INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE
Département de Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur

3ème année - Ingénierie de la Construction

GÉOTECHNIQUE 1

Cours - Chapitres 1

Jacques Lérau
Maître de Conférences

Année universitaire 2005 - 2006

GÉOTECHNIQUE 1

SOMMAIRE

Introduction **QU'EST-CE QUE LA GÉOTECHNIQUE ?**

Chapitre I **PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS**

1 - DÉFINITION DES SOLS – ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D' UN SOL
2 - CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS
3 - CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES
4 - STRUCTURE DES SOLS
5 - ESSAIS D' IDENTIFICATION PROPRES AUX SOLS GRENUS
6 - ESSAIS D' IDENTIFICATION PROPRES AUX SOLS FINS
7 - AUTRES ESSAIS
8 - CLASSIFICATION DES SOLS
Annexe 1 : Relations entre caractéristiques physiques
Annexe 2 : Granulométrie
Annexe 3 : Eléments de classification des argiles
Annexe 4 : Autres essais (compléments)

QU'EST-CE QUE LA GÉOTECHNIQUE ?

La Géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la Mécanique des Sols, de la Mécanique des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur. La Mécanique des Sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité.

A partir d'essais de laboratoires et in situ de plus en plus perfectionnés, la Mécanique des Sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais); ceci tant durant la progression des travaux (grands terrassements) qu'après mise en service des ouvrages.

LES DOMAINES D'APPLICATION

La Mécanique des Sols joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de bâtiment et de génie civil en relation avec les sols ou les mettant en œuvre.

Les sols peuvent

- supporter les ouvrages : fondations superficielles, fondations profondes , ...
- être supportés : murs de soutènement, rideaux de palplanches, ...
- constituer l'ouvrage lui-même : remblais, digues, barrages, ...

On peut citer par exemple :

- les fondations des bâtiments, des ouvrages d'art, des ensembles industriels ...
- les ouvrages de soutènement (murs, rideaux de palplanches, ...),
- les tunnels et travaux souterrains dans les sols,
- les barrages et digues en terre,
- la stabilité des pentes naturelles et des talus et les travaux de stabilisation,
- les ouvrages portuaires et maritimes (fondations de quais, comportement des brise-lames, ...),
- les terrassements des routes, autoroutes, voies ferrées,
- l'amélioration et le renforcement des sols,
- la protection de l'environnement.

Avril 2006

Chapitre I

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS

1 - DÉFINITION DES SOLS - ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SOL

1 - 1 - DÉFINITION DES SOLS

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories :

- les roches : agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau → Mécanique des roches.
- les sols : agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles → Mécanique des sols.

Les matériaux de transition entre sols et roches sont nommés SIRT (sols indurés et roches tendres).

On notera que le géologue appelle sols tous les matériaux se trouvant à la surface de l'écorce terrestre.

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

1 - 2 - ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SOL

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases :

sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent) (fig. 3-a).

L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec.

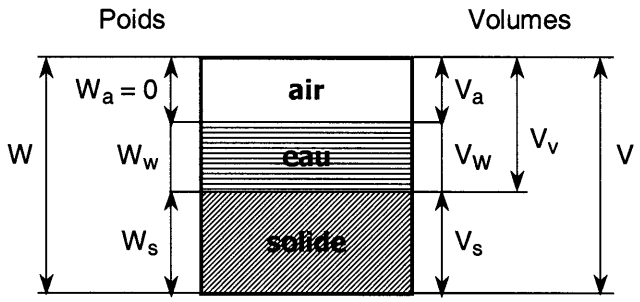
L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe.

2 - CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

2 - 1 - DESCRIPTION

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent le squelette solide, l'eau et l'air constituant le sol.

Pour cela considérons la représentation suivante d'un sol dans laquelle les trois phases sont séparées (fig. 1).



Représentation conventionnelle d'un volume de sol
Poids et volumes des différentes phases
- Figure 1 -

Notations conventionnelles :

W : poids total du sol[1] — V : volume total (apparent)
W_s : poids des particules solides — V_s : volume des particules solides
W_w : poids de l'eau[2] — V_v : volume des vides entre les particules
V_w : volume de l'eau
V_a : volume de l'air

avec les relations :

$W = W_s + W_w$ — $V_v = V_w + V_a$
$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$

On définit en outre les poids volumiques qui, avec les poids et volumes, constituent les paramètres dimensionnels :

• le poids volumique des particules solides (de la matière constituant les grains solides), noté γ_s

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$ sable et argile : ≈ 26 à 27 kN/m^3

La phase solide des sols est constituée principalement de silice et d'alumine. Les éléments simples Si et Al ayant des masses atomiques très voisines[3], le poids volumique des sols évolue dans une plage très étroite. Les sols organiques et les sols métallifères font exception à ces valeurs.

• le poids volumique de l'eau, noté γ_w

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 9{,}81 \text{ kN/m}^3$$

On prend souvent $\gamma_w = 10$ kN/m^3. Ce qui entraîne d'emblée 2% d'erreur relative.

• le poids volumique du sol (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté γ . C'est la somme des poids des particules solides et de l'eau d'un volume unité de sol.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$ sable : ≈ 17 à 20 kN/m^3 argile : ≈ 16 à 22 kN/m^3

• le poids volumique du sol sec, noté γ_d[4]

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$ sable : ≈ 14 à 18 kN/m^3 argile : ≈ 10 à 20 kN/m^3

[1] W pour weight
[2] w pour water
[3] respectivement 28 et 27 g/mole
[4] d pour dry

Si le sol est sec : $\gamma = \gamma_d$.

• le poids volumique du sol saturé, noté γ_{sat} : lorsque tous les vides sont remplis d'eau.

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + \gamma_w . V_v}{V}$$ sable et argile : ≈ 19 à 22 kN/m^3

• le poids volumique du sol déjaugé, noté γ'

Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède :

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$ sable et argile : ≈ 9 à 12 kN/m^3

On introduit aussi la notion masse volumique, notée ρ_i et plus rarement celle de densité par rapport à l'eau, notée D_i :

$$\text{densité : } D_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} \quad \Rightarrow \quad \text{densité sèche : } D_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

On observera que le vocabulaire courant utilisé dans le milieu professionnel du B.T.P. confond assez facilement poids volumique, masse volumique et densité.

Les paramètres sans dimensions, au nombre de quatre, indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol. Ils sont très importants et essentiellement variables.

On définit la porosité, notée n, qui permet de connaître l'importance des vides c'est à dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

sable : n ≈ 0,25 à 0,50
argile : n ≈ 0,20 à 0,80
La porosité est toujours inférieure à 1.
Elle peut aussi être exprimée en pour-cents.

Les sollicitations auxquelles sont soumis les sols produisent des variations du volume des vides V_V qui entraînent des variations du volume apparent V; aussi préfère-t-on souvent rapporter le volume des vides non pas au volume apparent de l'échantillon mais au volume des particules solides, lequel peut être considéré comme invariant. On définit alors l'indice des vides, noté e, dont la signification est analogue à celle de la porosité. Il est défini par la relation :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

sable : e ≈ 0,5 à 1
argile : e ≈ 0,3 à 1
L'indice des vides peut être supérieur à 1 et même atteindre la valeur 13 (cas extrême des argiles de Mexico).

La teneur en eau, notée w, est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Elle s'exprime en pour-cent. Elle est facilement mesurable en laboratoire.

$$w = \frac{W_w}{W_s} . 100$$

sable : w = 1 à 15 %
argile : w = 10 à 20 %
La teneur en eau peut dépasser 100 % et même atteindre plusieurs centaines de pour-cents.

Le degré de saturation, noté S_r, indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pour-cent.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} . 100$$

Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100 % (sol saturé).

Parmi tous les paramètres définis précédemment, les paramètres sans dimensions sont les plus importants. Ils caractérisent l'état dans lequel se trouve le sol c'est à dire l'état de compacité du squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air contenues dans le sol.

2 - 2 - RELATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES

Tous les paramètres précédemment définis ne sont pas indépendants. Les relations les plus importantes existant entre ces différents paramètres sont données en annexe.

Il est très pratique d'utiliser le schéma de la représentation conventionnelle d'un sol du paragraphe précédent pour déterminer ou démontrer ces relations.

Pour caractériser complètement un sol la connaissance de trois paramètres indépendants est nécessaire; le poids volumique de l'eau étant connu. Par exemple :

- un paramètre quantifiant le poids volumique : γ ou γ_s ou γ_d,
- un paramètre quantifiant l'importance des vides : e ou n,
- un paramètre quantifiant la présence d'eau : w ou S_r.

Nous avons vu que le poids volumique des particules solides (en dehors des particules organiques et métalliques) varie entre des limites assez proches ($26\ kN/m^3 < \gamma_s < 27\ kN/m^3$). On peut donc le considérer pratiquement comme constant (on prend en général $\gamma_s = 26{,}5\ kN/m^3$). Dans ce cas les paramètres variables et indépendants d'un sol se réduisent à deux.

2 - 3 - DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Lorsqu'on se trouve en présence d'un sol, il faut tout d'abord déterminer les valeurs de trois paramètres indépendants. Compte tenu de la dispersion inévitable, il convient réaliser un nombre important de mesures dont on prend la valeur moyenne. Ces mesures se font généralement en laboratoire.

2 - 3 - 1 - Détermination de la teneur en eau (pondérale) w (norme NF P 94-050)

C'est la caractéristique la plus facile à déterminer.

La teneur en eau se détermine par deux pesées. Une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée, après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon m_s.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \qquad \text{avec } m_w = m - m_s$$

2 - 3 - 2 - Détermination du poids volumique γ (norme NF P 94-053)

Il faut déterminer la masse m et le volume total V de l'échantillon. Pour déterminer ce dernier on utilise l'une des trois méthodes suivantes :

• Méthode par immersion dans l'eau :

Un échantillon de forme simple, de masse comprise entre 0,1 et 0,5 kg est pesé (m) puis recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{paraffine} = 0{,}88\ g/cm^3$). Une deuxième pesée ($m_p$) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume. Une troisième pesée, hydrostatique, de l'échantillon recouvert de paraffine (m'_p) permet de calculer le volume de l'échantillon recouvert de paraffine. Le volume de paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon :

$$V = V_{sol+paraffine} - V_{parafine} = \frac{m_p - m'_p}{\rho_w} - \frac{m_p - m}{\rho_p}$$

L'échantillon de sol n'est pas remanié, il est à l'état naturel.

• Méthode de la trousse coupante :

On effectue un poinçonnement avec une trousse coupante dans l'échantillon. Les faces de la prise d'essai sont arasées aux extrémités. Le volume V de la prise d'essai est égal au produit de l'aire de la section d'entrée de la trousse coupante par sa hauteur.

L'échantillon de sol est légèrement remanié par le passage de la trousse coupante, il est cependant considéré à l'état naturel.

• Méthode du moule :

L'échantillon, préparé selon un processus défini, remplit le moule jusqu'à débordement. L'extrémité supérieure du moule, de dimensions connues, est arasée à la règle. C'est la méthode utilisée dans l'essai Proctor (norme NF P 94-093).

L'échantillon de sol est remanié.

2 - 3 - 3 - Détermination du poids volumique des particules solides γ_s (norme NF P 94-054)

Le problème est de mesurer le volume des grains solides, V_s, constituant l'échantillon de sol. Cette mesure est effectuée généralement au pycnomètre (fig. 2).

Une masse connue m_s de sol séché (par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante) est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Un agitateur magnétique sépare les particules les unes des autres. Les bulles d'air libérées sont aspirées par un vide d'air (trompe à eau). Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les particules solides, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacée par les particules solides.

Le volume de la phase solide V_s, égal au volume d'eau déplacée par le sol, est déterminé par pesée.

m_1 : masse du pycnomètre contenant l'eau distillée et le barreau magnétique,

m_2 : masse du pycnomètre contenant le sol l'eau distillée et le barreau magnétique.

$m_2 = m_1 + m_s - \rho_w . V_s$

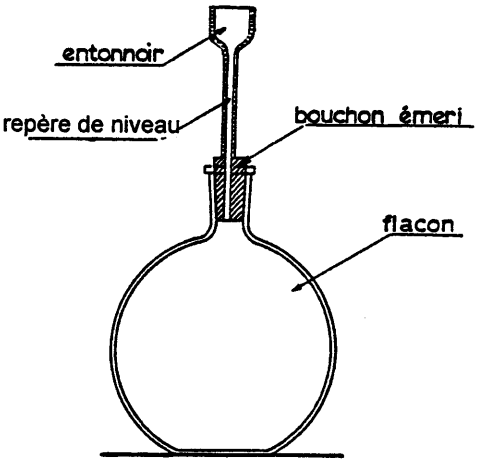
avec m_s : masse des particules solides,

ρ_w : masse volumique de l'eau distillée,

V_s : volume des particules solides.

$$V_s = \frac{m_1 + m_s - m_2}{\rho_w}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{m_1 + m_s - m_2}\,\rho_w \quad \Rightarrow \quad \gamma_s = \rho_s . g$$



Pycnomètre

- Figure 2 -

L'erreur relative sur le résultat est de l'ordre de quelques 10^{-4}.

3 - CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES

3 - 1 - FORME

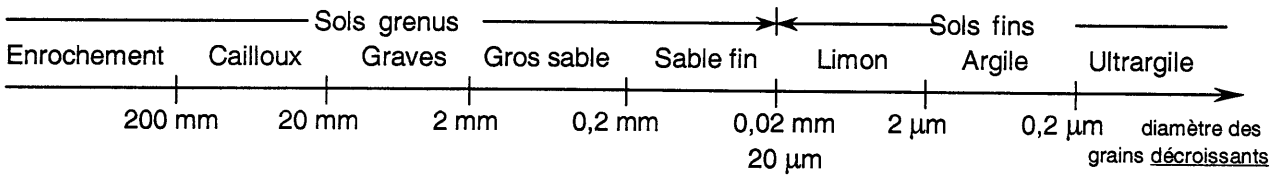
On peut distinguer trois catégories de formes :

- les particules sphériques / cubiques (arrondies / anguleuses) : cas des sols grenus (sables),
- les particules en plaquettes : cas des sols fins (argiles),
- les particules en aiguilles.

3 - 2 - DIMENSIONS

Supposons un sol dont les grains solides ont des dimensions peu différentes les unes des autres (sol dit à granulométrie uniforme).

Suivant la taille des grains on définit les catégories de sols suivantes (basées sur le nombre 2 et la progression géométrique de rapport 10) :



3 - 3 - CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES

3 - 3 - 1 - Courbe granulométrique

La façon la plus courante de représenter les résultats des essais de tamisage et de sédimentométrie[5] consiste à tracer une courbe granulométrique. Elle représente le poids des tamisats cumulés (échelle arithmétique) en fonction du diamètre ou du diamètre équivalent, D, des particules solides (échelle logarithmique). La courbe granulométrique donne le pourcentage en poids des particules de taille inférieure ou égale à un diamètre donné (pourcentage du poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié). Les coordonnées semi-logarithmique permettent une représentation plus précise des fines particules dont l'influence est capitale sur le comportement des sols.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen :

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

(D_y : ouverture du tamis laissant passer y % du poids des grains).

D_{10} est appelé diamètre efficace.

Pour $C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée, pour $C_u < 2$ la granulométrie est dite uniforme ou serrée.

Plus la granulométrie est serrée plus la pente de la partie médiane de la courbe est prononcée.

On définit aussi le coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}.D_{10}}$$

Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites, le sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière. Quand sa granulométrie est discontinue, avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forment des pentes stables.

3 - 3 - 2 - Surface spécifique

On appelle surface spécifique la surface des grains par unité de masse. Elle dépend principalement de la taille des grains (dans une moindre mesure de la forme des grains). Elle peut varier de 0,3 m^2/g pour les sables fins à plusieurs centaines de m^2/g pour les argiles de type Montmorillonite[6].

4 - STRUCTURE DES SOLS

4 - 1 - STRUCTURE DES SOLS PULVÉRULENTS (sols grenus)

$D > 20\ \mu m$ (exemple : les sables).

Les grains se détachent les uns des autres sous leur poids.

Les principales forces intervenant dans l'équilibre de la structure sont les forces de pesanteur; c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister. Cette stabilité sera d'autant meilleure que le nombre de contacts sera élevé (sol bien gradué).

Dans le cas de sols humides non saturés (fig. 3-a) : l'eau est retenue, sous forme de ménisques au voisinage des points de contacts entre les grains, par des forces de capillarité; elle crée entre ces derniers des forces d'attraction. Le matériau présente une cohésion capillaire (châteaux de sable). Les forces capillaires sont négligeables devant les forces de pesanteur.

---

[5] Des rappels sur le tamisage et la sédimentométrie sont présentés à l'annexe 2.

[6] La salle GC 110 mesure environ 120 m^2

4 - 2 - STRUCTURE DES ARGILES (rappels)

D < 2 µm.

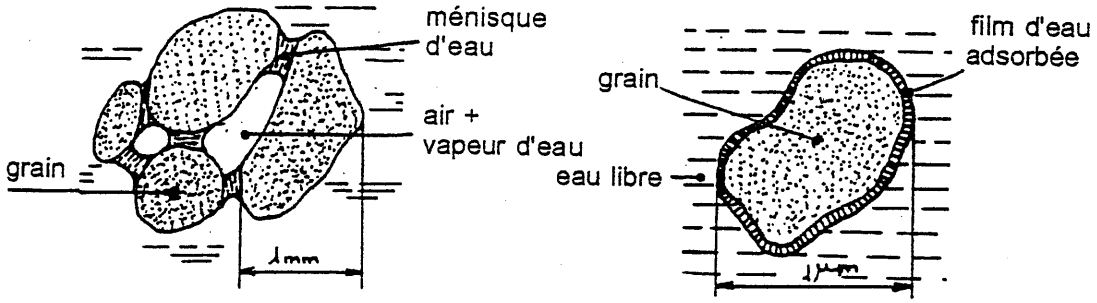
Les particules restent collées les une aux autres. Le sol présente une cohésion : il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées. Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles ont une forme de plaquettes.

La surface des plaquettes étant chargée négativement, les particules sont soumises à des forces d'attraction intergranulaires diverses. : forces électriques[7], forces de Van der Waals[8]. Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente, on admet qu'elle sont négligeables à partir d'une distance de 0,4 µm. Pour qu'elles puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire que les grains de ce sol aient des dimensions très petites.

Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée ou eau liée d'épaisseur à peu près constante (≈ 0,01 µm) (fig. 3-b). Elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes de celles de l'eau libre :

- elle a une très forte densité : 1,5
- elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),
- sa viscosité très élevée, qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux : fluage, compression secondaire, ...
- elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C.).

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques du sol.



a - Sol humide et non saturé

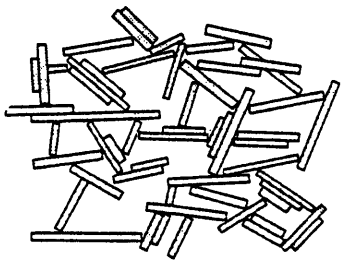
b - Particule de sol très fin

- Figure 3 -

Orientation des particules

On distingue deux types fondamentaux d'orientation :
- l'orientation floculée (bord contre face), structure en "château de cartes" (fig. 4 - a).
- l'orientation dispersée (face contre face) (fig. 4 - b).

Les particules des sédiments argileux naturels ont une orientation plus ou moins floculée suivant qu'elles se sont déposées en milieu marin ou en eau douce.



a - Orientation floculée

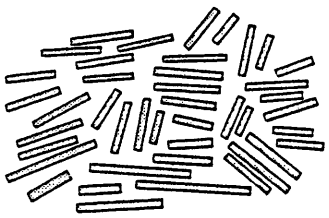
[7] Des molécules électriquement neutres peuvent constituer des dipôles (les centres des charges positives et négatives sont distincts). Les forces électriques s'exercent entre les dipôles.

[8] Forces d'attraction entre molécules dues aux champs électriques résultant du mouvement des électrons sur leurs orbites; varient inversement proportionnellement à une puissance élevée de la distance.

Les argiles marines ont en général une structure plus ouverte que les argiles déposées en eau douce.

La consolidation et les efforts de cisaillement tendent à orienter les particules suivant l'arrangement dispersé.

L'orientation des particules joue un rôle important sur les propriétés physiques et mécaniques. Ces notions sur l'orientation des particules argileuses permettent d'expliquer qualitativement des phénomènes complexes liés à la consolidation et à la résistance des argiles.



b - Orientation dispersée

Particules de sol argileux

- Figure 4 -

Ordres de grandeur des caractéristiques géométriques des principales familles d'argiles

Nature	Diamètre	Epaisseur	Surface spécifique[9]
Kaolinite [10]	0,3 à 3 µm	D/3 à D/10	10 à 20 m^2/g
Illite [11]	0,1 à 2 µm	D/10	80 à 100 m^2/g
Montmorillonite [12]	0,05 à 1 µm	D/100	jusqu'à 800 m^2/g

Les argiles rencontrées en pratique sont formées de mélanges de minéraux argileux se rattachant à ces trois familles (cf. annexe 3).

4 - 3 - SOLS ORGANIQUES

Lorsque les grains sont constitués de matière organique, le sol est dit organique. La présence dans les sols de matières organiques, qui sont à l'origine de textures lâches et d'une importante rétention d'eau, confèrent à ceux-ci une grande plasticité et une grande compressibilité. Pour des études d'ouvrages importants où le critère de compressibilité est prépondérant (remblai sur sol compressible par exemple), le dosage de matières organiques des sols appelés à supporter de tels ouvrages est indispensable.

La tourbe, résultat de la décomposition des végétaux, est un exemple de sol organique; elle est presque exclusivement composée de fibres végétales.

5 - ESSAIS D' IDENTIFICATION PROPRES AUX SOLS GRENUS

5 - 1 - ESSAI D'ÉQUIVALENT DE SABLE (norme NF P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable, désigné par le symbole E.S., a pour but d'évaluer la proportion relative d'éléments fins contenus dans le sol et dont la présence en quantité notable peut modifier le comportement mécanique.

C'est un essai empirique, simple, rapide et ne nécessitant qu'un appareillage très élémentaire. Il permet de contrôler sur place la constance de certaines qualités de matériaux mis en œuvre sur chantier à une cadence rapide. Il est très largement utilisé, en particulier en géotechnique routière.

L'essai consiste à opérer sur l'échantillon de sol (fraction du matériau dont les éléments sont inférieurs à 5 mm) un lavage énergique de manière à le séparer de ses matières fines. L'éprouvette contenant le sol et la solution lavante est soumise à 90 cycles de 20 cm d'amplitude en 30 secondes. La solution utilisée a, en outre, un pouvoir floculant sur les argiles et les colloïdes[13].

---

[9] surface spécifique du ciment : ≈ 1 m^2/g

[10] du chinois kao ling, lieu où l'on extrayait cette argile, de kao, élevée, et ling, colline

[11] de l'Illinois - USA

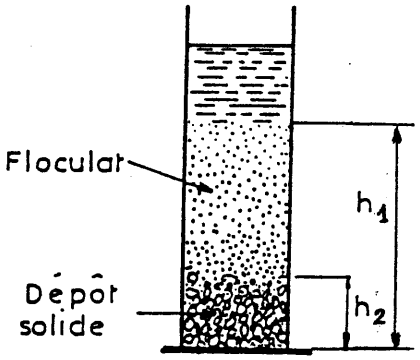
[12] de Montmorillon (Vienne) - France

[13] particules très petites restant en suspension dans l'eau et dont la floculation produit un gel.

On laisse la solution se décanter (fig. 5). Le sable vrai se dépose dans le fond de la burette jusqu'à un niveau h_2 qui peut être mesuré. Au-dessus du sable, se dépose le floculat gonflé par la solution. On peut distinguer un deuxième niveau h_1 qui sépare le liquide contenant le floculat du liquide transparent de solution lavante décanté. On détermine le rapport entre la hauteur du dépôt solide h_2 et la hauteur du niveau supérieur du floculat h_1.

L'équivalent de sable est par définition :

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



Essai d'équivalent de sable
- Figure 5 -

La valeur de l'équivalent de sable chute très rapidement dès qu'il y a un faible pourcentage de limon ou d'argile dans le sol pulvérulent.

Ordres de grandeur :

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

5 - 2 - INDICE DE DENSITÉ (norme NF P 94-059)

Pour donner une idée de l'état de compacité dans lequel se trouve un sol grenu à l'état naturel, on définit l'indice de densité :

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

e_{max} et e_{min} sont déterminés par des essais de laboratoire.

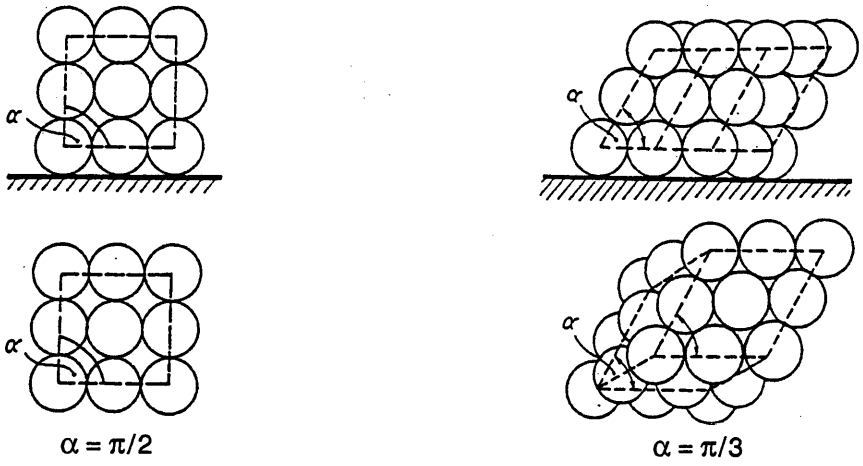
L'essai consiste à mettre en place le matériau séché dans un moule de volume connu, selon une procédure bien définie (avec une hauteur de chute nulle). On peut ainsi calculer son poids volumique minimal. Une surcharge statique de 10 kPa est ensuite appliquée afin de procéder au compactage de l'échantillon par vibration. On calcule alors son poids volumique maximal.

Pour un sol lâche $e \approx e_{max} \Rightarrow I_D \approx 0$.

Pour un sol serré $e \approx e_{min} \Rightarrow I_D \approx 1$.

Le comportement des sols grenus dépend presque uniquement de l'état de compacité dans lequel se trouve le squelette solide.

Dans le cas d'un matériau théorique constitué de sphères de même diamètre on peut définir deux assemblages particuliers correspondant à e_{min} et e_{max} (fig. 6) :



$\alpha = \pi/2$ $\alpha = \pi/3$

- a - Etat le moins le compact : assemblage cubique : une sphère en contact avec six autres sphères $e_{max} = 0,92$ ($n_{max} = 47,6$ %)

b - Etat le plus compact : assemblage rhomboédrique[14] : une sphère en contact avec douze autres sphères $e_{min} = 0,35$ ($n_{min} = 25,9$ %)

Assemblage de sphères de même diamètre

- Figure 6 -

6 - ESSAIS D' IDENTIFICATION PROPRES AUX SOLS FINS

6 - 1 - LIMITES D'ATTERBERG

C'est l'un des essais d'identification les plus importants.

Ces limites sont mesurées, avec un appareillage normalisé, sur le mortier, c'est à dire la fraction de sol qui passe au tamis de 0,40 mm.

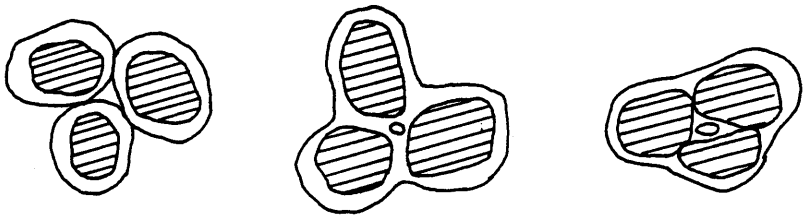
On peut considérer quatre états caractérisant la consistance des sols fins. Pour des teneurs en eau décroissantes :

• l'état liquide : Le sol a une consistance très faible. Il a l'aspect d'un fluide, il tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les particules glissent facilement les unes sur les autres (fig. 7-a).

• l'état plastique : Le sol a une consistance plus importante. Il ne tend plus à se niveler. Soumis à de faibles contraintes il se déforme largement sans se rompre. Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Les particules ont mis en commun leurs couches adsorbées; lorsqu'il y a déformation les particules restent attachées les une aux autres sans s'éloigner (fig. 7-b).

• l'état solide (avec retrait) : Le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformations élastiques).

• l'état solide sans retrait; les particules arrivent au contact en quelques points en chassant l'eau adsorbée; le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue (fig. 7-c).



a – Etat liquide b - Etat plastique c - Etat solide sans retrait

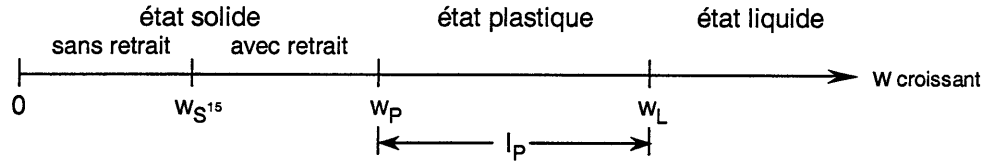
Divers états d'un sol fin

- Figure 7 -

La transition d'un état à un autre est très progressive, c'est pourquoi toute tentative pour fixer la limite entre deux états comporte une part d'arbitraire. Néanmoins, on utilise les limites définies par Atterberg et précisées ensuite par Casagrande.

[14] appelé aussi assemblage "en tas de boulets"

On définit :
- la limite de liquidité, notée w_L qui sépare l'état liquide de l'état plastique,
- la limite de plasticité, notée w_P qui sépare l'état plastique de l'état solide,
- la limite de retrait, notée w_S qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

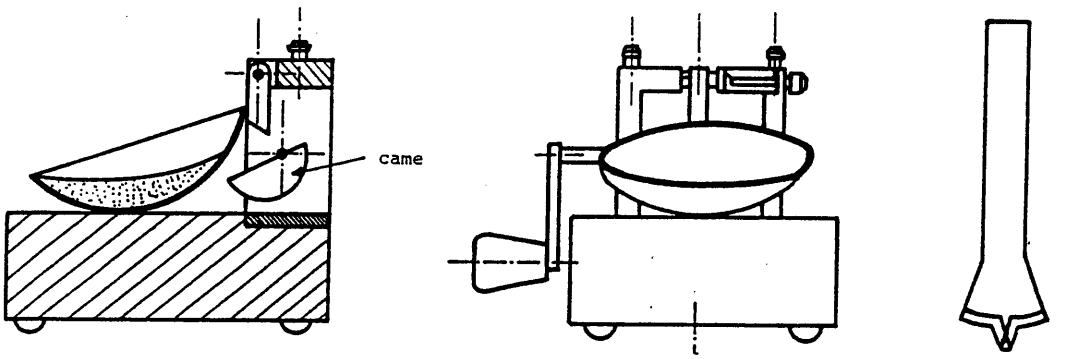


Dans les sols en place, la teneur en eau naturelle w_{nat} est généralement comprise entre w_L et w_P, très près de w_P.

6 - 1 - 1 - Limite de liquidité w_L

6 - 1 - 1 - 1 - Méthode de Casagrande (détermination à la coupelle - norme NF P 94-051).

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V (fig. 8). On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte.



coupelle vue de côté — coupelle vue de face — outil à rainurer

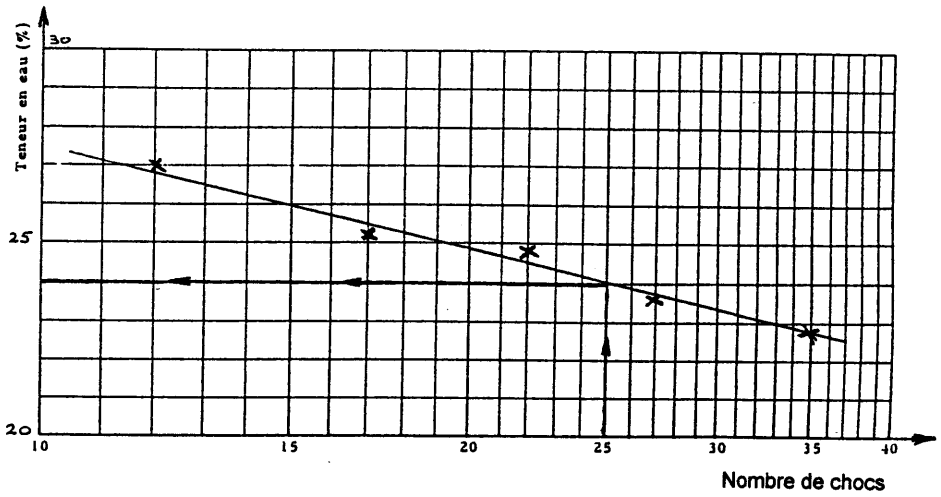
Appareillage pour la détermination de la limite de liquidité

- Figure 8 -

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau w, on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques (échelle arithmétique pour les teneurs en eau, logarithmique pour le nombre de chocs) lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. On réalise cinq essais qui doivent s'échelonner régulièrement entre 15 et 35 ou, mieux, entre 20 et 30 chocs. La droite la plus représentative est ensuite tracée à partir des points expérimentaux (fig. 9).

[15] S pour shrinkage : retrait



Limite de liquidité

- Figure 9 -

Pour le même intervalle des valeurs de N, la formule approchée

$$w_L = w\left(\frac{N}{25}\right)^{0,121}$$

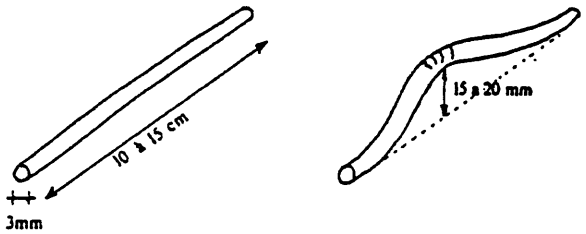
représente également assez bien les résultats expérimentaux. On peut donc employer avec prudence cette relation qui permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

6 - 1 - 1 - 2 – Méthode du cône de pénétration (norme NF P 94-052-1)

La relation entre la teneur en eau du sol remanié et la pénétration pendant cinq secondes, sous son propre poids, d'un cône normalisé (angle au sommet de 30°, masse de 80 g), tombé en chute libre, est déterminée expérimentalement. On porte en abscisse les teneurs en eau (en %) et en ordonnée les pénétrations correspondantes du cône (en mm), les deux échelles étant linéaires. La droite la plus représentative est tracée à partir des points expérimentaux. Par définition la limite de liquidité est la teneur en eau du sol qui correspond à une profondeur de pénétration du cône de 17 mm.

6 - 1 - 2 - Limite de plasticité w_P (norme NF P 94-051)

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement (fig. 10). La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.



Détermination de la limite de plasticité

- Figure 10 -

Ces deux limites sont d'une importance fondamentale en géotechnique car elles indiquent la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau.

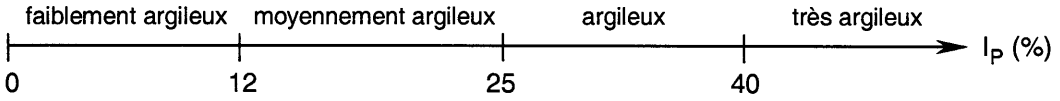
6 - 1 - 3 - Indice de plasticité I_P (norme NF P 94-051).

L'indice de plasticité, noté I_P, est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols.

Il s'exprime par la relation : $I_P = w_L - w_P$

Il mesure l'étendue du domaine de plasticité, domaine pendant lequel on peut travailler le sol. Il a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière; il est préférable qu'il soit le plus grand possible.

Le GTR 92 (Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme - septembre 1992) retient pour I_P les seuils d'argilosité suivants :



6 - 1 - 4 - Ordres de grandeur

Nature	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)
Limon	24	17	7
Argile limoneuse peu plastique	40	24	16
Argile plastique	114	29	85
Argile de Mexico	500	125	375
Bentonite[16]	710	54	656

6 - 2 - VALEUR DE BLEU DE MÉTHYLÈNE : VBS (norme NF P 94-068)

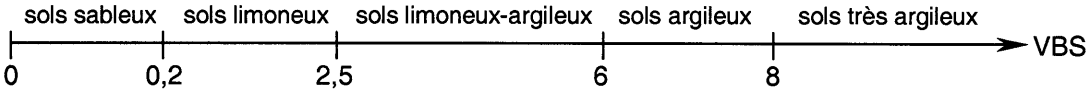
Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est récente.

Ce paramètre, noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

Ordres de grandeur :



7 - AUTRES ESSAIS

Des essais complémentaires, présentés en annexe 4, peuvent être réalisés. Il s'agit de
- l'analyse minéralogique,
- la teneur en matière organique,
- la teneur en carbonate de calcium.

8 - CLASSIFICATION DES SOLS

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

Apparentée à la classification américaine U.S.C.S. (Unified Soil Classification System), la classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées (L.P.C.) utilisée en France s'appuie sur essentiellement sur l'analyse granulométrique et sur les caractéristiques de plasticité de la fraction fine, complétée par des essais très simples (couleur, odeur, effets de l'eau, etc.).

[16] minéral argileux thixotrope du groupe des smectites (de Fort Benton – Montana – USA).

La classification GTR 92 utilisée dans les travaux de terrassement est aussi très largement répandue.

Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

8 - 1 - SOLS A GRANULOMÉTRIE UNIFORME

Voir § 3 - 2

8 - 2 - SOLS A GRANULOMÉTRIE NON UNIFORME

On distingue trois grands types de sols :

- les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids > 80 µm,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids < 80 µm,
- les sols organiques dont la teneur en matière organique est > à 10%.

8 - 2 - 1 - Sols grenus

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (fig. 11).

Définitions			Symboles	Conditions	Désignations géotechniques
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}.D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A[17]	grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A[17]	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}.D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A[17]	sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A[17]	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 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

CLASSIFICATION L.P.C. DES SOLS GRENUS

- Figure 11 -

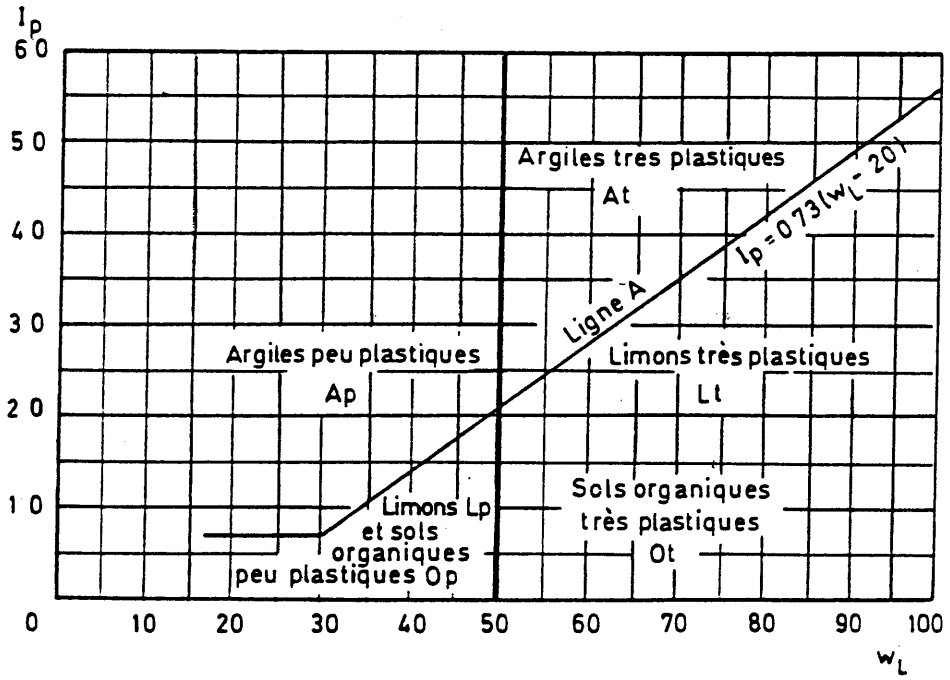
[17] Ligne A du diagramme de plasticité – voir figure 12

8 - 2 - 2 - Sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (fig. 12).

Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- les limons très plastiques : L_t
- les limons peu plastiques : L_p
- les argiles très plastiques : A_t
- les argiles peu plastiques : A_p



Abaque de plasticité de Casagrande

CLASSIFICATION L.P.C. DES SOLS FINS

- Figure 12 -

Remarque : Les mots argile et limon ne représentent plus ici des classes granulométriques, mais sont liés aux valeurs des limites d'Atterberg. Il s'agit donc d'une classification basée sur la plasticité c'est à dire la nature minéralogique des particules de sol et non de leur dimensions.

8 - 2 - 3 - Sols organiques

Teneur en matière organique (%)	Désignation géotechnique		
0 - 3	Sol inorganique		
3 - 10	Sol faiblement organique	fO	Vase
10 - 30	Sol moyenne organique	mO	Sol tourbeux
> 30	Sol très organique	tO	Tourbe

ANNEXE

RELATIONS ENTRE CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

[1] $n = \frac{V_v}{V}$ *

[2] $n = \frac{e}{1+e}$

[3] $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$

[4] $n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w}$

[5] $e = \frac{V_v}{V_s}$ *

[6] $e = \frac{n}{1-n}$

[7] $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$

[8] $e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$

[9] $w = \frac{W_w}{W_s}$ *

[10] $w = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$

[11] $w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$

[12] $w = S_r \cdot \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right)$

[13] $S_r = \frac{V_w}{V_v}$ *

[14] $S_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \frac{w}{e}$

[15] $S_r = \frac{w}{w_{sat}}$ (γ_d constant)

[16] $\gamma = (1 + w)(1 - n)\gamma_s$

[17] $\gamma = \frac{1+w}{1+e} \cdot \gamma_s$

[18] $\gamma = (1 + w)\gamma_d$

[19] $\gamma = \gamma_d + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$

[20] $\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{1+e}$

[21] $\gamma = (1 - n)\gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$

[22] $\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$

[23] $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$

[24] $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ *

[25] $\gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$

[26] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$

[27] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$

* : relation de définition

ANNEXE 2

GRANULOMÉTRIE

Les grains d'un sol ont des dimensions très variables pouvant aller de la dizaine de centimètres au micromètre. Un essai d'identification important consiste à étudier la granulométrie du sol, c'est à dire la distribution des grains suivant leur dimension en déterminant par pesée l'importance relative des classes de grains de dimensions bien définies.

1 - TAMISAGE

Pour les sols grenus on utilise une série de passoires et de tamis.

Les trous des passoires ont un diamètre variant de 100 à 6,3 mm. L'ouverture intérieure des mailles des tamis varie de 12,5 mm à 40 µm. Par définition le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer. Quand on se sert de passoires, il faut connaître les dimensions des tamis équivalents. D étant le diamètre des trous de la passoire, l'ouverture intérieure des mailles du tamis équivalent est égale à D/1,25 (résultat de Féret). On utilise, par exemple, indifféremment un tamis de 10 mm ou une passoire de 12,5 mm.

On commence toujours par passer l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant de façon à déterminer le poids de l'échantillon sec. On procède ensuite au tamisage proprement dit, soit à sec, soit sous l'eau, à l'aide d'une colonne de tamis soumise à des

vibrations. La quantité de matériau retenue sur le tamis est appelée refus, celle qui passe au travers du tamis est appelée tamisat.

Le tamisage à sec n'est précis que pour les matériaux dénués de cohésion comme les sables ou les graviers. En présence d'un sol limoneux ou argileux, il faut effectuer un tamisage sous l'eau. Le matériau doit alors être mis à tremper pendant un temps suffisant pour désagréger mottes et agglomérats. Cette opération peut durer de quelques minutes à plusieurs heures. Après tamisage, on passe de nouveau les tamis et leurs refus à l'étuve avant de les peser.

2 - SÉDIMENTOMÉTRIE

Lorsque la dimension des particules est inférieure à 80 µm le tamisage n'est plus possible. On a alors recours à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse limite de chute d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule (fig. 1).

Cette relation s'écrit :

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\,\mu} D^2$$

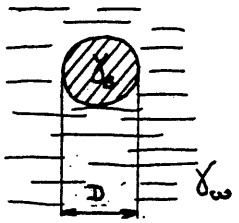
avec : v : vitesse de décantation,

D : diamètre de la particule,

γ_w : poids volumique du liquide utilisé (eau + défloculant),

μ : viscosité dynamique du liquide.

Cette formule donne par exemple pour la décantation de particules d'un poids volumique de 26,5 kN/m^3 dans de l'eau à 20°C ($\mu = 10^{-3}$ Pa.s) $\Rightarrow$ v (cm/s) $\approx 9000\ D^2$ (D exprimé en cm).

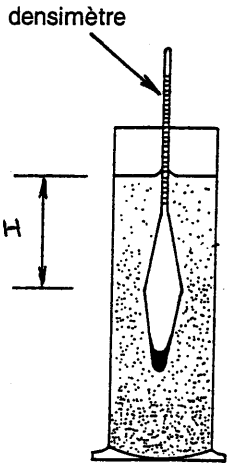


Loi de Stokes

- Figure 1 -

En pratique, pour pouvoir appliquer la loi de Stokes, il convient d'opérer sur une suspension de faible concentration (environ 20 g/litre) et sur des particules de dimension inférieure à 100 µm. Par convention, le diamètre d'une particule est égal au diamètre de la particule sphérique de même poids volumique qui a la même vitesse de décantation; il est appelé diamètre équivalent (le mot est important car les particules très fines sont très aplaties).

Le procédé consiste à mesurer à différentes époques, à l'aide d'un densimètre, la densité d'une suspension d'un sol (fig. 2). On opère sur une suspension initialement homogène. La décantation des particules détruit cette homogénéité, les particules les plus grosses tombant le plus rapidement. A une profondeur H donnée on mesure le densité δ de la suspension en fonction du temps t.



Sédimentométrie

- Figure 2 -

A cette profondeur H (= v.t)

- il n'y a plus de particules de diamètre supérieur à D tel que $D = \frac{18\,\mu.H}{(\gamma_s - \gamma_w)\,t}$ car la sédimentation de ces particules a été plus rapide,

- le poids volumique de la suspension s'écrit :

$$\delta\,.\,\gamma_w = \frac{y.W_s + \gamma_w\left(V - \frac{y.W_s}{\gamma_s}\right)}{V}$$

avec :

$$y = \frac{\text{poids des particules de diamètre} < \text{à D}}{\text{poids total } W_s \text{ des particules solides}}$$

V : volume de la suspension

On détermine $y = \frac{V}{W_s} \cdot \frac{\gamma_s \cdot \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot (\delta - 1)$ en fonction du temps.

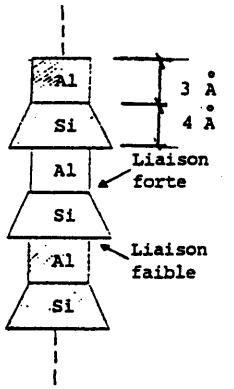
ANNEXE 3

ÉLÉMENTS DE CLASSIFICATIONS DES ARGILES

On distingue trois grandes familles.

La kaolinite

Le feuillet de kaolinite résulte de la liaison d'une couche tétraédrique (1) avec une couche octaédrique (2), la liaison se faisant par les atomes d'oxygène (fig. 1). La particule de kaolinite est formée d'un empilement de ces feuillets, de l'ordre d'une centaine. Les feuillets sont liés les uns aux autres par des liaisons du type hydrogène donc des liaisons relativement fortes; il en résulte que l'empilement est difficile à dissocier. Le minéral est par conséquent stable et l'eau ne peut ni circuler entre les feuillets ni provoquer un gonflement ou un retrait des particules. Ces argiles sont les moins dangereuses pour l'ingénieur.



Structure de la kaolinite

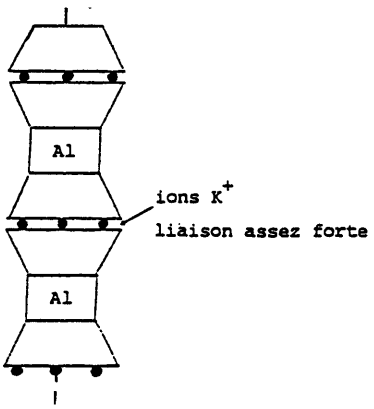
- Figure 1 -

Les smectites (dont la montmorillonite)

Même type structural que les illites, mais avec très peu de cations K^+ interfoliaires. Il en résulte des liaisons extrêmement lâches entre les feuillets ce qui permet à des molécules d'eau de se glisser entre les feuillets en provoquant des gonflements spectaculaires (5 à 6 couches de molécules d'eau). Les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont susceptibles de gonflements ou de retraits importants suivant les variations de teneur en eau. Les particules de montmorillonite ont des dimensions très faibles, leur surface spécifique est dont très élevée d'où une activité superficielle intense. A cette famille appartient la bentonite couramment utilisée comme boue de forage et dans l'exécution de parois moulées.

Les illites

Leur structure est très proche de celle du mica blanc. Une couche octaédrique est prise entre deux couches tétraédriques. Ces dernières sont occupées par des Si^{4+} dont un peu moins de 1 sur 4 est remplacé par des Al^{3+}. La neutralité électrique est rétablie par l'interposition de cations K^+ entre les couches tétraédriques : il apparaît ainsi des liaisons ioniques faibles entre les feuillets, suffisantes toutefois pour les bloquer.



Structure de l'illite

- Figure 2 -

L'atome d'aluminium du feuillet octaédrique qui se trouve sous forme d'un Al^{+++} peut être remplacé par d'autres ions comme Mg^{++}, principalement dans la montmorillonite et dans l'illite. Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption en surface de cations Ca^{++}, Li^+, K^+, Fe^{++}. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

ANNEXE 4

AUTRES ESSAIS - COMPLÉMENTS

1 - ANALYSE MINÉRALOGIQUE

L'analyse minéralogique fait appel à l'observation au microscope électronique, à l'étude par diffraction des rayons X, à l'analyse chimique.

L'analyse minéralogique d'un sol est généralement un essai qui apporte beaucoup d'informations, car le comportement des sols fins est fonction de leur composition minéralogique. Par exemple une forte teneur en montmorillonite indiquera un sol très sensible à l'eau pouvant donner lieu à des gonflements ou des retraits importants.

2 - TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE

Les matières organiques sont très variées et il est de ce fait quasiment impossible de déterminer par des essais simples chacune des variétés. On se contente d'un dosage pondéral global. Plusieurs méthodes de dosage sont possibles.

Méthode classique

Les matières organiques sont oxydées par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique concentré.

Méthode thermique

Celle-ci fait appel à l'analyse thermique différentielle (A.T.D.), méthode plus longue mais plus précise que la méthode classique.

Test d'humidification de Von Post

Le test de Von Post permet d'estimer le degré de décomposition des matières organiques des sols par référence à une échelle d'humidification empirique comportant dix classes H_1 à H_{10} (la classe H_1 correspond à une masse végétale non humidifiée, la classe H_{10} à un sol organique totalement humidifié, à l'état de pâte.

L'essai consiste à comprimer une certaine quantité de matériau et à observer la nature et la couleur du liquide qui en sort, que l'on compare à une échelle préétablie. Il peut être réalisé à la main ou à l'aide d'un système mécanique.

3 - TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM

La détermination de la teneur en $CaCO_3$ s'effectue au calcimètre Dietrich - Früling. L'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de CO_2 dégagé par la réaction du HCl sur le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon.

L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction:

$$CaCO_3 + 2\,HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2\nearrow$$

La teneur en $CaCO_3$ d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60 - 70 %.

Teneur en $CaCO_3$ (%)	Désignation géotechnique	
0 - 10	Argile	Sols
10 - 30	Argile marneuse	Sols
30 - 70	Marne	Sols
70 - 90	Calcaire marneux	Roches
90 - 100	Calcaire	Roches

Avril 2006