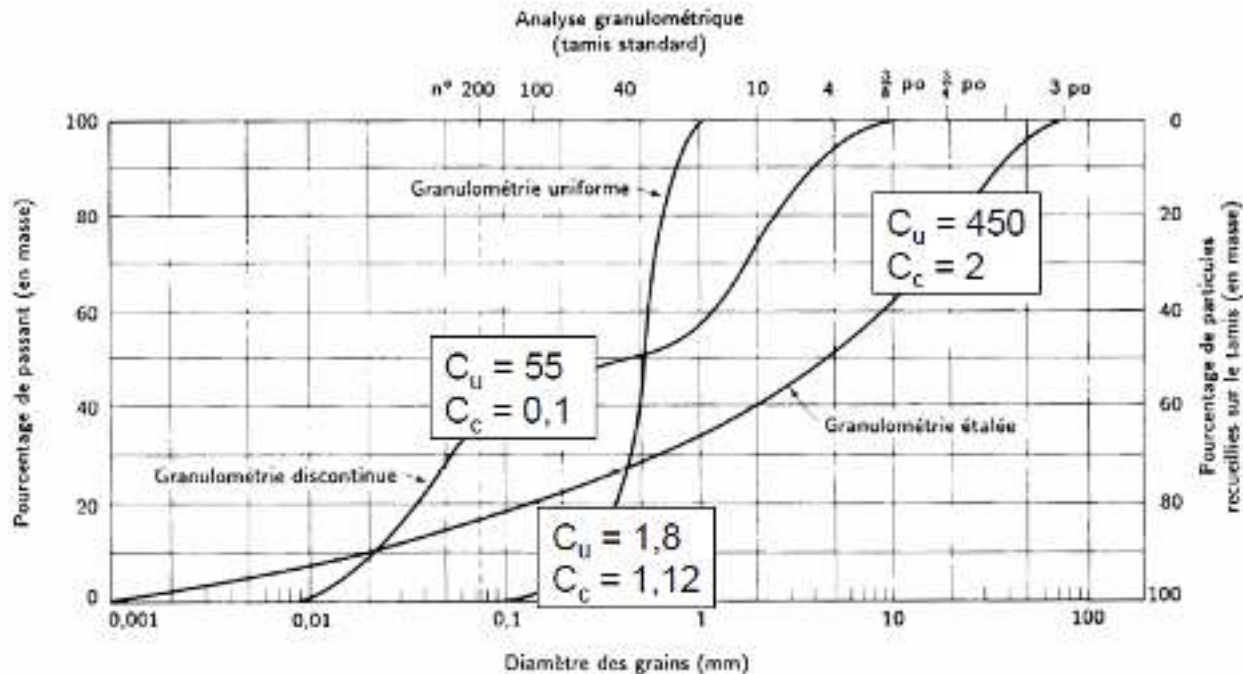
Facteur d'uniformité

$C_c = D_{30}^2 / (D_{60} D_{10})$

Facteur de courbure

Caractéristiques dimensionnelles

Caractéristiques granulométriques



Coefficient d'uniformité $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Coefficient de courbure $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$

Caractéristiques dimensionnelles

Sol grenu

Dépend uniquement des caractéristiques du squelette :

- Les propriétés géotechniques restent stables si sec, humide, saturé
- Importance de la dimension des grains et de leur état de compacité

Sol fin

Selon la teneur en eau les propriétés mécaniques d'un sol fin varient (changement de consistance):

- De celles d'un liquide
- À celle d'un solide

La taille des grains influe sur les forces de cohésion

Essais d'identification

Sols grenus

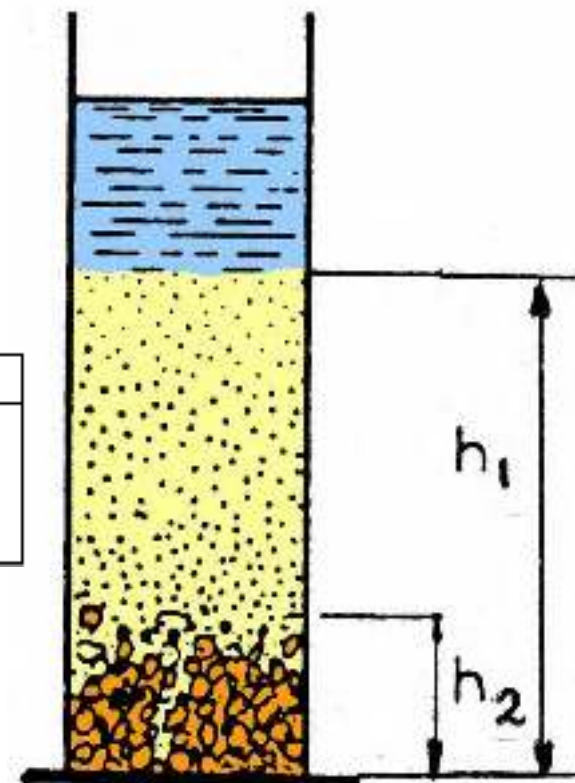
- **Essai d'équivalent de sable** : évaluation de la proportion d'éléments fins dans un sol
dépôt solide (sable) au fond de l'éprouvette
+ particules fines gonflées par la solution

$$E.S. = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

Nature	Equivalent de sable
Argile pure	E. S. = 0
Sol plastique	E. S. = 20
Sol non plastique	E. S. = 40
Sable pur et propre	E. S. = 100

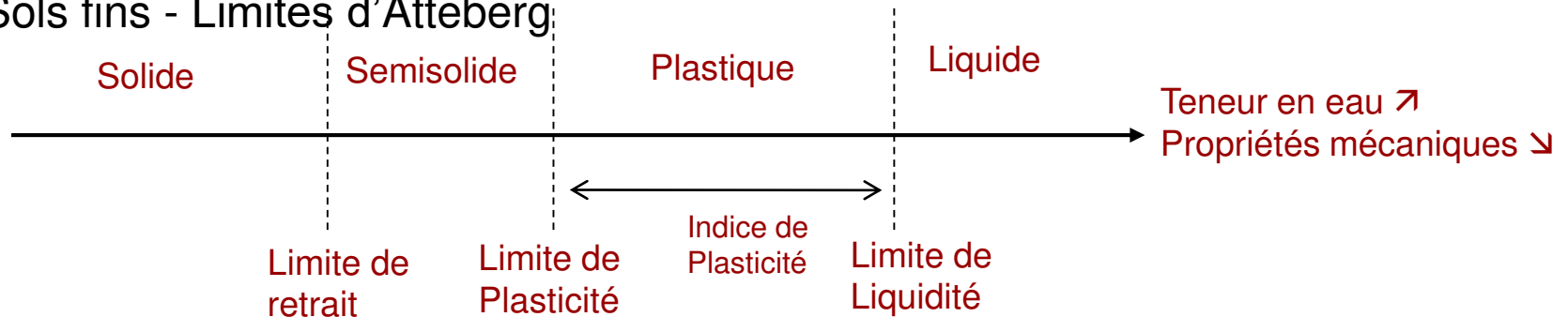
- **Indice de densité** : état de densité dans lequel se trouve un sol pulvérulent

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$



Essais d'identification

Sols fins - Limites d'Atteberg:

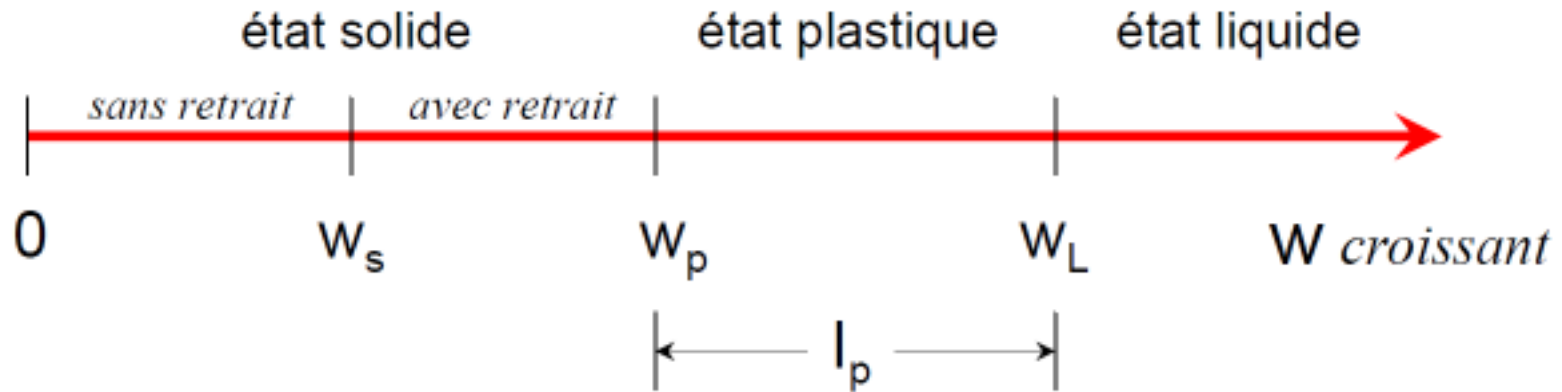


➤ Signification physique:

- ❑ **w_s** - La **Limite de Retrait**, est définie comme la teneur en eau en deçà de laquelle on n'observe plus de contraction volumique en séchant davantage
- ❑ **w_p** - La **Limite de Plasticité** caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Au dessus de cette limite, le sol se déforme plastiquement sans se rompre. En-dessous, le sol devient semi-solide et friable (fissuration).
- ❑ **w_L** - La **Limite de Liquidité** caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. Au dessus de cette limite le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son poids propre.
- ❑ **I_p** - L'**Indice de Plasticité** est défini comme : **$I_p = w_L - w_p$**

Essais d'identification

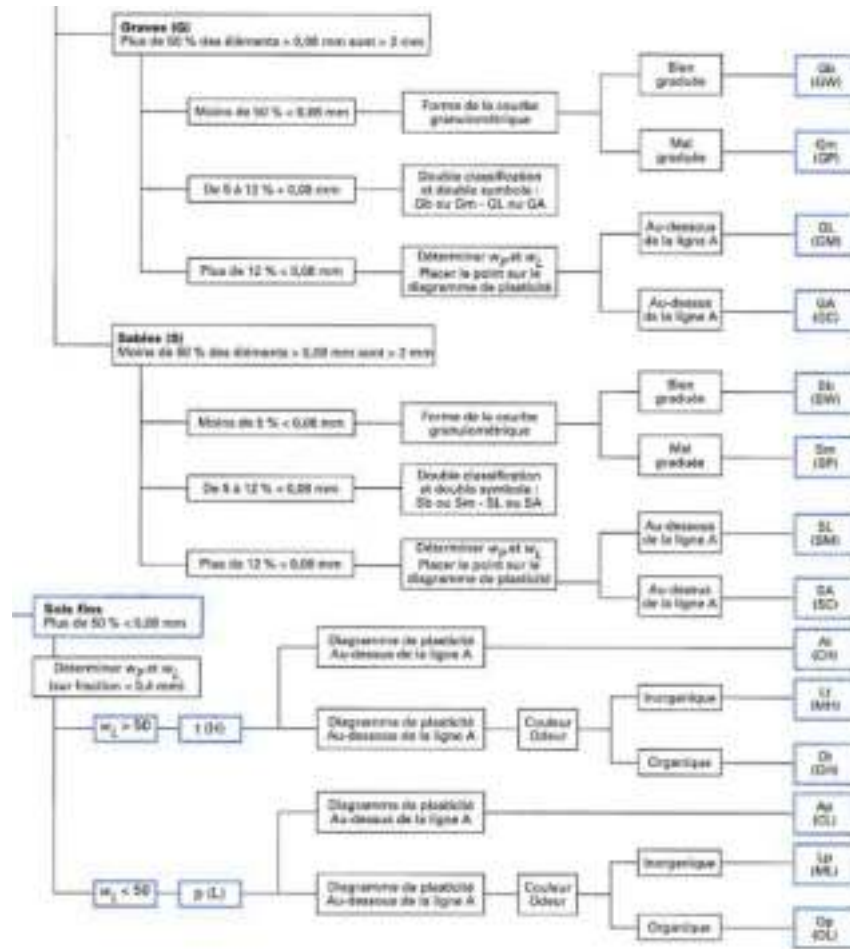
Sols fins - Limites d'Atteberg



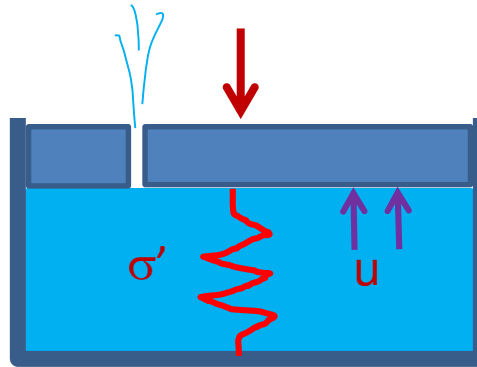
Limite de liquidité w_L : Méthode de Casagrande
Teneur en eau pour laquelle une entaille est refermée sur 10mm après 25 chocs

Essais d'identification

Classification des sols



Contrainte effective

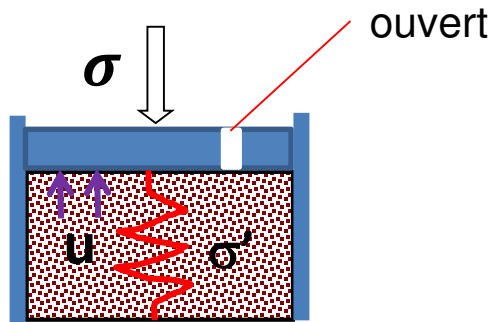


$$\sigma = \sigma' + u$$

$$1D : \sigma = \sigma' + u$$

Principe de Terzaghi : sol se déforme \leftrightarrow variation de σ'
 u : pression interstitielle

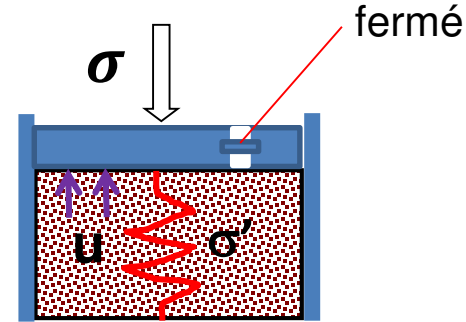
Contrainte effective



$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma \\ u &= 0\end{aligned}$$

(a) Le sol se déforme

Cas (a): l'eau peut sortir.
La surpression u reste nulle.
La contrainte totale (charge extérieure) est transmise au squelette. Le sol se déforme.



$$\begin{aligned}\sigma' &= 0 \\ u &= \sigma\end{aligned}$$

(b) Le sol ne se déforme pas

Cas (b): l'eau ne peut pas sortir.
La surpression u monte et reprend intégralement la charge extérieure. L'eau étant pratiquement incompressible, empêche tout changement de volume. Le sol ne se déforme pas.

Résistance au cisaillement

Critère de coulomb caractérisant la résistance au cisaillement

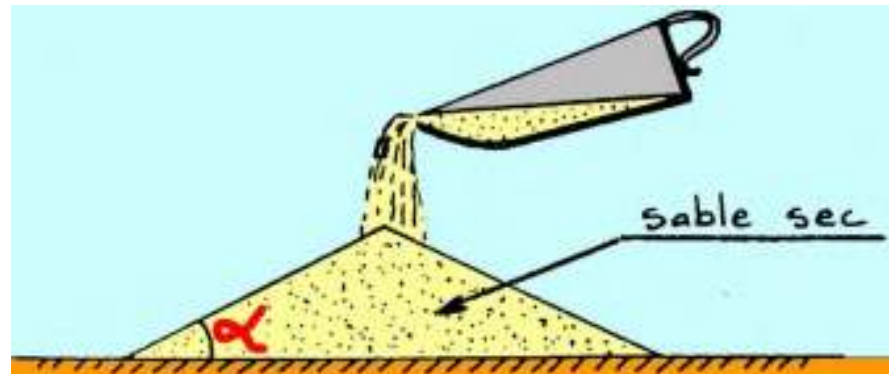
$$R = c + \sigma' \tan \phi$$

c : cohésion

Sols grenus : cohésion nulle quelque soit la teneur en eau

Sols fins : cohésion nulle pour un sol sec ou trop humide. L'eau donne entre ces bornes une cohésion au sol qui peut être très élevée

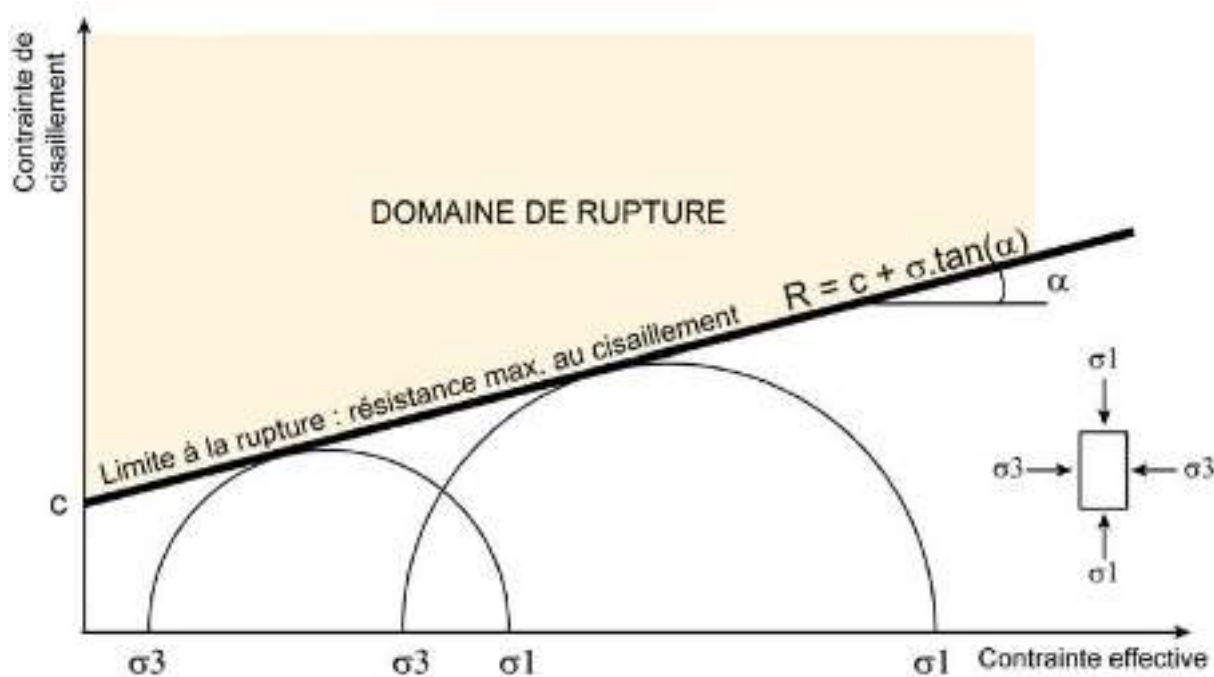
ϕ : angle de frottement interne



Résistance au cisaillement

Critère de coulomb caractérisant la résistance au cisaillement

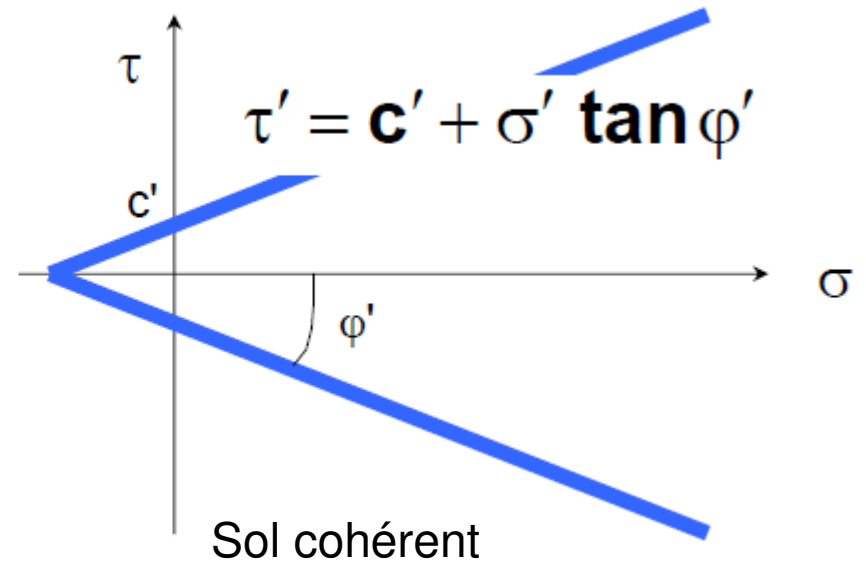
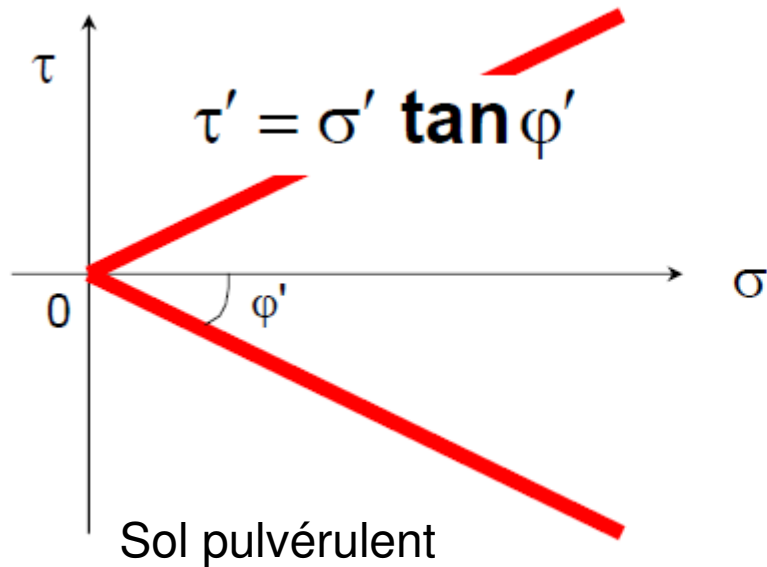
$$R = c' + \sigma' \tan \phi'$$



Résistance au cisaillement

Critère de rupture de coulomb caractérisant la résistance au cisaillement

$$R = c' + \sigma' \tan \phi'$$



Résistance au cisaillement

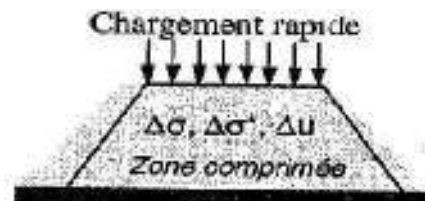
Notion de **court terme** et **long terme**

La réponse du sol à une sollicitation dépend donc de la nature et de l'état du sol, mais aussi des conditions de sollicitation.

Un chargement rapide : l'eau contenue dans le sol reprend les efforts -> court-terme (CT), action non drainée

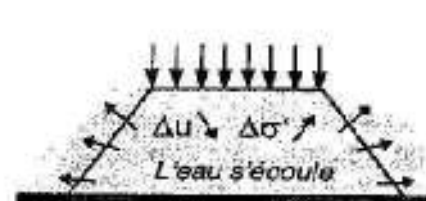
Un chargement lent : l'eau contenue dans le sol a le temps de s'évacuer et donc de « reporter » les efforts au squelette solide -> long-terme (LT), action drainée

Exemple de réalisation d'un remblai



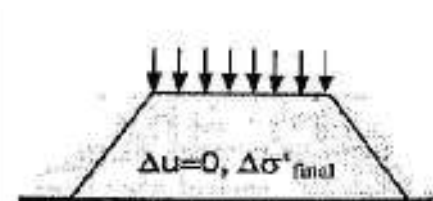
Les contraintes totales et effectives et la pression interstitielle s'adaptent à la charge imposée et à la condition de volume constant.

a. Déformation à volume constant



L'eau s'écoule vers l'extérieur et la pression interstitielle diminue. Les contraintes effectives augmentent. Le sol se comprime progressivement.

b. Phase transitoire



Les charges hydrauliques se sont stabilisées de nouveau. Les surpressions interstitielles sont nulles. La charge est supportée par les contraintes effectives.

c. Nouvel état d'équilibre

Résistance au cisaillement

Les notions de court terme et long terme dépendent de la vitesse de la sollicitation que subit le sol mais aussi de la capacité de l'eau à circuler dans le sol (lié à la perméabilité), ainsi :

→ Les sols sableux ont un comportement identique à court terme et à long terme (perméabilité grande, période de transition rapide).

→ Les sols argileux ont un comportement différent à court terme et long terme (dissipation des efforts plutôt long).

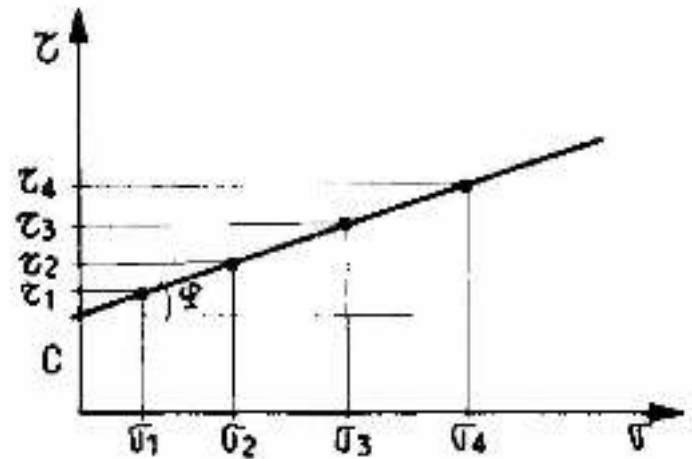
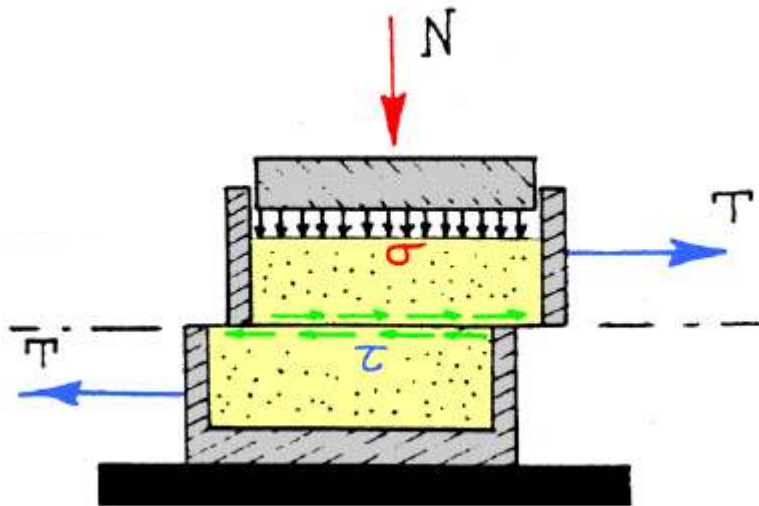
Distinction à prendre en compte dans la détermination des caractéristiques mécaniques et dans les différentes phases de calcul

Résistance au cisaillement

Mesure au laboratoire des caractéristiques de cisaillement :

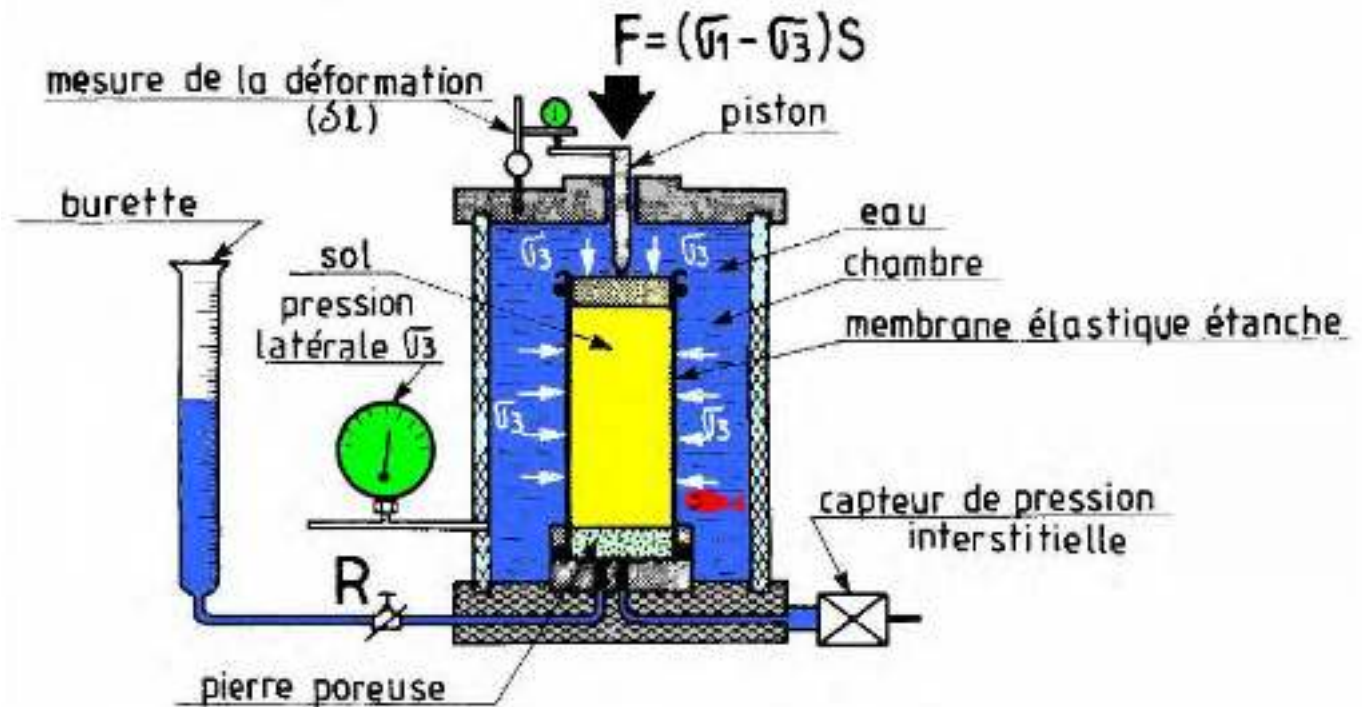
Essai de cisaillement direct – Boîte de Casagrande

Essai drainé \rightarrow caractéristique à LT (c' et ϕ')



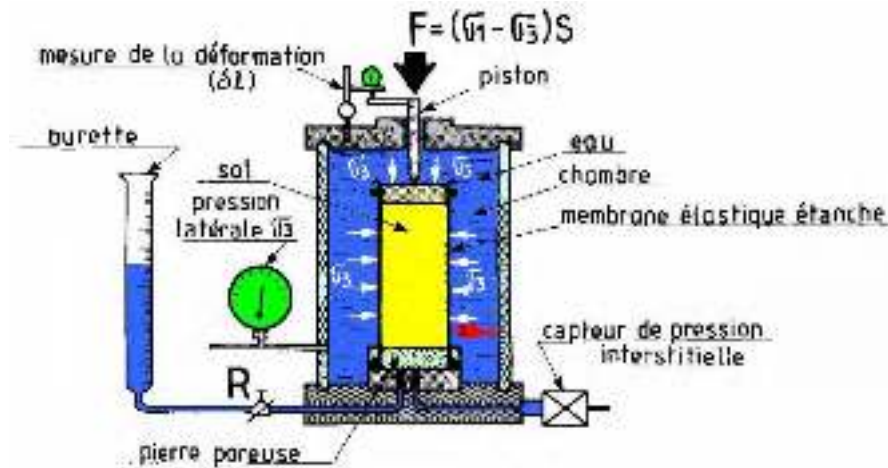
Résistance au cisaillement

Mesure au laboratoire des caractéristiques de cisaillement :
Essai triaxial



Résistance au cisaillement

Mesure au laboratoire des caractéristiques de cisaillement :
Essai triaxial



Plusieurs conditions de drainage

→ Court terme : c_u

- phase chantier

- sollicitation sans drainage

→ Long terme : c' et ϕ'

- phase finale

- sollicitation avec drainage

Résistance au cisaillement

Mesure au laboratoire des caractéristiques de cisaillement :
Essai triaxial



Cellules triaxiales 50 à 150 mm



Eprouvettes triaxiales 38 à 150 mm

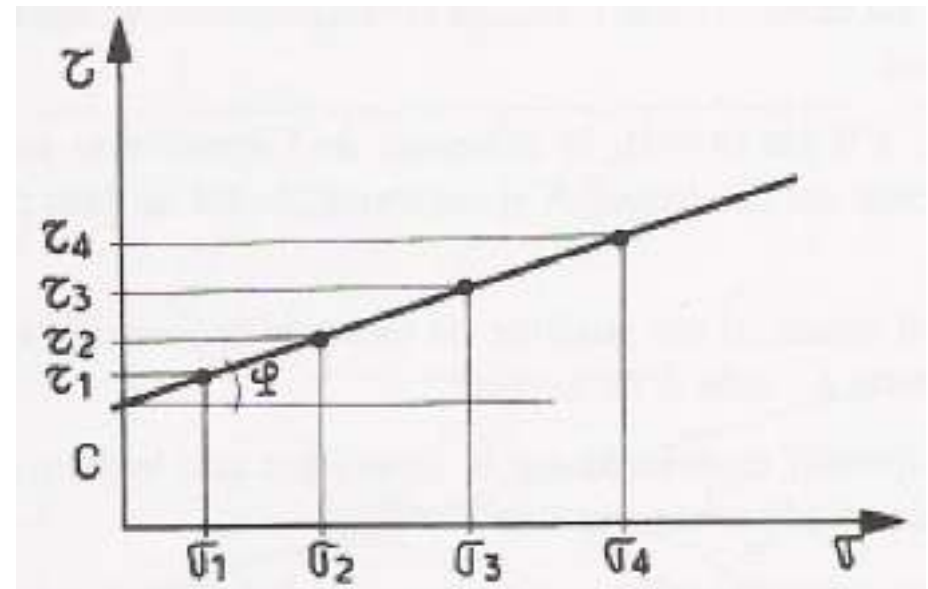
Résistance au cisaillement

Exercice (boîte de Casagrande)

Échantillon de sol prélevé à 3 m

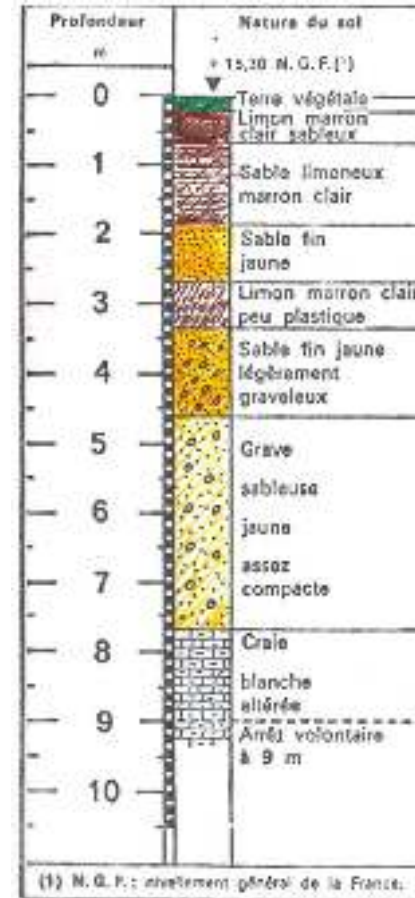
- 3 échantillons soumis à des contraintes de confinement respectivement égales à 25 kPa, 50 kPa et 75 kPa.
- On mesure respectivement les contraintes de cisaillement à la rupture de 17.5 kPa, 32 kPa et 45.5 kPa.

→ Donner la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

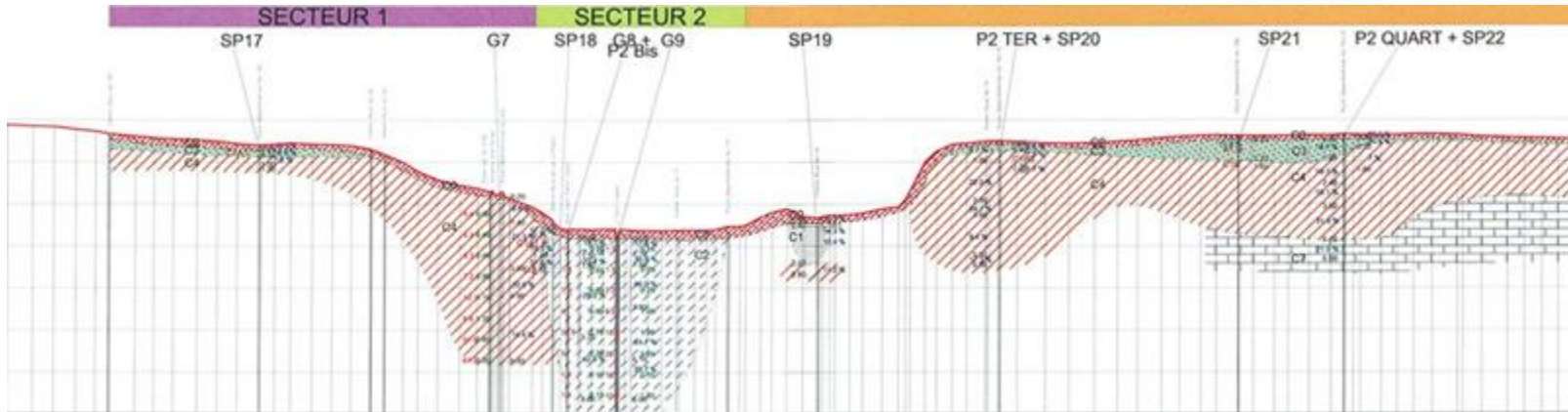


Profil géotechnique et reconnaissances

- Types de sol rencontrés
- Caractéristiques mécaniques
- Niveau piézométrique



Profil géotechnique



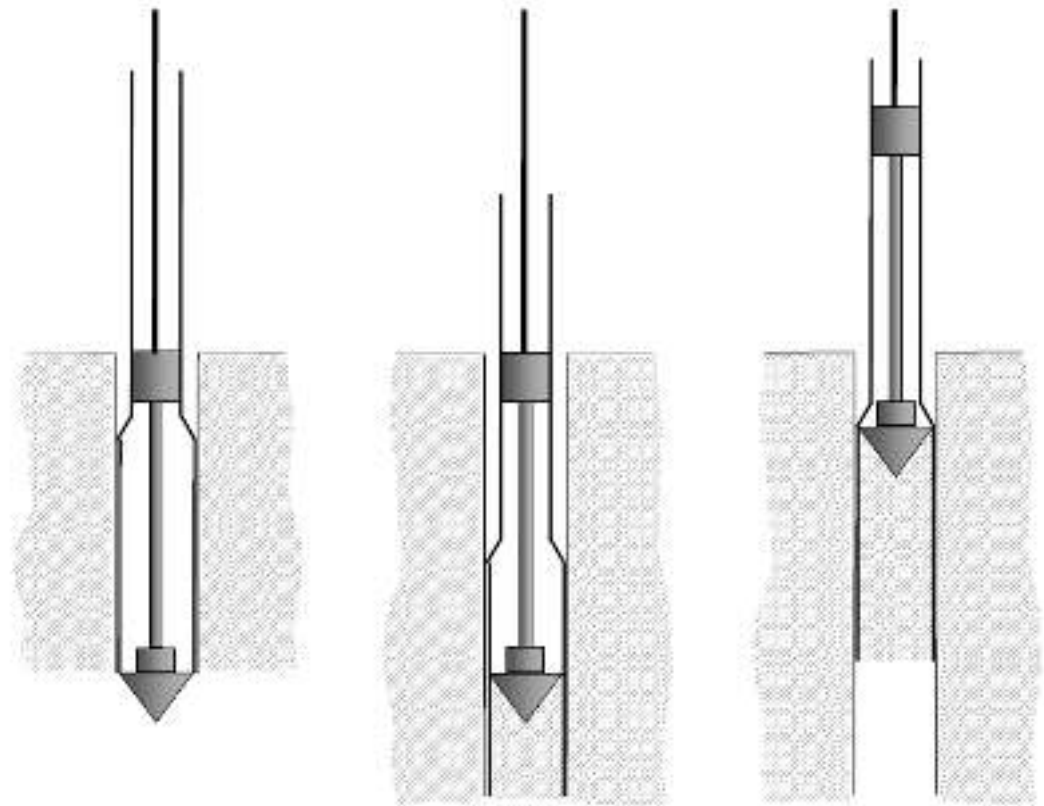
- Collecte de données existantes
- Méthodes de reconnaissance globale : cartes géologiques, géophysique...
- Sondages et essais

Carottage

Prélèvements
d'échantillons intacts

Observation de la
lithologie

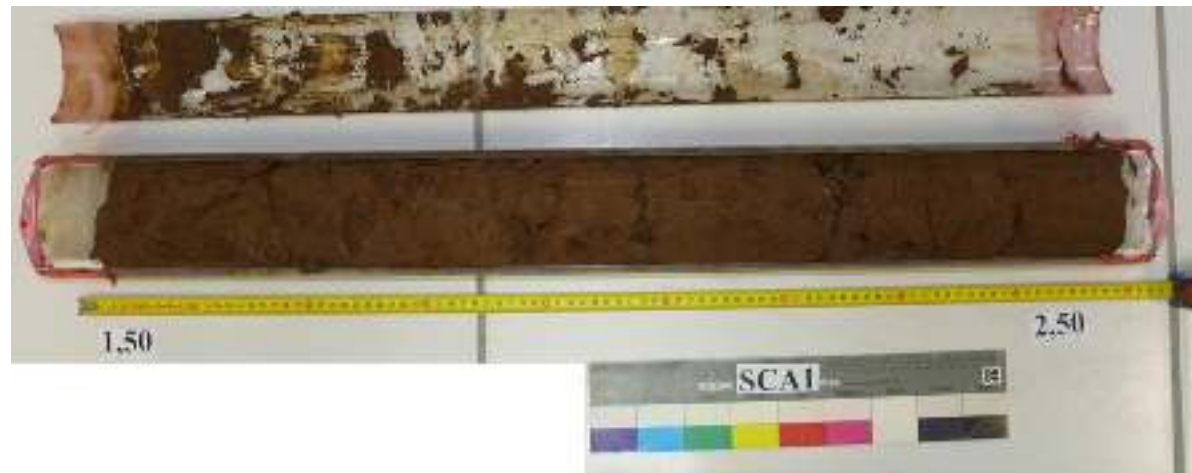
Réalisation en
laboratoire d'essais pour
mettre en évidence les
paramètres de
résistance, de
déformabilité



Carottage



Le transport



Echantillon carotté
(argile entre 1,5 et 2,5 m de profondeur)

Essais in-situ

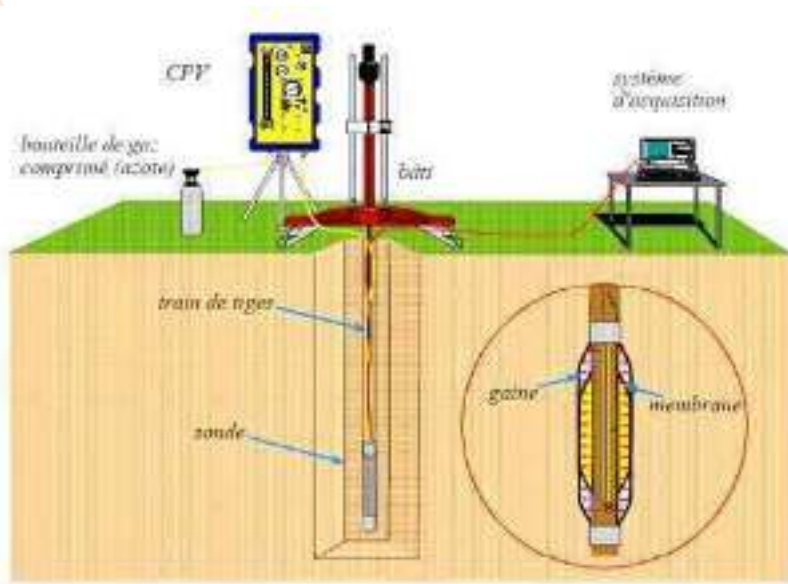
Essais pressiométriques

- Conçu à l'origine par Ménard pour le dimensionnement des fondations superficielles
- Domaine d'application :
 - Tous types de sol saturés ou non (y compris remblais et rocher avec +/- d'incertitudes)
 - Détermination des caractéristiques in situ du sol en petites déformations (dans un domaine « pseudo-élastique ») et à la rupture (i.e. déformabilité et résistance)
- Principe
Dilater radialement dans le sol une sonde cylindrique pour déterminer la relation entre la pression appliquée et le déplacement de la paroi de la sonde → essai de cisaillement

Essais in-situ

➤ Appareillage :

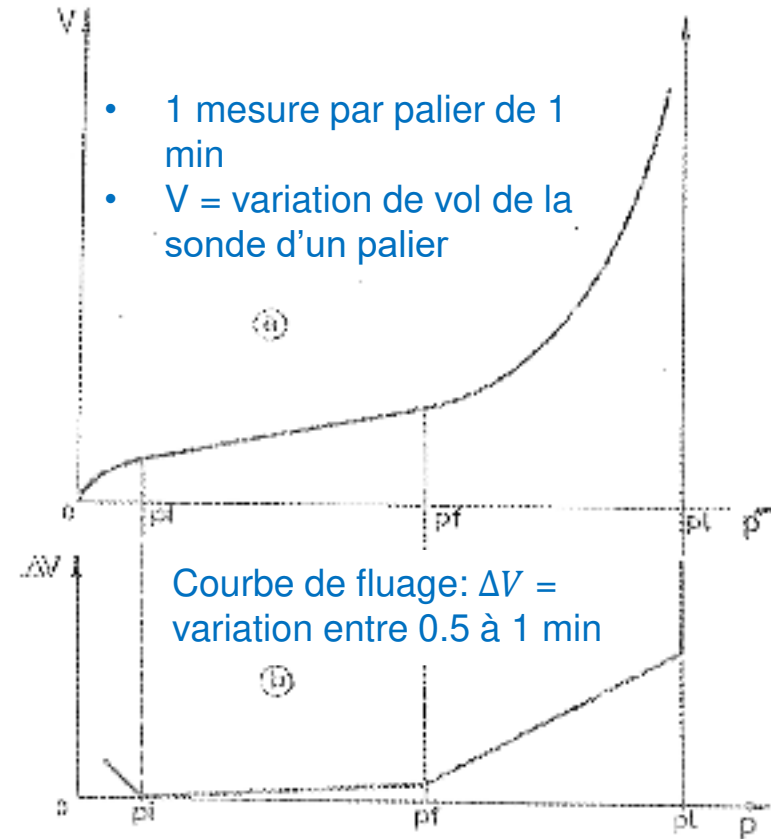
- Contrôleur Pression-Volume (CPV) : rempli d'eau et connecté à la sonde de mesure. Il permet d'envoyer l'eau jusqu'à une pression de 5 MPa par paliers (1 minute chacun)
- Gaine
- Train de tiges



Essais in-situ

- Paramètres déduits de l'essai
 - Pression de fluage p_f : limite entre le comportement pseudo-élastique du sol et le comportement plastique
 - Pression limite p_l : pression correspondante à la rupture du sol en place (pour une faible augmentation de la pression appliquée, forte augmentation du volume injecté)
 - Module pressiométrique E_m : définit le comportement pseudo-élastique

→ Paramètres de déformabilité et résistance



Essais in-situ

Exemple de courbe pression-volume

Em (MPa)	13.66
----------	--------------

PI (MPa)	1.74
----------	-------------

Pf (MPa)	1.23
----------	-------------

Em / PI*	8.38
----------	-------------

Pli (MPa)	1.81
-----------	------

σ_{hs} (MPa)	0.11
---------------------	------

PI* (MPa)	1.63
-----------	-------------

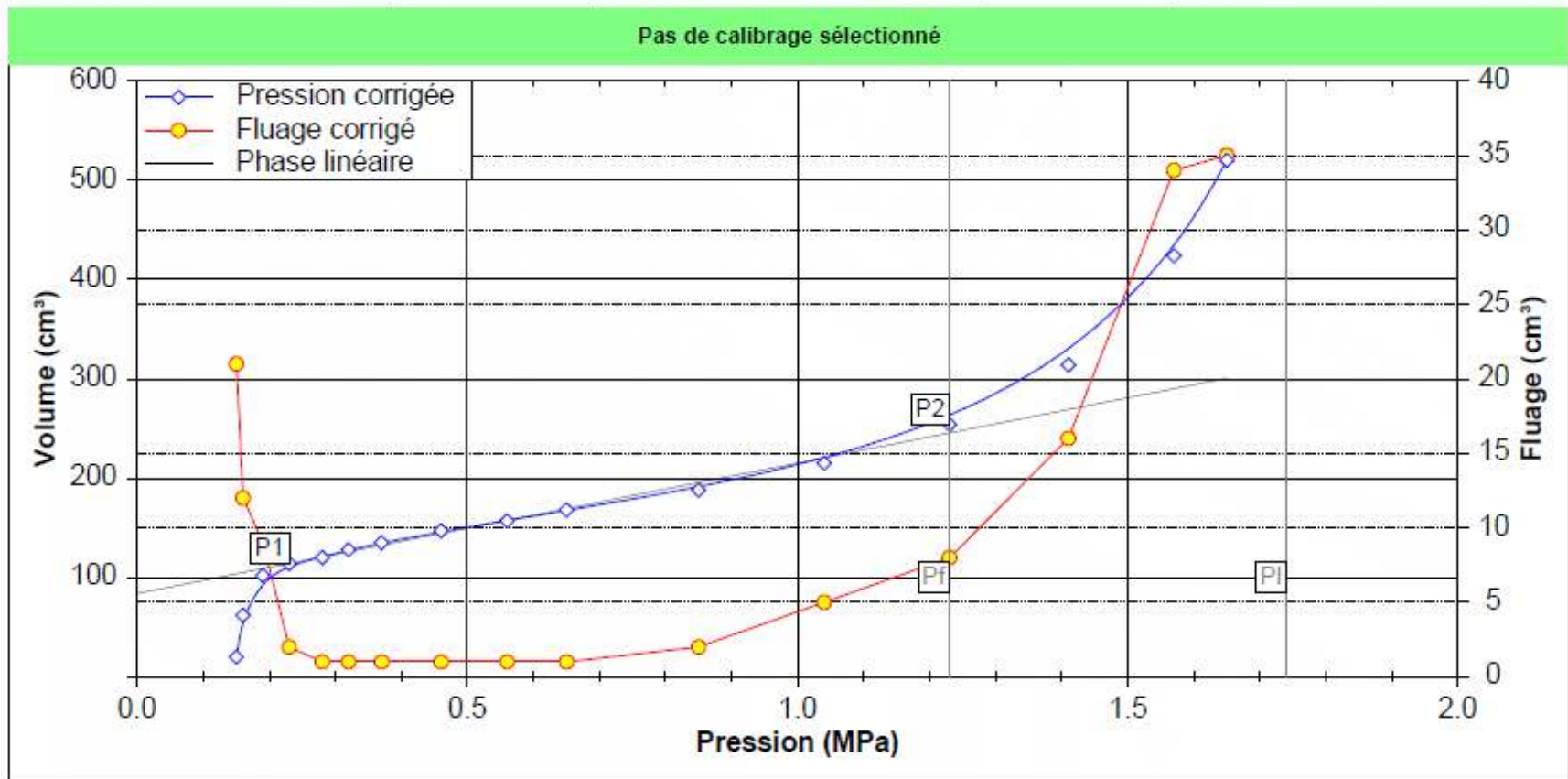
Plh (MPa)	1.74
-----------	------

P1 (MPa)	0.23
----------	------

Pf* (MPa)	1.12
-----------	-------------

Pld (MPa)	1.65
-----------	------

P2 (MPa)	1.23
----------	------



Essais in-situ

Exemple de courbe pression-volume

Em (MPa)	0.06
----------	------

Em / PI*	6.00
----------	------

PI* (MPa)	>0.01
-----------	-------

Pf* (MPa)	0.01
-----------	------

PI (MPa)	>0.03
----------	-------

Pli (MPa)	
-----------	--

Pli (MPa)	
-----------	--

Pli (MPa)	0.03
-----------	------

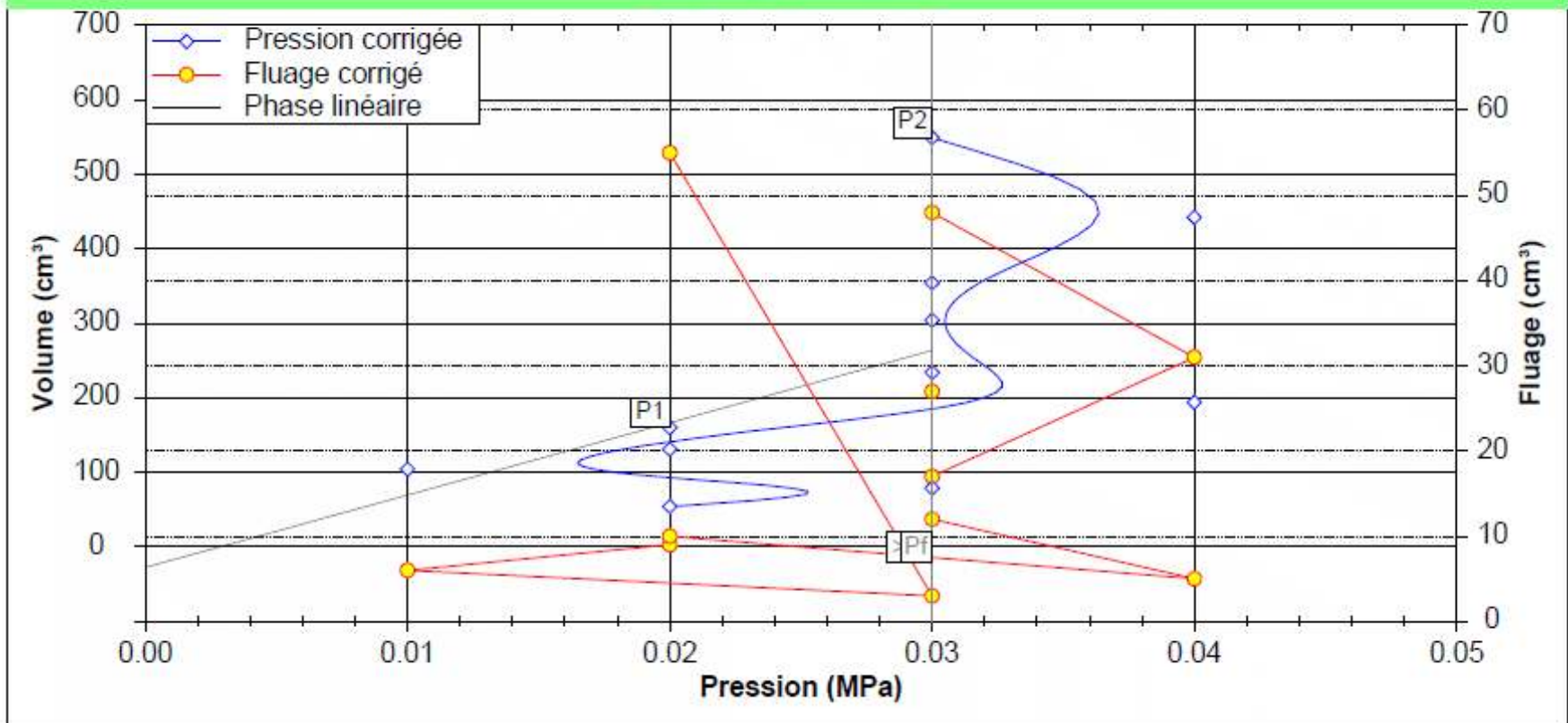
Pf (MPa)	0.03
----------	------

σ_{hs} (MPa)	0.02
---------------------	------

P1 (MPa)	0.02
----------	------

P2 (MPa)	0.03
----------	------

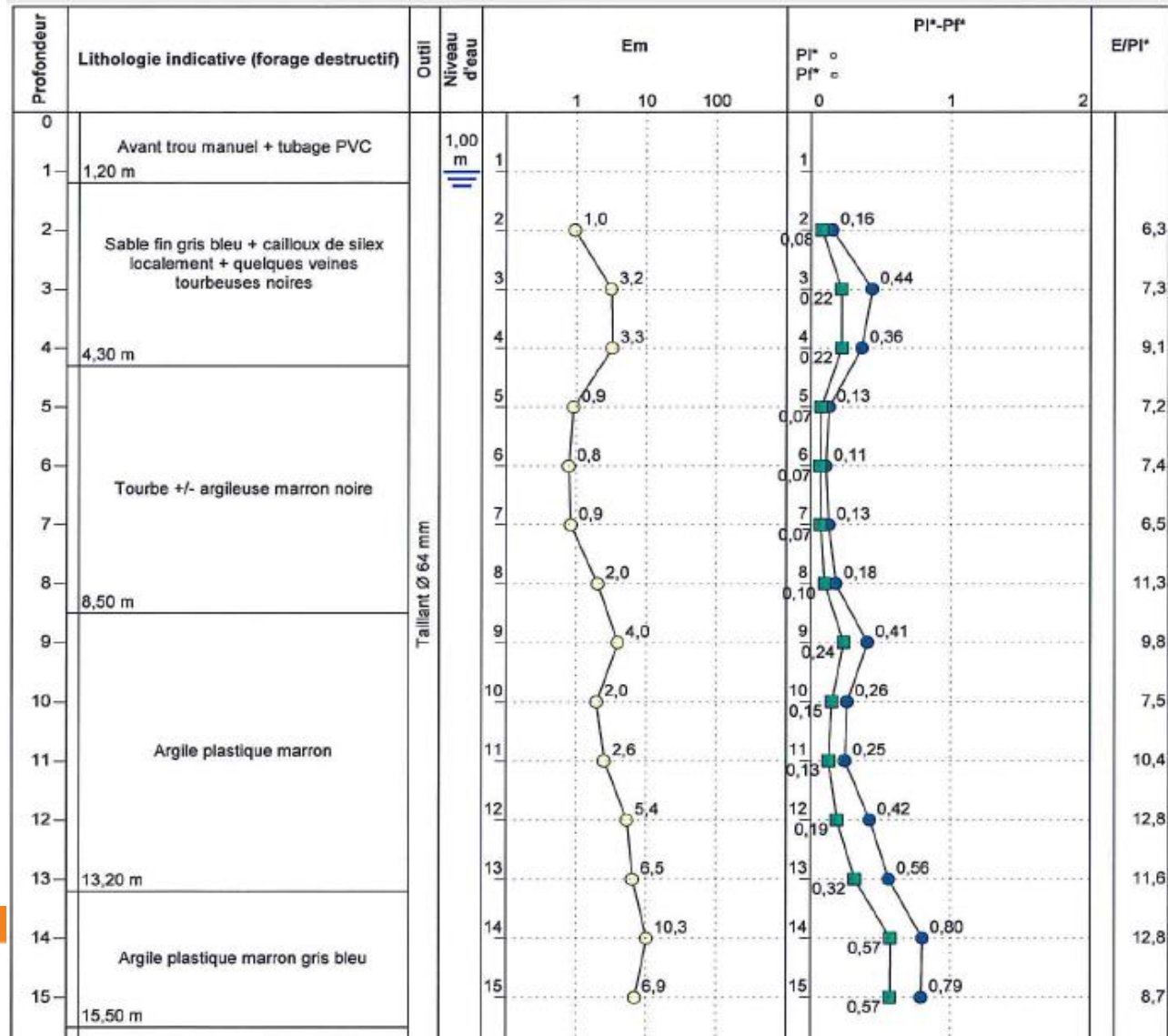
Pas de calibrage sélectionné



Essais in-situ

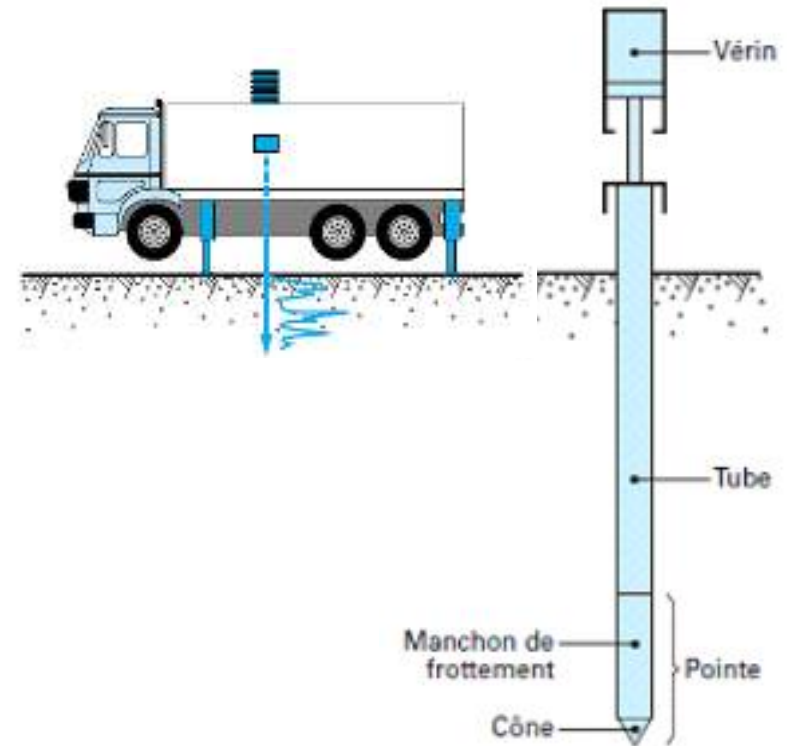
PV final

Mesures in-situ



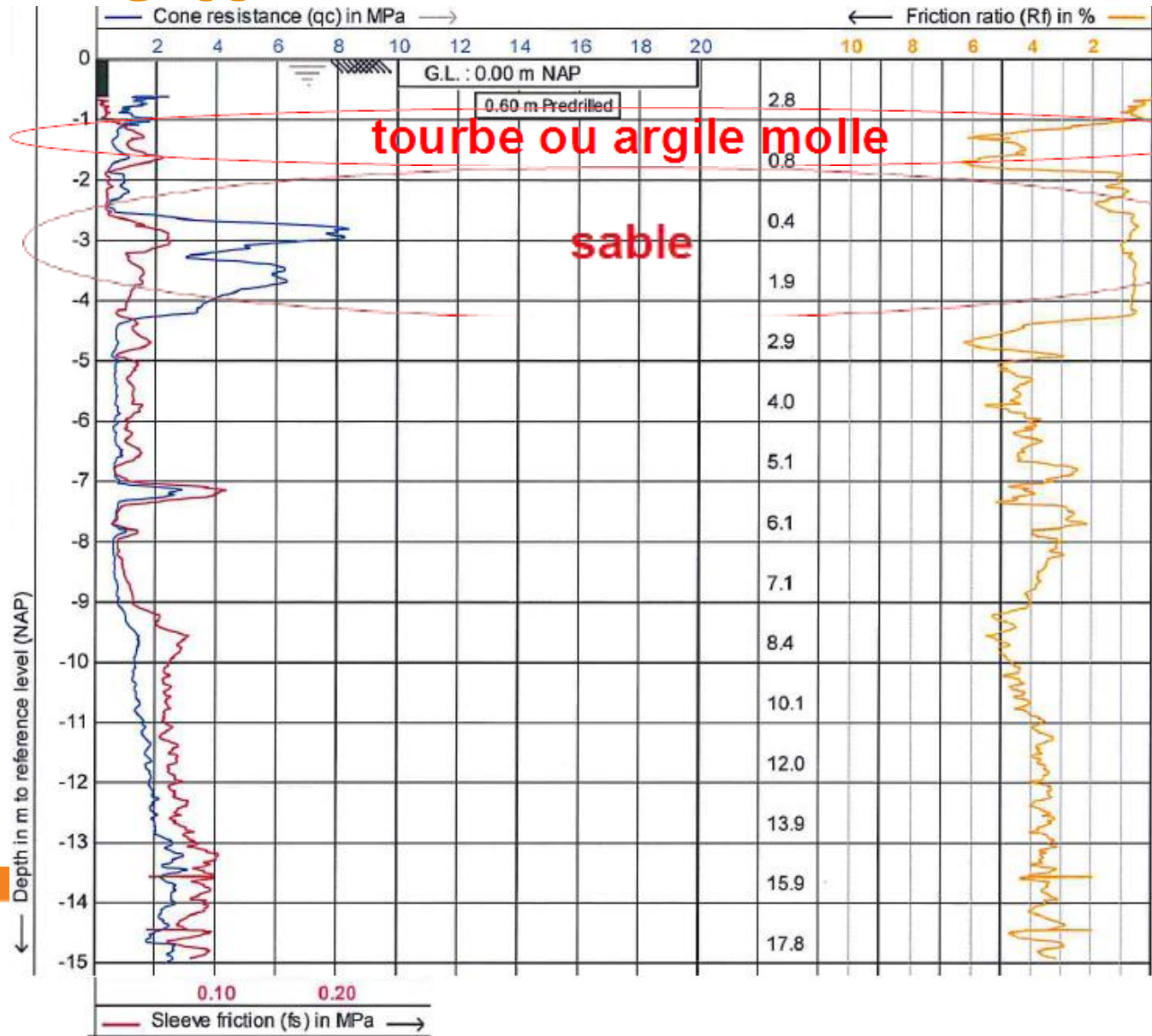
Essais in-situ

- CPT : Cone Penetration test
- Principe : Enfoncer dans le sol à vitesse constante et à l'aide d'un vérin hydraulique une pointe terminée par un cône
- Paramètres déduits de l'essai
 - **Résistance à la pénétration** du cône q_c (MPa)
 - **Frottement sur le manchon** f_s (MPa)
 - **Rapport de frottement**
 $R_f = f_s/q_c$ (%)
 - CPT_u : + mesure de la pression interstitielle u (MPa)



Essais in-situ

PV final (CPT)



Mesures in-situ

Reconnaitances en site sismique

- Classification des sols (Eurocode 8-1)

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

h_i : épaisseur (m) de la $i^{\text{ème}}$ couche

v_i : célérité des ondes de cisaillement de la $i^{\text{ème}}$ couche

→ Niveau de reconnaissances aux types de sols de fondation et à l'importance de l'ouvrage

Classe du sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres						
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{60} (mmv/30m)	C_u (kPa)	Type de sol	Pressiomètre*		CPT [†]
						p_1 (MPa)	E_p (MPa)	
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800				> 5	> 100	
B	Dépôts rudes de sables, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des caractéristiques mécaniques avec la profondeur.	360-800	> 50	> 250	sols granulaires	= 2	= 20	= 15
					sols cohérents	= 2	= 25	= 3,5
C	Dépôts profonds de sables de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement rade, ayant des épaisseurs de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres.	180-360	15-50	70-250	sols granulaires	> 1	> 8	> 5
					sols cohérents	> 0,5	> 5	> 1,5
D	Dépôts de sols sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant en majorité des sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	< 70	sols granulaires	< 1	< 8 MPa	< 5
					sols cohérents	= 0,5	= 5 MPa	= 1,5
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de v_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus rade avec $v_s = 800$ m/s.							
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($I_p > 40$) et une teneur en eau importante.	< 100*		10 - 20				
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1 .							

* Valeurs indicatives

Reconnaitances en site sismique

- Exemple 1 : construction d'une maison individuelle à Vaulx-en-Velin (aléa faible)

→ Niveau de reconnaissances « le plus faible »

Choix de la classe de sol en fonction des caractéristiques pressiométriques (tableau indicatif précédent)

- Exemple 2 : construction d'une école à Vaulx-en-Velin (aléa faible)

→ Niveau de reconnaissances « intermédiaire »

Choix de la classe de sol en fonction des caractéristiques pressiométriques ou CPT (corrélations empiriques sur la base de retour d'expérience sur des sites similaires + description de la lithologie (sondages carottés) + essais d'identification en laboratoire

Reconnaitances en site sismique

- Exemple 3 : construction d'une école à Vénissieux (aléa modéré)

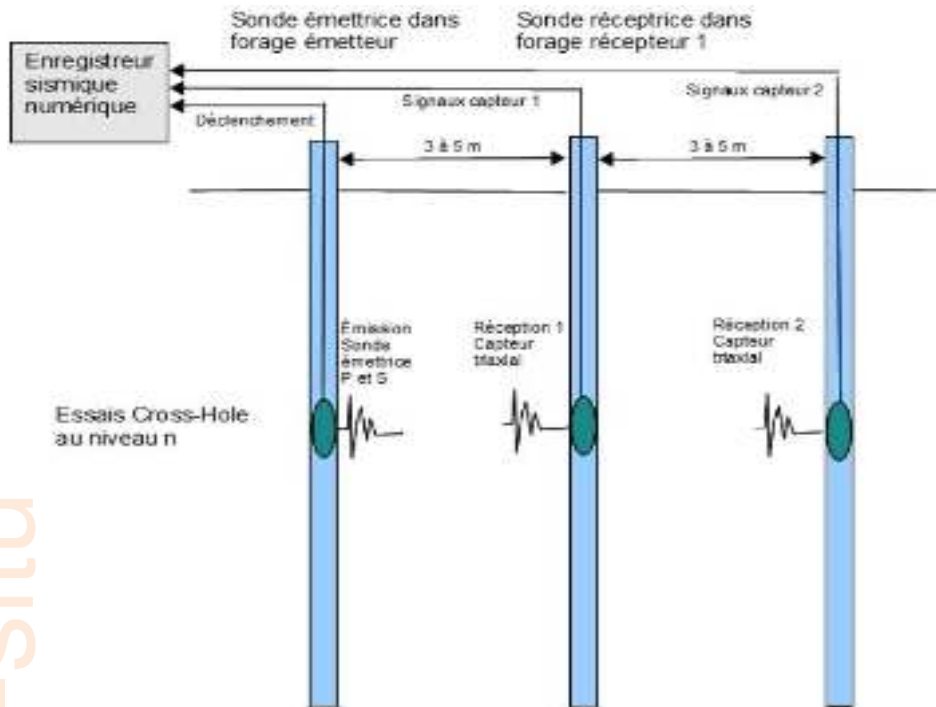
→ Niveau de reconnaissances « le plus élevé »

Choix de la classe de sol en fonction de la mesure de v_s par :

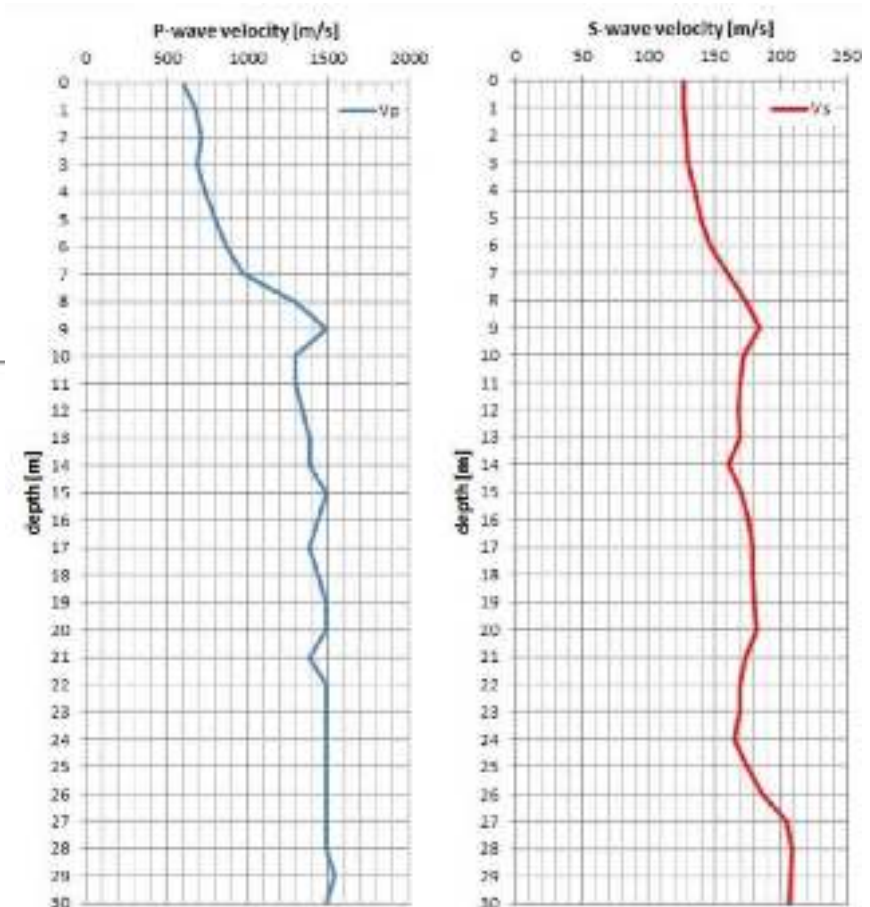
- Des techniques invasives en forage (cross-hole, down-hole, sismo-piézocône)
- En complément des techniques non invasives (à partir des ondes de surface) + forages de reconnaissance
- En complément des essais de laboratoire sur échantillons intacts (essai à la colonne résonante, essais triaxiaux cycliques) + essais d'identification

Reconnaitssances en site sismique

Cross-hôle



Principe



PV final

Reconnaitances en site sismique

- Les **essais triaxiaux cycliques** sont utilisés pour mesurer les propriétés dynamiques des sols et leurs résistances cycliques.
- Les sols doivent être prélevés par carottage dans le cadre des reconnaissances géotechniques des sites.
- Ils sont testés alors dans leur état naturel au laboratoire en vue de mesurer **des modules de déformation, des amortissements et des résistances cycliques**, en tenant compte des non-linéarités de leur comportement mécanique et des pressions interstitielles.



Presse triaxiale cyclique



Éprouvette triaxiale (diamètre 76 mm)

Les essais sont réalisés à l'aide d'une presse triaxiale cyclique, qui permet d'appliquer des séquences de cycles pilotées en force axiale ou en déplacement axial.

Des dispositifs annexes servent à appliquer la pression de confinement et assurer la parfaite saturation du sol.

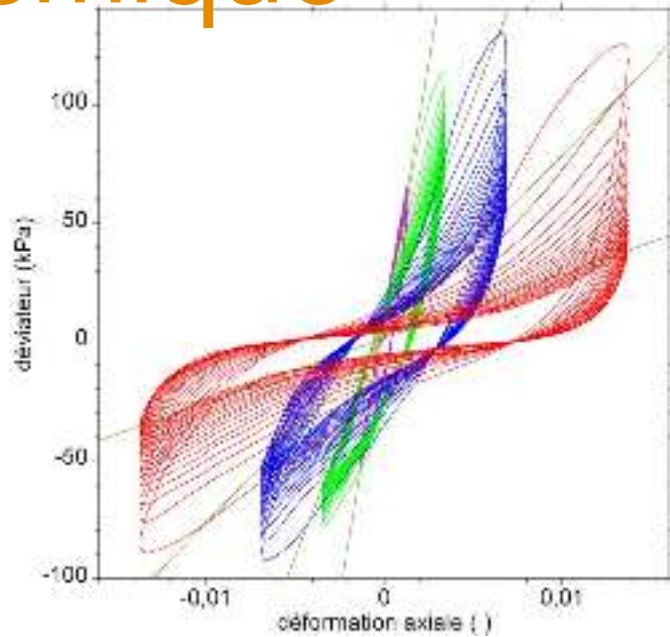
Reconnaitances en site sismique

Propriétés dynamiques des sols

- Une éprouvette de sol est consolidée sous une pression effective p_c donnée en rapport avec l'état des contraintes dans le site.
- Elle est soumise ensuite à des séquences successives de cycles pilotés en déplacement axial et d'amplitudes différentes $\Delta\varepsilon_a$, en **condition non drainée**.
- Un module d'Young (raideur du sol) et un amortissement (dissipation de l'énergie) sont tirés de chacune des séquences de cycles.
- Ces paramètres dynamiques du sol
- sont exprimés en fonction de l'amplitude cyclique $\Delta\varepsilon_a$.

Reconnaitssances en site sismique

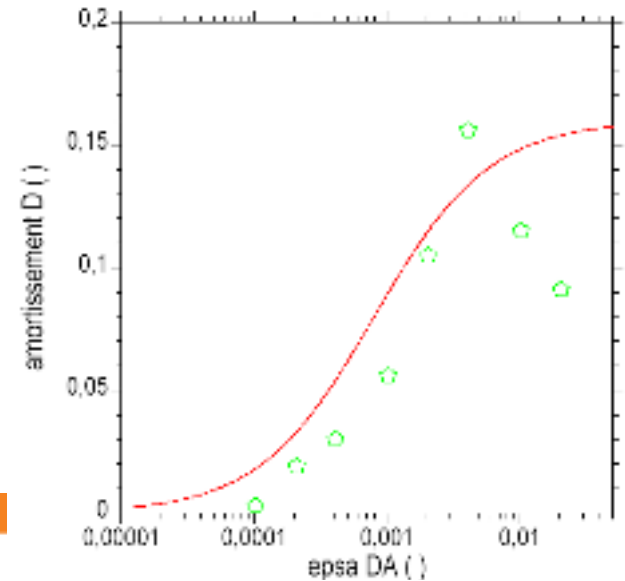
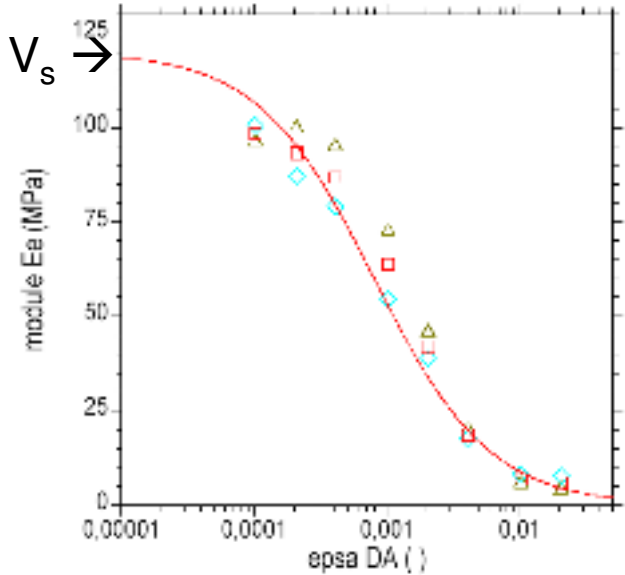
Estimation de V_s →



Essai triaxial cyclique. Courbes contrainte-déformation pour plusieurs séquences de cycles d'amplitudes croissantes



Exemples d'éprouvette après essais



Module d'Young et amortissement en fonction de l'amplitude de la déformation. Chaque point est une séquence de cycles

Reconnaitances en site sismique

Autres applications :

- Vérification de la stabilité des ouvrages vis à vis de la **liquéfaction des sols** (résistance cyclique des sols)



Séisme de Niigata (1964)

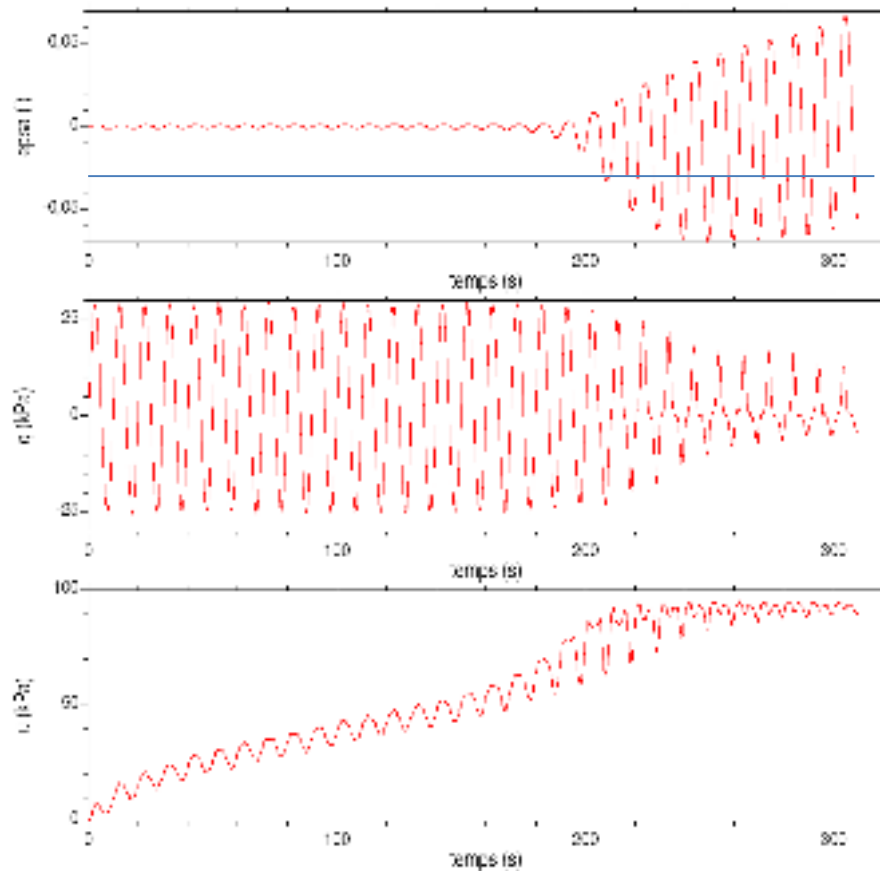
- Calcul des réponses dynamiques des massifs de sols
- Interactions sols-structures

Reconnaitances en site sismique

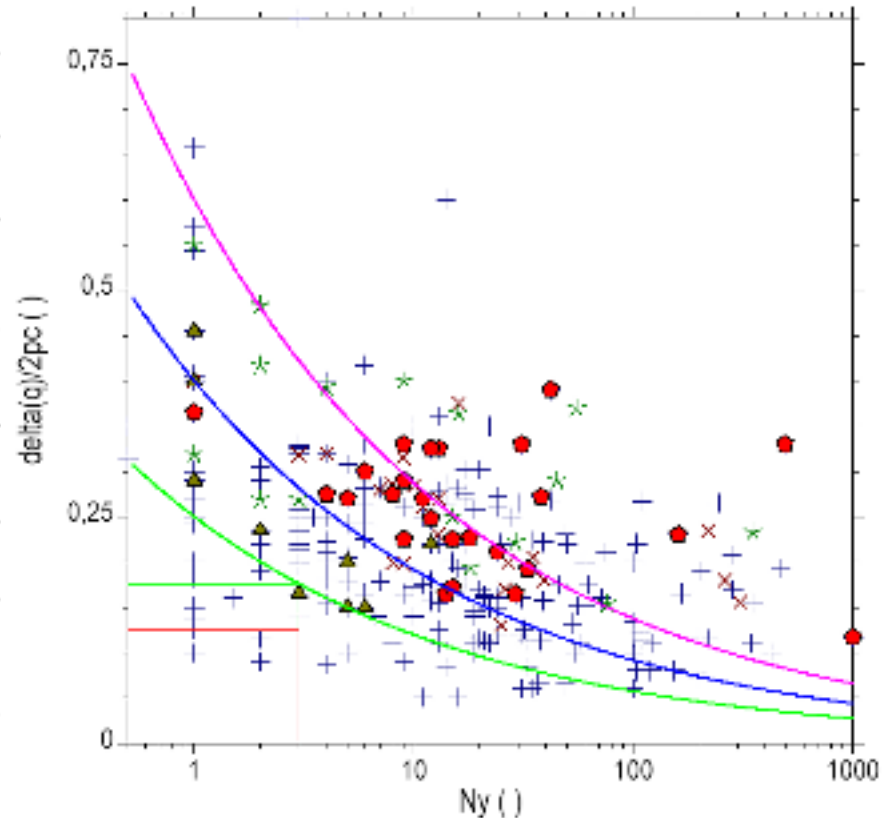
Résistance cyclique des sols en laboratoire (liquéfaction)

- Plusieurs éprouvettes identiques sont consolidées sous une pression effective p_c donnée en rapport avec l'état des contraintes dans le site.
- Elles sont soumises ensuite à des chargements cycliques pilotés en force axiale et d'amplitudes différentes en condition **non drainée**.
- La résistance cyclique est définie par un nombre de cycles N_y pour atteindre un niveau de déformation (2,5 % par exemple). La courbe ($N_y, \Delta q_y/2p_c$) des résistances cycliques est mise en correspondance avec la contrainte de cisaillement sismique dans le massif, pour un nombre de cycles équivalents du séisme de projet. Un **coefficient de sécurité** est tiré de cette comparaison.

Reconnaitssances en site sismique



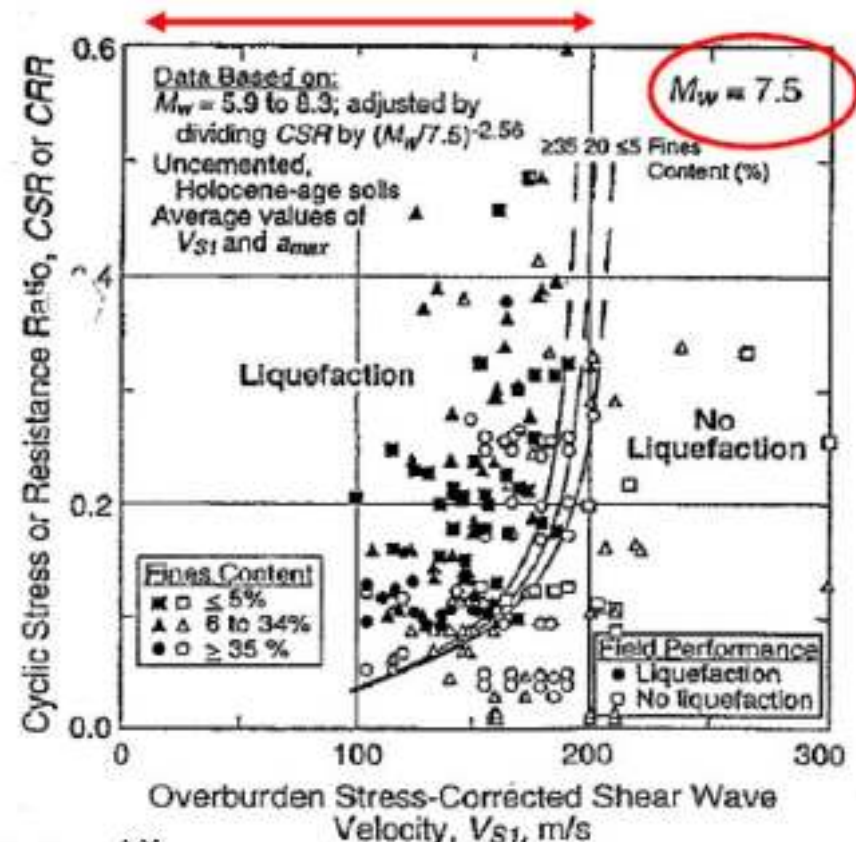
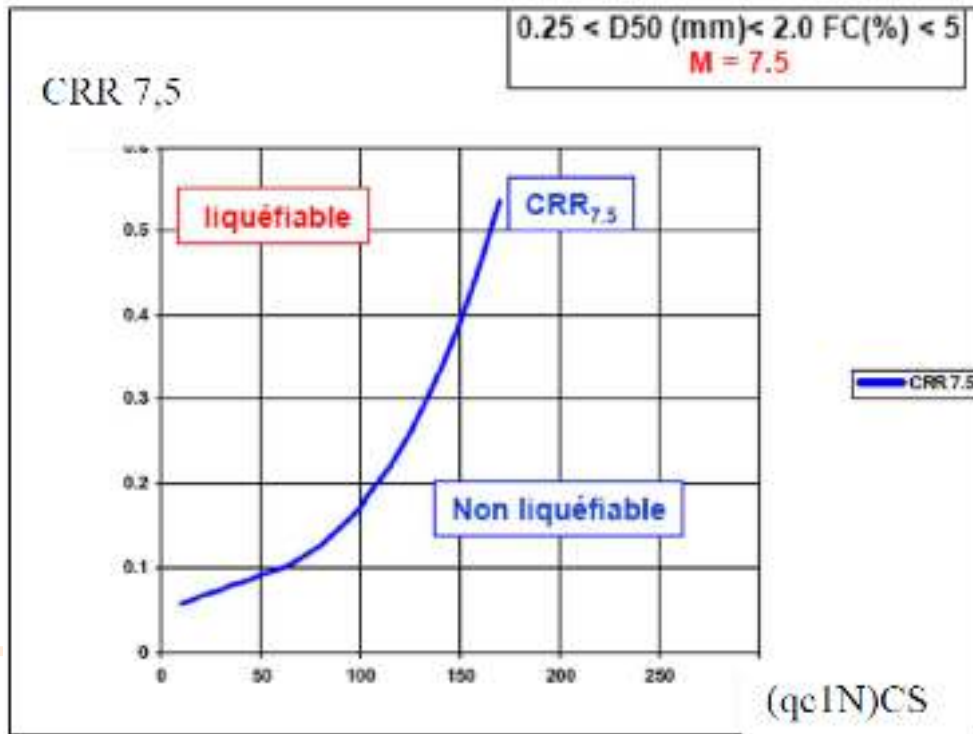
Séquence de cycles pilotés en force



Résistances cyclique en fonction
du nombre de cycles
Chaque point est une éprouvette

Reconnaitssances en site sismique

À partir des essais in-situ (approche empirique)



Estimation du potentiel de liquéfaction à partir de la résistance de pointe (CPT)

Estimation du potentiel de liquéfaction à partir de Vs

→ coefficient de sécurité

Références

Propriétés physique des sols, INSA Toulouse

https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/mcyr/chapitre_1-proprietes_physiques_des_sols.pdf

Résistance au cisaillement des sols

https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/mcyr/chapitre_4-resistance_au_cisaillement_des_sols.pdf

Fondations superficielles, Roger Frank, mai 2014