

Description, identification et classification des sols

par **Jean-Pierre MAGNAN**

Ingénieur en chef des Ponts et chaussées

Directeur technique au Laboratoire central des ponts et chaussées

Professeur de mécanique des sols et des roches à l'École nationale des ponts et chaussées

1. Description qualitative des sols	C 208 - 2
1.1 Origine des sols	2
1.2 Le sol, matériau à trois phases.....	2
1.3 Description des trois phases.....	2
1.3.1 Phase solide	2
1.3.2 Phase liquide.....	3
1.3.3 Phase gazeuse.....	3
1.3.4 Arrangement des phases	3
1.4 Liaisons entre les phases.....	3
1.4.1 Couche d'eau adsorbée.....	3
1.4.2 Sols pulvérulents et sols cohérents	4
1.5 État de l'eau dans le sol	4
2. Description quantitative et identification des sols.....	4
2.1 Objet de l'identification	4
2.2 Description de l'état du sol	4
2.2.1 Paramètres d'état.....	4
2.2.2 Relations entre les paramètres d'état	5
2.3 Propriétés des particules du sol	6
2.3.1 Granularité	6
2.3.2 Équivalent de sable	7
2.3.3 Limites d'Atterberg (sols fins)	7
2.3.4 Essais au bleu de méthylène	9
2.3.5 Teneur en carbonate de calcium	9
2.3.6 Teneur en matières organiques.....	10
2.3.7 Degré d'humification des matières organiques.....	10
2.3.8 Analyse minéralogique de la fraction argileuse	10
2.3.9 Activité des argiles	10
2.4 Caractéristiques d'état et essais d'identification correspondants	10
2.4.1 Teneur en eau.....	10
2.4.2 Indice de consistance	11
2.4.3 Indice des vides	11
2.4.4 Indice de densité.....	11
2.5 Conclusions.....	11
2.6 Valeurs numériques.....	12
3. Classification des sols.....	12
3.1 Principe des classifications des sols	12
3.2 Classification des sols LPC/USCS.....	12
3.3 Classification LPC modifiée	12
3.4 Classification des sols pour les terrassements routiers	15
Pour en savoir plus.....	Doc. C 208

A la différence des autres matériaux du génie civil et du bâtiment, les sols (et les roches) préexistent sur le site des travaux et la première phase de toute étude géotechnique consiste à définir la nature et l'état de ces terrains. Les techniques utilisées pour caractériser les sols d'un site sont décrites dans deux articles de ce traité : « Forages et sondages » ([C 228]), et le présent article consacré à la description, l'identification et la classification des sols, qui présente des techniques de caractérisation des sols en laboratoire.

Les sols prélevés dans des forages ou des excavations peuvent être décrits de plusieurs façons complémentaires : d'après la nature, d'après les proportions et d'après les propriétés physiques de leurs constituants. Les paramètres correspondants seront utilisés dans les autres articles de ce traité consacrés aux propriétés mécaniques des sols et aux ouvrages. La classification permet pour sa part de transmettre en quelques mots une image globale de chaque sol, très utile pour les échanges entre spécialistes.

1. Description qualitative des sols

1.1 Origine des sols

Les sols et les roches se présentent sous forme d'agrégats de particules généralement minérales, mais parfois organiques, de taille et de forme variables. La nature et l'intensité des forces qui lient les particules de l'agrégat dépendent de la nature du matériau.

On ne traitera ici que des sols, qui peuvent être définis comme des agrégats dans lesquels les particules sont faiblement liées et peuvent être séparées par agitation ou trituration dans l'eau. Les roches sont traitées dans les articles spécialisés de ce traité. Cette définition, assez imprécise, induit un certain recouvrement entre sols et roches (certaines marnes, craies, argiles raides, roches tendres).

Les sols ont deux origines principales :

- la **désagrégation des roches** par altération mécanique ou physico-chimique sous l'effet des agents naturels :

- fissuration consécutive à la décompression, aux effets des chocs thermiques ou du gel ou aux contraintes tectoniques ;
- attaque mécanique (chocs et frottements) dans un processus naturel de transport : gravitaire, glaciaire, fluvial, marin, éolien ;
- attaque chimique sous l'effet de circulations d'eaux ;

- la **décomposition d'organismes vivants** : végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

On distingue également :

- les **sols résiduels**, provenant de l'altération sur place des roches ;
- les **sols transportés**, provenant du dépôt des produits d'altération, préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent à l'ingénieur les problèmes les plus délicats ;
- les **formations géologiques de roches tendres**.

Enfin, suivant leurs conditions de formation et de dépôt, les sols peuvent contenir des matières organiques en proportion plus ou moins élevée.

Il est difficile de distinguer la part qui revient aux différents agents naturels dans la formation des sols et d'apprécier leur importance respective, car leur action est le plus souvent simultanée. Il est possible, par contre, de reconnaître dans telle ou telle caractéristique d'un sol l'effet d'un processus d'altération ou d'un mode de transport déterminé. On soulignera en particulier que les processus mécaniques ou physiques d'évolution des roches ne permettent pas

de réduire la dimension des particules en dessous de 10 à 20 μm , car les effets mécaniques, dus aux chocs ou au frottement liés à la masse des particules, diminuent rapidement avec leur volume. Au-dessous de cette dimension, la fragmentation des particules se poursuit principalement par altération chimique, qui entraîne la destruction de certaines des liaisons chimiques des minéraux. Elle s'accompagne d'une augmentation rapide de la surface des particules offerte à l'attaque chimique.

1.2 Le sol, matériau à trois phases

Le sol est un matériau à trois phases : agrégats de particules minérales dont les vides peuvent être remplis de liquide et/ou de gaz. On distingue globalement :

- la **phase solide ou squelette solide**, constituée par les particules minérales ou organiques de l'agrégat ;
- la **phase liquide**, constituée par l'eau qui occupe les vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis d'eau, le sol est dit saturé ; sinon, il est dit non saturé ou partiellement saturé ;
- dans un sol non saturé, une partie des vides de l'agrégat est remplie par du **gaz**, essentiellement de l'air.

La coexistence, dans le matériau, de trois phases présentant de grandes différences dans leurs propriétés physiques et mécaniques explique la complexité du comportement mécanique des sols.

La définition d'un sol repose donc sur une description précise des trois phases.

1.3 Description des trois phases

1.3.1 Phase solide

La phase solide est caractérisée par la description de ses particules élémentaires (dimensions, formes, états de surface, natures chimique et minéralogique) et de leur arrangement. Les particules formées par altération physique ou mécanique sont généralement constituées de fragments de la roche mère renfermant chacun un ou plusieurs minéraux ; leur forme est régulière. Les particules résultant de l'altération chimique ont au contraire une forme irrégulière de plaquette ou de disque et sont constituées soit par des fragments de la roche mère ne comportant qu'un seul minéral, soit par des minéraux différents, formés au cours des processus de dissolution et recristallisation inhérents à l'altération chimique.

On distingue classiquement dans un sol trois fractions, suivant la dimension des particules (tableau 1). La fraction très fine est généralement dénommée « argile » en dehors de toute signification minéralogique. Elle est souvent constituée d'argiles, au sens minéralogique du terme. Il existe trois grandes familles d'argiles : les kaolinites, les illites et les montmorillonites.

L'arrangement des particules peut être caractérisé par leur degré de serrage (et, par conséquent, par le volume des vides offerts aux deux autres phases), ainsi que par l'existence éventuelle de directions préférentielles d'orientation des particules.

1.3.2 Phase liquide

Les interstices du squelette solide sont occupés en partie ou en totalité par de l'eau. Cette eau n'est en général pas pure : elle contient des électrolytes dissociés en cations et anions (son pH est alors acide ou basique), des matières organiques et des colloïdes en suspension et, dans certains cas, des gaz dissous.

1.3.3 Phase gazeuse

Dans les sols non saturés, la phase gazeuse est présente dans tout ou partie des pores sous forme d'un mélange d'air, de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'autres gaz. Les sols saturés peuvent aussi contenir du gaz, mais sous forme de bulles ou en dissolution dans l'eau.

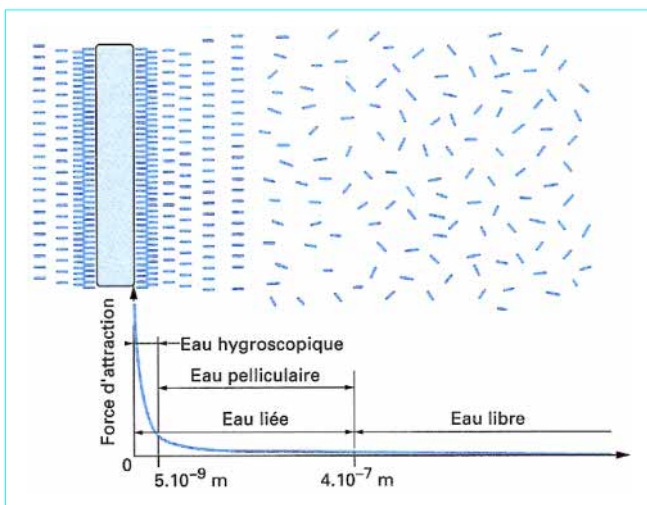


Figure 1 – Liaison des phases solide et liquide : eau liée et eau libre
(d'après Polubarinova-Kochina, 1962)

1.3.4 Arrangement des phases

L'arrangement des phases dans le sol dépend de la nature de leurs constituants, des liaisons physicochimiques ou mécaniques entre ces constituants et de l'histoire du sol (conditions de transport et de dépôt, évolution postérieure à la sédimentation).

1.4 Liaisons entre les phases

On s'intéressera ici plus spécialement aux interactions ou forces de liaison entre les particules de la phase solide et l'eau interstitielle.

Toutes les particules de sol sont entourées d'une couche de molécules d'eau, fixées par des forces de Van der Waals, des liaisons hydrogène ou des forces électriques. Cette couche d'eau absorbée est beaucoup plus épaisse pour les particules argileuses où les forces électrostatiques prédominent.

1.4.1 Couche d'eau adsorbée

Les particules de la fraction très fine des sols sont en général de nature argileuse. Elles portent à leur surface des charges électriques négatives. Le champ électrique créé par ces charges oriente les molécules dipolaires de l'eau au voisinage de la particule (les ions H^+ sont attirés vers la surface). L'interaction électrique entre l'eau et les particules argileuses décroît rapidement quand on s'éloigne de la particule (figure 1). Les premières couches de molécules d'eau sont fortement liées et ne se déplacent pratiquement pas par rapport à la particule. Les couches suivantes sont plus faiblement liées et ont un comportement visqueux différent de celui de l'eau libre (eau aux propriétés usuelles).

La couche d'eau « adsorbée » ou « hygroscopique » est la couche des molécules d'eau liées de façon presque rigide à la particule. Elle comporte aussi des cations provenant de la dissociation des électrolytes contenus dans l'eau et qui sont attirés aussi par les charges négatives de la surface des particules. L'épaisseur de cette couche varie avec la nature du minéral argileux et avec la nature des cations. Elle est de l'ordre de 50 Å (soit 0,005 μm) et dépend peu des dimensions de la particule.

L'eau pelliculaire est l'eau qui entoure la couche d'eau adsorbée. Ses propriétés physiques et mécaniques sont influencées par le champ électrique de la particule. L'épaisseur de la couche d'eau liée peut atteindre 0,4 à 0,5 μm .

L'eau liée (adsorbée et pelliculaire) est à l'origine des propriétés de plasticité, de thixotropie et de fluage (viscosité) des sols très fins ou argileux. Les forces de surface ou de contact sont prépondérantes dans ces sols par rapport aux forces de pesanteur.

Tableau 1 – Fractions du sol suivant la dimension des grains

Dimension D des particules	Fraction du sol	Forme des grains	Nature des minéraux
$D > 80 \mu\text{m}$	grenue	régulière	minéraux d'origine
$2 \mu\text{m} < D < 80 \mu\text{m}$	fine	plaquette ou disque	
$D < 2 \mu\text{m}$	très fine ou argileuse		minéraux d'origine ou néo-formés

Note : la frontière définie à 80 μm en France passera à 63 μm dans les prochaines années (harmonisation européenne).

Tableau 2 – Sols pulvérulents et sols cohérents : caractéristiques		
Sols	pulvérulents ou grenus ou granulaires	cohérents ou fins
Particules	Grains	Proportion notable de particules fines à très fines
	Forme régulière	Forme irrégulière (grande surface spécifique)
	Altération physico-mécanique	Altération physico-chimique
Liaison particule-eau	Faible ou nulle. Eau libre	Forte. Eau liée. Existence d’une couche d’eau adsorbée
	Pas d’influence : — de la nature minéralogique des particules — des électrolytes de l’eau libre	Influence : — de la nature minéralogique des particules — des électrolytes de l’eau libre
Force de liaison	Forces de pesanteur prépondérantes	Forces de pesanteur Forces d’attraction moléculaire et électrostatique prépondérantes à courte distance.

1.4.2 Sols pulvérulents et sols cohérents

Les propriétés très particulières de la fraction très fine des sols font qu’elles commandent le comportement global du sol lorsque cette fraction très fine est en proportion notable. Cette observation a conduit à diviser les sols en deux grandes catégories, caractérisées dans le tableau 2 : les sols pulvérulents et les sols cohérents.

1.5 État de l’eau dans le sol

Si l’on examine maintenant les phénomènes du point de vue de l’eau contenue dans le sol, on constate qu’elle se présente sous plusieurs états suivant l’intensité des forces liant ses molécules aux particules solides (figure 2) :

- l’eau de constitution entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol sont formées ;
- l’eau liée ou adsorbée à la surface des grains très fins est orientée par les forces d’attraction moléculaire et les forces électrostatiques. Elle a une viscosité élevée et ne transmet pas les pressions ;
- l’eau libre circule librement dans les pores du sol sous l’effet des forces de pesanteur ;
- enfin, dans les sols non saturés, en présence d’air ou d’autres gaz, l’eau est retenue dans les canaux les plus fins du sol par les forces capillaires. Elle se trouve alors en dépression par rapport à la pression atmosphérique. C’est ainsi que les nappes à surface libre dans les sols fins sont généralement surmontées d’une frange capillaire dont la hauteur varie très largement avec la nature du sol. La frange capillaire est saturée juste au-dessus de la surface libre, puis de moins en moins saturée. Au-delà d’une certaine hauteur, l’eau n’est plus continue dans l’espace des pores et n’intervient plus de façon autonome dans le comportement mécanique du sol.

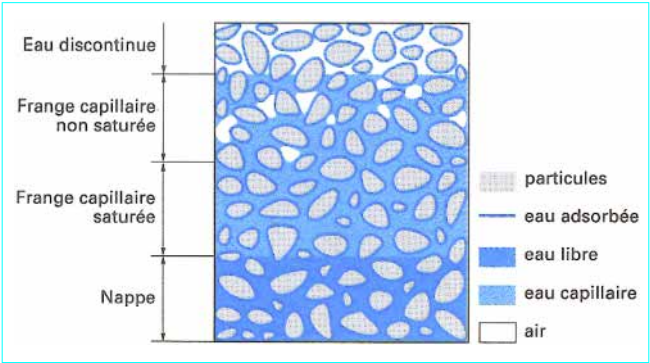


Figure 2 – Différents états de l’eau dans le sol

Les essais d’identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive, du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d’aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents.

Les essais d’identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Leurs résultats permettent aussi d’estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés mécaniques des sols et d’établir un prédimensionnement grossier des ouvrages au stade des premières études.

On distingue classiquement deux grandes catégories d’essais d’identification :

- les essais qui répondent de l’arrangement et de la répartition des phases (squelette solide, eau, air). Ces essais caractérisent l’état du sol et ne peuvent être réalisés que sur des échantillons intacts ;
- les essais qui traduisent les propriétés des particules du sol et l’intensité de leurs liaisons avec l’eau. Ces essais caractérisent la nature du sol et sont réalisés sur des échantillons intacts ou remaniés (dont l’état a été perturbé lors du prélèvement ou du transport).

2. Description quantitative et identification des sols

2.1 Objet de l’identification

Identifier un sol, c’est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d’identification ».

2.2 Description de l’état du sol

2.2.1 Paramètres d’état

L’arrangement dans le sol des particules, de l’eau et du gaz est trop complexe pour être décrit de façon détaillée. On se contente pour cette raison d’une estimation globale des proportions des phases solide, liquide et gazeuse, rassemblées par l’esprit selon le schéma de la figure 3.

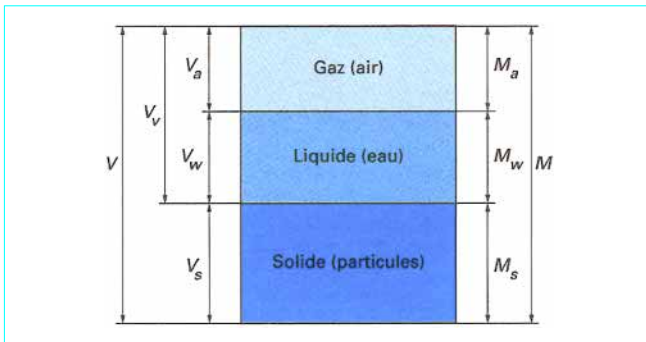


Figure 3 – Schématisation des trois phases du sol

Si l'on note M les masses et V les volumes, affectés des indices s , w et a respectivement pour les trois phases solide, liquide et gazeuse, on définit :

— la **masse volumique de l'eau** :
masse d'eau par unité de volume d'eau (t/m^3)

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$$

— la **masse volumique du sol** :
masse globale des trois phases du sol par unité de volume du sol (t/m^3)

$$\rho = \frac{M}{V}$$

— la **masse volumique du sol sec** :
masse des particules du sol (phase solide seule) par unité de volume du sol (t/m^3)

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

— la **masse volumique des particules** :
masse des particules du sol (phase solide seule) par unité de volume des particules du sol (t/m^3)

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

— la **masse volumique de l'air** :
masse de l'air par unité de volume de l'air (t/m^3)

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a}$$

— la **masse volumique du sol saturé** :
masse volumique du sol dans l'hypothèse où tous les vides sont remplis d'eau (t/m^3)

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + M_w(V_v/V_w)}{V}$$

— la **masse volumique déjaugée du sol** : (t/m^3)

$$\rho' = \rho - \rho_w$$

— la **porosité** :
volume des vides (phases liquide et gazeuse) par unité de volume du sol

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

— l'**indice des vides** :
rapport du volume des vides (phases liquide et gazeuse) au volume des particules du sol

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

— la **teneur en eau** :

rapport de la masse d'eau à la masse du sol sec (sans unité ou %)

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

— la **teneur en eau de saturation** :

teneur en eau du sol saturé (tous les vides sont remplis d'eau) (sans unité ou %)

$$w_{sat} = \frac{V_v \rho_w}{M_s}$$

— la **teneur en eau volumique** :

rapport du volume d'eau au volume total du sol (sans unité ou %)

$$\theta = \frac{V_w}{V}$$

— le **degré de saturation** :

rapport du volume d'eau au volume des vides (sans unité ou %)

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

Les masses volumiques servent à calculer les contraintes dans les sols et sont pour cela multipliées par l'accélération due à la pesanteur pour obtenir des poids volumiques. On utilise souvent, dans la pratique, des définitions des poids volumiques parallèles à celles des masses volumiques données ci-dessus :

- poids volumique de l'eau $\gamma_w = g \rho_w$
- poids volumique du sol $\gamma = g \rho$
- poids volumique du sol sec $\gamma_d = g \rho_d$
- poids volumique des particules $\gamma_s = g \rho_s$
- poids volumique de l'air $\gamma_a = g \rho_a$
- poids volumique du sol saturé $\gamma_{sat} = g \rho_{sat}$
- poids volumique déjaugé $\gamma' = g \rho'$

L'accélération due à la pesanteur g , dont la valeur exacte est proche de $9,806 \text{ m/s}^2$, souvent arrondie à $9,81 \text{ m/s}^2$, est habituellement fixée à 10 m/s^2 en mécanique des sols, pour simplifier les calculs. Le poids volumique de l'eau est alors égal à $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$.

De plus, la masse volumique des minéraux qui constituent les particules de la plupart des sols est en général proche de $2,65$ ou $2,7 \text{ t/m}^3$. Mais les sols organiques ont des masses volumiques plus faibles.

Enfin, on néglige toujours la masse de l'air présent dans le sol : $\rho_a \approx 0$.

Lorsque le degré de saturation d'un sol est égal à 1, tous les vides du sol sont remplis d'eau et l'on dit que le sol est « saturé ». Il est « non saturé » dans le cas contraire ($S_r < 1$).

2.2.2 Relations entre les paramètres d'état

Les paramètres définis ci-dessus ne sont pas indépendants, puisqu'ils sont issus de six quantités élémentaires seulement. Il existe entre eux un certain nombre de relations mathématiques, qui peuvent être démontrées en se référant aux définitions de la figure 3.

■ Sol saturé ou sol non saturé

- Relation entre la porosité et l'indice des vides :

$$n = \frac{e}{1+e} \quad e = \frac{n}{1-n}$$

- Relation entre la masse volumique du sol sec et la masse volumique des particules :

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} = \rho_s (1-n)$$

- Relation entre la masse volumique du sol et la masse volumique du sol sec (ou des particules)

$$\rho = \rho_d (1 + w) \quad \rho = \frac{\rho_s (1 + w)}{1 + e}$$

■ Sol non saturé

- Expression de la masse volumique du sol

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_d + n S_r \rho_w \\ \rho &= \rho_s (1 - n) + n S_r \rho_w \\ \rho &= \frac{\rho_s + e S_r \rho_w}{1 + e} \end{aligned}$$

- Expression de la teneur en eau ou du degré de saturation

$$\begin{aligned} w &= \frac{e S_r \rho_w}{\rho_s} \\ S_r &= \frac{\rho_s w}{\rho_w} \\ S_r &= \frac{w}{\rho_w \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right)} \end{aligned}$$

■ Sol saturé ($S_r = 1$)

- Expression de la masse volumique du sol

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_d + n \rho_w \\ \rho &= \rho_s (1 - n) + n \rho_w \\ \rho &= \frac{\rho_s + e \rho_w}{1 + e} \end{aligned}$$

- Expression de la teneur en eau

$$w = \frac{e \rho_w}{\rho_s} \quad \text{d'où} \quad e = \frac{w \rho_s}{\rho_w}$$

■ Paramètres indépendants

L'état d'un sol peut donc être défini par :

- trois paramètres (e , ρ_s et S_r ou w) s'il n'est pas saturé ;
- deux paramètres (e ou w , ρ_s) s'il est saturé ;
- ou encore par respectivement deux ou un paramètre(s), si l'on admet pour ρ_s une valeur constante ($2,7 \text{ t/m}^3$).

2.3 Propriétés des particules du sol

Les essais caractérisant la nature du sol peuvent être effectués soit sur des échantillons intacts, soit sur des échantillons remaniés.

2.3.1 Granularité

2.3.1.1 Définitions

La granularité se définit comme la répartition de la dimension moyenne des particules du sol, exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau. Compte tenu de la faible plage de variation de la masse volumique des particules, cette répartition n'est pas très éloignée d'une répartition rapportée au volume des particules.

La granularité s'exprime par la courbe granulométrique (figure 4), tracée dans un diagramme semi-logarithmique, en portant :

- en abscisse, le logarithme du diamètre moyen D des particules ;

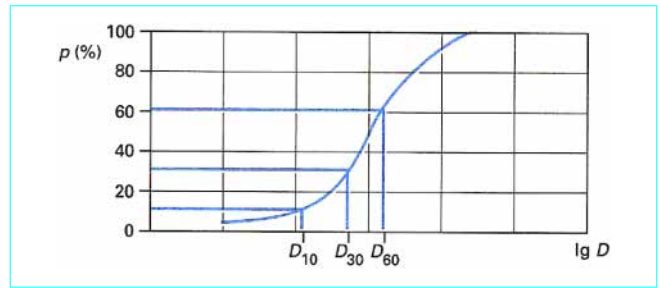


Figure 4 – Courbe granulométrique. Définition des paramètres D_{10} , D_{30} et D_{60}

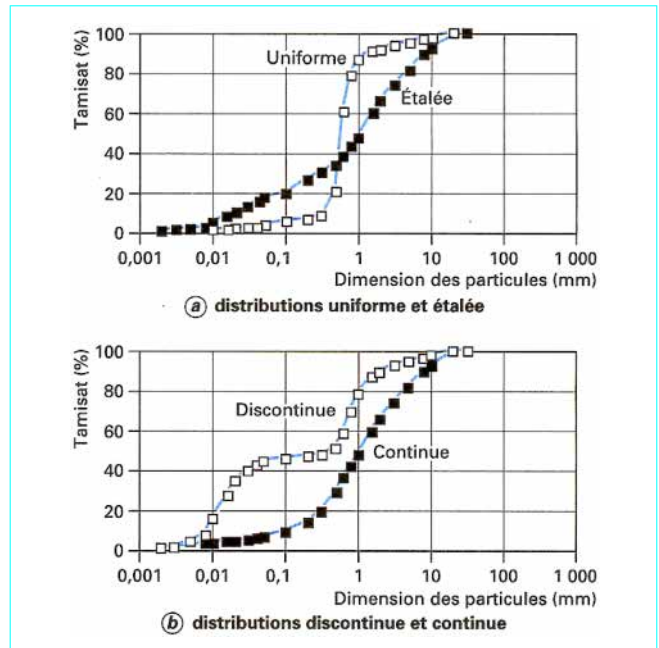


Figure 5 – Formes types de courbes granulométriques

— en ordonnée, le pourcentage en masse du matériau total, de la fraction du sol dont les particules ont un diamètre moyen inférieur à celui repéré par l'abscisse correspondante (tamisat).

Si l'on note D_p le diamètre correspondant à l'ordonnée p (%), on appelle :

- diamètre efficace : D_{10} ;
- coefficient d'uniformité ou de Hazen, le rapport $C_U = D_{60}/D_{10}$;
- coefficient de courbure, le rapport $C_Z = (D_{30})^2/(D_{10} D_{60})$

Suivant la forme de la courbe granulométrique, on parle de granularité uniforme ou étalée (figure 5a), discontinue ou continue (figure 5b). La forme de la courbe granulométrique est liée notamment au mode de formation (origine, transport et dépôt) du sol. Les sables éoliens, par exemple, ont une granularité uniforme.

2.3.1.2 Classes granulaires

Les classes granulaires sont définies sur la base de critères purement granulométriques. Le tableau 3 indique les classes utilisées traditionnellement en France et les classes recommandées par la Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondations (SIMSTF).

Tableau 3 – Classes granulaires

SIMSTF (1977)		France (traditionnelle)	
Dimensions	Nom	Dimensions	Nom
>200 mm	Blocs	> 200 mm	Blocs
60 à 60 mm	Galets, cailloux	20 à 200 mm	Galets, cailloux
20 à 60 mm	Gravier grossier	2 à 20 mm	Gravier
6 à 20 mm	Gravier moyen	0,2 à 2 mm	Sable grossier
2 à 6 mm	Gravier fin	20 à 200 µm	Sable fin
0,6 à 2 mm	Sable grossier	2 à 20 µm	Limon
0,2 à 0,6 mm	Sable moyen	< 2 µm	Argile
0,06 à 0,2 mm	Sable fin		
20 à 60 µm	Limon grossier		
6 à 20 µm	Limon moyen		
2 à 6 µm	Limon fin		
< 2 µm	Argile		

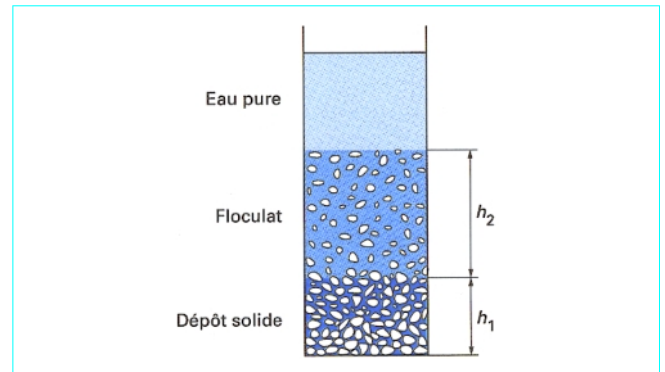


Figure 6 – Essai d'équivalent de sable

L'équivalent de sable E_S , qui s'exprime en pourcentage, est égal à :

$$E_S = 100 \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

L'équivalent de sable d'un sable propre, voisin de 100, tombe à 40 et moins en présence de quelques pour-cent de fines argileuses. Au-dessous de 40, l'équivalent de sable n'est plus une grandeur significative.

2.3.3 Limites d'Atterberg (sols fins)

2.3.3.1 Notion de consistance

Lorsque l'on fait décroître progressivement la teneur en eau d'un échantillon de sol, on constate qu'il passe successivement par plusieurs états, dont la description a été proposée par l'agronome suédois Atterberg :

- un **état liquide**, à teneur en eau élevée. Le sol se répand lorsqu'on le dépose sur une surface plane. Il ne possède aucune résistance. Ses particules sont pratiquement séparées par l'eau ;
- un **état plastique**. Le sol est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il subit de grandes déformations, en grande partie irréversibles, sans variation notable de volume et sans apparition de fissures. Le sol est malléable et conserve la forme qu'on lui donne. Lorsqu'on le triture, il peut perdre une partie de sa résistance. Certains sols, dits thixotropes, ont la propriété de récupérer avec le temps une partie de leur résistance ;
- un **état solide**. Le sol a le comportement d'un solide. L'application d'un effort n'entraîne que de faibles déformations. Le passage à l'état solide s'effectue d'abord avec réduction du volume ou retrait, puis à volume constant, sans retrait.

2.3.3.2 Limites de consistance ou limites d'Atterberg

Les teneurs en eau séparant les divers états de consistance du sol dépendent de la nature du sol. On les appelle (figure 7) :

- limite de liquidité w_L (limite entre l'état liquide et l'état plastique) ;
- limite de plasticité w_p (limite entre l'état liquide et l'état solide) ;
- limite de retrait w_s (limite entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait).

Les limites de liquidité, de plasticité et de retrait sont déterminées au moyen d'essais conventionnels. Les essais s'effectuent sur le mortier du sol (fraction inférieure à 420 µm).

■ La **limite de liquidité** se détermine au moyen d'un appareil normalisé, appelé « coupelle de Casagrande » (figure 8), qui est constitué d'une coupelle d'une dizaine de centimètres de diamètre, d'un socle de rigidité fixée et d'un système cranté permettant de soulever et de laisser retomber la coupelle d'une hauteur constante

2.3.1.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à 80 µm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie humide. Les dimensions des mailles des tamis (toile tressée) croissent en progression géométrique de raison $10/10$. Les dimensions des mailles des tamis les plus couramment utilisés sont les suivantes : 80 mm ; 50 mm ; 32 mm ; 20 mm ; 10 mm ; 5 mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,4 mm ; 0,1 mm ; 0,08 mm (80 µm).

Au-dessous de 63 µm, le tamisage n'est plus possible car les tamis s'encrassent et se déforment. L'analyse granulométrique se poursuit alors par sédimentométrie. La méthode est basée sur la loi de Stokes, applicable aux suspensions de faible concentration, qui donne la valeur limite de la vitesse de décantation de particules sphériques en suspension dans un liquide au repos, en fonction de leur diamètre :

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_w) g}{18 \eta} D^2$$

avec η viscosité du fluide,
 D diamètre de la sphère,
 ρ_s masse volumique des particules du sol,
 ρ_w masse volumique de l'eau.

Pour les particules fines et très fines d'un sol ayant des formes irrégulières (disques ou plaquettes), la loi de Stokes ne permet de définir qu'un diamètre équivalent de la particule.

L'essai consiste à mesurer au densimètre la densité de la suspension à divers instants.

L'utilisation de passeroles (plaques métalliques perforées), plus résistantes, à la place de tamis (fils métalliques tressés) devrait se développer dans le cadre de l'harmonisation des procédures d'essais en Europe.

2.3.2 Équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable, que l'on réalise sur les sols peu plastiques, contenant peu de particules fines, permet de caractériser globalement la proportion des particules fines ou très fines dans le sol. Il prolonge en fait la notion d'indice de plasticité (§ 2.3.3.3) pour les valeurs faibles de cet indice, où il perd sa signification.

L'essai s'effectue sur la fraction du sol inférieure à 5 mm. Il consiste à laver énergiquement (avec agitation) le sol dans une solution floculante normalisée à base de Cl_2Ca . Les éléments fins ou très fins, séparés des grains plus gros par agitation mécanique, entrent en suspension et floculent dans la solution chargée en électrolyte. Après un léger repos (20 min), on mesure les niveaux supérieurs h_1 du sédiment et h_2 du floculat (figure 6).

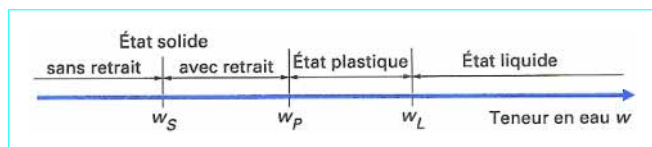


Figure 7 – États d'un sol en fonction de sa teneur en eau



Figure 8 – Appareillage pour la détermination de la limite de liquidité

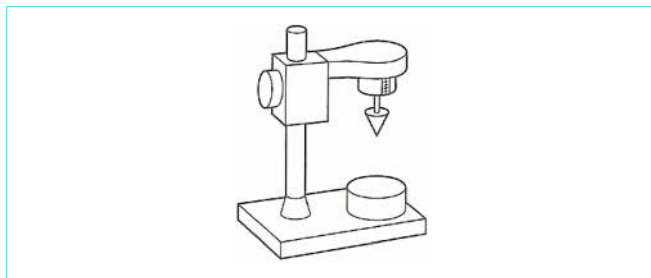


Figure 9 – Pénétromètre de consistance ou pénétromètre à cône tombant

(10 mm) à raison d'un coup par seconde. Le sol argileux, préparé à une teneur en eau fixée, est étalé dans la coupelle puis entaillé avec une spatule normalisée. On compte le nombre N des coups nécessaires pour que les lèvres de l'entaille se rapprochent sur 10 mm de longueur. L'opération est renouvelée pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité correspond par convention à $N = 25$ coups.

La limite de liquidité peut aussi être déterminée d'après l'enfoncement d'un cône normalisé de 30° d'ouverture et de masse 80 g (avec sa tige), qui est placé au contact de la surface de l'échantillon de sol de teneur en eau fixée (figure 9). La profondeur d'enfoncement Δh du cône sous son propre poids en 5 s est notée. On renouvelle l'opération pour différentes valeurs de la teneur en eau, puis on détermine par interpolation la limite de liquidité, qui correspond à un enfoncement de 17 mm.

■ La **limite de plasticité** est par convention la teneur en eau au-dessous de laquelle il devient impossible de confectionner des bâtonnets de 3 mm de diamètre et de 100 mm de longueur sans qu'ils se rompent ou s'émiettent. L'essai s'effectue à la main, comme montré sur la figure 10.

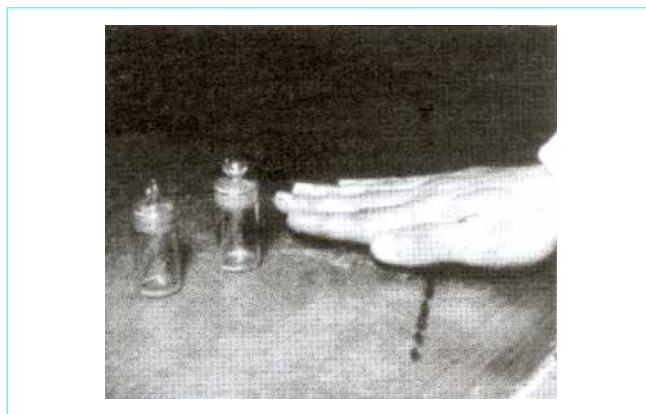
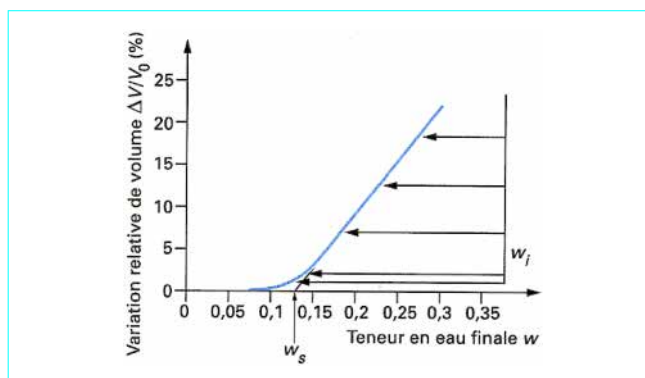


Figure 10 – Détermination de la limite de plasticité

Figure 11 – Détermination de la limite de retrait w_s

■ Pour déterminer la **limite de retrait**, on fabrique plusieurs échantillons de sol de même volume initial V_0 et de même teneur en eau initiale w_i . On les sèche pendant des durées différentes et l'on trace la courbe de variation relative du volume de l'échantillon en fonction de sa teneur en eau finale (figure 11). La limite de retrait marque la limite d'influence de la teneur en eau sur le volume du sol.

La précision de ces essais est de l'ordre d'un point (1 %) de teneur en eau.

Sauf pour les sols de formation récente, où elle est proche de la limite de liquidité, la teneur en eau des sols en place est en général voisine de la limite de plasticité.

2.3.3.3 Indice de plasticité

L'indice de plasticité est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité du sol :

$$I_P = w_L - w_P$$

Il mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique. Suivant la valeur de leur indice de plasticité, les sols peuvent se classer comme indiqué dans le tableau 4.

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés. On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse, mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

Tableau 4 – Degré de plasticité des sols

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_P < 5$	Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_P < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_P < 50$	Sol plastique
$50 < I_P$	Sol très plastique

À titre d'exemple, les valeurs les plus fortes de cet indice sont obtenues avec les montmorillonites et, plus particulièrement, celles chargées du cation sodium (Na^+).

2.3.3.4 Abaque de plasticité

Pour des sols de même origine, les limites de plasticité et de liquidité, ou encore l'indice de plasticité et la limite de liquidité, sont liés par une relation linéaire empirique, de forme générale :

$$I_P = a(w_L - b)$$

La droite moyenne a pour équation la relation suivante, dite « relation de Casagrande » :

$$I_P = 0,73(w_L - 20)$$

Cette droite (ligne A) est tracée sur la figure 12, avec des données relatives à différents sols naturels. Elle sera utilisée pour la classification des sols fins (§ 3.2).

2.3.4 Essais au bleu de méthylène

Les essais au bleu de méthylène mesurent la surface spécifique des particules argileuses du sol. L'essai dit « à la tache » mesure la surface spécifique totale (interne + externe) des particules, tandis que l'essai au bleu optique, dit « turbidimétrique », mesure leur surface spécifique externe.

2.3.4.1 Essai au bleu de méthylène (à la tache)

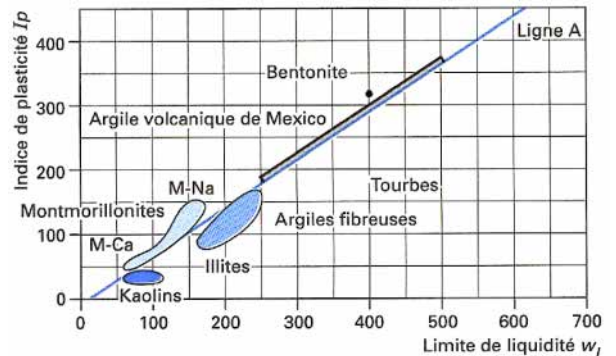
La valeur de bleu, notée V_B et exprimée en grammes de bleu de méthylène par 100 g de matériau, est la quantité de ce colorant qui est nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces internes et externes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

L'essai s'effectue sur 30 g de matériau, mis à tremper dans 0,2 L d'eau et maintenus en permanence sous agitation. On procède à des additions de bleu de méthylène jusqu'à ce que toutes les particules du sol soient saturées. La saturation est déterminée par le test de la tache, en observant la formation d'une aurole bleue sur le papier filtre où l'on dépose une goutte de solution.

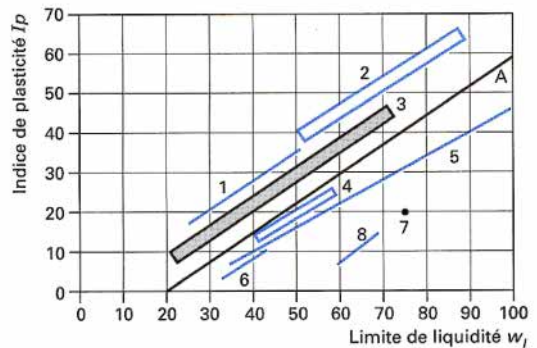
2.3.4.2 Essai au bleu turbidimétrique

L'essai est réalisé sur la fraction fine du sol (particules de dimensions inférieures à 80 μm). Les particules fines sont mises en suspension dans la cuve d'un spectrophotomètre et l'on mesure le coefficient d'absorbance de la suspension au fur et à mesure que l'on injecte du bleu de méthylène. La valeur de bleu turbidimétrique V_{Bt} est déduite de ces mesures et de mesures de références effectuées sans sol.

Les différences des valeurs de bleu V_B et V_{Bt} reflètent la complexité de la structure des particules argileuses (tableau 5).



(a) position des grandes classes de sols (Casagrande, 1932)



- 1 argile du Venezuela
- 2 argile Gumbo (Missouri, Arkansas, Texas)
- 3 argiles glaciaires (Ouest du Canada, Nord-Ouest des États-Unis)
- 4 argiles kaoliniques
- 5 limon organique et argile (Flessingue)
- 6 limon sableux micacé (Carterville)
- 7 poussière de mica
- 8 kaolin-mica

(b) position de quelques sols types (Terzaghi et Peck, 1967)

Figure 12 – Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols types

Tableau 5 – Valeurs de bleu et valeurs de bleu turbidimétrique (en g de bleu/100 g de sol)

Minéraux	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Valeur de bleu V_B	1	3,6	31
Valeur de bleu turbidimétrique V_{Bt}	0,9	1,8	3,6

2.3.5 Teneur en carbonate de calcium

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol C_{CaCO_3} , exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du sol.

Les sols fins contenant du carbonate de calcium peuvent être désignés comme indiqué dans le tableau 6, en complément de leur classification géotechnique (§ 3.2).

Tableau 6 – Dénomination des sols fins calcaires	
Pourcentage de CaCO ₃	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

2.3.6 Teneur en matières organiques

La teneur en matières organiques C_{MO} est le rapport de la masse de la matière organique présente dans le sol à la masse totale des matières solides du sol. La méthode classique de détermination de la masse des matières organiques consiste à les oxyder par un mélange d’acide sulfurique concentré et de bichromate de potassium porté à ébullition. La mesure de la « perte au feu » remplace souvent la méthode précédente. Elle consiste à sécher le sol à l’étuve à 105 °C, puis à le passer au four à 550 °C pour brûler toute la matière organique.

La teneur en matières organiques C_{MO} et la perte au feu C_{PF} sont liées par la relation expérimentale :

C_{MO} = 100 – 1,04 (100 – C_{PF})

Suivant leur teneur en matières organiques, les sols peuvent être qualifiés de :

- faiblement organiques si C_{MO} < 10 %
- moyennement organiques si 10 % < C_{MO} < 30 %
- fortement organiques si 30 % < C_{MO}

Les tourbes ont des teneurs en matières organiques comprises entre 50 et 100 %.

2.3.7 Degré d’humification des matières organiques

Les matières organiques d’origine végétale présentes dans le sol peuvent être dans un état de décomposition plus ou moins avancée. Le test d’humification de von Post permet de décrire l’état de décomposition de ces matières organiques par référence à une échelle empirique à 10 classes notées H1 à H10 (la classe H1 correspond à une masse végétale peu humifiée, dans laquelle la matière végétale a conservé sa structure, et la classe H10 à un sol organique totalement humifié, constitué d’une pâte de particules de très faibles dimensions).

L’essai consiste à comprimer un certain volume de matériau et à observer la nature et la couleur du liquide qui en sort, que l’on compare à une échelle de couleurs préétablie. La compression peut être réalisée à la main ou au moyen d’un système mécanique.

2.3.8 Analyse minéralogique de la fraction argileuse

Si le sol contient une proportion appréciable de minéraux argileux, il peut être intéressant de procéder à leur identification ainsi qu’à celle des cations adsorbés. Si l’identification qualitative est relativement aisée, la détermination quantitative des différentes espèces argileuses est plus délicate et fait appel à des méthodes d’analyse chimique relativement élaborées, telles que la diffraction des rayons X, la thermogravimétrie et l’analyse thermique différentielle,

la mesure des surfaces spécifiques, la spectrométrie infrarouge, etc., couplées judicieusement avec des méthodes chimiques classiques ou modernes (comme l’analyse par absorption atomique) et l’observation de lames minces au microscope électronique.

2.3.9 Activité des argiles

Les propriétés de plasticité des sols sont dues presque exclusivement à l’interaction des particules de dimensions argileuses (< 2 µm) avec l’eau. Si la nature de l’argile est constante, l’indice de plasticité du sol est proportionnel à la quantité d’argile présente dans le sol. L’activité A_c, définie comme le rapport de l’indice de plasticité I_P à la teneur en particules argileuses (C₂, teneur en particules de dimensions inférieures à 2 µm) :

A_c = I_P / C₂

est donc une caractéristique du sol, qui dépend principalement de sa nature minéralogique.

Le tableau 7 donne les activités des particules argileuses les plus courantes. En fonction de la valeur de l’activité A_c, les sols peuvent être groupés en classes (tableau 8).

Tableau 7 – Activité des minéraux argileux	
Type de minéral	Activité A _c
Quartz	0
Calcite	0,18
Kaolinite	0,46
Illite	0,90
Montmorillonite sodique	7,5
Montmorillonite calcique	1,5

Tableau 8 – Classes d’activité	
Activité A _c	Dénomination
0 < A _c < 0,5	inactif
0,5 < A _c < 0,75	peu actif
0,75 < A _c < 1,25	normal
1,25 < A _c < 2	actif
2 < A _c	très actif

La valeur de bleu (§ 2.3.4) est aussi une mesure de l’activité des argiles.

2.4 Caractéristiques d’état et essais d’identification correspondants

Les caractéristiques d’état des sols sont déterminées sur des échantillons intacts ou non remaniés.

2.4.1 Teneur en eau

Pour un sol saturé, la teneur en eau est directement liée à l’indice des vides. Elle permet donc de caractériser l’état du sol. La teneur en eau se mesure conventionnellement en portant le sol à la température de 105 °C jusqu’à ce que sa masse se stabilise. Cela

correspond au départ de l'eau libre du sol. L'échantillon de sol est pesé avant et après son passage à l'étuve. Pour les sols contenant des matières organiques, la température d'étuvage est limitée à 60 °C, pour éviter de brûler les matières organiques. C'est aussi le cas des sols contenant du gypse (le gypse perd son eau de constitution vers 65 °C).

Dans les sols non saturés, l'eau ne remplit pas les pores du sol et le comportement du sol est lié directement à l'indice des vides et au degré de saturation (§ 2.4.3).

2.4.2 Indice de consistance

L'état d'un sol fin ou cohérent plastique s'apprécie également par l'indice de consistance. L'indice de consistance I_c situe en valeur relative la teneur en eau du sol dans la plage de plasticité. Il est égal au rapport :

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_P}$$

On utilise aussi l'indice de liquidité I_L , égal au complément à un de l'indice de consistance :

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P} = 1 - I_c$$

Ces deux indices peuvent avoir des valeurs sortant de l'intervalle [0, 1].

On peut associer à l'indice de consistance d'un sol un ordre de grandeur de sa résistance, comme indiqué dans le tableau 9. (La résistance à la compression simple R_c est la pression maximale que peut supporter une éprouvette cylindrique de sol chargée selon son axe, voir article *Résistance au cisaillement* dans cette rubrique [C 216]).

2.4.3 Indice des vides

L'indice des vides e caractérise l'état des sols, saturés ou non saturés. La mesure de l'indice des vides nécessite celle de la masse volumique du sol sec ρ_d et de la masse volumique des particules ρ_s :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Pour les sols cohérents non saturés, elle est complétée par le degré de saturation S_r , qui se détermine à partir des mesures de e et w par la relation :

$$S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w}$$

2.4.4 Indice de densité

L'indice des vides ne traduit pas à lui seul le degré de serrage des particules des sols grenus ou pulvérulents, car il dépend largement de la granularité du sol et de la forme des grains. C'est pourquoi on caractérise le sol par son indice de densité I_D (appelé antérieurement « densité relative », D_r), qui situe en valeur relative l'indice des vides dans sa plage de variation :

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

Les états extrêmes de densité d'un sol (indice des vides maximal e_{\max} et indice des vides minimal e_{\min}) sont obtenus par des procédures normalisées (par vibration, d'une part, et par déversement à l'entonnoir, d'autre part). Pratiquement, pour les sables propres, l'indice des vides varie entre 0,43 et 1.

2.5 Conclusions

■ Un sol se caractérise par la nature et les propriétés de ses particules et par son état.

La nature du sol est définie par sa granularité, sa plasticité (ou son équivalent de sable), la nature de ses particules (minéraux, matières organiques).

L'état du sol est défini par l'indice des vides (ou la teneur en eau) pour les sols saturés et par l'indice des vides et le degré de saturation (ou la teneur en eau) pour les sols non saturés. Il s'apprécie également en valeur relative par l'indice de consistance pour les sols cohérents (ou fins) et l'indice de densité pour les sols pulvérulents (ou grenus). Ces essais sont récapitulés dans le tableau 10.

■ La description d'un sol donne des indications sur :

- sa granularité (indication de ses deux classes granulaires principales) ;
- la forme et l'état de surface de ses grains ;
- sa plasticité ou son équivalent de sable ;
- son état de densité ou de consistance ;
- sa couleur, son odeur ;
- sa structure visible à l'œil nu ;
- son origine ou son niveau géologique ;
- son appellation régionale ou locale.

Tableau 9 – Indice de consistance et état des sols fins (d'après [3] et [5])

Consistance du sol	R_c (kPa)	I_c	Identification en place
Très mou	$R_c < 25$	< 0	On peut facilement enfoncer le poing sur plusieurs cm
Mou	$25 < R_c < 50$	0	Le pouce s'enfonce facilement sur plusieurs cm
Mi-consistant	$50 < R_c < 100$	↓	Le pouce peut être enfoncé sur plusieurs cm avec un effort modéré
Consistant	$100 < R_c < 200$		Empreinte du pouce mais pénétration seulement avec un grand effort
Très consistant ou raide	$200 < R_c < 400$	1	Facile à rayer avec l'ongle du pouce
Extrêmement consistant ou très raide	$400 < R_c$	> 1	Difficile à rayer avec l'ongle du pouce

Tableau 10 – Essais d’identification d’un sol

Sol	Nature	État
Pulvérulent (grenu)	Granularité (analyse granulométrique)	Indice des vides
	Équivalent de sable	Teneur en eau
	Teneur en carbonates	Indice de densité
	Masse volumique des particules	
Cohérent (fin)	Granularité (sédimentométrie)	Indice des vides
	Limites d’Atterberg	Teneur en eau
	Activité	Degré de saturation
	Teneur en carbonates	Indice de consistance
	Teneur en matières organiques	
	Masse volumique des particules	

Exemples : sable de Beauchamp du bassin parisien ; sable fin limoneux, uniforme, à grains ronds, brun, faiblement plastique, marin, du bartonien inférieur.

- Elle est complétée le cas échéant par :
 - la teneur en matières organiques ;
 - la teneur en carbonate de calcium.

■ Les essais d’identification ont souvent un caractère conventionnel et doivent être réalisés en respectant un processus opératoire précis. La plupart de ces essais sont définis par des normes françaises (cf. [Doc. C 208]).

2.6 Valeurs numériques

Le tableau 11 donne les caractéristiques physiques de quelques sols types.

3. Classification des sols

3.1 Principe des classifications des sols

Les systèmes de classification des sols sont ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d’une campagne de sondages et d’établir des coupes géotechniques du terrain.

Ces coupes sont précieuses pour l’ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n’entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement.

Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols :

- les uns sont basés sur l’aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. Ces classifications présentent en général l’inconvénient de ne pouvoir être étendues à d’autres usages que celui pour lequel elles ont été établies ;
- les autres sont basés sur certains essais d’identification. Parmi ces systèmes, plusieurs se réfèrent uniquement à la granularité du sol (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés. D’autres utilisent simultanément

la granularité et la plasticité du sol. On décrira ici l’une de ces classifications, dite « classification des laboratoires des ponts et chaussées » ou « classification LPC », qui n’est autre que la classification USCS (*Unified Soil Classification System*), adaptée aux seuils granulométriques utilisés en France (1965), puis la classification LPC modifiée pour mieux décrire les sols contenant des matières organiques (1974/1980). La classification des sols pour les terrassements routiers, qui est utilisée en France pour les études de terrassements et est souvent utilisée dans les rapports d’études géotechniques de tracés, sera ensuite présentée.

3.2 Classification des sols LPC/USCS

La classification LPC (1965) utilise les résultats d’essais classiques d’identification des sols :

- des critères granulométriques :
 - les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm) ;
 - la forme de la courbe granulométrique :
 - coefficient d’uniformité ou de Hazen C_u ;
 - coefficient de courbure C_z ;
- les caractéristiques de plasticité w_L et I_P , et la ligne A d’équation $I_P = 0,73 (w_L - 20)$ (relation de Casagrande, § 2.3.3.4) ;
- la teneur en matières organiques.

La classification peut également s’effectuer à partir de l’observation visuelle du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier [10].

La classification débouche sur 15 sols types, affectés chacun d’un symbole à deux lettres, prises dans les trois ensembles suivants.

- **Éléments du sol**
 - G Gravier. Le gravier est la fraction principale
 - S Sable. Le sable est la fraction principale
 - L Limon ou limoneux
 - A Argile ou argileux
 - T Tourbe
 - O Organique. Le sol contient des matières organiques
- **Granularité du sol**
 - b Bien gradué
 - m Mal gradué
- **Plasticité du sol**
 - t Très plastique
 - p Peu plastique

La classification LPC globale est décrite sur la figure 13. La figure 14 donne la classification des sols fins et le tableau 12 la classification des sols grenus.

La classification LPC/USCS présente l’avantage d’être d’un manie- ment relativement simple et d’être utilisée dans de nombreux pays autres que la France. Toutefois, elle a été complétée ultérieurement pour mieux décrire les sols organiques, ce qui a donné la classi- fication LPC modifiée décrite dans la section suivante.

3.3 Classification LPC modifiée

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %). Seuls les sols comportant moins de 10 % de matières organiques continuent d’être classés

Tableau 11 – Caractéristiques physiques de quelques sols

Nature et origine	Étage géologique	Teneur en eau naturelle w	Limite de liquidité w_L	Limite de plasticité w_P	Indice de plasticité I_P	Indice de consistance I_c	Indice des vides e	Porosité n	Teneur en matières organiques (%)	Teneur en CaCO_3 (%)
Sols courants français										
Sable de Fontainebleau (propre)	Stampien	6					0,75	0,43		
Sable de Fontainebleau (pollué)	Stampien	10			7		0,55	0,35		
Limon d'Orly (moyennement plastique)	Quaternaire	23	32	18	14	0,65	0,60	0,40		5
Limon plastique du Perche	Crétacé supérieur	50	75	48	27	1	1,40	0,60		0
Argile de Dozulé (très raide) (Seine-Maritime)	Callovo-oxfordien	19	48	21	27	1	0,50	0,33		
Argile verte plastique de Romainville	Sannoisien	30	65	30	35	1	0,80	0,45		14
Argile de Pomoy (Vosges) plastiques, mi-consistante	Rhétien	37	72	33	39	0,90	1	0,50		3
Argile de Narbonne	Quaternaire	30	41	21	20	0,55	0,80	0,45	1	18
Vase de Cran (Morbihan) très plastique, très molle	Quaternaire	108	125	43	82	0	2,90	0,75	3	
Tourbe de Bourgoïn (Isère)	Quaternaire	580					9	0,90	55	
Tourbe du Lamentin (Martinique)	Quaternaire	430					9	0,90	45	
Marne blanche de Pantin plastique, mi-consistante	Ludien	21	52	20	32	1	0,6	0,38		69
Marne de Vitrolles, Rognac moyennement plastique, raide	Danien	12	37	19	18	1,4	0,5			57
Craie franche de la région parisienne	Sénonien	27			< 10		0,75	0,43		98
Argiles types										
Kaolinite			52	31	21					
Illite			70	35	35					
Montmorillonite Na^+			600	50	550					
Montmorillonite Ca^{++}			250	50	200					
Sols types étrangers										
Argile bleue de Boston		40	42	22	20	0,1	0,75	0,43		
Argile de Londres	Éocène	29	76	29	47	1				
Argile de Mexico	Origine volcanique		500	375	125		3,383, 1350	0,77 à 0,93	} d'après [1]	
Terre à diatomées			115	0	115		3,11	0,755		

comme les sols fins. Pour les teneurs en matières organiques plus fortes, l'accent est mis sur le degré de décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test de von Post (§ 2.3.7). La classification débouche sur vingt-deux types de sols, qui sont :

- des sols grenus : Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, SL
- des sols fins : At, Ap, Lt, Lp

- des sols faiblement organiques : fO-At, fO-Ap, fO-Lt, fO-Lp
- des sols moyennement organiques : mO-a, mO-sf, mO-f
- des sols très organiques : tO-a, tO-sf, tO-f.

Les symboles des sols grenus et des sols fins sont les mêmes que dans la classification LPC/USCS. Pour les sols organiques,

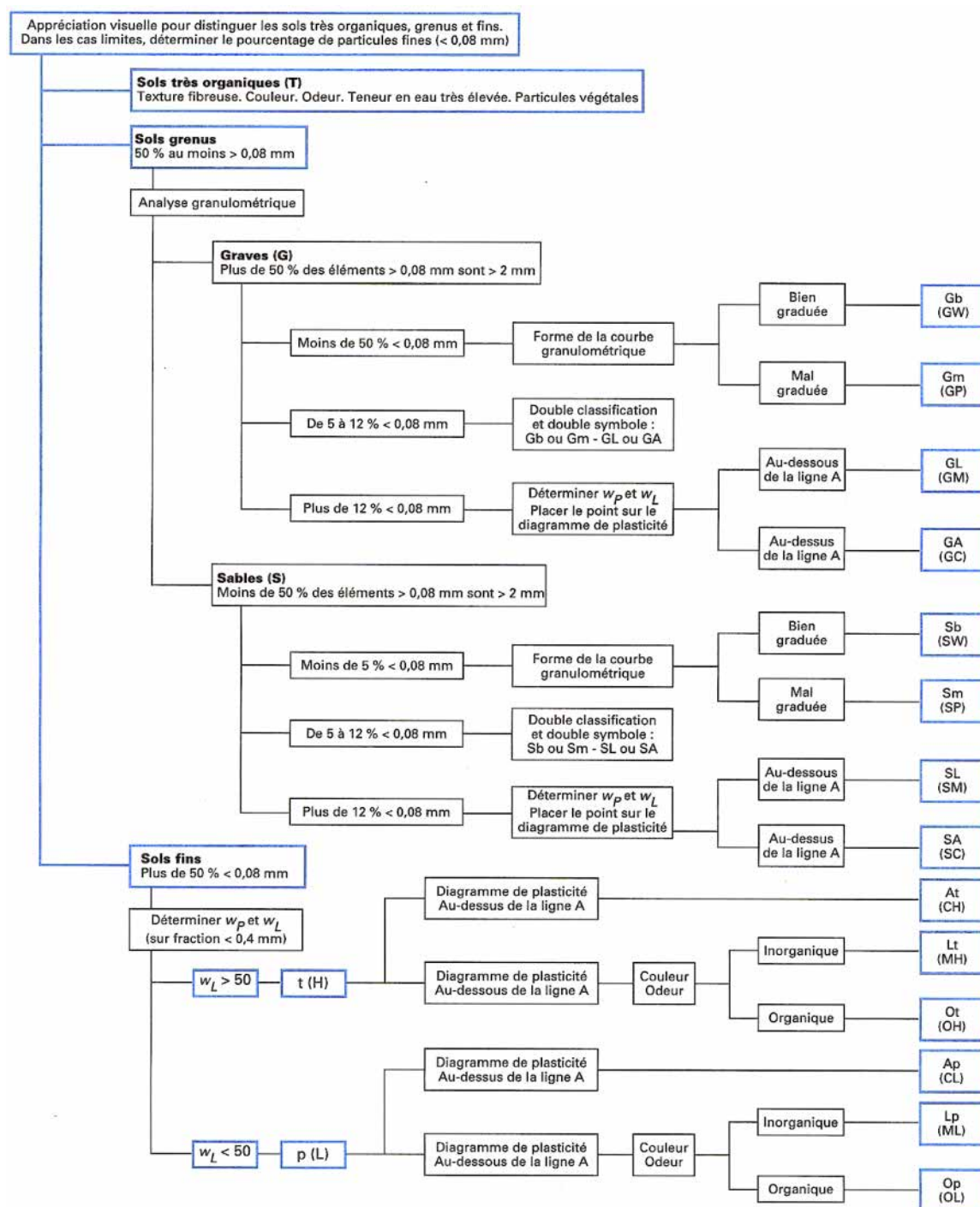


Figure 13 – Classification LPC/USCS des sols en laboratoire

Tableau 12 – Classification des sols grenus en laboratoire (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm)

Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_U = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < C_Z = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (figure 14)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A (figure 14)	Grave argileuse
Sable	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_U = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < C_Z = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (figure 14)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A (figure 14)	Sable argileux

Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5 et 12 %, on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL.

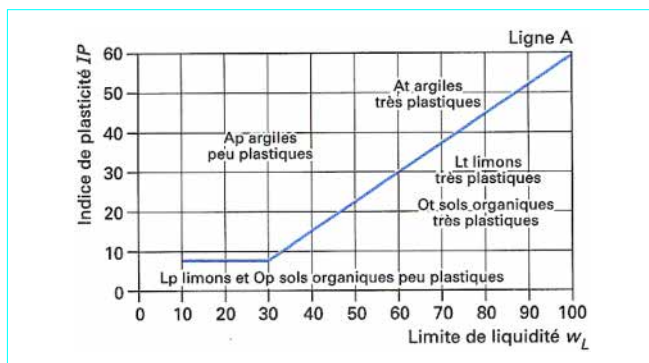


Figure 14 – Classification des sols fins en laboratoire.
Diagramme de plasticité

les symboles a, sf et f signifient « à matière organique amorphe », « à matière organique semi-fibreuse » et « à matière organique fibreuse ».

La figure 15 présente le schéma général de la classification des sols LPC modifiée (1974/1980), et détaille les modifications apportées par rapport à la classification LPC/USCS.

3.4 Classification des sols pour les terrassements routiers

Une classification particulière des sols est utilisée en France pour les travaux de terrassements routiers. Cette classification, dite classification GTR, définit des classes de sols corrélées avec l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantiers et leur comportement mécanique ultérieur. Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés sur la figure 16. La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA [6] et dans la norme NF P 11-300.

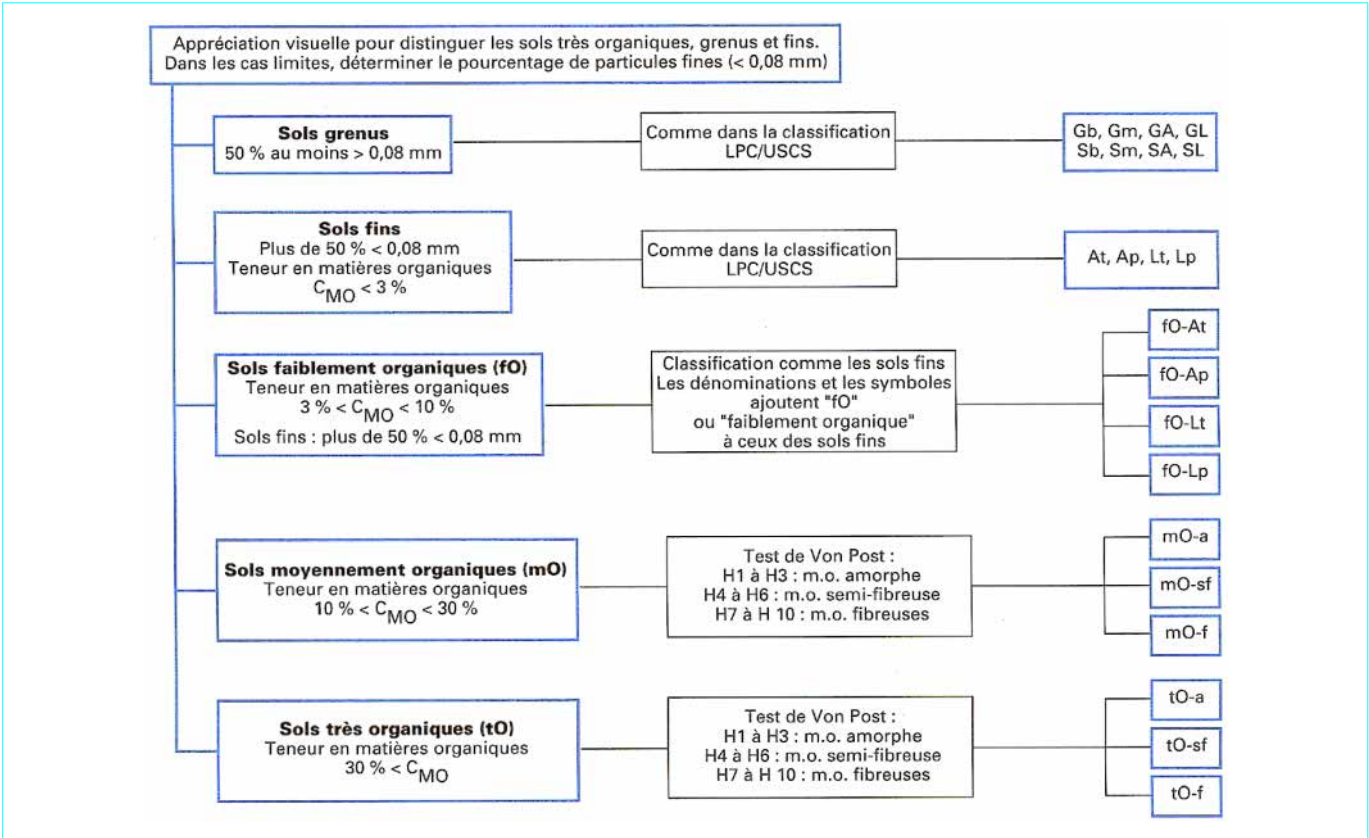


Figure 15 – Classification des sols LPC modifiée (1974/1980)

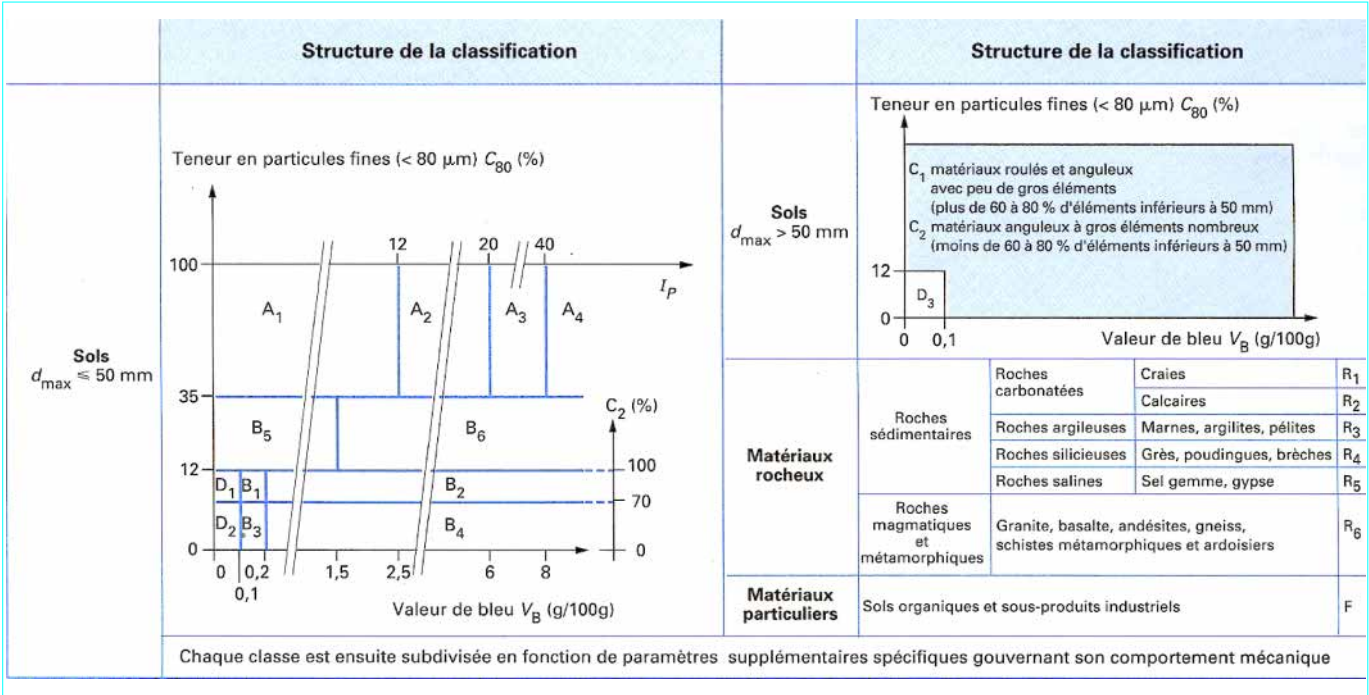


Figure 16 – Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers

Description, identification et classification des sols

par **Jean-Pierre MAGNAN**

Ingenieur en chef des Ponts et des chaussées

Directeur technique au Laboratoire central des ponts et chaussées

Professeur de mécanique des sols et des roches à l'École nationale des ponts et chaussées

Références bibliographiques

- [1] CAQUOT (A.) et KERISEL (J.). – *Traité de mécanique des sols*. 514 p., Gauthier-Villars (1966).
- [2] CASAGRANDE (A.). – *Research on the Atterberg limits of soils*. Public Roads, vol. 13, n° 8, pp. 121-136 (1932).
- [3] COSTET (J.) et SANGLERAT (G.). – *Cours pratique de mécanique des sols*. 628 p., Dunod (1969).
- [4] GRIM (R.E.). – *Clay mineralogy*. 608 p., McGraw Hill (1968).
- [5] LEONARDS (G.A.). – *Les fondations* (traduit de l'américain). 1124 p., Dunod (1968).
- [6] LCPC-SETRA. – *Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique*. Fascicule 1 : Principes généraux, 98 p. Fascicule 2 : Annexes techniques, 101 p. Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris et Service d'études techniques des routes et autoroutes, Bagneux (1992).
- [7] MAGNAN (J.-P.). – *Classification géotechnique des sols*. 1. À propos de la classification LPC. Revue de janv.-fév. 1980. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 105, pp. 49-52 janv.-fév. 1980.
- [8] PERRIN (J.). – *Classification des sols organiques*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 69, pp. 39-47 janv.-fév. 1974.
- [9] POLUBARINOVA-KOCHINA (P. Ya.). – *Theory of ground water movement*. Traduit du russe (Gostekhizdat, Moscou, 1952). Princeton University Press, N.J., 613 p. (1962).
- [10] SCHÖN (Ch.). – *Classification géotechnique des sols basée sur la classification USCS*. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers, n° 16, pp. 3-5 à 3-16 nov.-déc. 1965.
- [11] SIMSTF (Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations). – *Liste de symboles, unités et définitions*. Comptes-rendus du 9e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Tokyo, vol. 3, pp. 156-170 (1977).
- [12] TERZAGHI (K.) et PECK (R.). – *Mécanique des sols appliquée* (traduit de l'anglais), 1967, Dunod (épuisé). Édition originale : *Soil mechanics in engineering practice*, 729 p., John Wiley and Sons, 2^e édition (1967).
- [13] VOÏNOVITCH (I.A.) (Coordinateur) et al. – *L'analyse minéralogique des sols argileux* 93 p. Éditions Eyrolles, Paris (1971).
- [14] HOLTZABFEL (T.). – *Les minéraux argileux. Préparation, analyse, diffractométrie et détermination*. 135 p., Éd. Société géologique du Nord, publication n° 12 (1985).

Normes françaises

Association française de normalisation (AFNOR)

NF P 94-040	10.93	Sols : reconnaissance et essais. Méthode simplifiée d'identification de la fraction 0-50 mm d'un matériau grenu. Détermination de la granulométrie et de la valeur de bleu.	NF P 94-056	03.96	Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par tamisage à sec après lavage.
NF P 94-050	09.95	Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage.	NF P 94-057	05.92	Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.
NF P 94-051	03.93	Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle. Limite de plasticité au rouleau.	XP P 94-058	10.93	Sols : reconnaissance et essais. Détermination de l'état de décomposition (humification) des sols organiques. Essai de von Post.
NF P 94-052-1	11.95	Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Partie 1 : Limite de liquidité. Méthode du cône de pénétration.	NF P 94-059	09.92	Sols : reconnaissance et essais. Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents.
NF P 94-053	10.91	Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.	NF P 94-068	11.93	Sols : reconnaissance et essais. Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.
NF P 94-054	10.91	Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthodes du pycnomètre à eau.	XP P 18-597		Granulats. Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines.
NF P 94-055	12.93	Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol. Méthode chimique.	XP P 18-598		Granulats. Équivalent de sable.
			NF P 11-300	09.92	Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.