

CHAPITRE 01 : Moyens de reconnaissances géotechniques

I- Généralités :

1/ Définitions :

La géotechnique est le domaine d'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des matériaux qui constituent la croûte terrestre et de leurs applications en construction civile.

Du point de vue géotechnique, ces matériaux se divisent en deux grandes catégories : **les roches** et **les sols**.

2/ Domaines d'application :

On peut citer :

- les fondations des ouvrages : bâtiments, ponts, usines, silos...
- les ouvrages de soutènement des terres,
- la stabilité des pentes naturelles et des talus,
- les terrassements : routes, autoroutes, voies ferrées...
- les tunnels et travaux souterrains,
- les barrages et notamment les digues et barrages en terre,
- les ouvrages fluviaux, portuaires et maritimes,
- l'hydrogéologie et la protection de l'environnement.

3/ Description des sols :

Les sols peuvent être **comme matériau de construction, support de fondations et supportés par des ouvrages**

3.1/ Caractéristiques physiques des sols

Un sol est défini par trois phases : gazeuse, liquide et solide. A partir des proportions volumiques et pondérales, leurs paramètres géométriques et hydriques sont définis :

- Porosité : $n = \frac{V_v}{V}$
- Degré de saturation : $S_r = \frac{V_w}{V_v}$
- Indice des vides : $e = \frac{V_v}{V_s}$
- Teneur en eau (pondérale) : $w = \frac{W_w}{W_s}$
- Indice de compacité : $I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

Avec e_{max} indice des vides correspondant au sol dans son état le plus lâche, et e_{min} dans son état le plus dense.

Un sol est caractérisé également par différents poids volumiques :

- apparent : $\gamma = \frac{W}{V}$
- du squelette : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$
- sec : $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$
- de l'eau : $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$
- déjaugé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

D'après la figure 1.1, le poids volumique apparent γ est égal à γ_d pour un sol sec, à γ_{sat} pour un sol saturé, et à γ_h (pour « humide ») dans les autres cas.

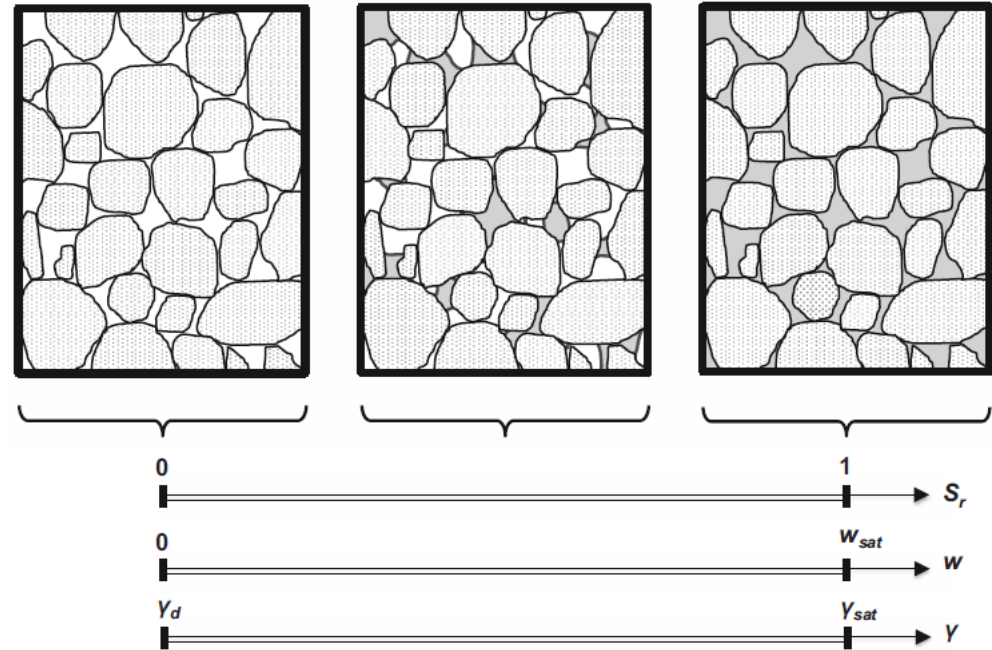
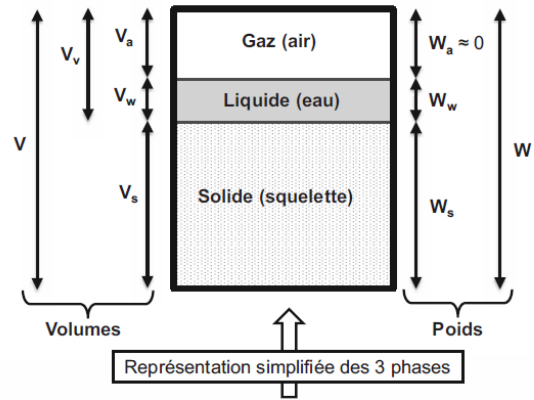
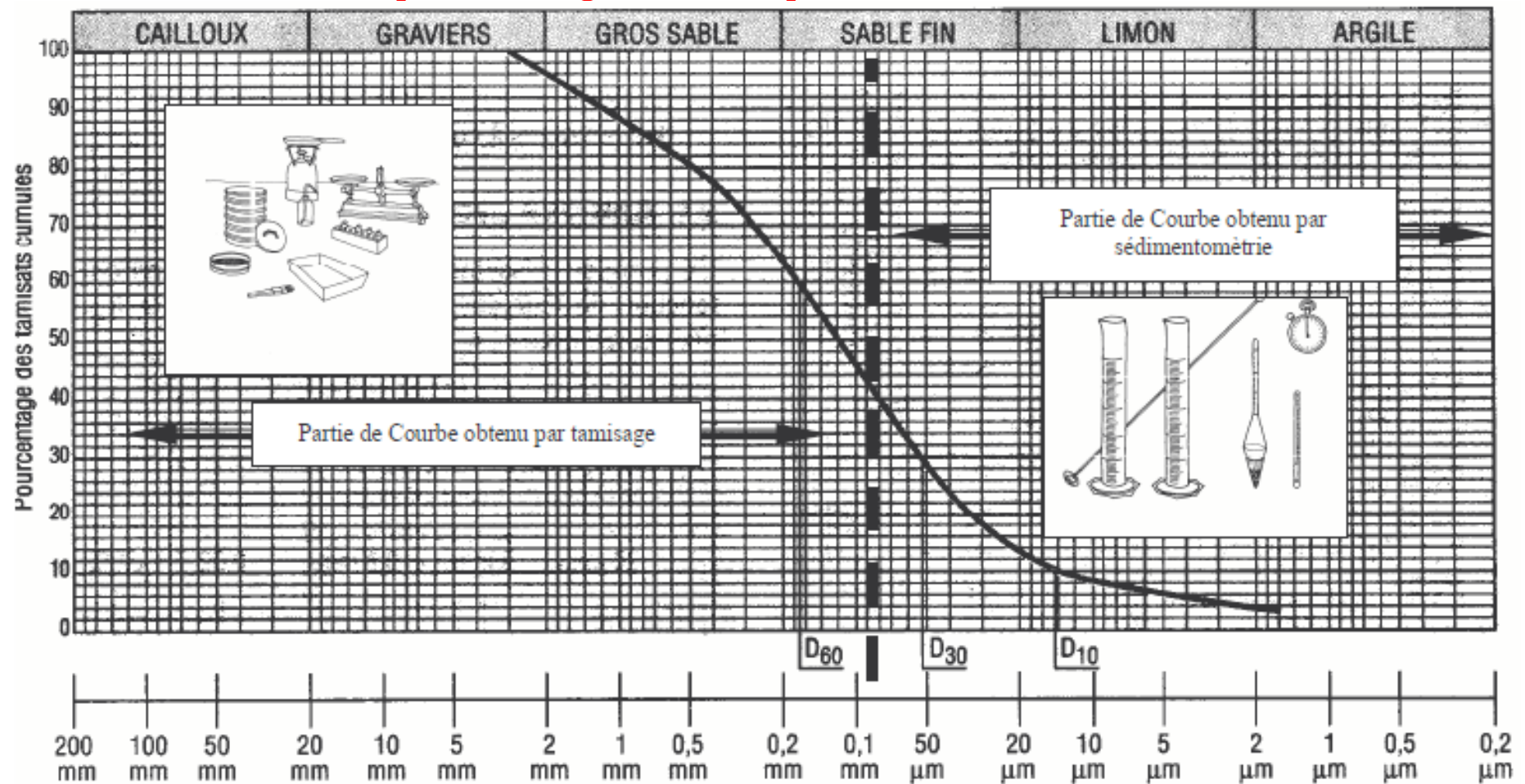
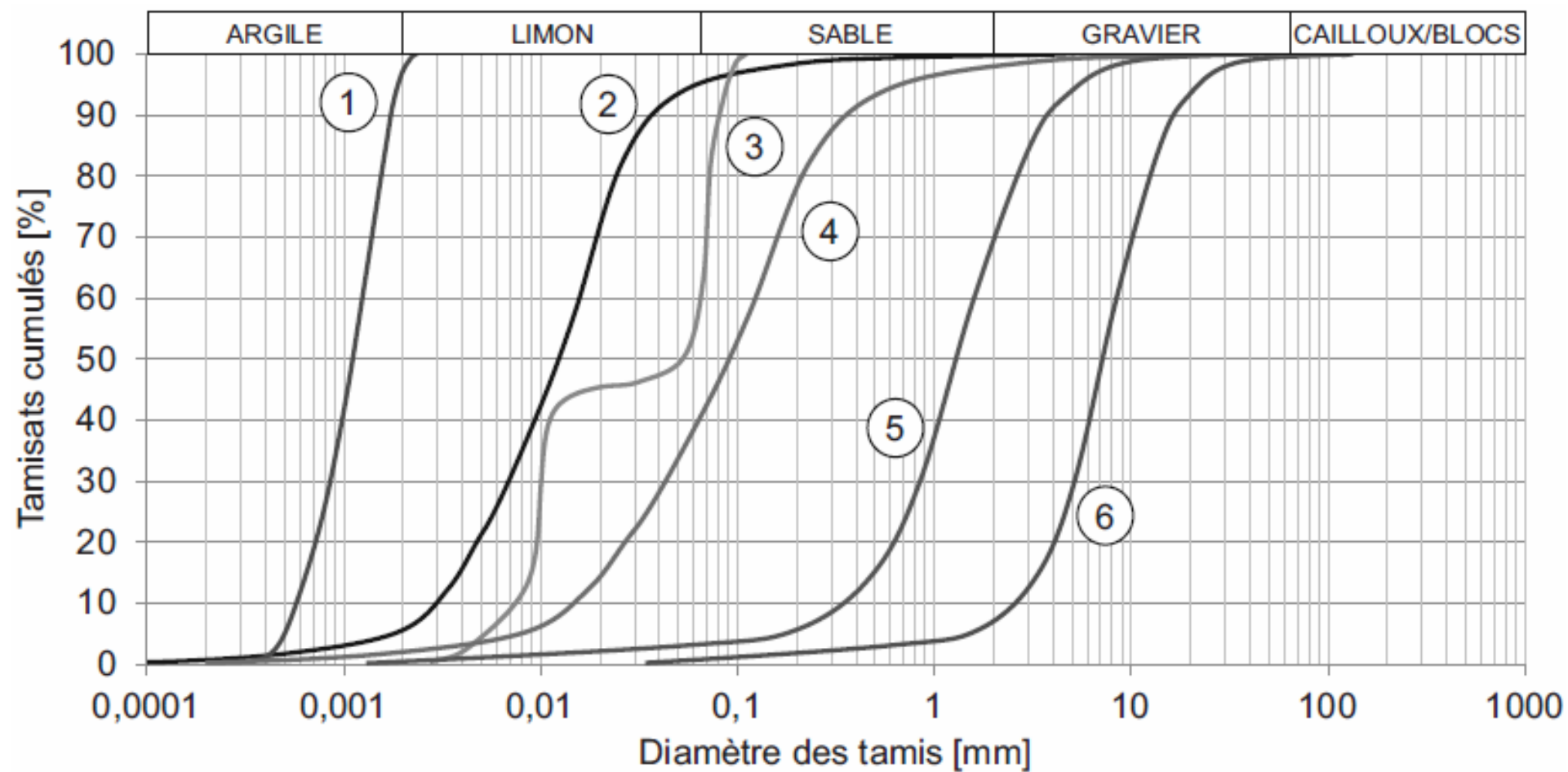


Fig. 1.1. Description d'un sol - États de saturation

3.2/ Identification des sols par Courbe granulométrique





La forme de la courbe granulométrique permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie ou encore son uniformité, exprimée par le **Coefficient d'uniformité** (COEFFICIENT DE HAZEN

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- si $C_u < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée),

- si $C_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

On définit également le **coefficient de courbure** :

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

A noter : Un sol est bien gradué si C_c est compris entre 1 et 3



FIGURE 1.3 Interprétation des coefficients C_u et C_c

3.3/ Identifications propres aux sols fins

La consistance d'un sol fin (fraction passant au tamis de 0,4 mm, les argiles et limons) peut passer de l'état liquide à plastique puis à l'état solide. Les limites d'Atterberg de liquidité ω_L et de plasticité ω_P , déterminées expérimentalement, permettent de séparer ces trois états.

La limite de plasticité (ω_P) sépare l'état plastique de l'état semi-solide. En générale elle ne dépasse pas 40%.

La limite de liquidité (ω_L) sépare l'état liquide de l'état plastique.

La connaissance de ces limites est importante pour l'exécution de travaux de terrassements (fouille, tranchée, ...). En particulier, si le matériau doit être utilisé après remaniement (remblais, barrage en terre, ...), leur détermination revêt une importance considérable.

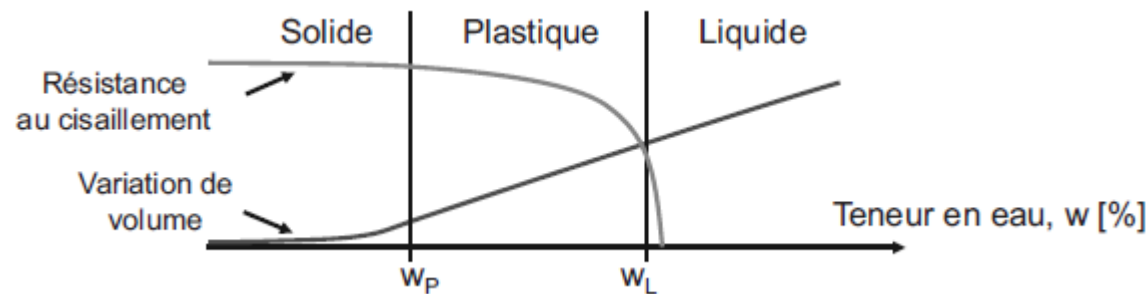


FIGURE 1.4 Limites d'Atterberg

À partir de ces limites, on définit les indices de plasticité I_p et de consistance I_c :

$$I_p = w_L - w_P \quad I_c = \frac{w_L - w_P}{I_p}$$

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

Indice de plasticité I_p	Etat- du sol
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau 2.6 Classification d'un sol selon l'indice de plasticité I_p

Un sol, dont l'indice I_p est grand, est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus I_p est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.

I_p précise donc aussi les risques de déformation des matériaux.

Indice de consistance I_c	Etat- du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

Tableau 2.7 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance

3.4/ Identifications géotechnique des sols

Elle présente un intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement (*classification GTR*).

Les grandes familles de matériaux de cette classification sont présentées dans le tableau 2.5.ci-dessous.

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{\max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\max} > 50mm$ et passant à $80\mu m > 12\%$ ou passant à $80\mu m \leq 12\% +$ VBS>0,1	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS ≤ 0,1 et passant à $80\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	

$D_{\max}$ = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments)

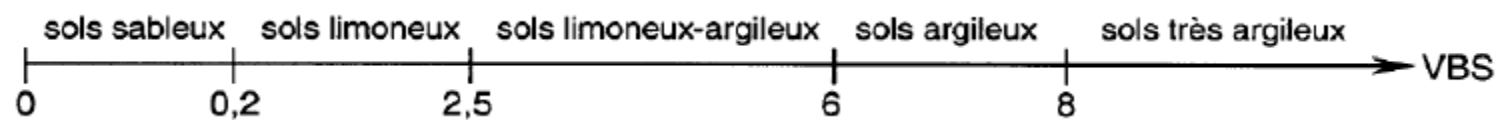
Tab. 2.8 : Classification GTR (SETRA)

Tableau de correspondance

- A : sols fins (limons, argiles...),
- B : sols sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileuses...),
- C : sols comportant des fines et des gros éléments (alluvions grossières, argile à silex...),
- D : sols et roches insensibles à l'eau (sables et graves propres, matériaux rocheux sains...),
- R et F (détaillées ci-dessus) : d'autres essais concernant spécifiquement ces classes.

(1) Classification détaillée de la sous-classe de sol A_2 :

A_2 correspond le plus fréquemment aux sols suivants : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes. La majorité des outils de terrassement est adaptée à ce type de sol si la teneur en eau n'est pas trop élevée. Dès que I_p est inférieur à 12 (NF P 94-051), il est préférable d'utiliser la valeur de bleu VBS pour identifier le sol.



valeur de bleu de méthylène d'un sol

3.5/ Identifications LPC des sols.

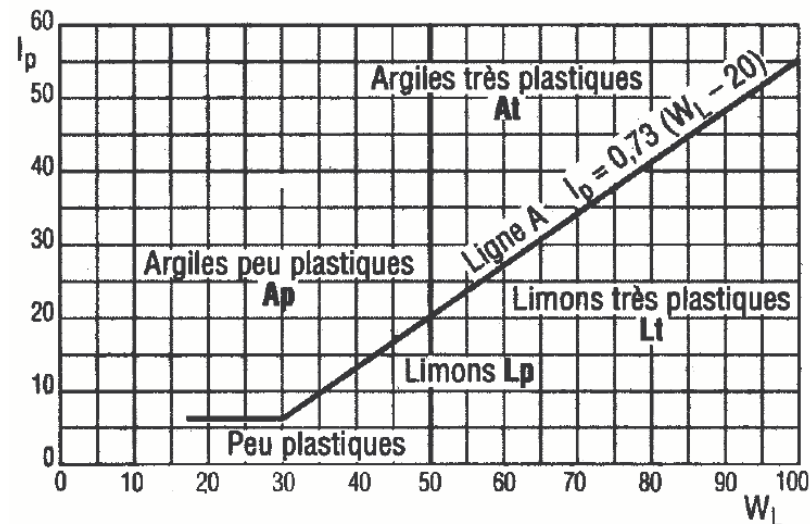
C'est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System).

Elle utilise les résultats de l'analyse granulométrique, de l'Equivalent de sable et des limites d'Atterberg.

Suivant la classification LPC, on distingue trois grands types de sols :

- _ Les sols grenus dont 50% d'éléments en poids sont supérieurs à 80 μ ;
- _ Les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à 80 μ ;
- _ Les sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée

Le diagramme de plasticité associée à cette classification :



Tab. 2.14.b. : Classification LPC : Diagramme de plasticité

4. Principaux moyens de reconnaissance

Les moyens de reconnaissance sont divisés en deux catégories principales :

1^{ère} catégorie : les méthodes d'observation du terrain soit en place, soit à l'aide d'échantillons.

A cette catégorie appartiennent les tranchées, puits, galeries et sondages de reconnaissance.

2^{ème} catégorie : les méthodes de mesure in situ qui sont basées sur la mesure des propriétés physique qui peuvent être mécanique, électrique, hydraulique etc.

A cette catégorie appartiennent les essais mécaniques, géophysiques et hydrauliques.

4.1. Les tranchées et les puits

Leurs objectifs sont généralement multiples :

- Recherche d'un substratum imperméable sous une couverture peu épaisse.
- Levé d'une coupe géologique détaillée
- Prélèvement d'échantillons pour identification et essais mécaniques.



4.2. Les galeries

Il s'agit d'une technique beaucoup plus coûteuse qui n'est généralement mise en œuvre que pour des reconnaissances à gros budget (appuis de barrage, travaux souterrains).



4.3. Les sondages mécaniques

La gamme des moyens de sondage mécanique est très étendue, qu'il s'agisse de la puissance des appareils, du mode de perforation, des diamètres employés, des profondeurs atteintes. La quasi-totalité des reconnaissances géotechniques n'intéressent que les profondeurs comprise entre 0 et 100 m ; les investigations de 100 à 300 m sont rares. Exceptionnellement des projets nécessitent des forages profonds.



D'une façon générale, les sondages mécaniques ont un double but :

- Géologique : permet de compléter la reconnaissance géologique du sous-sol.
- Géotechnique : pour le prélèvement d'échantillons intacts destinés au laboratoire et pour l'exécution d'essais in situ, hydrauliques ou mécaniques.

Le mode de forage peut être destructif ou non destructif avec prélèvement d'échantillons (beaucoup plus cher).

Les modes de forage, l'échantillonnage et les types d'essais différents selon que l'on se trouve en terrain meuble peu cohérent ou dans le rocher.

4.3.1 Le sondage en terrain meuble

Les principales difficultés proviennent de la tenue des parois du sondage et de la remontée du terrain foré.

Dans la plupart des cas, il faut opérer sous la protection d'un tubage continu ou employer une boue de forage qui, formant un cake sur la paroi du puits.

4.3.1.1 Tarières à main

La tarière à main : pour les faibles profondeurs (jusqu'à 5 m)



4.3.1.2 Tarières à moteur

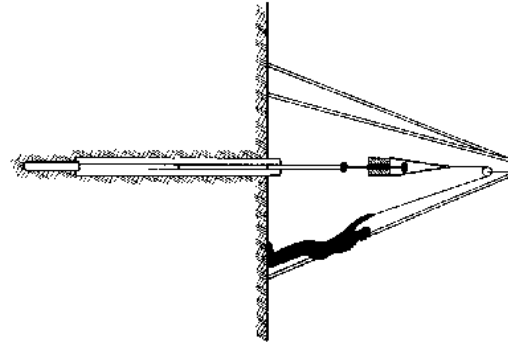
Montée sur camion, sont efficaces pour la reconnaissance rapide. Elles sont peu exploitables sous l'eau, et inopérants dans les formations à blocs.



4.3.1.3 Sondage par battage

Cette méthode est la plus courante en terrain meuble, sec ou saturé. Un tubage métallique est enfoncé dans le sol par battage à l'aide d'un mouton.

La colonne de sédiment ainsi isolée à l'intérieur du tube est extraite à l'aide d'un outil adapté.



4.3.2 Le sondage en terrain rocheux

La reconnaissance géologique et géotechnique n'est pas le seul but assigné aux forages au rocher sur un chantier. Ils permettent également :

- La mise en place d'équipement destiné à des mesures (piézomètres, perméabilités, pression interstitielle, etc.).
- Le traitement des terrains (injection, drainage).
- Le soutènement (ancrage).
- La mise en place de charges d'explosifs (terrassement en grande masse).

L'essentiel pour ces dernières applications est de perforer rapidement et économiquement d'où le recours à des méthodes destructives. Celles-ci sont mal adaptées aux besoins de la reconnaissance géologique et géotechnique qui exige une grande qualité de l'échantillonnage.

4.3.2.1 Les méthodes destructives

Tous fragmentent la roche, et les débris doivent être remontés à la surface par un fluide de forage (air comprimé, eau, boue).

4.3.2.2 Les méthodes non destructives (forages carottés)

Leur but est de découper en continuité sur toute une colonne de terrain puis de la remonter à la surface du sol pour examen géologique ou essais de laboratoire.

Dans la pratique, la carotte est découpée à l'aide d'une couronne abrasive solidaire d'un tube carottier qui permet sa protection et sa remontée.

TYPE	PROFONDEUR MAXI	SOLS	NAPPE	DIFFICULTES	ECHANTILLONS	ESSAIS POSSIBLES	OBSERVATIONS
Puits manuels	5 à 7 m	- tous sols excepté sable (étayage) - sols rocheux (marteau piqueur) + compresseur	En cas de Nappe arrêt En sol Meuble	- obstacle dangereux (zone urbaine) - risque d'éboulé	Intacts et remaniés possibles (boites paraffines)	Essais in-situ (y d W- cisaillement Essai de plaque tous essais de labosur prélèvement	Très recommandé car permet de voir les formations
Tarière A main	10 m	Sols fins	Si nappe en terrain sableux arrêt	Présence d'un seul caillou peut arrêter faire attention pour la détermination des trois rocheux	remanié	Essais in-situ (perméabilité) essais d'ardent sur prélèvement	Difficultés de préciser la côte de chacune des formations traversées à 20 ou 30 cm près.
Pelle Mécanique	5 à 7 m	Tous sols non rocheux et sols rocheux altérés	Arrêt avec nappe	Très destructifs Obstacle dangereux	Intacts et remaniés	Tous essais in-situ et en laboratoire	Permet l'observation utilisé peu avant les travaux.

TYPE	PROFONDEUR MAXI	SOLS	NAPPE	DIFFICULTES	ECHANTILLONS	ESSAIS POSSIBLES	OBSERVATIONS
Tarrière mécanique	20 à 30 m	Sol meuble	Niveau relevable des Qu'atteint	Limitation suivant la compacité du sol et les éboulements éventuels	Remanié continu intact possible avec équipement	In-situ perméabilité – en labo identification	Permet une reconnaissance plus profonde précision de la coupe 0,50 m
Sondeuse s mécaniques	30 m	Tous sols même rocheux	Après tubage et attente de la stabil.	Matériel assez lourd demandant un accès parfois coûteux	Remanies possibles intacts avec équipement spécifique	Vitesse d'avancement essais sur échantillon intact en laboratoire	Il faut faire attention à la qualité du prél intact en fonction du type de sol
Pénètre dynamique		Sols Meubles	Présence de nappe possible mais pas toujours détectable	Nécessité la proximité de sondage pour caler les résultats	non	Résistance à l'avancement	Utile pour détermination du toit rocheux attention aux niveaux caillouteux et aux zones d'altération

4.4. Les essais hydrauliques

Parmi les constituants du sous-sol, l'eau. La résolution de nombreux problèmes d'hydraulique des sols implique la connaissance du coefficient de perméabilité.

La mesure du coefficient de perméabilité effectuée au laboratoire est rarement satisfaisante, l'hétérogénéité du sol en place est le plus souvent l'origine de cette non satisfaction.

Il est donc nécessaire de procéder à des essais en place intéressant un volume suffisant pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol.

Les principaux essais de perméabilité en place sont :

- L'essai de pompage.
- L'essai Lefranc.
- L'essai Lugeon.

4.5. Méthodes Géophysiques

- Discipline qui consiste à étudier (observer, mesurer) un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités creusées dans le sol.
- Ce champ physique (origine naturelle ou provoquée), dépend d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain.

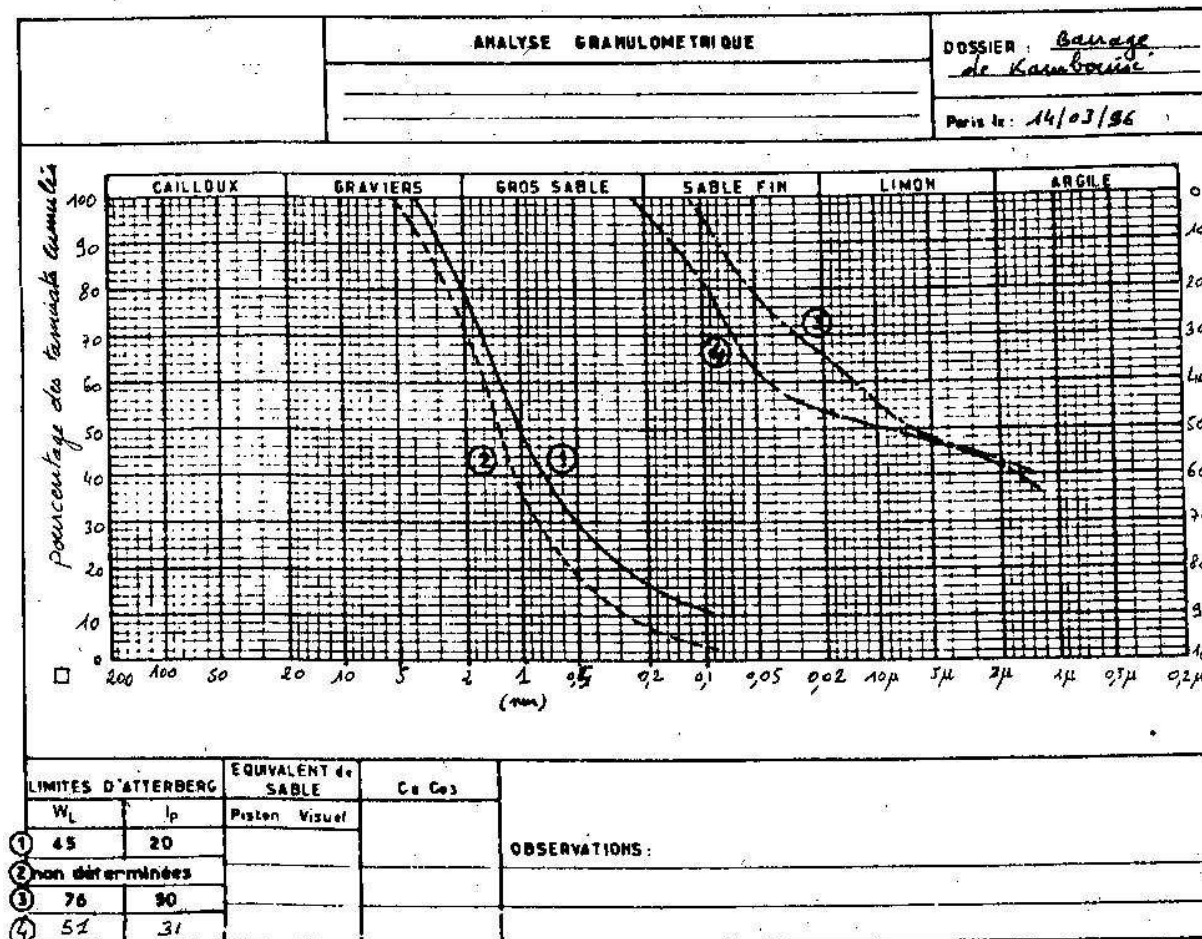
5. La stratégie des reconnaissances

Pour conclure ce chapitre consacré aux définitions et aux moyens de reconnaissance à mettre en œuvre pour compléter l'étude géologique de surface, nous insisterons sur le choix d'un type d'appareil doit se faire en fonction du terrain attendu et surtout de la nature du problème à résoudre. Il est rare qu'une seule méthode donne des résultats escomptés et l'on doit souvent combiner plusieurs observations et/ou plusieurs mesures.

Dans le cas des projets importants, il est nécessaire de conduire la campagne par étapes successives allant de la résolution des problèmes généraux à celles des points particuliers. On réservera toujours les essais ponctuels et coûteux pour la deuxième ou la troisième phase, après que la reconnaissance globale du site et la mise en évidence des principales difficultés auront été effectués.

Exercice 1

Quelle est la classification géotechnique et LPC des sols (1), (2), (3) et (4) dont les courbes granulométriques sont indiquées ci-dessous ?



Exercice 2

Quelle est la classification géotechnique des sols (1), (2), (3) et (4) dont les courbes granulométriques sont indiquées ci-dessous ?

