

Chapitre 04

Reconnaissance et exploration des sols

Le comportement d'un sol dans la nature dépend, non seulement des propriétés essentielles de chacun des éléments de la masse de sol considéré, mais aussi des propriétés résultant de l'arrangement des particules à l'intérieur de cette masse. Il convient donc de distinguer deux classes de propriétés caractéristiques : les propriétés des grains élémentaires et les propriétés de l'agrégat.

Les propriétés principales des grains sont la dimension et la forme, et pour les argiles, le caractère minéralogique des grains les plus petits. La propriété la plus importante de l'agrégat est, pour les sols sans cohésion, la compacité relative, et pour les sols cohérents, la consistance. Les paramètres de ce type sont des paramètres statiques. Il existe des paramètres dynamiques caractérisant les sols dans leur comportement sous l'influence des facteurs extérieurs.

Ces divers paramètres sont déterminés grâce aux essais de la mécanique des sols que l'on peut diviser en deux grands types :

a) Essais au laboratoire :

- **essais d'identification et de classification** : ce sont des essais simples et peu onéreux qui caractérisent le sol. Ils sont très importants car toute étude doit être basée sur une classification.
- **Essais mécaniques et hydrauliques** : plus longs et plus coûteux que les précédents, ils nécessitent de plus des échantillons intacts et un appareillage beaucoup plus complexe.
- **Essais de géotechnique routière** : ils permettent d'apprécier les caractéristiques des matériaux que l'on désire réutiliser en remblai, en précisant en particulier les conditions de mise en place des matériaux.

b) Essais de chantier : essais mécaniques, hydrauliques et essais de contrôle permettant de vérifier les conditions établis au laboratoire.

4.1 Les essais de laboratoire

4.1.1 Les essais d'identification

Quelque soit l'utilisation envisagée d'un sol, il est important de connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose. Les essais qui conduisent à cette étude portent le nom d'essais d'identification.

4.1.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Les dénominations en fonction de la grosseur des grains (D) sont les suivantes :

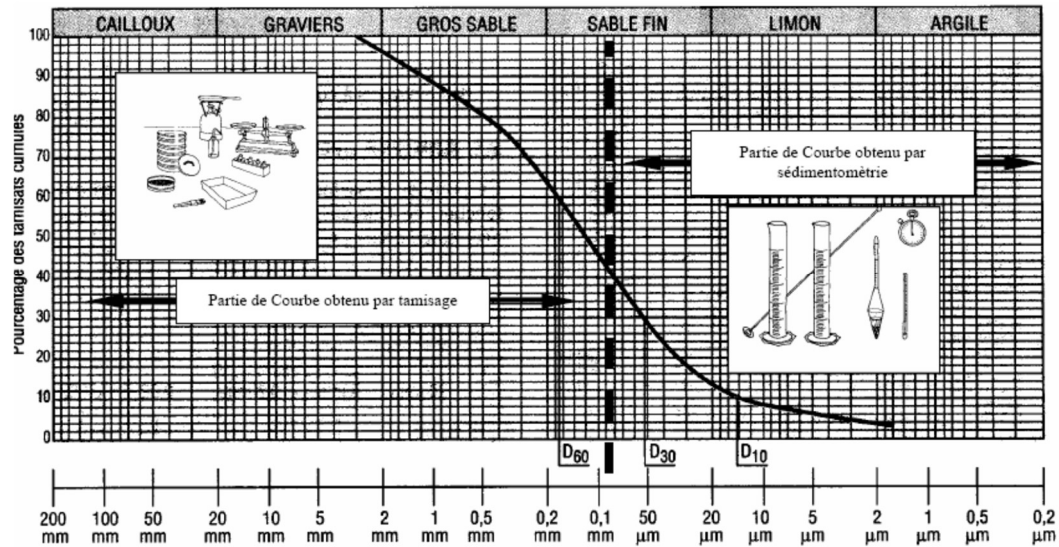


Fig. 4.1 Analyse granulométrique

4.1.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 microns.



Fig. 4.2 Sédimentométrie

4.1.1.3 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm), car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.

L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau (w) de cette fraction de sol et en observer sa consistance.

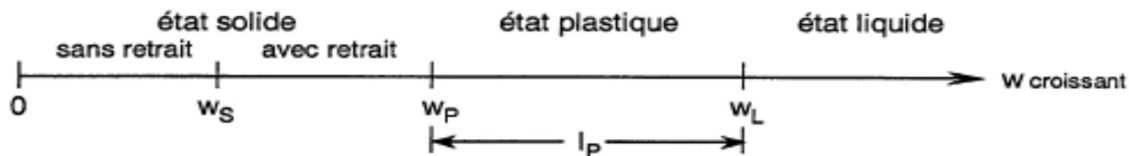


Fig. 4.3 Limite d'Atterberg

4.1.1.4 Valeur au bleu de méthylène

Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation. En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par les surfaces des particules de sols.

On distingue les valeurs suivantes :

$VBS \leq 0,2$: sols sableux (sol insensible à l'eau)

$0,2 < VBS \leq 2,5$: sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)

$2,5 < VBS \leq 6$: sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)

$6 < VBS \leq 8$: sols argileux

$VBS > 8$: sols très argileux

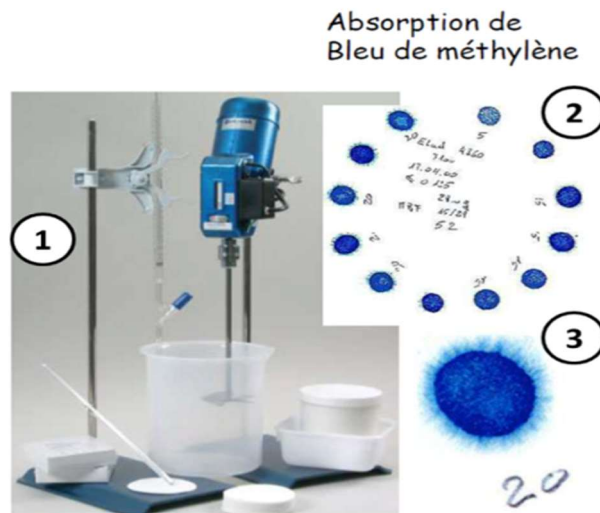


Fig. 4.4 Essai de bleu de méthylène

4.1.1.5 Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu. Cet essai est important, car la présence d'éléments fins peut modifier le comportement de ces sols.



Fig. 4.5 équivalent de sable

4.1.1.6 Classification des sols

Il existe plusieurs classifications des sols, elles regroupent les sols qui ont une nature, un état, un comportement similaires par rapport à une application géotechnique particulière. Nous présenterons la classification des LPC et la classification des sols pour la réalisation des remblais et des couches de forme (GTR 1992).

A- Classification LPC

Cette classification est celle utilisée dans les pays Afrique francophone. Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System).

La classification LPC des sols utilise les résultats de l'analyse granulométrique et des limites d'Atterberg

Classification des sols grenus (plus de 50% des éléments > 80µm) $D_{50} > 0.08 \text{ mm}$					
Définitions			Symboles	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Gb	$Cu > 4$ et $1 < Cc < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	GL	Point (I_p ; W_L) au dessous de A	Grave limoneuse
			GA	Point (I_p ; W_L) au dessus de A	Grave argileuse
Sables	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre < 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Sb	$Cu > 6$ et $1 < Cc < 3$	Sable propre bien graduée
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	SL	Point (I_p ; W_L) au dessous de A	Sable limoneux
			SA	Point (I_p ; W_L) au dessus de A	Sable argileux
Si 5% d'éléments < 80µm < 12%, on utilise un double symbole :					
- pour les graves : Gb-GL Gb-GA Gm-GL Gm-GA					
- pour les sables : Sb-SL Sb-SA Sm-SL Sm-SA					

Fig. 4.6 Classification LPC

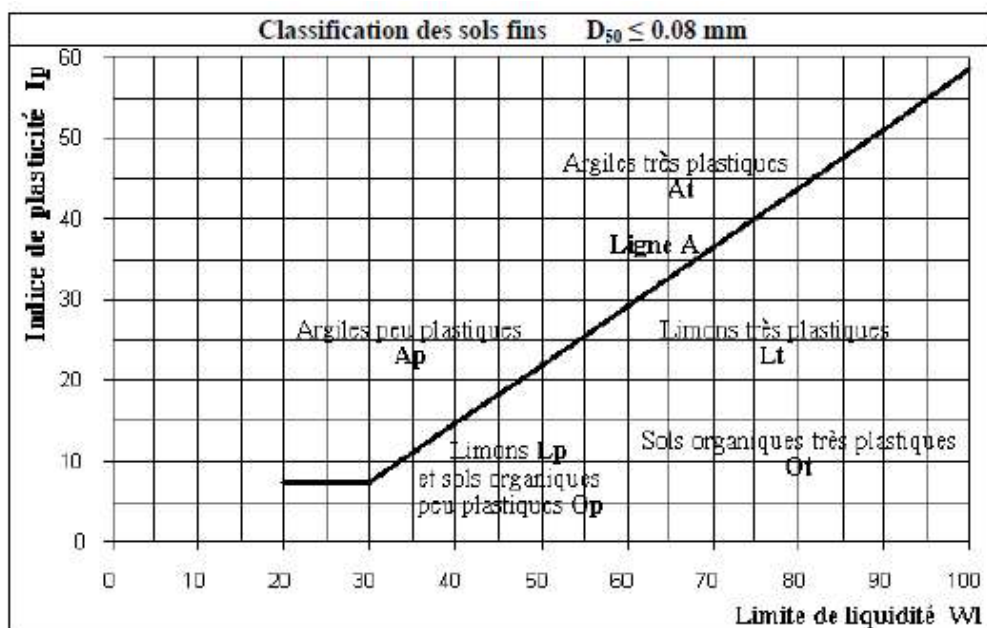


Fig. 4.7 Classification des sols fin.

B- Classification GTR

Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement. Son utilisation est détaillée dans le Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme ; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR.

Les sols sont classés A, B, C, D, les sols ayant une teneur en matières organiques supérieure à 3% sont classés en F. Les matériaux rocheux sont classés en R.

Les tableaux ci-dessous donnent les classes A, B, C, et D.

Classe A <i>Classification des sols fins</i>			
Classement selon la nature			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I_p ≤ 12	A1 Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
		12 < I_p ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...
		25 < I_p ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
		I_p > 40 ou VBS > 8	A4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques...

Classe B <i>Classification des sableux ou graveleux, avec fines</i>			
Classement selon la nature			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B1 Sables silteux...
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B2 Sables argileux (peu argileux)...
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B3 Graves silteuses...
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B4 Graves argileuses (peu argileuses)...
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ou I_p ≤ 12	B5 Sables et graves très silteux...
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ou I_p > 12	B6 Sables et graves argileux à très argileux

Classe C <i>Classification des sols comportant des fines et des gros éléments</i>			
Classement selon la nature			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$D_{max} > 50 \text{ mm}$ et tamisat à $80 \mu\text{m} > 12\%$ ou si le tamisat à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$ la VBS est $> 0,1$	C Sols comportant des fines et des gros éléments	Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60$ à 80% et matériaux roulés. La fraction $0/50$ est un sol de classe A	C_{1Ai} Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...
		Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60$ à 80% et matériaux roulés. La fraction $0/50$ est un sol de classe B	C_{1Bi} Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...
		Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60$ à 80% . La fraction $0/50$ est un sol de classe A	C_{2Ai} Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...
		Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60$ à 80% . La fraction $0/50$ est un sol de classe B	C_{2Bi} Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...

Classe D <i>Classification des sols insensible à l'eau</i>			
Classement selon la nature			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$VBS \leq 0,1$ et tamisat à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D Sols insensibles à l'eau	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $2 \text{ mm} > 70\%$	D₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...
		$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $2 \text{ mm} \leq 70\%$	D₂ Graves alluvionnaires propres, sables...
		$D_{max} > 50 \text{ mm}$	D₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...

Fig.4.8 Classification GTR

4.1.2 Les essais de géotechniques routières

4.1.2.1 Essai PROCTOR

Compacter un sol c'est essayer de rapprocher par des procédés statiques ou dynamiques appropriés les grains d'un matériau de façon à accroître sa masse volumique et sa compacité.

Le compactage d'un sol intéresse non seulement les remblais routiers mais aussi les barrages en terre. Le but de l'essai Proctor est de déterminer en fonction de la teneur en eau pour un sol donné la densité sèche maximale qui peut être obtenue en utilisant une énergie de compactage donnée.



Fig. 4.9 Essai PROCTOR

4.1.2.2 Essai CBR

L'essai CBR (California Bearing Ratio) a pour but la détermination d'un indice e (indice portant Californie n) permettant de calculer grâce à des abaques l'épaisseur des couches de fondation d'une route nécessaires à la constitution d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu prévus et des conditions hydriques futures que subira cette route. Il est déterminé pour des sols à vocation routière de manière purement empirique.



Fig. 4.10 Appareil CBR

4.1.3 Les essais mécaniques

4.1.3.1 Essai œdométrique

Cet essai a pour objet essentiel d'étudier la consolidation d'échantillons de sols intacts ou remaniés, soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide.

On peut suivre la consolidation au cours du temps et déterminer les relations entre charge et déformation après consolidation.

On peut aussi atteindre le coefficient de perméabilité verticale pour une compacité donnée.

Pratiquement, cet essai permet de prévoir l'importance et la durée des tassements des sols sous une charge donnée, sous réserve de nombreuses hypothèses dont il faut vérifier le bien fondé dans chaque cas.



Fig. 4.11 Essai œdométrique

4.1.3.2 Essai de cisaillement rectiligne

Cet essai est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol, c'est-à-dire la cohésion C et l'angle de frottement.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte maximale de cisaillement dans le plan de la rupture. Le problème est de définir le critère de rupture à utiliser.



Fig. 4.12 Appareil de cisaillement direct

4.1.3.3 Essai de cisaillement triaxial

L'essai triaxial a pour but de déterminer les paramètres C et ϕ appelés cohésion et angle de frottement qui servent de base à tous les calculs de stabilité en mécanique des sols.

L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques d'élancement 2. L'éprouvette est placée dans une cellule où elle est soumise à un champ uniforme de contrainte qui a pour composante :

- une pression hydrostatique σ_3 appliquée par l'intermédiaire d'un fluide (eau en général) remplissant la cellule ;
- un déviateur appliqué par un piston ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Trois types d'essai peuvent être réalisés au triaxial :

- Essai consolidé drainé CD ;
- Essai consolidé non drainé CU avec mesure de la pression interstitielle ;
- Essai non consolidé non drainé UU.



Fig. 4.13 Appareil triaxial

4.2 Les essais in situ

4.2.1 Essai Pressiométrique

L'essai pressiométrique peut être réalisé dans tous les types de sols saturés ou non, y compris dans le rocher (avec plus d'incertitude) et les remblais

L'essai pressiométrique consiste à dilater radialement dans le sol une sonde cylindrique et à déterminer la relation entre la pression p appliquée sur le sol et le déplacement de la paroi de la sonde. L'appareillage comprend un contrôleur pression-volume appelé CPV, des tubulures et une sonde

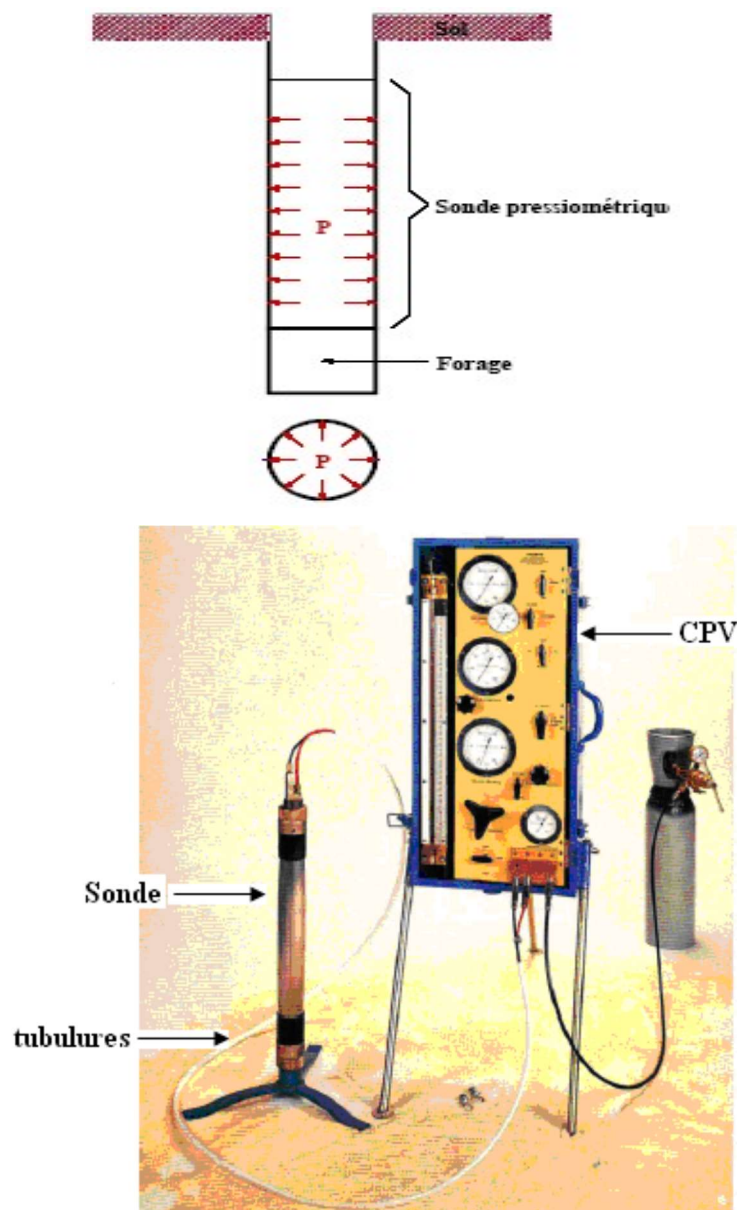
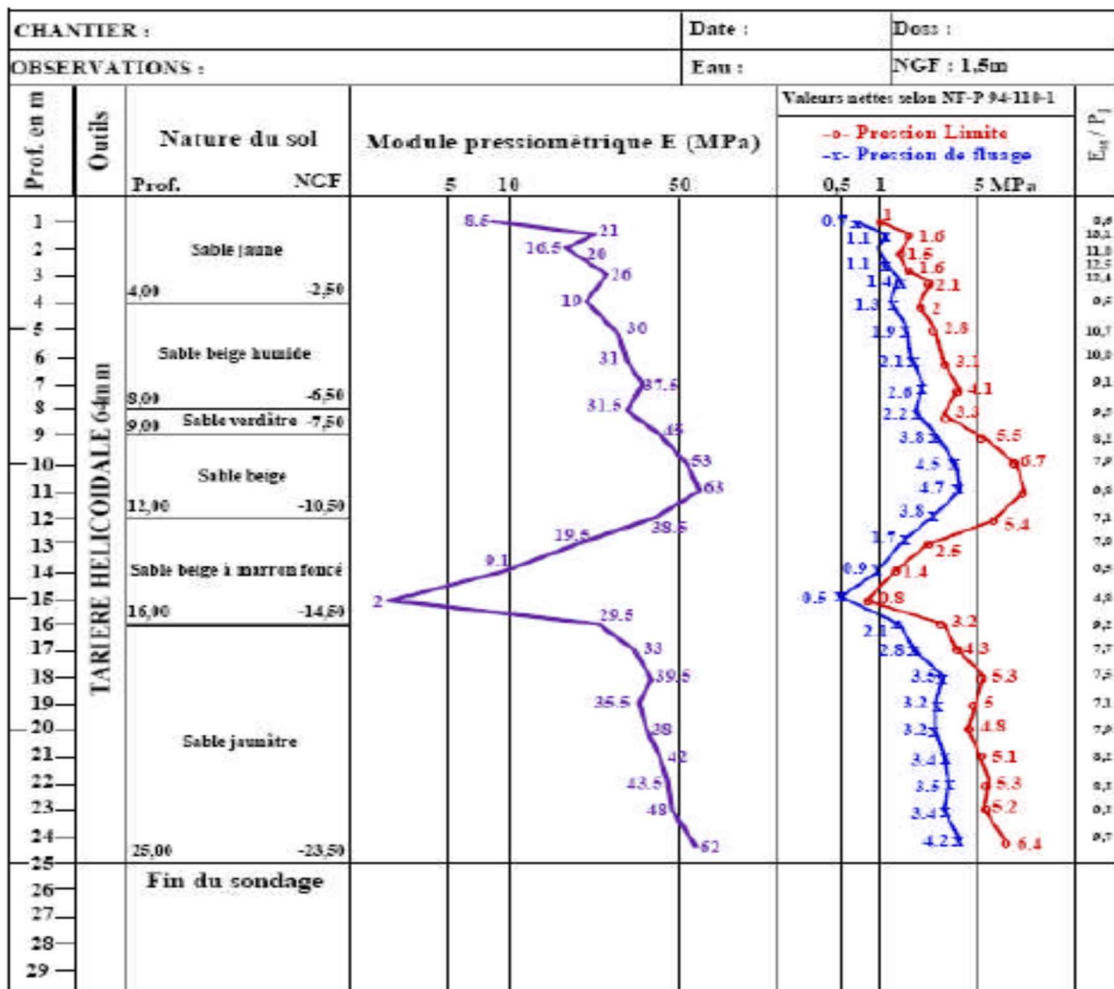


Fig. 4.14 Essai pressiométrique



CLASSE DE SOL	DESCRIPTION	PRESSIOMETRE P_1 (MPa)
ARGILES, LIMONS	A Argiles et limons mous	< 0,7
	B Argiles et limons fermes	1,2 - 2,0
	C Argiles très fermes à dures	> 2,5
SABLES, GRAVES	A Lâches	< 0,5
	B Moyennement compacts	1,0 - 2,0
	C Compacts	> 2,5
CRAIES	A Molles	< 0,7
	B Altérées	1,0 - 2,5
	C Compacts	> 3,0
MARNES	A Tendres	1,5 - 4,0
MARNO-CALCAIRES	B Compacts	> 4,5

Fig. 4.15 Courbe pressiométrique

4.2.2 L'essai pénétrométrique

Les pénétromètres sont constitués de train de tiges à l'extrémité desquelles sont placées des pointes coniques d'un diamètre supérieur ou égale à celui du train de tige. L'essai consiste à enfoncer l'ensemble (pointe + tiges) dans les terrains afin de déterminer la résistance limite du sol.

Il existe deux types de pénétromètres : les pénétromètres statiques qui sont enfoncés dans les terrains à vitesse lente et régulière et les pénétromètres dynamiques qui sont enfoncés par battage.

4.2.2.1 Le pénétromètre statique

L'essai de pénétration statique s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 20 mm. La longueur de pénétration est limitée à la force de réaction de l'appareillage (généralement de 100 kN). Il est surtout utilisé pour le dimensionnement des pieux mais peut également servir à la classification des sols.

L'essai de pénétration statique consiste à enfoncer dans le sol, à vitesse constante, un train de tiges terminé par une pointe munie d'un cône et à mesurer de manière continue la résistance à la pénétration qc de ce cône.

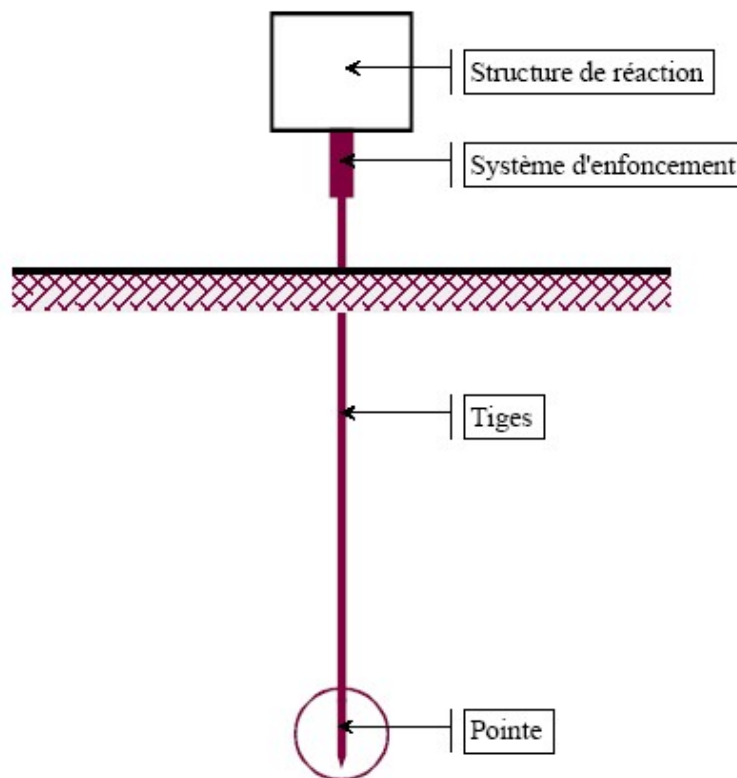


Fig. 4.16 Principe du pénétromètre statique

Un exemple de résultat est donné sur la figure ci-dessous.

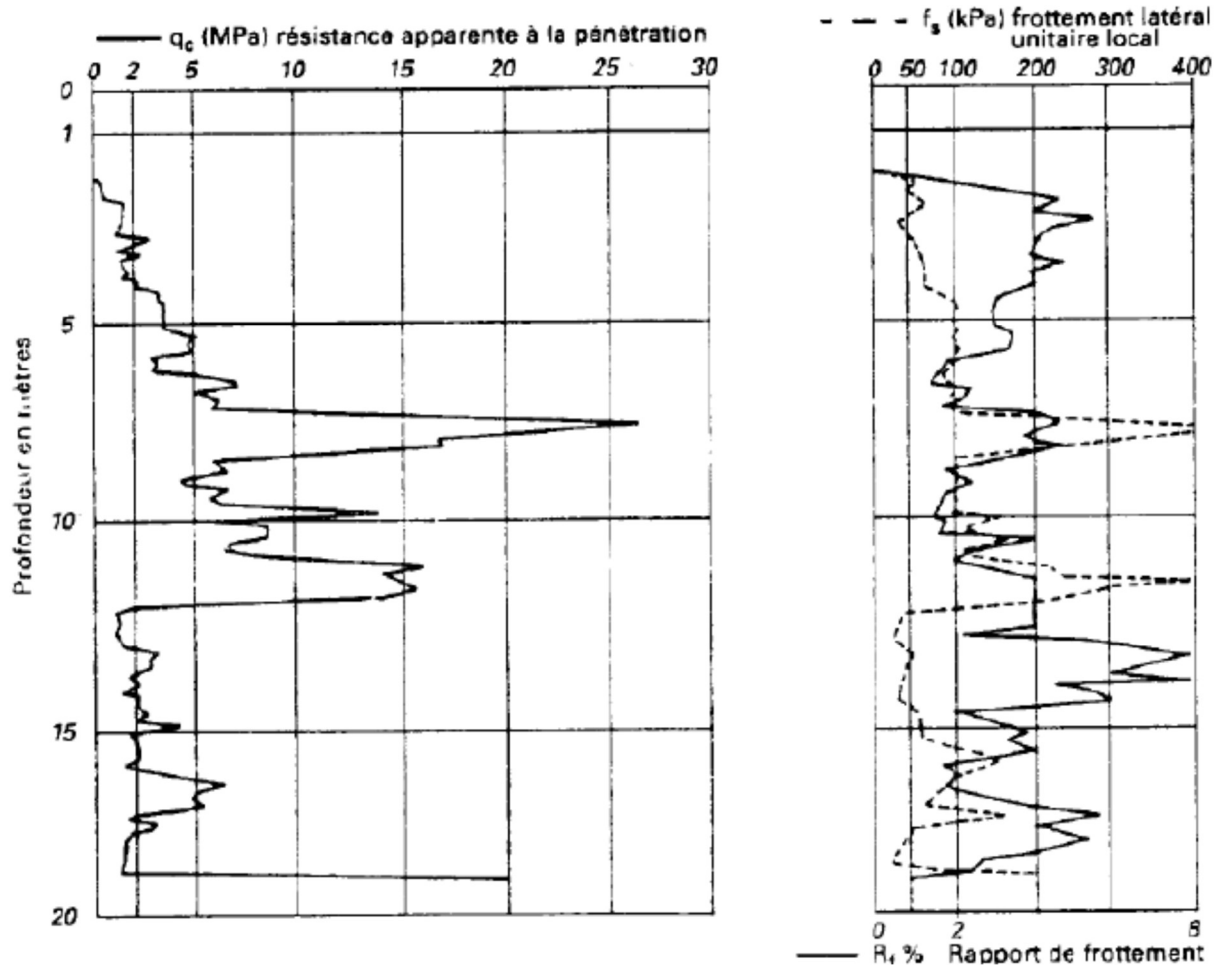


Fig. 4.17 Courbe de l'essai pénétromètre statique

Le tableau ci-dessous donne un classement des sols en fonction de q_c en vue du dimensionnement des fondations d'ouvrages de génie civil.

Tableau 4.1 Classification du sol en fonction du q_c

CLASSE DE SOL		DESCRIPTION	PENETROMETRE q_c (MPa)
ARGILES LIMONS	A	Argiles et limons mous	< 3
	B	Argiles et limons fermes	3,0 - 6,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 6,0
SABLES, GRAVES	A	Lâches	< 5
	B	Moyennement compacts	8,5 - 15,0
	C	Compacts	> 20,0
CRAIES	A	Molles	< 5
	B	Altérées	> 5,0
	C	Compactes	-
MARNES	A	Tendres	-
MARNO-CALCAIRES	B	Compacts	-



Fig. 4.18 Pénétromètre statique

4.2.2.2 Le pénétromètre dynamique

Deux pénétromètres dynamiques, type A et B, ont été normalisés. Ces deux types de pénétromètres permettent d'apprécier :

- la succession de différentes couches de terrain ;
- l'homogénéité d'une couche ;
- la position d'une couche résistante ou d'un bed-rock connus.

Les résultats de l'essai au pénétromètre dynamique B permettent seulement d'orienter le choix des fondations

L'essai de pénétration dynamique consiste à enfoncer dans le sol, par battage de manière continue, un train de tiges muni, en partie inférieure, d'une pointe débordante, tout en injectant une boue de forage, entre la paroi de sondage et les tiges et à noter le nombre de coups nécessaires pour faire pénétrer dans le sol la pointe d'une hauteur h de 10 cm. L'injection de la boue de forage permet de supprimer le frottement latéral des tiges dans le sol.

Les essais de pénétration dynamique type A peuvent être réalisés dans tous les sols fins et grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 60 mm. L'essai est limité à une profondeur de 30 m.

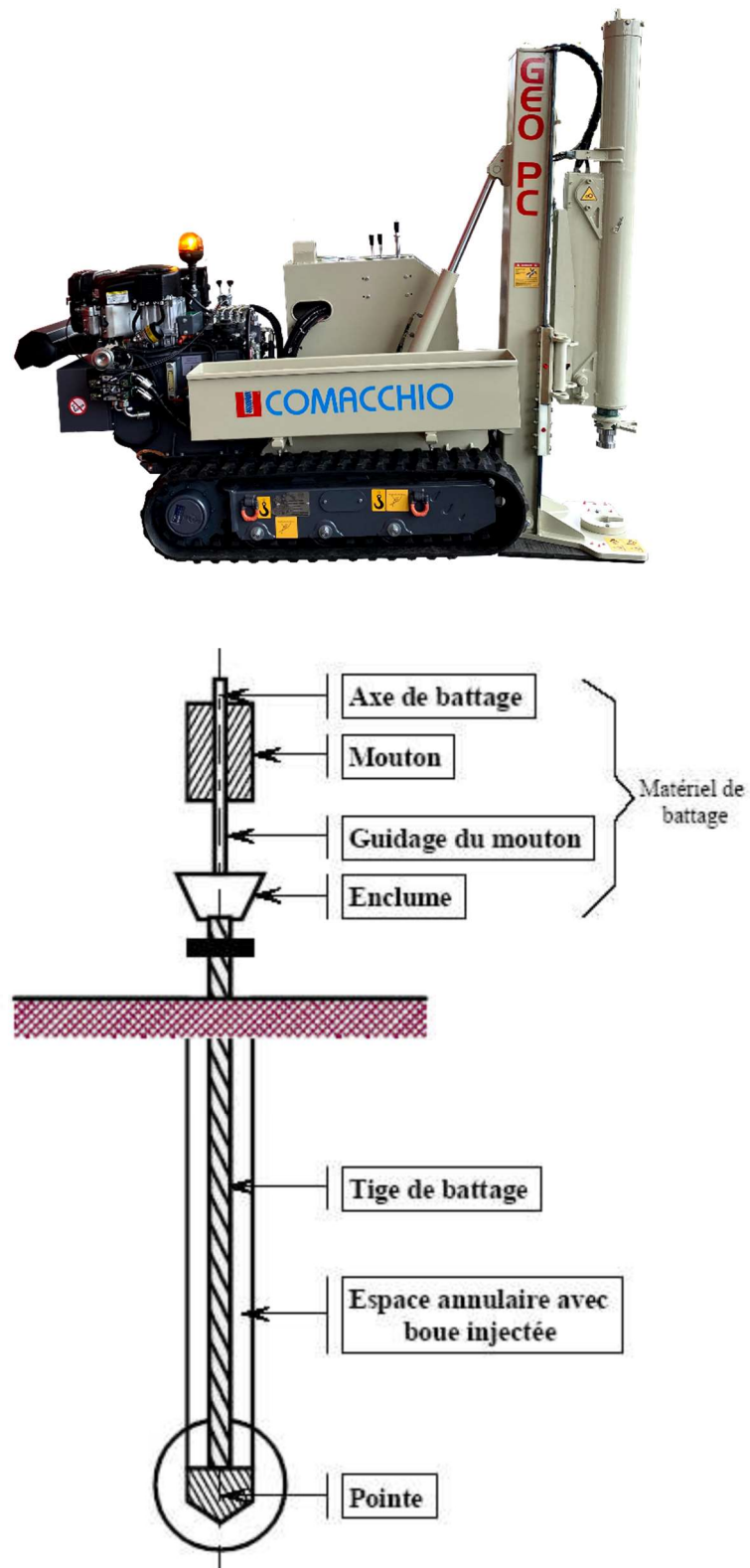


Fig. 4.18 Pénétrömètre dynamique

4.2.3 Essai scissométrique

L'essai scissométrique, réalisé au sein du sol en place, consiste à introduire dans le sol un moulinet et à lui transmettre un mouvement de rotation pour établir la relation entre la rotation du moulinet et la résistance au cisaillement opposée par le sol.

L'objectif est de mesurer en fonction de la profondeur, la cohésion apparente des terrains fins cohérents.

Les essais scissométriques courants sont réalisables dans tous les types de sols fins cohérents de consistance faible à moyenne.

L'appareillage comprend : un système de fonçage, un moulinet, des tiges de torsion, un couplemètre et un dispositif de mesures (figure ci-dessous).

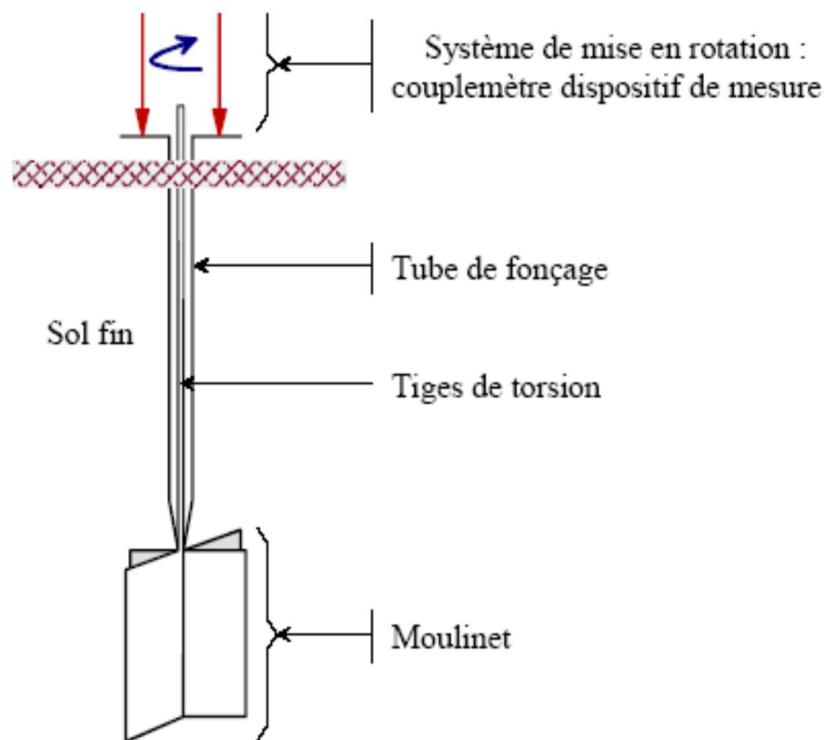


Fig. 4.19 principe de l'Essai scissométrique



Fig. 4.20 Essai scissométrique.

4.3 Conclusion

La reconnaissance et l'exploration des sols constituent des étapes préliminaires essentielles dans tout projet géotechnique ou de construction. Ces investigations permettent d'acquérir une connaissance approfondie des caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques du sol, ainsi que de ses hétérogénéités. Elles jouent un rôle crucial dans la conception des fondations et des structures, en garantissant la sécurité, l'économie et la durabilité du projet.

QUESTIONS A DEBATTRE

- 1) Sur quels types de sols les essais de limites d'Atterberg sont effectués ?
- 2) En plus de l'appareil de Casagrande, on parle aussi du pénétromètre à cône : à quoi ça sert ?
- 3) Peut-on réaliser l'essai de bleu sur un sable ?