



**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**  
**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail**  
**DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**VERSION EXPERIMENTALE**

**RESUME THEORIQUE**  
**&**  
**GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

<b>MODULE 14</b>	<b>CONNAISSANCES SUR LA MECANIQUE DES SOLS</b>
------------------	--

**SECTEUR : BTP**

**SPECIALITE : CHEF DE CHANTIER TRAVAUX  
PUBLICS**

**NIVEAU : TECHNICIEN**

**(APC) Juin.2007**

<http://module01-ofppt.blogspot.com>

## REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont contribué à l'élaboration du présent document.

### Pour la supervision :

M. Khalid BAROUTI  
Mme Najat IGGOUT  
M. Abdelaziz EL ADAOUI

Chef projet BTP  
Directeur du CDC BTP  
Chef de Pôle CDC /BTP

### Pour la conception :

Mr KRISTOV KOLEV

Formateur à ISTA MAAMORA KENITRA

Mr LAHLAFI MOHAMMED

Formateur ISTA MAAMORA KENITRA

### Pour la validation :

Mme GUNINA Fatna

Formatrice animatrice au CDC /BTP

**Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.**

**DRIF**

## SOMMAIRE :

Présentation du module

Résumé de théorie

### **I. Caractéristiques physiques structure et classification des sols**

- 1) Généralités et définitions
- 2) Processus géologique de formation des sols
- 3) Les différentes phases constitutives d'un sol
- 4) Les caractéristiques physiques et leur mesure

### **II. Connaissances générales sur les limites d'ATTERBURG**

- 1) limite de liquidité
- 2) Limite de plasticité
- 3) limite de retrait
- 4) Indice de plasticité

### **III. classification des sols**

- 1) La classification du laboratoire des pont et chaussée
  - Sols a granulométrie uniforme
  - Sols a granulométrie non uniforme

### **IV. Guide des travaux pratiques**

- 1) TP 1 détermination de la limite de liquidité
- 2) TP 2 détermination de la limite de plasticité
- 3) TP 3 détermination de la limite de retrait

## MODULE 14 : CONNAISSANCE SUR LA MECANIQUE DES SOLS

Durée : 60 heures

### OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

#### COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit **savoir déterminer le type des sols et les caractéristiques demander par les bureaux d'études béton armé**, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

#### CONDITIONS D'EVALUATION

- Individuellement
- A partir des questions de cours
- A partir des exercices notés

#### CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Connaître les types des sols
- Respecter les normes fixer par le laboratoire des pont et chaussée
- utilisation correcte des matériels du laboratoire
- savoir faire les calculs nécessaires pour le laboratoire mécanique des sols

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT

**PRECISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

Détermination des types de sol

Détermination des limites d'ATTERBERG

**CRITERES PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- Mode d'emploi par sondage
- Mode d'emploi fixé par le laboratoire mécanique des sols
  
- Détermination de la limite de liquidité
- Détermination de la limite de plasticité
- Détermination de la limite de retrait

## OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

Le stagiaire doit maîtriser les savoirs, savoir-faire, savoir-percevoir ou savoir-être jugés préalables aux apprentissages directement requis pour l'atteinte de l'objectif de premier niveau, tels que :

### **Avant d'apprendre à déterminer les limites d'ATTERBERG :**

1. Connaître les types des sols
2. Connaître les différentes caractéristiques des sols
3. Apprendre le mode d'emploi des laboratoires de mécanique des sols

## **PRESENTATION DU MODULE**

- *le module dont l'intitulé est la connaissance de base de la mécanique des sols*
- *Il est situé dans la première partie du programme.*
- *Il est composée de 02 parties comme suit :*
  - *Connaissances générales sur les types des sols*
  - *Détermination des limites d'ATTERBERG*
  
- *A l'issu de ce module, les stagiaires auront acquis des connaissances techniques de base sur les types des sols et de savoir déterminer les limites d'ATTERBERG*
- *La durée de ce module est de 60 heures.*

**MODULE, 14 :**

**CONNAISSANCES SUR  
LA MECANIQUE DES  
SOLS  
RESUME DE THEORIE**

## CARACTERISTIQUES PHYSIQUES STRUCTURE ET CLASSIFICATION DES SOLS

### **I. GENERALITES ET DIFINITIONS :**

Le terme de sol correspond à une notion première, intuitive. Mais si l'on se penche de plus près sur le problème de la définition du matériau sol on constate qu'il en existe plusieurs suivant que l'on s'intéresse à un problème géologique de pédologie (étude des sols en agronomie) ou de géologie.

Du point de vue du géologue, on peut définir un sol comme faisant partie des roches meubles ou plastiques, ou encore comme étant une formation géologique superficielle résultant de l'alternance des roches de l'écorce terrestre. Les sols entrent en général dans la catégorie des roches sédimentaires à l'exception des cendres ou projections volcaniques.

La difficulté essentielle d'une telle définition réside dans le fait qu'elle n'établit aucune distinction très nette entre un sol et une roche, et qu'il existe certains matériaux tels que les marnes compactes, que l'on peut classer soit parmi les roches, soit parmi les sols.

De manière simple, on peut dire qu'un sol séché et plongé dans l'eau, se désagrège relativement vite, alors qu'une roche reste intacte.

Dans de nombreux projets, les sols sont encore trop souvent désignés par des expressions imprécises du type : argile sableux, ou sable argileux, sans autre commentaire, alors que de tels matériaux peuvent présenter des propriétés mécaniques extrêmement différents, la nécessité s'est donc fait sentir d'étudier les caractéristiques physiques des sols, de manière à aboutir à une classification géologique rationnelle, éliminant ces imprécisions de langage.

### **II. PROCESSUS GEOLOGIQUE DE FORMATION DES SOLS :**

On voit que les sols sont le résultat de l'altération des roches constitutives de la croûte terrestre (roches mères). L'étude de ces phénomènes relève de la géodynamique externe étudiée dans le cours de géologie de P. ANTOINE tome 1. Nous bornons ici à rappeler l'essentiel.

L'altération de la roche mère peut être le résultat :

- D'une dégradation mécanique due à divers facteurs : variations thermiques (gel – dégel - échauffement)
- D'un processus chimique :
  - ✓ Oxydation (air ou d'eau de pluie) donnant en général une teinte rouille (sels ferriques)
  - ✓ Réduction (eaux stagnantes) donnant une teinte bleutée ou verdâtre (sels ferreux)

- ✓ Hydratation
- ✓ Dissolution
- ✓ Hydrolyse
- D'un processus biologique, produisant à la fois une action mécanique et une action Chimique (racines, décomposition de végétaux, bactéries).

L'étude de la genèse des sols permet d'autre part de distinguer trois catégories :

**Les sols autochtones :**

Qui résultent directement de l'altération du substratum rocheux qu'ils recouvrent.  
Exemple typique : arène granitique ou gore (sable argileux grossier)

**Les sols résiduels :**

Très répandus, résultant de dégradation de la roche sous jacente et de roches ayant plus ou moins disparu par suite d'une décomposition intérieure. Ces sols présentent donc une parenté totale avec le substratum actuel. Ce sont essentiellement des sols à dominante argileuse. Exemple : argile à silex du bassin parisien.

**Les sols transportés :**

Très répandus. Le transport peut résulter de différents processus :

- Transport, limite dans l'espace, de formations résiduelles par glissement ou écoulement visqueux : colluvions de pente.
- Transport du glaciers actuels ou disparus : moraines (argiles à blocs).
- Transport par le vent : loess, limon et sables éoliens.
- Transport par les cours d'eau : dépôts alluviaux fluviaux (très hétérogènes) lacustres ou marins (homogènes).

La connaissance du processus géologique de formation des sols n'est pas sans intérêt pour le géotechnicien. C'est ainsi que les argiles glaciaires, qui on subit lors des glaciations quaternaires les contraintes importantes dues au poids des glaciers aujourd'hui disparus, auront un comportement mécanique très différent de celui des argiles molles de mexico, dont la structure très lâche résulte du dépôt dans un lac profond (actuellement comblé) de particules de cendres volcaniques fines amenées, soit par le vent, soit par les cours d'eau affluents

**III. LES DIFFERENTES PHASES CONSTITUTIVES D'UN SOL :**

Un sol est un élément de trois phases : la phase solide composée de grains dont l'ensemble constitue le squelette du sol, la phase liquide représentée par l'eau remplissant partiellement les vides existant entre les particules, et la phase gazeuse constituée en général par un mélange d'air et de la vapeur d'eau qui occupe les vides restants.

**A. Phase gazeuse généralement**

Lorsque le sol est sec, le gaz contenu dans les vides est généralement de l'air, mais le plus souvent il s'agit d'un mélange d'air et de vapeur d'eau, car les sols en place sont le plus souvent humides. Lorsque tous les vides sont remplis d'eau, la phase gazeuse est inexistante, le sol est donc saturé.

En pratique, dans nos régions tempérées, des nappes d'eau souterraines appelées nappes phréatiques baignent les sols en place Leur niveau supérieur se situe en général à quelques mètres de la surface. La plupart des sols à quelques mètres sont saturés

L'étude du comportement des sols non saturés est très complexe et en est encore à ses débuts. L'élément gazeux joue cependant un rôle très important en pratique, en particulier dans le compactage des sols.

Dans la suite des cours, sauf indication contraire, nous bornons à considérer le cas des sols saturés.

### **B. Phase liquide :**

On distingue différentes catégories d'eau dont l'importance est plus ou moins grande suivant la grosseur des grains du sol.

#### **L'eau libre :**

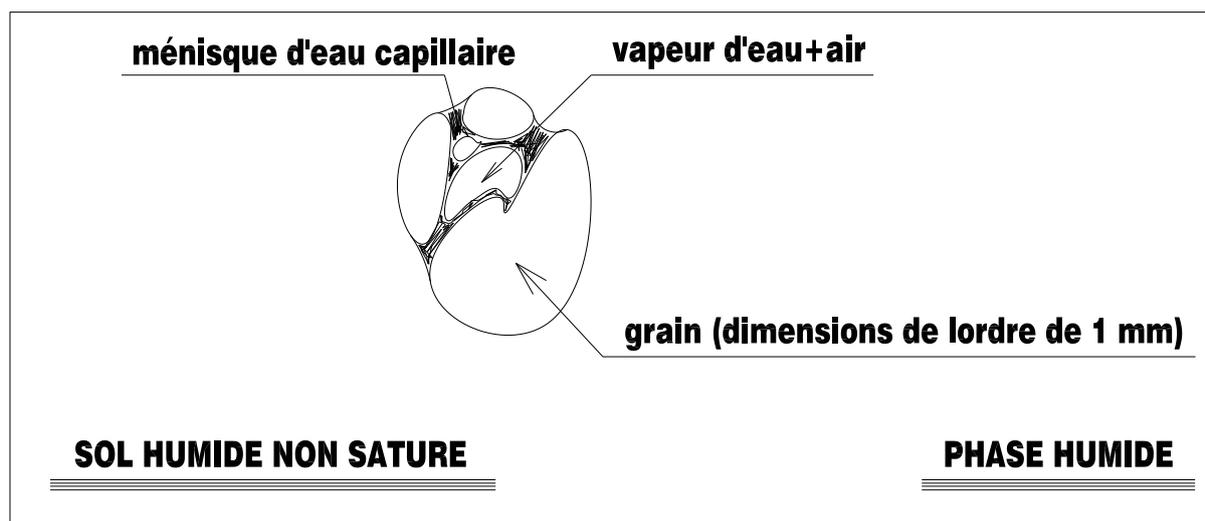
Qui peut circuler entre les grains. Elle s'évapore complètement lorsque le sol est porté à une température légèrement supérieure à 100 C°. C'est l'eau libre qui constitue les nappes phréatiques.

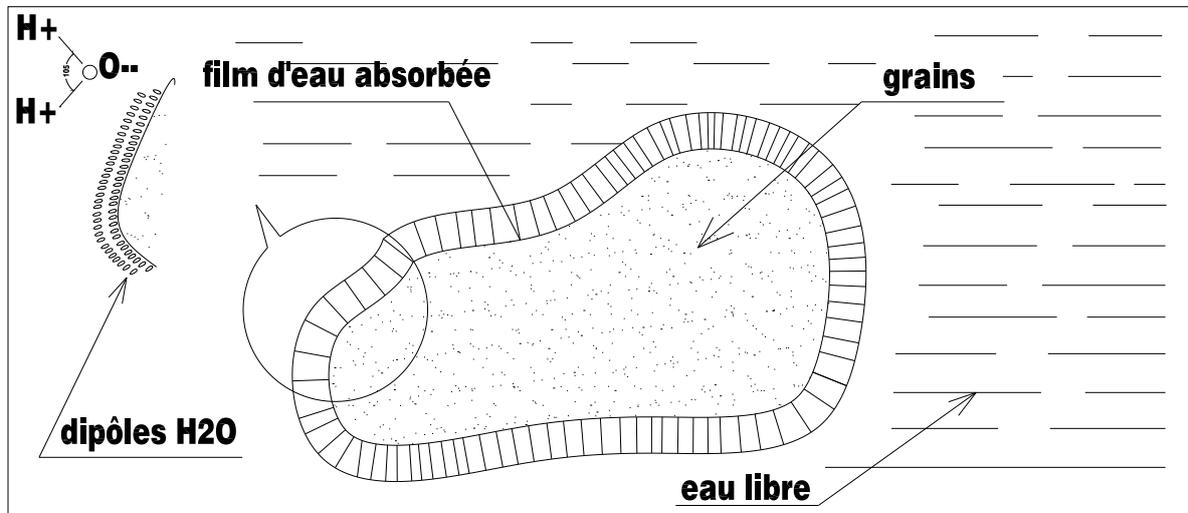
#### **L'eau capillaire :**

Ce type de l'eau est retenu sous forme de ménisque au voisinage des points de contact entre les grains par des forces capillaires, créant entre ces derniers des forces d'attraction. Dans le cas de sols non saturés, et disparaît dans les mêmes conditions de température que l'eau libre.

#### **L'eau absorbée :**

Que l'on rencontre dans les sols très fins (diamètre moyen  $< 2\mu\text{m}$ ). Due au problème d'absorption de l'eau par la phase solide, elle consiste d'adsorption de l'eau formée de couches orientées de dipôles  $\text{H}_2\text{O}$ . Ses propriétés sont très différentes de celles de l'eau libre. Elle n'est pas mobile, présente une importance viscosité qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un solide et celles d'un liquide. Elle ne peut être évacuée qu'à température élevée (vers 300° C).





Cette coquille d'eau absorbée joue le rôle de lubrifiant entre les grains, et a une influence importante sur les propriétés mécaniques des sols fins.

### C. Phase solide :

Lorsque le sol résulte de la désagrégation mécanique d'une roche, les grains du sol sont constitués de mêmes minéraux que la roche mère. En général des dimensions supérieures à  $2 \mu$ , et une forme relativement arrondie, constituant un squelette dans lequel les vides occupent un volume plus faible que les grains.

Lorsque le sol résulte d'un processus chimique qui s'est superposé à une désagrégation mécanique, les particules du sol n'ont plus la même structure cristalline que la roche mère, et ont des dimensions inférieures à  $2 \mu$ . Les sols ainsi formés sont appelés argiles.

Nous reviendrons plus loin sur le détail de leur structure à l'échelle moléculaire.

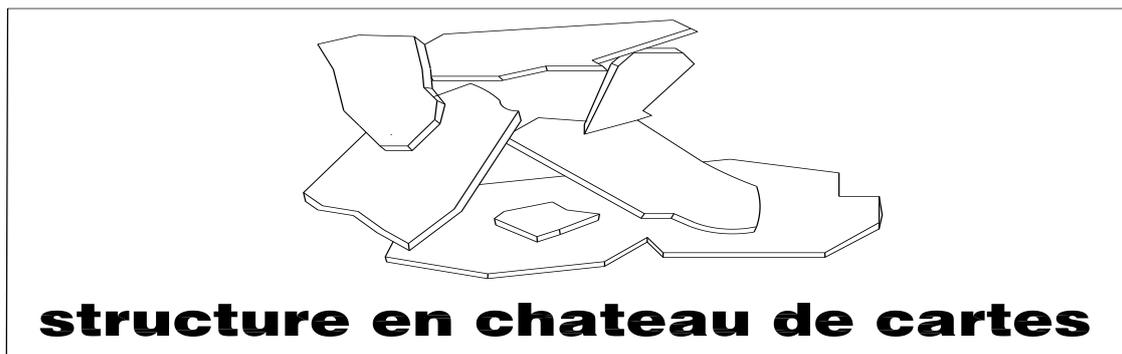
Les particules argileuses sont caractérisés par :

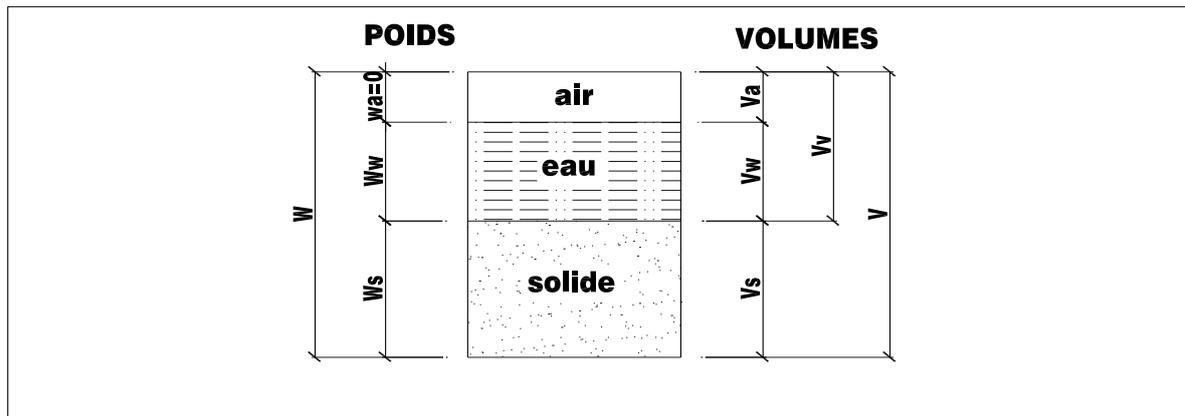
Une dimension très faible (diamètre moyen  $< 1 \mu$ ).

Une forme aplatie (feuilles ou paillettes).

D'importantes forces d'attraction de nature physico-chimiques entre les particules.

Ces particules constituent un squelette dans lequel les vides peuvent parfois occuper un volume bien supérieur à celui des grains (structure alvéolaire ou château de cartes).



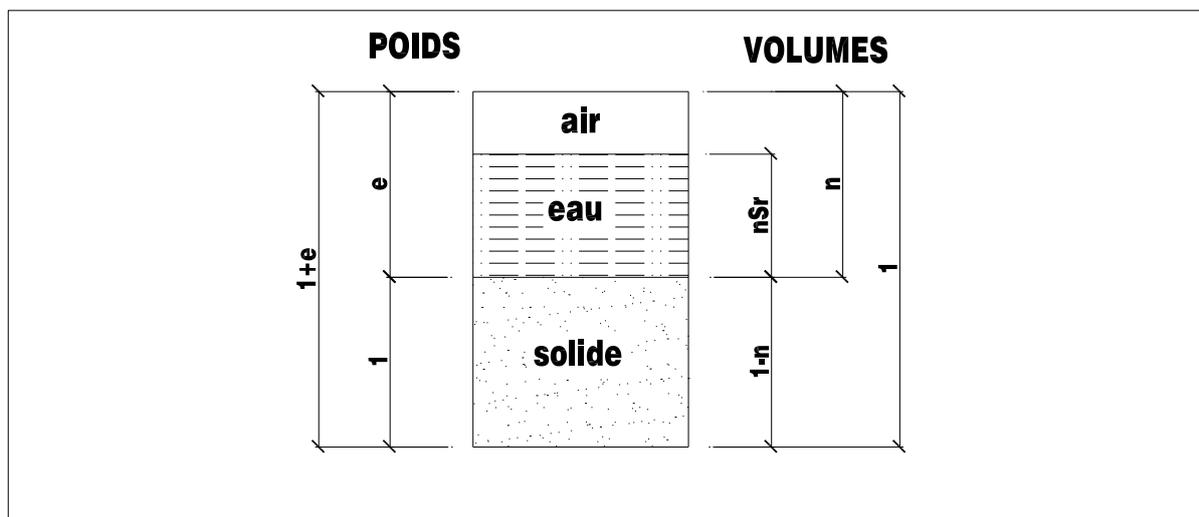


Le squelette d'un sol peut également être constitué de particules de matières organiques de formes et de dimensions très variables. La touche est un exemple de sol organique végétale à structure fibreuse. Les vases sont des argiles organiques en formation contenant divers types de bactéries et des matières organiques en voie de décomposition.

#### IV. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET LEUR MESURE :

##### A. Paramètres dimensionnels :

Dans la plupart des questions on utilisera les poids volumique. En se reportant à la représentation conventionnelle classique d'un volume  $V$  de sol dans lequel les trois phases seraient séparées, on définit successivement :



- $\gamma_h$  poids volumique total humide  $\gamma_h = w / v$ .
- $\gamma_{sat}$  poids volumique saturé (lorsque l'eau occupe la totalité des vides).
- $\gamma_d$  poids volumique sec  $\gamma_d = w_s / v$ .
- $\gamma_s$  poids volumique des grains solides  $\gamma_s = w_s / v_s$ .

- $\gamma_w$  poids volumique de l'eau  $\gamma_w = W_w / v_w$
- $\gamma'$  poids volumique déjaugé (lorsque le sol est entièrement immergé)

Quand il ne peut y avoir confusion, on utilise quelquefois la notion  $\gamma$  au lieu de  $\gamma_h$ ,  $\gamma_{at}$  ou  $\gamma_d$ .

L'utilisation des poids volumiques  $\gamma$  au lieu des masses volumiques  $\rho$ , permet d'éviter l'introduction de l'accélération de la pesanteur  $g$  ( $\gamma = \rho g$ ).

### **B. Paramètres sans dimensions :**

Ce sont des paramètres très importants et essentiellement variables pour un sol donné. Ils indiquent dans quelles proportions se trouvent les différentes phases du sol, et caractérisent l'état dans lequel se trouve le squelette du sol (état de compactibilité lâche ou serrée). On définira successivement en se reportant à la figure.

On rencontrera parfois la notion de densité d'un sol par rapport à l'eau. La notion à utiliser sera alors par exemple  $\gamma_d / \gamma_w$  pour la densité sèche. Bien qu'il s'agisse d'un paramètre sans dimension, nous ne l'incluons pas dans le paragraphe, et, en principe, nous n'utiliserons pas cette notion.

#### **L'indice des vides e :**

Rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$E = V_v / V_s$$

L'indice des vides d'un sol peut être supérieur à 1 (cas extrême des argiles de Mexico :  $e > 13$ ).

#### **La porosité n :**

Rapport du volume des vides au volume total du sol.

$$N = V_v / V$$

La porosité d'un sol est toujours inférieure à 1.

#### **La teneur en eau :**

Rapport du poids des grains solides pour un volume donné de sol. Dans cette définition on convient de prendre en compte l'eau qui s'est évaporée après un séchage du sol dans une étuve à 105° C. jusqu'à poids constant de l'échantillon. On l'exprime en pourcentage.

$$W = W_w / W_s \times 100 \%$$

La teneur en eau d'un sol peut dépasser 100 %.

#### **Le degré de saturation :**

Rapport du volume de l'eau au volume des vides. L indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. il s'exprime également en pourcentage.

$$S_r = V_w / V_v \times 100 \%$$

#### **Relation entre les paramètres :**

Les paramètres que l'on vient de définir ne sont pas indépendants. Il est courant que l'on ait besoin de calculer certains d'entre eux à partir de la mesure des autres. Les relations les plus importantes sont les suivantes :

$$N = e / (1+e).$$

$$W = e.Sr. \gamma_w / \gamma_s.$$

$$E = n / (1-n).$$

Pour les sols saturés  $e = w \times \gamma_s / \gamma_w$ .

$$\gamma_h = (1+w) \times \gamma_s / (1+r) = (1-n) \gamma_s + Sr.n.\gamma_w$$

$$\gamma_d = \gamma_s (1-n) = \gamma_s / (1+e).$$

Pour les sols saturés  $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$

$$\Gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) (1-n) = (\gamma_s - \gamma_w) \times \gamma_d / \gamma_s.$$

Pour établir ces relations, il est pratique d'étudier la représentation schématique conventionnelle du sol rencontrée plus haut

### Importance des paramètres sans dimensions :

Nous verrons, au paragraphe suivant, l'on peut séparer les sols en deux grandes familles :

Les sols grenus ou pulvérulents dont le type est le sable, et dont les grains sont libres de se mouvoir les uns par rapport aux autres (le sable coule entre les doigts).

Les sols fins ou cohérents dont le type est argile, qui présentent de la cohésion.

Les sols grenus ont un comportement mécanique qui dépend presque uniquement de leur état de compacité (lâche ou serré), alors que les sols fins ont un comportement qui dépend en premier lieu de leur teneur en eau.

On voit donc que parmi tous les paramètres définis précédemment, ce sont les paramètres sans dimensions qui sont les plus importants.

Comme le poids volumique des grains solides (hormis le cas des particules organiques) varie dans des limites assez faibles :

$$26 \text{ KN} / \text{m}^3$$

On peut le considérer pratiquement comme constant (on prend en général  $\gamma_s = 2.65 \text{ KN} / \text{m}^3$ ), et connaissant le poids volumique de l'eau considéré aussi comme constant ( $\gamma_w = 10 \text{ KN} / \text{m}^3$ ), il en résulte que les paramètres variables et indépendants d'un sol se réduisent à deux :

L'indice des vides :  $e$

La teneur en eau :  $w$

N.B pour donner une meilleure idée de l'état de compacité d'un sol grenu, on définit également un nouveau paramètre sans dimensions, l'indice de densité ou densité relative :

$$I_d = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}).$$

$e_{\max}$  et  $e_{\min}$  sont les deux états de compacité extrêmes que l'on peut obtenir expérimentalement pour un sol donné. Ils sont déterminés par des essais de laboratoire strictement normalisés.

L'eau capillaire confère aux sols pulvérulents humides une légère cohésion. C'est elle qui rend possible la construction des châteaux de sable par les enfants.

Pour un sol lâche :  $I_d$  est voisin de 0

Pour un sol serré :  $I_d$  est voisin de 1

On notera par ailleurs que dans le cas des sables, on a toujours :

$$0.40 \leq e \leq 1$$

Le tableau suivant donne les caractéristiques de différents sols en place.

sol	Période ou étage géologique	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	n	Teneur en eau naturelle	$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	Teneur en matière organique	Teneur en CaCO <sub>3</sub>
Sable de fontainebleau	Stampien	27.0	0.75	0.43	6%	16.3	===	===
limon d'Orly	quaternaire	26.2	0.6	0.38	23%	19.3	===	===
Limon de la perche	Crétacé supérieur	26.7	1.4	0.58	50%	===	===	===
Argile verte de Romainville	Sannoisien (oligocène)	26.7	0.80	0.44	30%	19.7	===	0.2
Argile des Flandres	Ypresien (éocène)	27.4	1.01	0.50	35%	18.5	===	0.2
Argile de Dozulé	Callovo-oxfordien	26.6	0.50	0.33	19%	21.2	===	===
Vase de pallavas	quaternaire	26.3	1.73	0.63	66%	16.2	5%	===
Tourbe de Bourgoin	quaternaire	===	9	0.90	580%	===	55%	===
Argile de mexico	Origine volcanique	===	3.38 à 13.50	0.77 à 0.93	===	===	===	===

### Mesures de laboratoire :

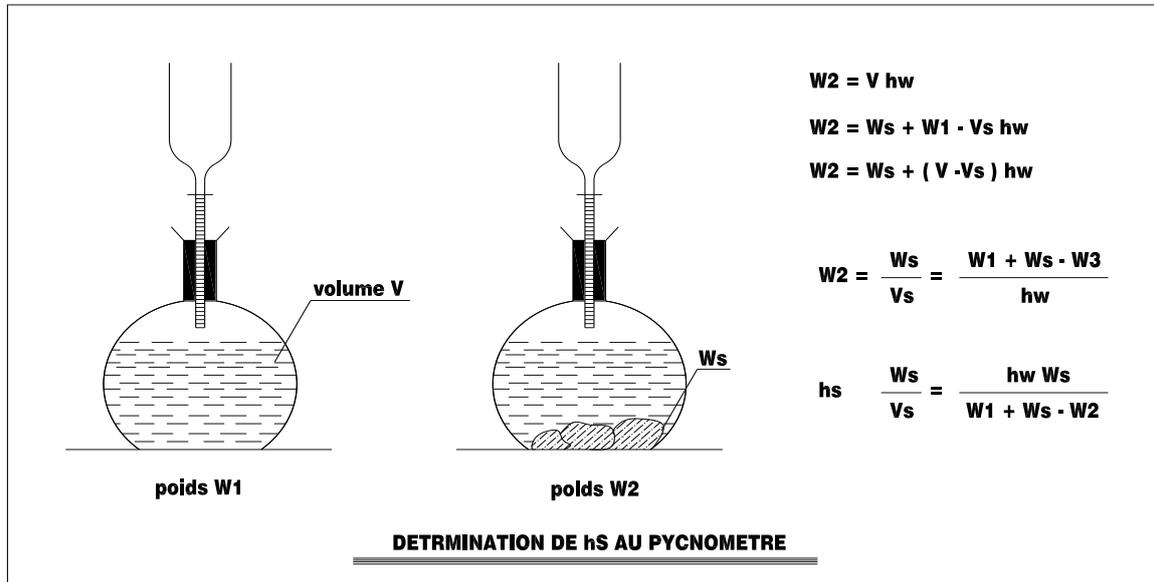
D'après ce que l'on vient de voir, il suffit de déterminer les valeurs des trois paramètres indépendants  $\gamma_s$ , e et w, ou l'on tire ensuite les autres caractéristiques à l'aide des relations précédentes.

Compte tenu de la disposition inévitable, due notamment à l'hétérogénéité du matériau, on prendra la moyenne de plusieurs essais. Les mesures se font en général au laboratoire.

**Détermination du poids volumique des grains solides  $\gamma_s$  :**

Cette mesure se fait à l'aide d'un pycnomètre. Un poids connu de sol  $W_s$ , sèche par passage à l'étuve à  $105^\circ \text{C}$  jusqu'à poids constant ( $w = 0$ ) est introduit dans un flacon (pycnomètre) contenant de l'eau distillée. On en déduit par pesée le volume d'eau déplacée par le sol  $V_s$ . L'ou l'on tire :

$$\Gamma_s = W_s / V_s.$$



On a vu que l'on obtient en général  $26 \text{ KN} / \text{m}^3 < \gamma_s < 28 \text{ KN} / \text{m}^3$ .

Toutefois, si le sol a une teneur élevée en matières organique on peut obtenir des valeurs plus faibles pour  $\gamma_s$  exemple vase de Martrou  $\gamma_s = 18 \text{ KN} / \text{m}^3$ .

Détermination de la teneur en eau :

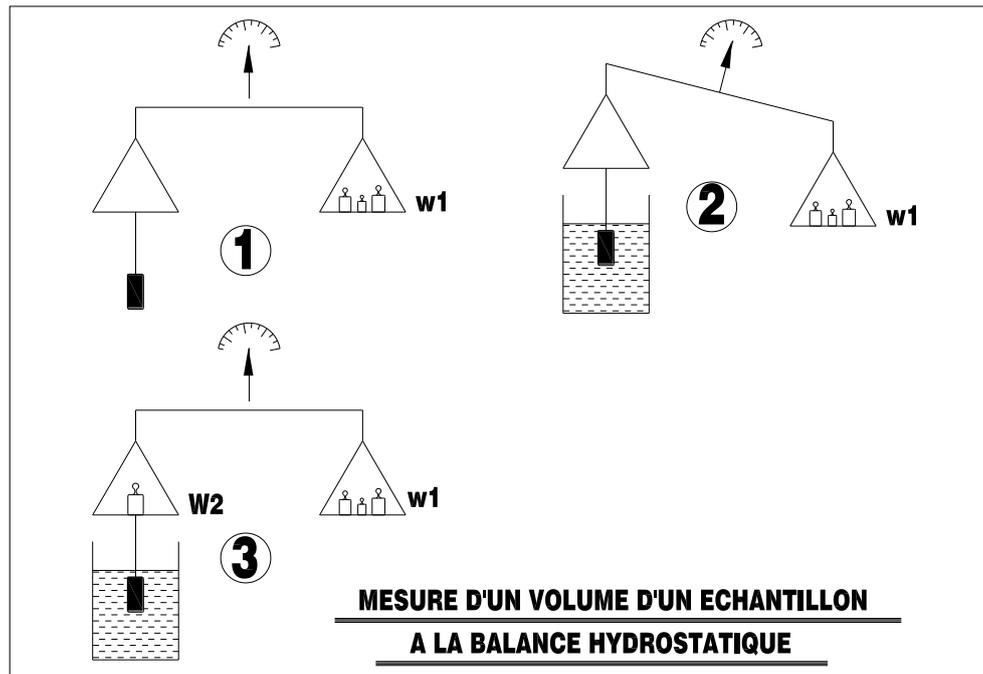
Elle se fait par deux pesées. L'une à la teneur en eau naturelle qui donne le poids  $W$  de l'échantillon humide, l'autre à état sec après passage à l'étuve à  $105^\circ \text{C}$ . jusqu'à poids constant qui donne le poids sec  $W_d$  de l'échantillon.

On en tire  $W = (w - w_d) / w_d$ .

**Détermination de l'indice des vides  $e$  :**

C'est une mesure délicate. Elle nécessite la détermination du poids du poids  $W_s$  du sol séché à l'étuve, et du volume total  $V$  de l'échantillon. Ce dernier se détermine généralement en mesurant la longueur d'une carotte de diamètre connu (diamètre du carottier). On peut aussi opérer par déplacement de liquide à la balance hydrostatique après avoir paraffiné l'échantillon.

On en tire :  $e = [ V / (W_d / \gamma_s) ] - 1$ .



## V. STRUCTURES DES SOLS :

### A. Granulométrie d'un sol

Le squelette solide d'un sol est formé de particules de dimensions très variables pouvant aller de la dizaine de cm au micro. Le but de l'analyse granulométrique est de déterminer la distribution de ces particules en mesurant par pesée l'importance relative de classes grains de dimensions bien définies. Ces différentes classes portent les dénominations suivantes :

Ø moy des grains	200 mm	20 mm	2 mm	0.02 mm	0.02 mm 20 µ	2 µ
désignation :	cailloux	graves ou graviers	gros sable	sable fin	limon	argile

**DENOMINATION DES CLASSES DES GRAINS**

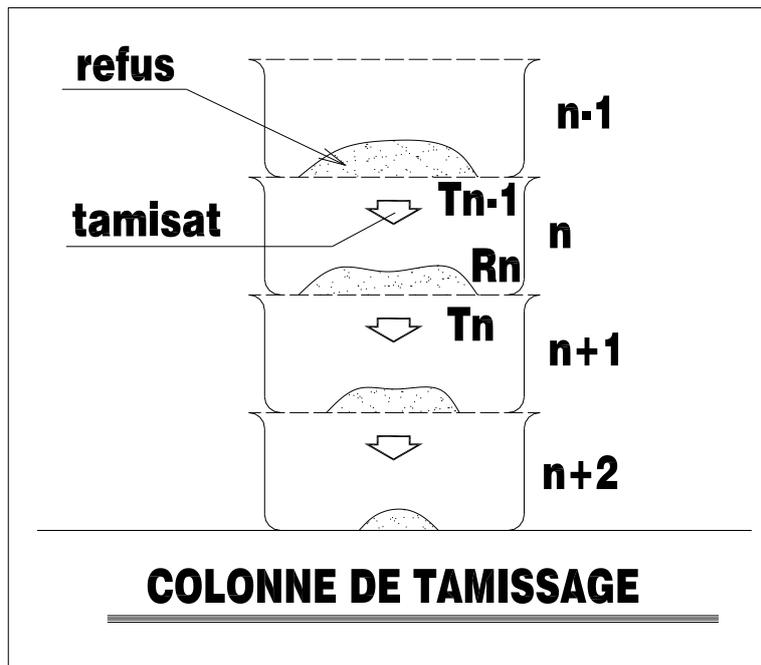
On procède expérimentalement par tamisage pour les éléments de diamètre moyen  $> 100\mu$  et par sédimentométrie pour les éléments fins est importante. Le tamisage se fait sous un courant d'eau (voie humide). Sinon, il peut s'effectuer par voie sèche.

#### Tamisage

L'essai de tamisage se fait à l'aide d'une colonne de tamis soumise à des vibrations. L'essai est normalisé. La quantité de matériau retenue par un tamis s'appelle le refus, la quantité de matériau qui passe au travers d'un tamis s'appelle le tamisât.

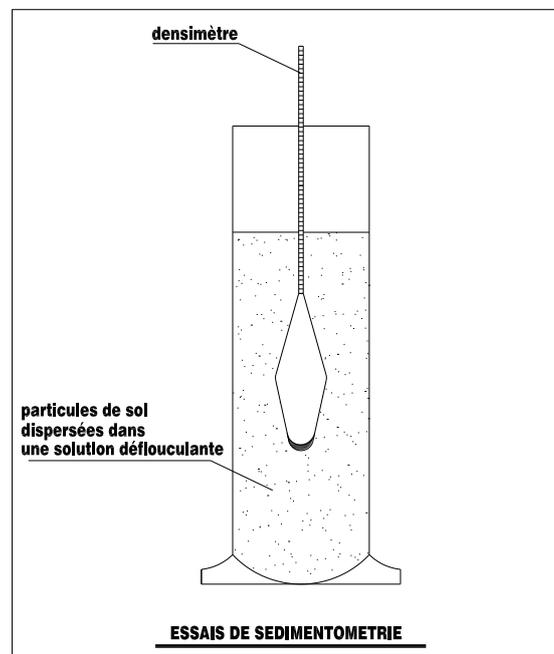
En désignant par  $R_j$  les refus,  $T_i$  les tamisâts, on a au nième tamis d'une colonne de tamisage :

$$T_{n-1} = R_n + T_n$$



### Sédimentométrie

Pour les particules inférieures à  $100\mu$  les forces de surface inter particulaires sont trop importantes (apparition de la cohésion), et les grains tendent à s'agglomérer. On procède par sédimentométrie, méthode basée sur l'application de la loi de Stokes phénomène de décantation des grains de sol dans une solution défloculante.



La loi de Stokes donne la vitesse limite d'une particule sphérique descendant sous l'action de la pesanteur dans un milieu visqueux.

Cette vitesse est proportionnelle au carré du diamètre de la particule, les particules les plus grosses se déposent plus rapidement.

On a :  $v = (\gamma_s - \gamma_o) d^2 / 18 \eta$

$\eta$  étant la viscosité dynamique de l'eau à la température de l'expérience ( $\eta = 1$  centpoise à 20°).

$\gamma_o$  le poids volumique du liquide (eau + défloculant)

On procède expérimentalement en mesurant la densité de la solution à différents niveaux en fonction du temps à l'aide d'un densimètre. En introduisant la notion de diamètre équivalent  $d_y$  (les particules n'étant en réalité pas sphériques, mais plutôt aplaties) on peut calculer à partir des mesures de densité, le pourcentage  $y$  en poids de sol sec, des particules de dimensions inférieures ou égales à  $d_y$ .

### **B. Limites d'ATTERBERG :**

Afin de préciser les trois états de consistance des sols fins : états liquide, plastique, et solide, le suédois ATTERBERG a proposé au début du siècle de définir trois limites exprimées par des teneurs en eau (en %). Les limites de liquidité WL de plasticité Wo et de retrait Ws.

Indiquons successivement les tests auxquels on se réfère pour définir ces limites, tels qu'ils ont été précisés par CASAGRANDE.

Nous renvoyons pour plus de détails aux manipulations de géotechnique routière, et au cours de routes.

#### **Limite de liquidité WL :**

Elle sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle se détermine comme suite : on étant sur une coupelle une couche d'argile que l'on divise en deux à l'aide d'un instrument en forme de. On imprime à la coupelle des secousses égales en intensité, suivant un rythme normalisé. A la limite de liquidité, la rainure en V doit être refermée sur une longueur de centimètre après vingt cinq secousses.

#### **Limite de plasticité WP :**

Elle sépare l'état plastique de l'état solide. Elle correspond à la teneur en eau minimum pour laquelle on peut rouler le sol en rouleaux de trois millimètre de diamètre et de deux centimètre de longueur sans qu'ils se rompent.

#### **Limite de retrait WS :**

Elle sépare l'état solide sans retrait dans lequel l'eau absorbée est encore en place, de l'état solide avec retrait ou l'eau absorbée a disparu. C'est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les pores du sol lorsque celui-ci atteint par séchage son minimum de volume. Elle se détermine peu fréquemment.

#### **Indice de plasticité IP :**

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité d'un sol

$$IP = WL - WP$$

La notion de plasticité est très importante en géotechnique, en particulier en en géotechnique routière.

CASAGRANDE a montré sur les sols américains qu'il existait une relation de forme :

$$IP = aWL - b.$$

Pour les sols français  $a = 0.70$  et  $b = 9$

#### **Précision et porté des essais d'ATTERBERG**

On peut considérer que l'erreur sur la limite de liquidité est de l'ordre de 0.5 % pour un laboratoire exercé. Celle sur la limite plasticité être estimée à 2 %.

Malgré leur définition très arbitraire, et le caractère un peu simpliste du processus expérimental, les résultats présentent grande fidélité, et les essais d'ATTERBERG constituent des essais d'identification et de classification fort utiles pour l'ingénieur.

SKEMPTON a montré que l'indice de plasticité est en relation a peu près linière avec le pourcentage en poids des grains inférieurs à  $2\mu$  (teneur en argile).

Or, ce sont ces éléments fins qui sont dangereux pour la construction en raison de la présence d'eau absorbée. Le rapport de ces deux pourcentages est appelé activité colloïdale de l'argile. une argile inactive a une activité  $< 0.75$ .

Une argile normale a une activité comprise entre 0.75 et 1.25.

Une argile active a une activité  $> 1.25$ .

On se méfiera tout particulièrement des argiles qui ont un double caractère de plasticité et d'activité.

On notera enfin que dans les sols en place la teneur en eau naturelle W généralement comprise entre WL et WP très près de WP.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de quelques sols fins et typiques.

sol	WL	WP	IP	Teneur en eau naturelle	Activité
Limon d'Orly	32	18	14	23	****
Limon plastique du perche	75	48	27	50	****
Argile verte de Romainville	65	30	35	30	0.49
Argile des landes	82	34	48	35	0.80
Argile de Dozulé	48	21	27	19	0.47
Argile bleue de boston	42	22	20	40	****
Argile de Londres	76	29	47	29	****
Tour bure de Bourgoin	66	37	29	55	****
Vase de pallavas	70	30	40	66	****

## **VI. CLASSIFICATION DES SOLS**

### **A. Intérêt d'une classification**

Un système de classification utilisant les résultats d'essais facilement exécutables et peu onéreux est d'un grand intérêt pour l'ingénieur dans tous les problèmes courants de mécanique des sols.

Bien qu'il existe de nombreux systèmes de classification présentant chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Et pouvant regrouper différemment certains types de sols, l'intérêt d'une classification est en supprimant les désignations imprécises et ambiguës de donner une première idée du comportement mécanique du sol étudié elle permet ainsi d'éveiller l'attention de l'ingénieur au stade des études préliminaires ou les avant-projets et d'utiliser ensuite judicieusement les crédits affectés à la reconnaissance de cause le type le nombre et l'emplacement des essais plus complexes de laboratoire ou in situ qui seront ensuite exécutés.

Enfin dans le cas des ouvrages ou l'expérience pratique s'impose encore sur le calcul (choix des structures en géotechnique routière par exemple)

L'utilisation d'une classification est indispensable.

On définit également l'indice de liquidité :

$$IL = (W - WP) / (WL - WP) = (W - WP) / IP.$$

Pour une argile donnée, plus cet indice est grand, plus l'argile voisine de l'état liquide, donc plus elle est dangereuse. On notera que si  $W > WL$ , ce qui arrive parfois, IL est supérieur à 1.

### **B. La classification LPC : laboratoire des ponts et chaussées :**

Nous nous bornerons à étudier la classification LPC couramment utilisée en France. Cette classification utilise les résultats fournis par la granulométrie et les limites d'ATTERBERG, ainsi quelques essais complémentaires qui seront vu au chapitre suivant

#### **Sols à granulométrie uniforme**

Lorsque les dimensions des grains sont peu différentes, on adopte la classification déjà donnée

Sols pulvérulents  $d_{\text{moy}} > 20 \mu$  (cailloux; Graves gros; sable; sable fin)

Sols cohérents  $d_{\text{moy}} < 20 \mu$  (limon, argile)

En fait les limons ne se différencient des argiles que par les valeurs des limites d'ATTERBERG comme indiqué ci-après.

#### **Sols à granulométrie non uniforme**

Sols grenus dont 50 % des éléments en poids ont un diamètre  $> 80 \mu$ .

Sols fins dont 50 % des éléments en poids en un diamètre  $> 80 \mu$ .

Sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée.

Elle utilise les résultats des essais d'ATTERBERG par intermédiaire de l'abaque de plasticité de CASAGRANDE

La classification LPC est résumé dans les tableaux suivants :

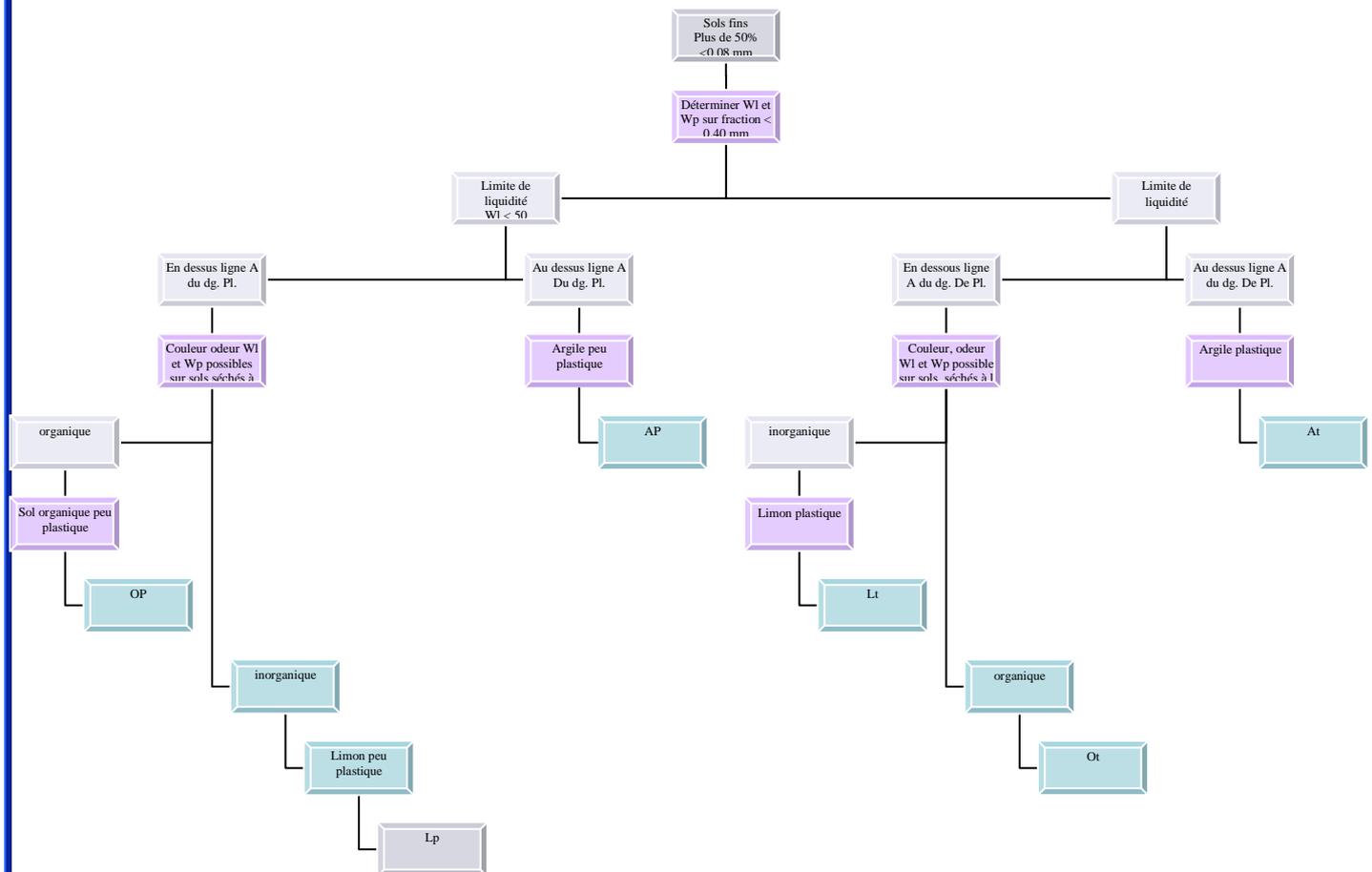
CALSSIFICATION DES SOLS GRENUS

définitions		sym	conditions	Appellations
graves	+ 50 % : D > 2mm	Gb	$C_u = D_{60} / D_{10} > 4$ Et $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ compris entre 1 et 3	Grave propre
		GW		Bien graduée
	- 5 % < 0.08 mm	Gm	Une des conditions de Gb Non satisfaisaire	Grave propre
		Gp		Mal graduée
	+ 12 % : < 0.08 mm	GL	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	Grave limoneuse
		GM		
	GA	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	Grave argileuse	
	GC			

CALSSIFICATION DES SOLS GRENUS

définitions		sym	conditions	Appellations
sables	+ 50 % : D < 2mm	Sb	$C_u = D_{60} / D_{10} > 6$ Et $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ compris entre 1 et 3	Sable propre
		SW		Bien gradué
	- 5 % < 0.08 mm	Sm	Une des conditions de Sb Non satisfaisaire	sable propre
		Sp		Mal gradué
	+ 12 % : < 0.08 mm	SL	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	Sable limoneux
		SM		
	SA	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	Sable argileu <sub>x</sub>	
	SC			

Lorsque 5 % < % inférieur à 0.08 mm < 12 on utilise un double symbole



## VII. PROCEDURE D'IDENTIFICATION ET ESSAIS COMPLEMENTAIRES

### A. Procédure courante d'identification :

Nous ne parlons pas des problèmes d'échantillons qui sortent du cadre de ce cours, mais qu'il ne faut pas cependant négliger. Nous renvoyons pour cela aux modes opératoires du LPC. L'identification commencera toujours par une observation préalable de l'échantillon : (couleur, odeur, homogénéité, présence de coquilles, de débris végétaux, etc...).

On passera ensuite à la mesure des paramètres physiques :  $\gamma_s$  (au pycnomètre), teneur en eau  $W$ , indice des vides  $e$  (par mesure directe ou à l'aide d'une balance hydrostatique). On pourra en déduire les autres caractéristiques physiques.

On procédera ensuite à la détermination de la granulométrie :

Par tamisage à sec s'il y a pas d'éléments fins) :

Par voie humide (tamisage sous l'eau) dans le cas contraire.

On comptera l'essai par la sédimentométrie sur la fraction  $< 100 \mu$ .

En précisant bien le mode de dispersion et la nature du flocculant.

On en tirera :

Le coefficient d'uniformité de HAZEN :  $C_u = d_{60} / d_{10}$

Eventuellement le coefficient de courbure :  $C_c = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60})$ .

Le diamètre efficace  $d_{10}$ .

Le pourcentage des éléments inférieurs à  $2 \mu$  (teneur en argile) par rapport au poids total du mortier (éléments  $< 0.40\text{mm}$ ).

On terminera en déterminant sur le mortier les limites de liquidité et de plasticité, d'où l'on déduira  $I_p$ , et on reportera le résultat sur l'abaque de plasticité de CASAGRANDE.

On pourra également en déduire l'activité du mortier.

Dans les cas courants, à l'aide des tableaux précédents, il n'y aura pas d'ambiguïté et l'identification sera terminée.

Dans certains cas cependant, on sera amené à exécuter des essais complémentaires que nous allons maintenant étudier.

### **B. Essai d'équivalent de sable :**

Cet essai est plus particulièrement utilisé en géotechnique routière.

Il est surtout important dans le cas des sols grenus, car il permet d'évaluer la quantité d'éléments fins contenus dans ces sols et dont la présence en quantité notable peut modifier profondément le comportement mécanique.

L'essai est effectué sur la traction du matériau dont les éléments sont inférieurs à  $5\text{mm}$ .

L'échantillon est placé dans une éprouvette avec une solution normalisée contenant un agent dispersant. L'éprouvette est ensuite agitée mécaniquement suivant un processus normalisé.

On laisse ensuite reposer l'ensemble. Il se forme très rapidement au fond de l'éprouvette un dépôt solide grossier surmonté d'un dépôt de flocculat de sol fin. Au bout d'un temps fixe par la norme, les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  du dépôt solide et du flocculat sont mesurées.

L'équivalent de sable ES s'exprime par le pourcentage :

$$ES = (h_1 / h_2) \times 100.$$

Essai d'équivalent de sable :

On a donc théoriquement :

$$ES = 0 \quad \text{argile pure}$$

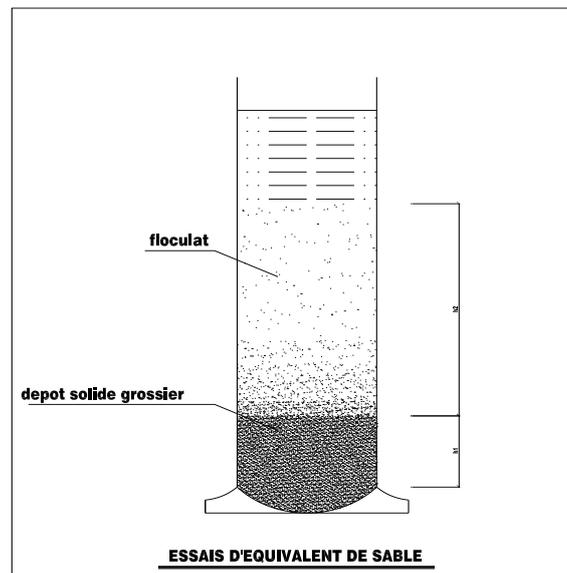
$$ES = 20 \quad \text{sol plastique}$$

$$ES = 40 \quad \text{sol non plastique}$$

$$ES = 100 \quad \text{sable pur et propre}$$

En pratique, cet essai n'est réalisé que sur des sols grenus pour lesquels la détermination des limites d'ATTERBERG est difficile et imprécise. On a donc en général :

$$ES > 30.$$



Évaluation de fin de module :

Définir les caractéristiques physiques pour les différents types de sols

Citer les limites d'ATTERBERG

bareme de notation

10/20

10/20

Liste des références bibliographiques :

