

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

2024-2025

PLAN :

- Chapitre 0 : Généralités
- Chapitre 1 : Les granulats
- Chapitre 2 : Les liants – Le ciment
- Chapitre 3 : Le béton
- Chapitre 4 : Les liants hydrocarbonés
- Chapitre 5 : L'acier
- Chapitre 6 : Le bois
- Chapitre 7 : Les matériaux silicates
- Chapitre 8 : Les géotextiles
- Chapitre 9 : Autres matériaux de construction

GÉNÉRALITÉS

Matériau : Matière première choisie en raison des propriétés spécifiques, utilisée naturellement ou mise en œuvre par des procédés techniques pour l'obtention d'un produit final possédant les caractéristiques convenues pour la construction.

Classification des matériaux :

- **Matériaux de résistance :** résistent contre les surcharges, constituent l'ossature. (pierres, terres cuites, béton, métaux, bois, etc.)
- **Matériaux de protection :** ils ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux (Enduits, Peintures, Bitumes, etc.)

GÉNÉRALITÉS

Propriétés des matériaux :

Le choix des matériaux repose sur les propriétés qu'il présente :

- **P. physiques** : qui mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité.
- **P. chimiques** : qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif (corrosion, acides...)
- **P. mécaniques** : qui reflètent le comportement des matériaux déformés par les forces.

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La densité.
- La masse volumique apparente.
- La masse volumique absolue.
- La porosité et la compacité.
- La teneur en eau.

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La densité :

C'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température de 20°C.

Elle est exprimée sans unité.

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La masse volumique apparente :

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm³; kg/m³; T/m³).

$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de la matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores).

Elle est exprimée en (g/cm³; kg/m³; T/m³).

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{V_{ap} - V_v}$$

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La porosité et la compacité :

La porosité est le rapport du volume vide au volume total de la matière :

$$P = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \cdot 100 (\%)$$

La compacité est le rapport du volume solide au volume total de la matière :

$$P = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \cdot 100 (\%)$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation suivante : $p + c = 1$

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques physiques :

- La teneur en eau :

C'est la quantité d'eau contenue dans les pores d'un matériau. Elle est exprimée en % par la relation :

$$W = \frac{Gh - Gs}{Gs} \cdot 100$$

Où G_s : la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

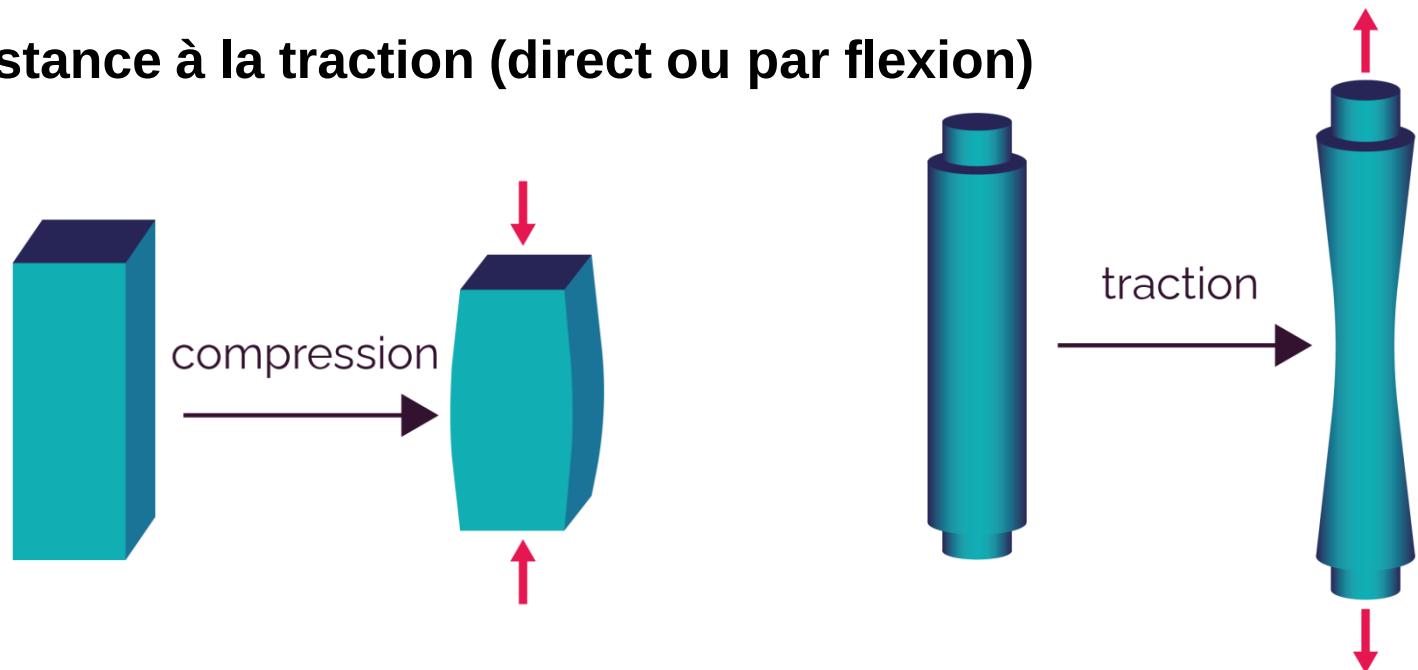
G_h : la masse humide d'échantillon.

GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques mécaniques :

Elle est définie par la contrainte maximale de rupture d'un matériau sous un chargement extérieur (force, poids.....). On distingue principalement :

- La résistance à la compression
- La résistance à la traction (direct ou par flexion)

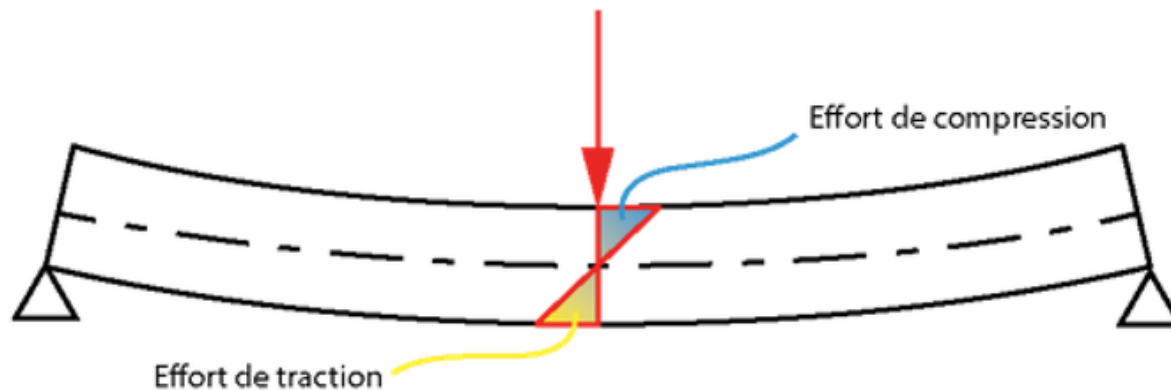


GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques mécaniques :

Traction par flexion :

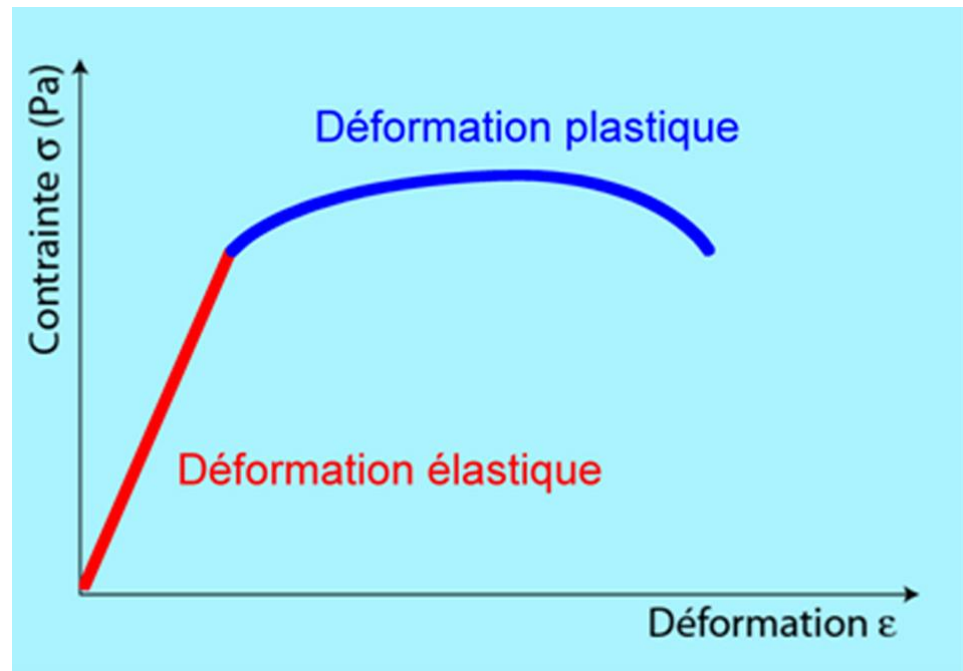
Un effort de flexion (ponctuelle ou uniformément répartie) appliqué sur une poutre génère un effort de compression sur la fibre supérieure. La déformation résultante implique une traction dans la fibre inférieure de l'élément.



GÉNÉRALITÉS

4- Caractéristiques mécaniques :

Chaque matériau est défini par un diagramme contrainte-déformation qui illustre les différentes phases de sa déformation (élastique, plastique, rupture). Le diagramme se présente comme suit :



CHAPITRE 1 :

LES GRANULATS

LES GRANULATS

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80% du poids total du béton.

les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton.

Le granulat étant un matériau lourd, le coût de transport est relativement élevé par rapport à sa propre valeur. Les sites de production sont donc naturellement implantés à proximité des lieux de consommation (carrières)

LES GRANULATS

1- Classification des granulats :

- Les granulats naturelles: issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique.
- Les granulats artificiels: qui proviennent de la transformation thermique des roches, de minerais, des sous produits industriels (laitiers,).



LES GRANULATS

2- Texture et forme des granulats :

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité des bétons, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère; une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer les défauts d'aspect.

La forme des granulats influe sur la facilité de mise en œuvre et le compactage du béton. Ainsi la compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment. En plus l'état de surface des grains influent sur la compacité du mélange et l'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

LES GRANULATS

2- Texture et forme des granulats :



LES GRANULATS

2- Texture et forme des granulats :

Pour caractériser la forme des granulats, on a recourt au calcul du coefficient d'aplatissement.

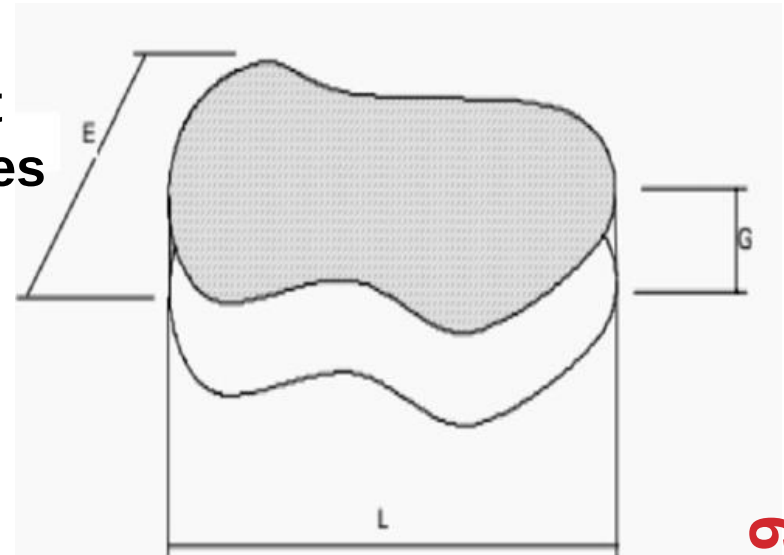
E : Épaisseur.

G : Grosseur, dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

L : Longueur, le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles

$$C = \frac{G}{E}$$

Le grain est dit plat si $G/E < 1.58$



LES GRANULATS

3- Désignation des granulats :

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit:

Granulat d/D

Granulat : sable ou gravier

d : dimension minimale des grains

D : dimension maximale des grains

Exemples granulats rencontrés en pratique :

sable 0/3, gravier 3/8, gravier 8/15, gravier 15/25.

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- Propreté des granulats :

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques...etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte du ciment.

Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation.

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- Propreté des granulats :

Principe de l'essai ES :

Un échantillon de sol, tamisé à 5mm est placé dans une éprouvette graduée. On lui rajoute une solution d'eau et on agite l'ensemble pour dissocier les fines des grains du sol. Puis on laisse reposer l'échantillon pour permettre la sédimentation. Les particules fines restent en suspension alors que les particules plus grossières comme le sable se déposent en bas de l'éprouvette.

Après sédimentation, on mesure les hauteurs nécessaires pour le calcul de l'indice ES.

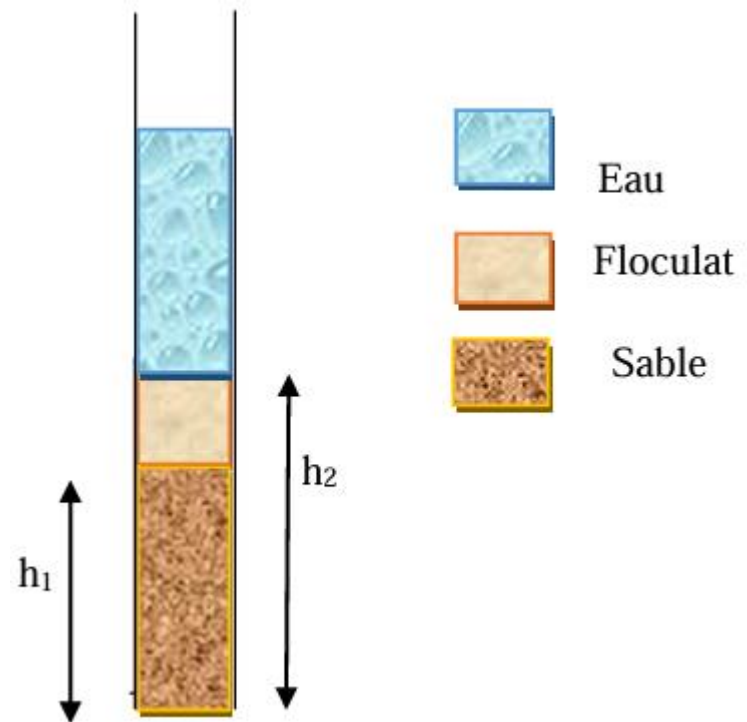
LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- Propreté des granulats :

Principe de l'essai ES :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \cdot 100$$



LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- Propreté des granulats :

Principe de l'essai ES :

Equivalent du sable (ES)	Nature	Qualité du sable
$ES < 60$	Sable argileux	Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux	De propreté admissible pour le béton de qualité
$70 \leq ES < 80$	Sable propre	Convenant parfaitement pour les bétons de qualité
$ES > 80$	Sable très propre	Risque d'entraîner un défaut de plasticité

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- La granularité :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer les tailles des grains constituant un échantillon à l'aide d'une série de tamis, puis les pourcentages de chaque famille de grains constitutif de l'échantillon.

Principe : L'échantillon est mis dans le tamis supérieur d'une série de tamis classés par ordre décroissant selon la dimension des mailles (du plus grand en haut au plus petit en bas). Après vibration de la série de tamis, les grains de l'échantillon se trouvent séparés selon leurs dimensions et chaque tamis retient une partie dite Refus partiel du tamis. Le refus cumulé (total) d'un tamis est la somme de tous les refus partiels des tamis qui se trouve au dessus.



LES GRANULATS

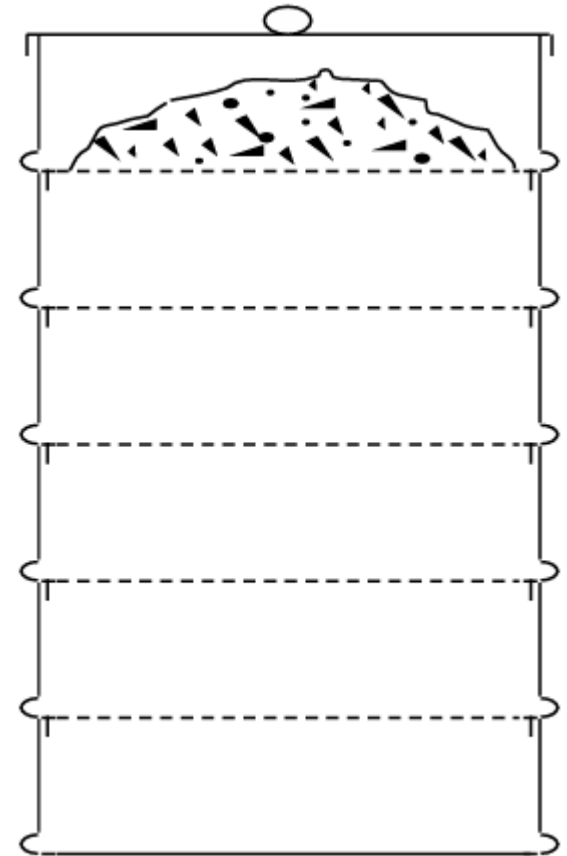
4- Caractéristiques physiques des granulats :

- La granularité :

Série de tamis utilisée dans l'essai granulométrique normalisé en (mm) : 0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ; 1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ; 31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00.

Le choix des tamis à utiliser dépend des dimensions du granulat à essayer.

Pour un sable par exemple, on peut prendre la série : 0.08 ; ; 5.00.



LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- La granularité :

La proportion (en %) du refus cumulé d'un tamis rapportée au poids total est :

$$\%Refus = \frac{Poids_refus_cumulé}{Poids_echantillon} \cdot 100$$

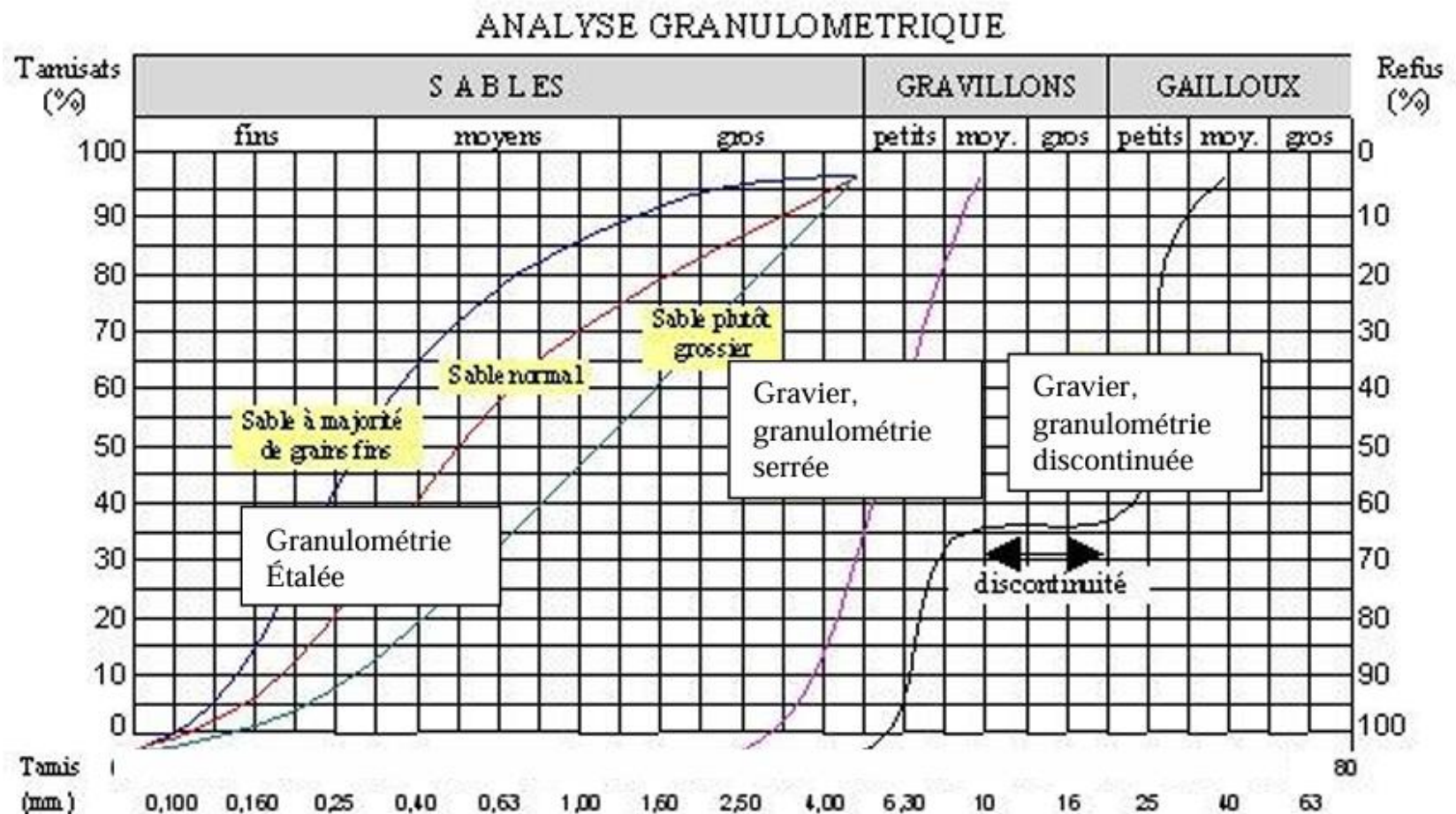
Le complément à 100% du refus cumulé est le Tamisât du tamis en considération.

$$\%Tamisât = 100\% - \%Refus$$

La courbe granulométrique est la représentation graphique du %Tamisât cumulé en fonction de la dimension de la maille du tamis. Afin de prendre en compte la grande variation des dimensions des grains, la dimension de la maille du tamis est représentée sur une échelle logarithmique.

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :



LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- La granularité :
- Module de finesse :

C'est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16-0.315-0.63-1.25-2.50-5\}$$

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- La granularité :
- Module de finesse :

Sable un peu trop fin : MF varie de 1.80 à 2.20 (facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance).

Sable préférentiel : MF varie de 2.20 à 2.80 (ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités).

Sable un peu trop grossier : MF varie de 2.80 à 3.20 (résistance élevée mais on aura, en général, une faible ouvrabilité et des risques de ségrégation).

Ségrégation : séparation des grains de la pâte du ciment.

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

- Exemple de tracé d'une courbe granulométrique :

On considère un échantillon de sable pesant 1000 g. Au regard des dimensions du sable on utilisera la série de tamis :

0.08 ; 0.125 ; 0.200 ; 0.315 ; 0.50 ; 0.80 ; 1.25 ; 2.00 ; 3.15 ; 5.00mm.

Les refus partiels dans les différents tamis sont donnés sur le tableau suivant :

LES GRANULATS

Tamis maille (mm)	Refus partiel (grs)	Refus cumulé (grs)	%Refus cumulé	%Tamisat
5.00	0			
3.15	10			
2.00	90			
1.25	100			
0.80	150			
0.50	150			
0.315	180			
0.200	120			
0.125	120			
0.08	80			

LES GRANULATS

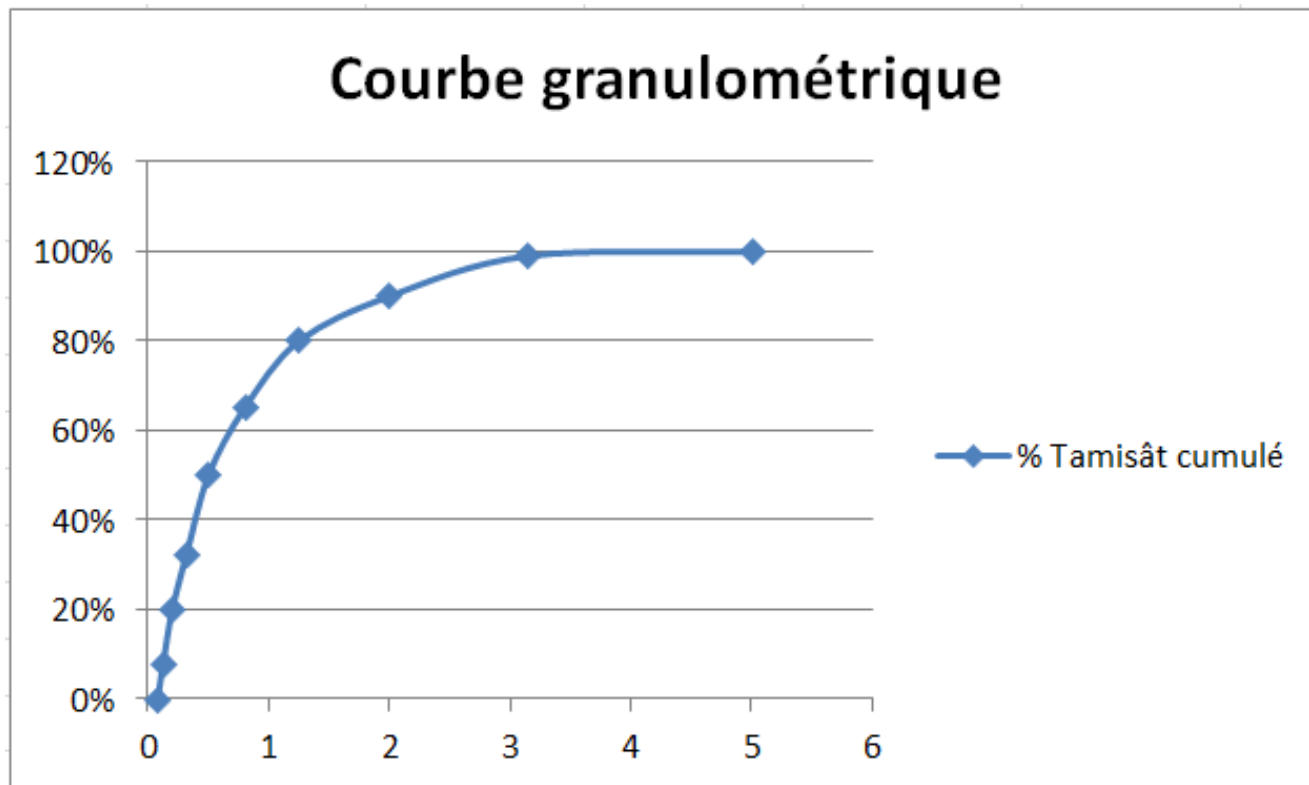
4- Caractéristiques physiques des granulats :

Tamis maille (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	% Refus cumulé	% Tamisât cumulé
5	0	0	0%	100%
3,15	10	10	1%	99%
2	90	100	10%	90%
1,25	100	200	20%	80%
0,8	150	350	35%	65%
0,5	150	500	50%	50%
0,315	180	680	68%	32%
0,2	120	800	80%	20%
0,125	120	920	92%	8%
0,08	80	1000	100%	0%

LES GRANULATS

4- Caractéristiques physiques des granulats :

Courbe granulométrique :



EXERCICE

L'analyse granulométrique d'un échantillon de **482,4 g** a donnée les résultats dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés R_i (g)	Pourcentage refus cumulés $100(\frac{R_i}{M_s})$	Pourcentage tamisât cumulés $100(1 - \frac{R_i}{M_s})$
8,00	0,40			
6,30	1,60			
5,00	1,20			
2,50	7,20			
1,25	13,20			
0,63	38,00			
0,315	133,60			
0,16	225,80			
0,08	46,40			

EXERCICE

À faire :

- Compléter le tableau
- Calculer le module finesse, commenter.
- Établir la courbe granulométrique.
- Déterminer la classe granulaire (d/D)

LES GRANULATS

5- Caractéristiques chimiques :

- **La teneur en chlorures :** Un sable provenant du bord de mer, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité. La quantité d'ions chlore acceptable dans les granulats est limitée à: 1 % pour les bétons non armés; 0,40 % pour les bétons armés selon la norme européenne NF EN 206-1. Ces pourcentages doivent être contrôlés pour éviter la contamination des ouvrages par les chlorures.
- **La teneur en sulfates :** La norme européenne EN-12-620 définit la limite de la teneur en sulfate à 1 %. Une grande quantité de sulfates dans les granulats peut causer des problèmes lors du procédé d'hydratation du ciment (réactions chimiques) qui pourra nuire à la durabilité du béton (expansions internes, fissures, perte de résistance...)

LES GRANULATS

5- Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats.

- **L'essai Los Angeles** : mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Principe : mettre l'échantillon dans un cylindre d'étude et le soumettre à des chocs par boulets qui vont désintégrer les grains.

LES GRANULATS

5- Caractéristiques mécaniques :

Conduite de l'essai :

Etape 1: introduire l'échantillon de masse $M = 5 \text{ Kg}$ et la charge de boulets de la classe granulaire choisie.

Etape 2: Appliquer 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min (500 ou 1000 tr).

Etape 3: recueillir le granulat et le tamiser à 1.6 mm, peser le refus, soit m le résultat de la pesée.

LES GRANULATS

5- Caractéristiques mécaniques :



LES GRANULATS

5- Caractéristiques mécaniques :

On calcule le coefficient de Los Angeles :

$$LA = \frac{M - M1}{M} \cdot 100(\%)$$

M : Masse de l'échantillon avant l'essai

M1 : Masse de l'échantillon au sortie de l'étude (passant du tamis 1,6 mm)

Faible coefficient => matériau plus résistant.

Valeurs du coefficient LA	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 < LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 < LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre à mauvaise qualité

LES GRANULATS

6- Granulats pour béton :

Sable : Dont la taille est inférieure à 5 mm. Il est utilisé généralement pour remplir les vides entre les granulats plus gros et pour améliorer la maniabilité du béton.

Gravier : Ce sont des particules plus grandes, dont la taille varie entre 5 mm et environ 38 mm. Les granulats grossiers forment le squelette du béton en lui donnant sa solidité.



LES GRANULATS

6- Granulats pour chaussée :

Graves naturelles ou concassées : sont des mélanges de granulats de différentes tailles, utilisés pour les couches de fondation et de base des routes. Elles doivent avoir une bonne stabilité mécanique.

Enrobé bitumineux : Constitué d'un mélange de granulats (sables, graviers) et de bitume qui est un liant visqueux issu de pétrole. Pour une chaussée, il est capable de supporter des charges lourdes en plus d'absorber une partie des vibrations des véhicules et d'offrir une bonne adhérence pour les pneus.



Chapitre 2:

Identification des sols

Identification des sols

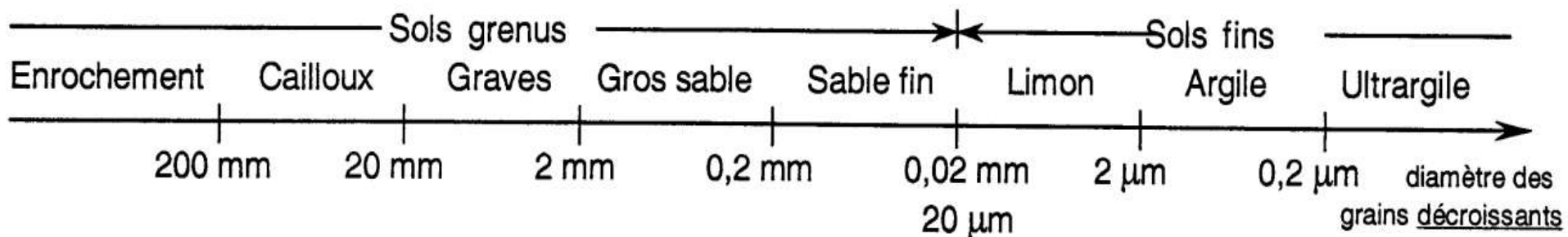
Pour caractériser un sol, il faut déterminer ses paramètres de nature et ceux d'état.

Les paramètres de nature indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps : Poids volumiques, granularité, argilosité, limites d'Atterberg, ...

Les paramètres d'état par contre, sont fonction de l'état dans se trouve le sol à un instant donné, et ils caractérisent le comportement du sol sous l'effet des chargements : La porosité, teneur en eau, saturation...

L'ensemble de ces paramètres est déterminé par des essais au laboratoire. On distingue, suivant la dimension des grains solides :

Essais sur sols grenus (pulvérulents) – Essais sur sols fins.



Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

1-1- Teneur en eau :

La teneur en eau est déterminée par deux pesées de l'échantillon :

- Une première pesée de l'échantillon dans son état naturel donne la masse M_H humide
- Une deuxième pesée après passage à l'étuve pendant 24 heures donne la masse M_s sèche de l'échantillon.

Le passage à l'étuve permet l'évaporation de l'eau (libre et capillaire) présente dans le sol.

La teneur en eau est ainsi calculée par la relation suivante :

$$\omega = \frac{M_H - M_s}{M_s} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

Elle est exprimée en pourcentage (%).

Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

1-2- Masse volumique :

La mesure de la masse volumique est effectuée généralement au pycnomètre. Principe : Une masse de sol séché m_s est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. On utilise un agitateur magnétique qui sépare les particules les unes des autres et permet la libération et l'évaporation des bulles d'air.

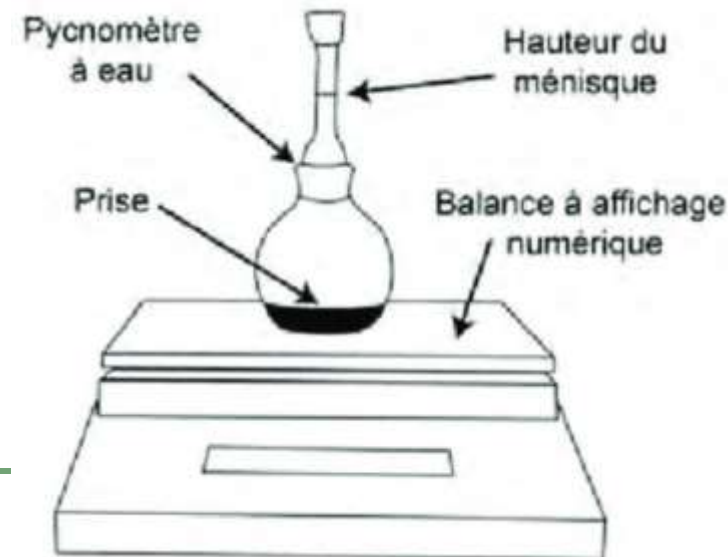
Après élimination de toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides V_s

On calcule la masse volumique des grains solides :

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

Le poids volumique est ainsi déduit :

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g$$



Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

1-3- Granularité :

La granularité d'un échantillon de sol est déterminé en effectuant une analyse granulométrique par séries de tamis.

Les résultats sont rapportées sur une courbe granulométrique, qui représente les tamisâts cumulés en % (échelle arithmétique) en fonction des ouvertures des tamis en mm (échelle logarithmique).

La courbe granulométrique donne le pourcentage en poids des particules de taille inférieure ou égale à un diamètre donné.

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

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

d_y étant le diamètre/ouverture du tamis laissant passer y% des grains.

d_{10} est appelé diamètre efficace.

Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

1-3- Granularité :

Si $C_u > 2$; la granulométrie est dite étalée.

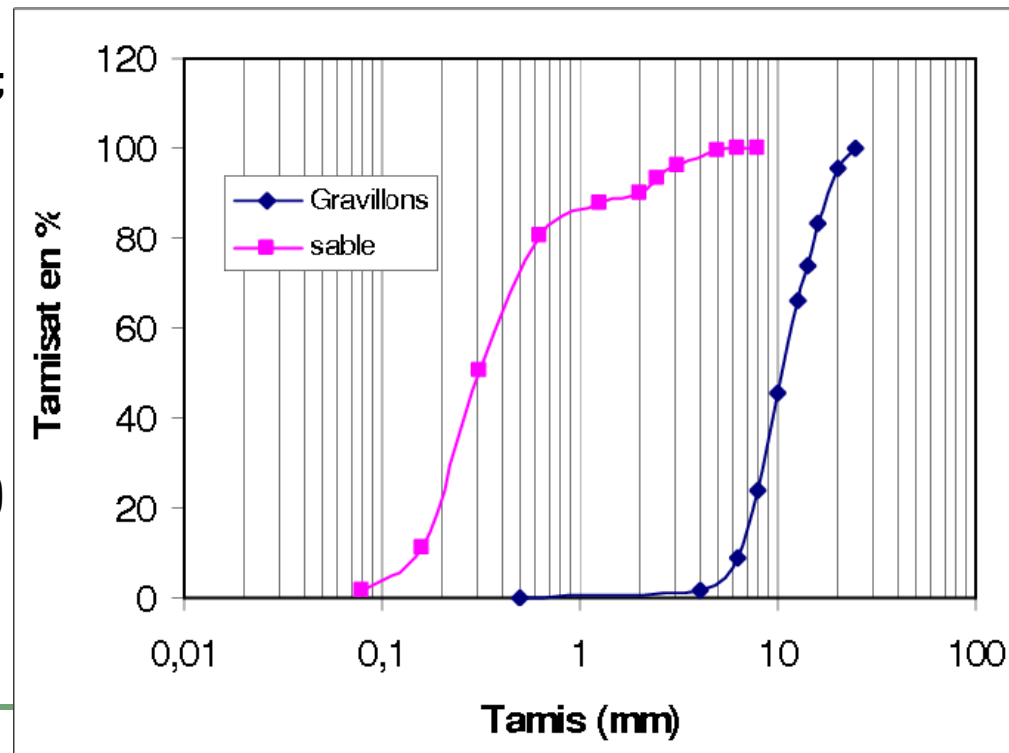
Sinon ($C_u < 2$) ; on dit que la granulométrie est uniforme ou serrée.

Un deuxième coefficient est défini ;

- Coefficient de courbure C_c :

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

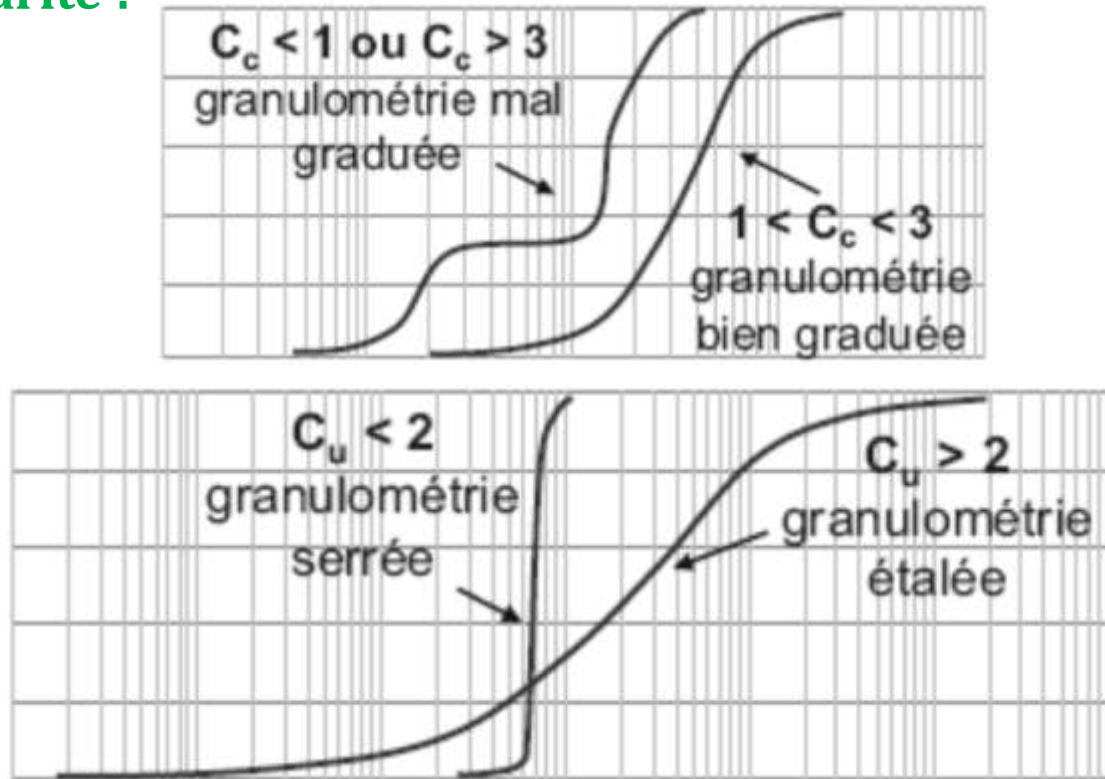
Il décrit la graduation du sol (bien gradué ou mal gradué/discontinue)



Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

1-3- Granularité :



Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

La granulométrie nous permet d'identifier la taille des grains des sols et leur répartition, ainsi que de le classer en une des deux catégories:

- **Sols fins** : Plus de 50% des éléments ont $\phi < 80\mu\text{m}$
- **Sols grenus (pulvérulents)** : plus de 50% des éléments ont $\phi > 80\mu\text{m}$

On distingue donc des essais propres aux sols fins et d'autres propres aux sols grenus.

Les essais d'identification qui suivent permettent de qualifier le sol par un nom plus précis : argile, sable...

Identification des sols

1- Détermination des caractéristiques :

Les principaux essais d'identification sont :

Sols grenus

- Essai d'équivalent de sable (ES)
- Indice de densité (état de compacité d'un sol à l'état naturel)

Sols fins

- Essai de consistance : Limites d'Atterberg
- Valeur au bleu de Méthylène (VBS)

Identification des sols

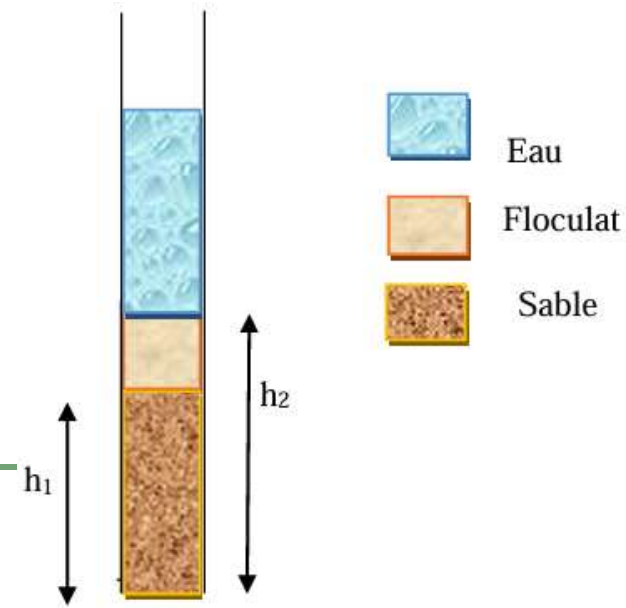
2- Essais d'identification des sols grenus/pulvérulents :

2-1- Équivalent de sable :

C'est un essai très largement utilisé, en particulier en géotechnique routière. Il permet l'évaluation de la portion des éléments fins contenue dans un échantillon de sable. La présence en quantité de ces éléments peut altérer le comportement mécanique du sable.

L'essai consiste à mettre l'échantillon de sol ($\Phi < 5\text{mm}$) dans une éprouvette et le faire subir un lavage énergique de manière à le séparer de ses matières fines. Puis d'effectuer les mesures nécessaires afin de calculer le coefficient ES.

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



Identification des sols

2- Essais d'identification des sols grenus/pulvérulents :

2-2- Indice de densité :

Il permet de donner une idée sur l'état de compacité dans lequel se trouve le sol à l'état naturel. L'indice de densité est calculé par :

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

e : Indice des vides à l'état naturel

e_{max} : Indice des vides du sol à l'état le plus lâche.

e_{min} : Indice des vides du sol à l'état le plus dense (échantillon compacté)

L'indice des vides est déterminé en suivant les étapes suivantes : prélèvement de l'échantillon (carrotier) sans perturber sa structure initiale – Mesurer le volume total V_t - Déterminer la masse sèche M_s - Calculer le volume des grains solide V_s - Calculer le volume des vides $V_v = V_t - V_s$ - Calculer l'indice des vides $e = V_v/V_s$

Identification des sols

2- Essais d'identification des sols grenus/pulvérulents :

2-2- Indice de densité :

La valeur ainsi obtenue permet de caractériser la compacité de l'échantillon de sol :

I_D	Compacité du sol
0	Tres lâche
<0.5	lâche
0.5	moyennement dense
>0.5	très compact
1	très bien compact

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-1- Valeur au bleu de méthylène :

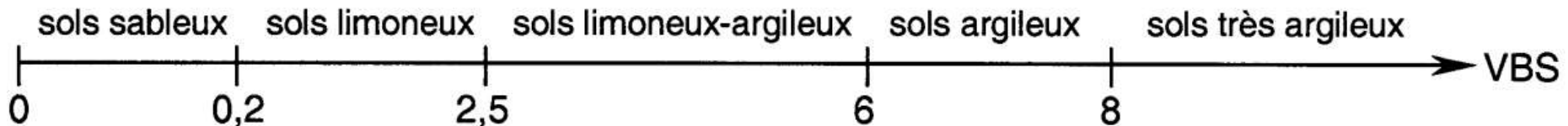
C'est un autre paramètre qui permet de caractériser la présence des éléments fins (argilosité d'un sol).

Le bleu de méthylène s'adsorbe par les surfaces des argiles contenues dans le sol, et permet donc de déterminer la quantité de cette fraction.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenu en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique.

L'objectif est le développement d'une auréole bleutée autour de la tache.

Le VBS est ainsi exprimé en grammes de bleu pour 100 g de sol.



Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

Ces limites sont mesurées sur la fraction de sol qui passe au tamis de 0,40 mm. Selon la consistance des sols fins, on considère 4 états qui dépendent de leur teneur en eau :

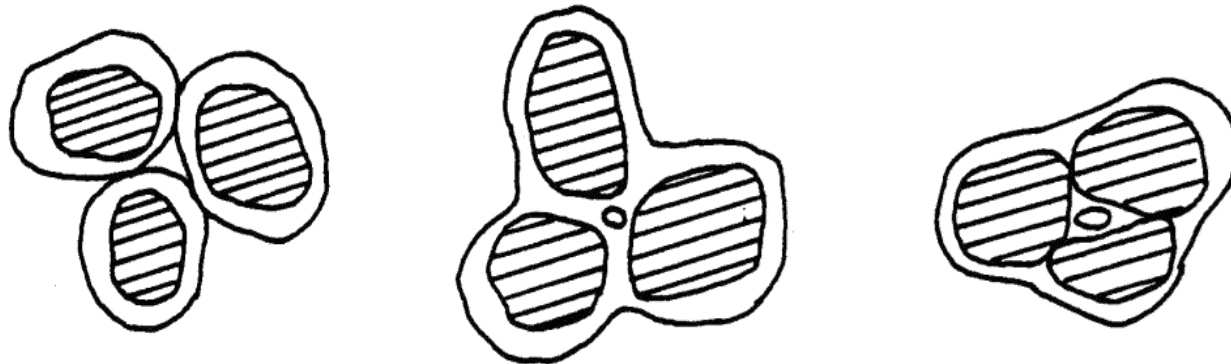
- ❖ **État liquide** : Le sol a l'aspect liquide et d'une consistance très faible. Les particules glissent facilement les unes sur les autres.
- ❖ **État plastique** : Le sol a une consistance plus importante. Lorsqu'il est soumis à de faibles contraintes, il se déforme largement sans se rompre, et garde sa déformation après suppression des charges. Les particules ont mis en commun leurs couches d'eau adsorbée.
- ❖ **État solide avec retrait** : le sol contient une faible quantité d'eau. Le volume du sol diminue lorsque la teneur en eau diminue.
- ❖ **État solide sans retrait** : Le sol atteint son volume minimal. Les particules arrivent en contact en quelques points en joignant leur couche d'eau adsorbée (pas d'eau libre entre les particules).

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

Les différentes états sont illustrés dans la figure suivante :



a – Etat liquide

b - Etat plastique

c - Etat solide sans retrait

La transition d'un état à un autre est marqué par une limite. On distingue trois limites dites **Limites d'Atterberg** :

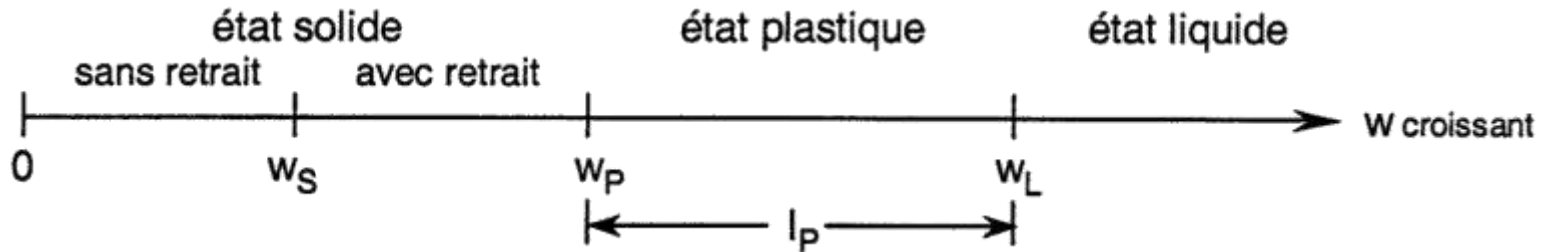
- Limite de liquidité w_L - Limite de plasticité w_P - Limite de retrait w_S

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

Les différentes états sont illustrés dans la figure suivante :



Les limites w_L , w_p et w_s sont déterminées par des essais au laboratoire.

➤ Limite de liquidité w_L (Méthode de Casagrande) :

La méthode utilise un appareil appelé coupelle de Casagrande (figure ci-après).
Principe : Un échantillon de sol ($< 0,4$ mm) est mélangé avec de l'eau jusqu'à obtenir une pâte homogène. On place l'échantillon dans la coupelle et on l'étend, puis on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. La coupelle est actionnée pour effectuer des chocs à un rythme précis.

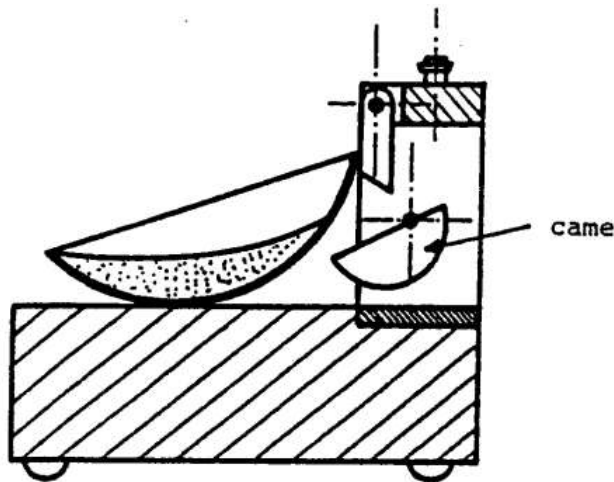
Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

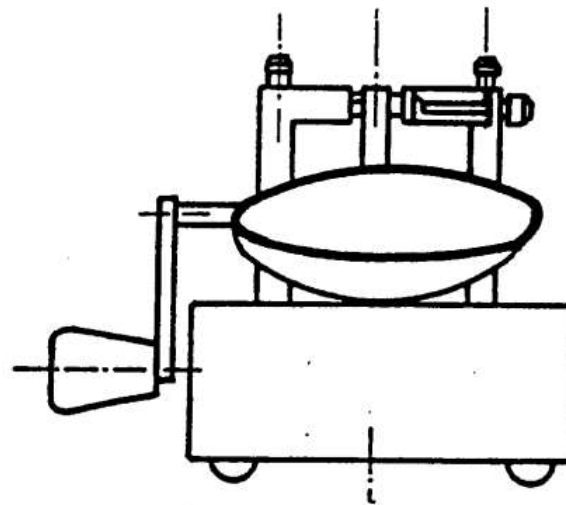
3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Limite de liquidité w_L (Méthode de Casagrande) :

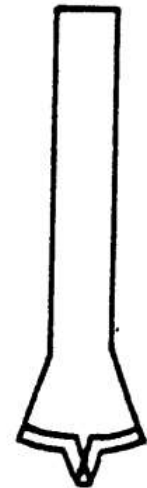
On compte le nombre de coups nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm.
On prélève ensuite un échantillon de la pâte pour mesurer sa teneur en eau.



coupelle vue de côté



coupelle vue de face



outil à rainurer

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Limite de liquidité w_L (Méthode de Casagrande) :

L'essai est répété plusieurs fois pour obtenir au moins 4 points avec des nombre de chocs compris entre 15 et 35. Puis on trace la courbe de liquidité ($\omega = f(N)$) sur un graphique logarithmique.

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

Après traçage de la courbe, on détermine la limite de liquidité :

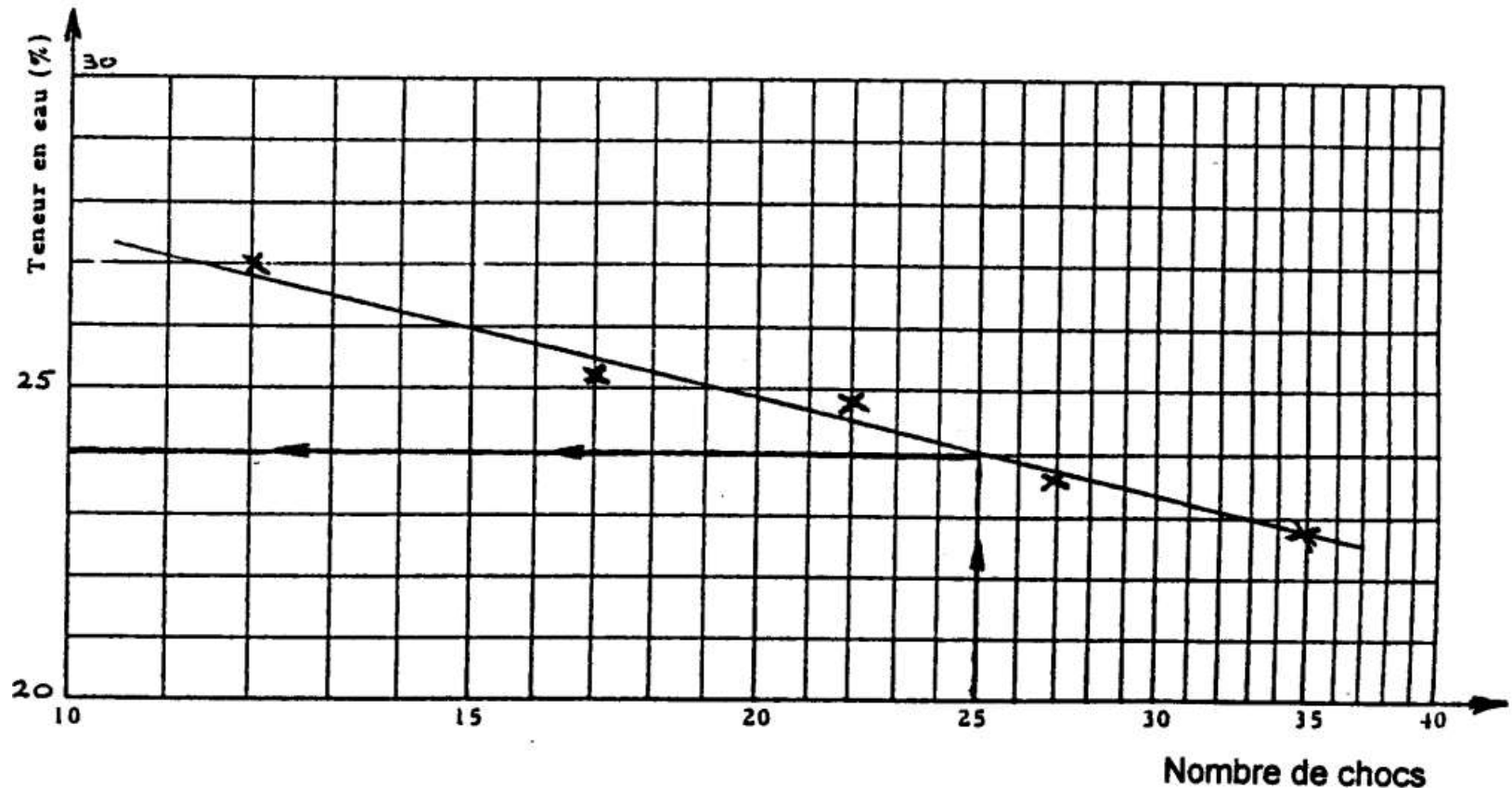
$$\underline{w_L = f(25 \text{ coups})}$$

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Limite de liquidité w_L (Méthode de Casagrande) :



Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Limite de plasticité w_p :

Pour déterminer la limite de plasticité, on prépare une pâte homogène en mélangeant un échantillon de sol ($<0,4$ mm) avec de l'eau.

La pâte est ainsi roulée (à la main) pour former un cylindre de 3mm de diamètre.

Lorsque le cylindre se fissure ou casse lorsqu'il atteint **3mm** de diamètre (on ne peut plus former de rouleaux plus fins), la limite de plasticité correspond à la teneur en eau correspondante à ce cylindre.

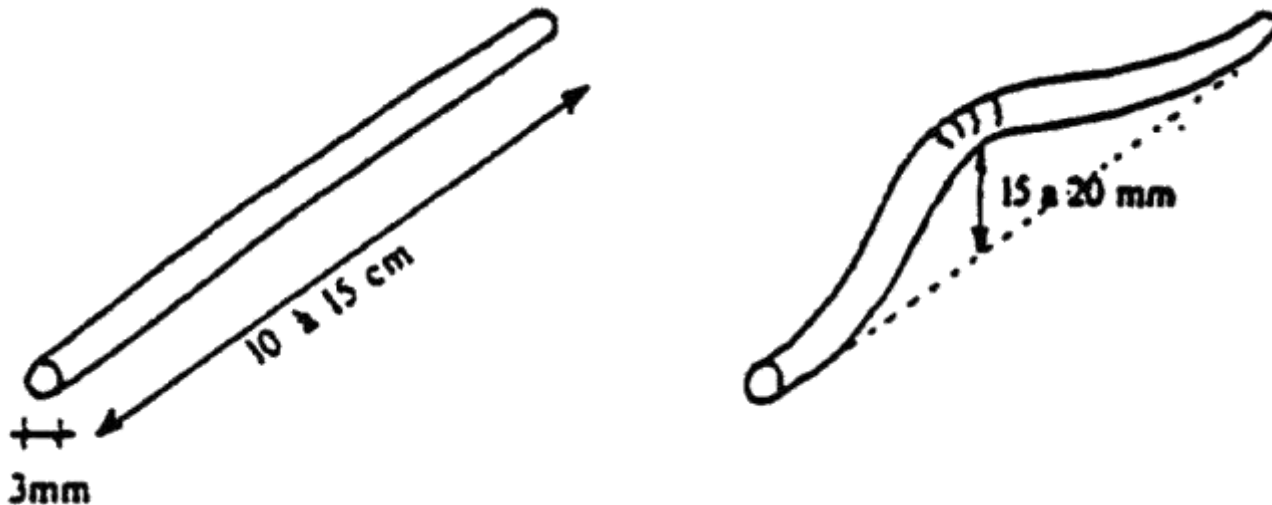
L'opération est répétée pour garantir la précision des résultats et obtenir la moyenne = w_p

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Limite de plasticité w_p :



Les deux limites (de liquidité et de plasticité) sont très importants en géotechnique, car ils indiquent la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau.

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

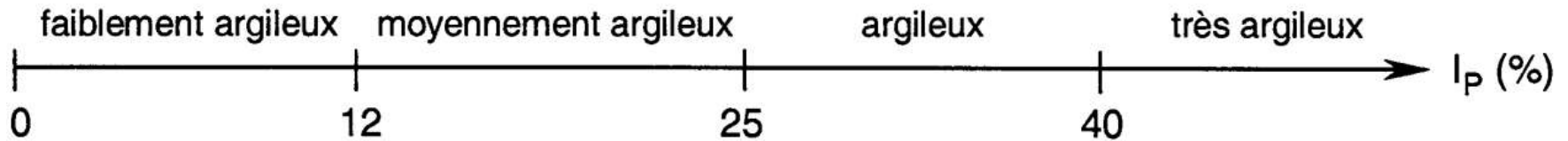
➤ Indice de plasticité I_P :

L'indice de plasticité est un paramètre utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Il correspond à l'étendue du domaine de teneurs en eau dans lequel le sol a un comportement plastique. Il est mesuré par :

$$I_P = w_L - w_P$$

Le domaine de plasticité est le domaine qui nous intéresse le plus, il correspond au domaine pendant lequel on peut travailler le sol. De ce, il est préférable qu'il soit le plus grand possible.

Le GTR (Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme) retient pour les valeurs de I_P les seuils suivants :



Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Indice de consistance I_c :

On définit aussi l'indice de consistance qui mesure la cohésion et la rigidité d'un sol en fonction de sa teneur en eau :

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

Indice de consistance	consistance du sol
$I_c \leq 0$	Liquide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$	Solide ou semi solide.

Identification des sols

3- Essais d'identification des sols fins :

3-2- Limites d'Atterberg :

➤ Indice de liquidité I_L :

L'indice de liquidité permet de déterminer l'état d'un sol cohérent (comme les argiles) :

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

Chapitre 3:

Classification des sols

Classification des sols

- La classification des sols consiste à les rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.
- La première partie consiste à identifier le sol afin de déterminer ses différentes caractéristiques. Puis, en fonction de ces caractéristiques, on va lui attribuer un nom afin de prévoir son comportement et sa performance dans diverses applications.
- Si une fraction granulométrique est prépondérante, le sol pourra porter le nom correspondant accompagné d'un adjectif décrivant la deuxième fraction distinguée, soit par exemple : sable fin argileux, argile limoneux... etc.
- La classification est fonction de plusieurs paramètres : granulométrie, plasticité, densité... etc.
- Il existe de nombreuses méthodes et normes de classification que nous exposerons par la suite.

Classification des sols

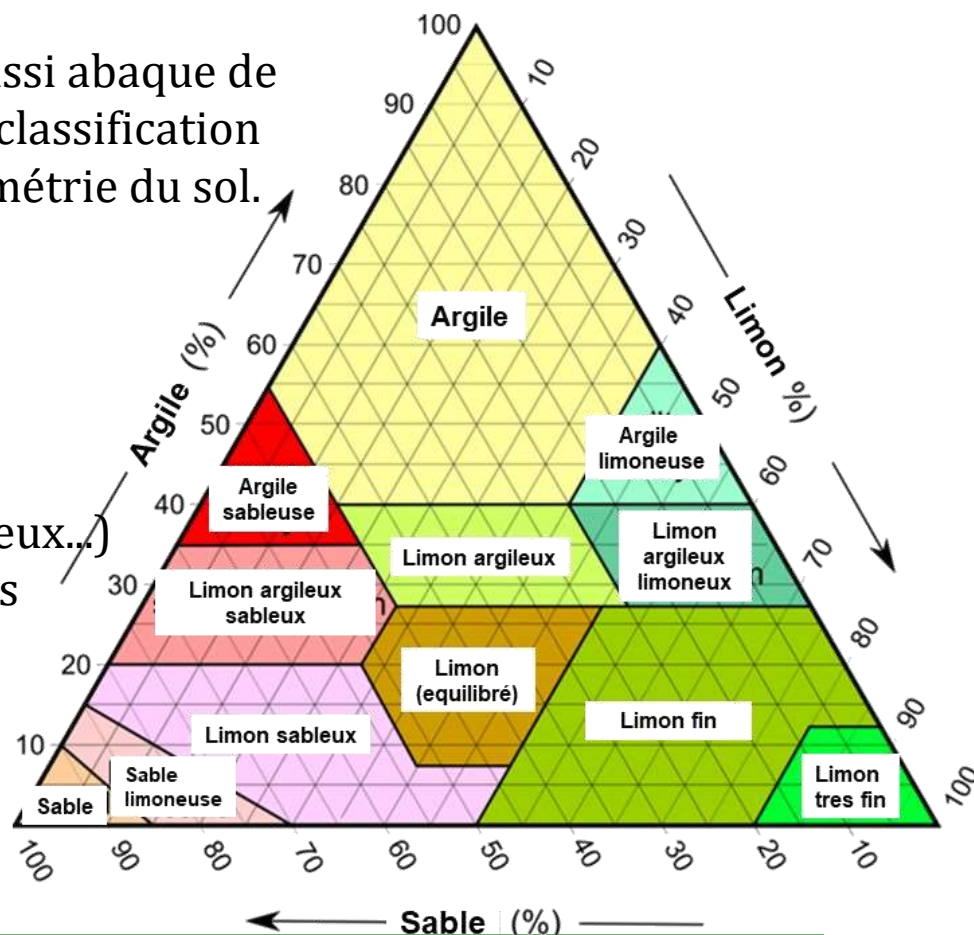
1- Classification triangulaire :

Le diagramme triangulaire, appelé aussi abaque de Taylor, est une première méthode de classification qui se base seulement sur la granulométrie du sol. La méthode distingue 3 pôles :

- **Les sables** : $> 50 \mu\text{m}$
- **Les limons** : de $50 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$
- **Les argiles** : $< 2 \mu\text{m}$

Et elle permet de baptiser un sol (argile, limon, sable, limon argilosableux...)

Cette classification est propre aux sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)



Classification des sols

2- Classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) :

Cette classification présente deux méthodes de classification pour les sols grenus et les sols fins.

La classification LPC utilise les résultats des essais d'identification des sols ; la granulométrie et les limites d'Atterberg.

Le tableau suivant résume les notations utilisées :

Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
G : Grave. 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	b : Bien gradué m : Mal gradué	t : Très plastique p : Peu plastique

Sols grossiers :

sols grossiers
50% d'éléments > 0,08 mm

q1 : quantité d'éléments supérieurs
à 0.08 mm et supérieurs à 2 mm

q1 > 50%

graves

q1 < 50%

sables

q2 : valeur du passant à 0.08 mm

q2 < 5%

Grave
propre

$C_u ; C_c$

Gb

Grave
propre
bien
graduée

5% < q2 < 12%

Double
appellation

12% < q2 < 50%

Grave
"polluée"

$W_L ; W_P$

Gl

Grave
limoneuse

Ga

Grave
argileuse

q2 < 5%

Sable
propre

$C_u ; C_c$

Sb

Sable
propre
bien
gradué

5% < q2 < 12%

Double
appellation

Sm

Sable
propre
mal
gradué

12% < q2 < 50%

Sable
"pollué"

$W_L ; W_P$

Sl

Sable
limoneux

Sa

Sable
argileux

Sols grossiers :

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 $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ 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 $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ 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

Classification des sols

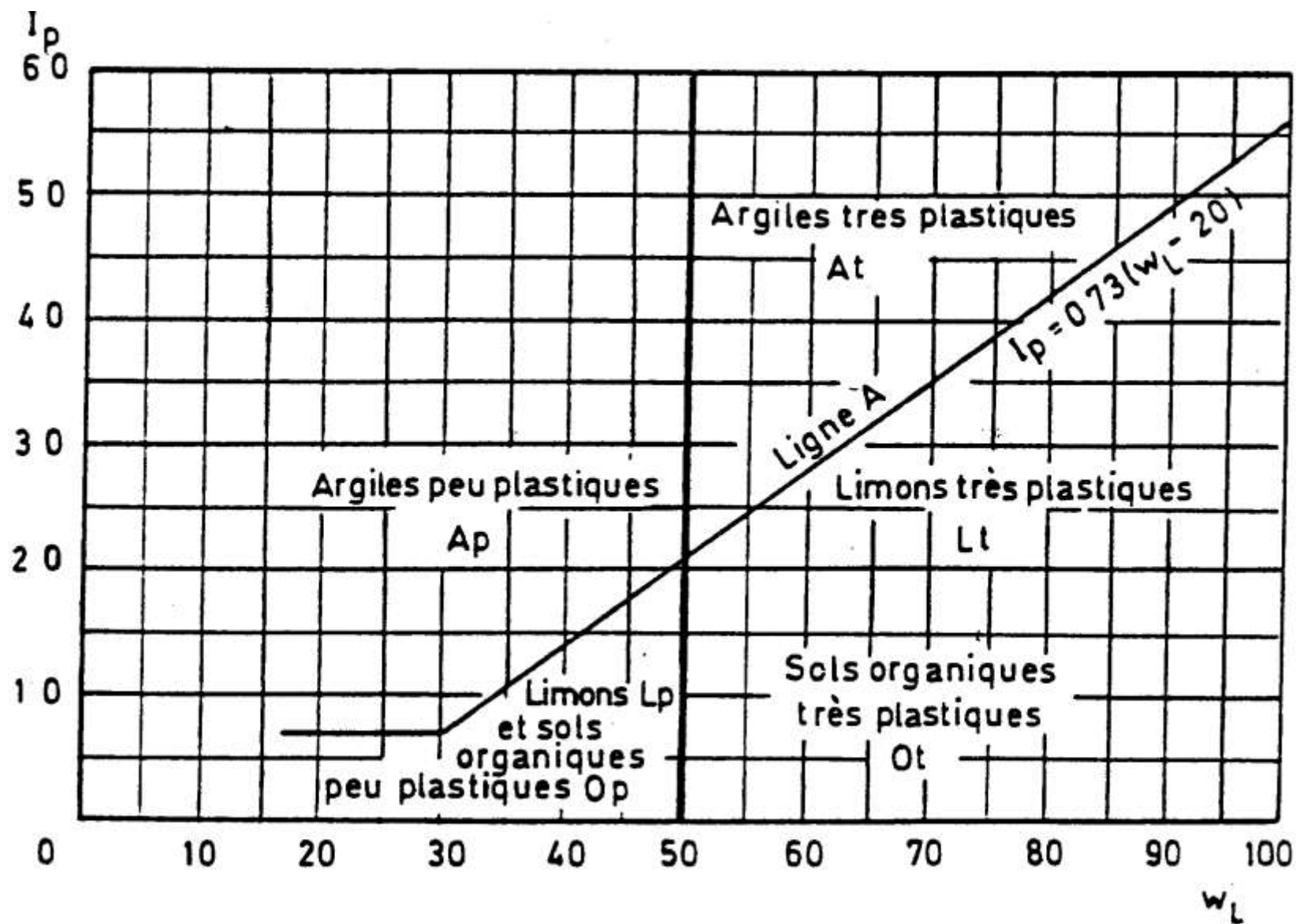
2- Classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) :

Lorsque $5\% < \% \text{ éléments inférieur à } 0,08 \text{ mm} < 12\%$

⇒ on vérifie toutes les conditions des quatre classes et 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**

La classification LPC des sols fins est déterminé en projetant les résultats des limites d'Atterberg sur le graphique suivant (abaque de plasticité de Casagrande) :



Classification des sols

2- Classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) :

La classification des sols organiques est fonction de la teneur des sols en matière organique. Cette teneur est déterminée par calcination des sols (cuisson à température de $\approx 500^{\circ}\text{C}$).

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

Classification des sols

3- Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers) :

Cette classification est utilisée pour la définition de sols utilisés pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Elle tient compte des mêmes paramètres de base utilisés dans la classification LPC, mais elle est beaucoup plus précises pour les fractions argileuses qui conditionnent les terrassements.

- La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA et dans la norme NF P 11-300

Les paramètres utilisés sont : La granulométrie, les limites d'Atterberg et le VBS

La méthode GTR classe les sols dans 3 familles :

- Les sols de classe : A, B, C, D.
- Les matériaux rocheux de classe : R
- Les sols organiques et sous produits industriels de classe : F

Les classes sont définies dans le tableau ci-après :

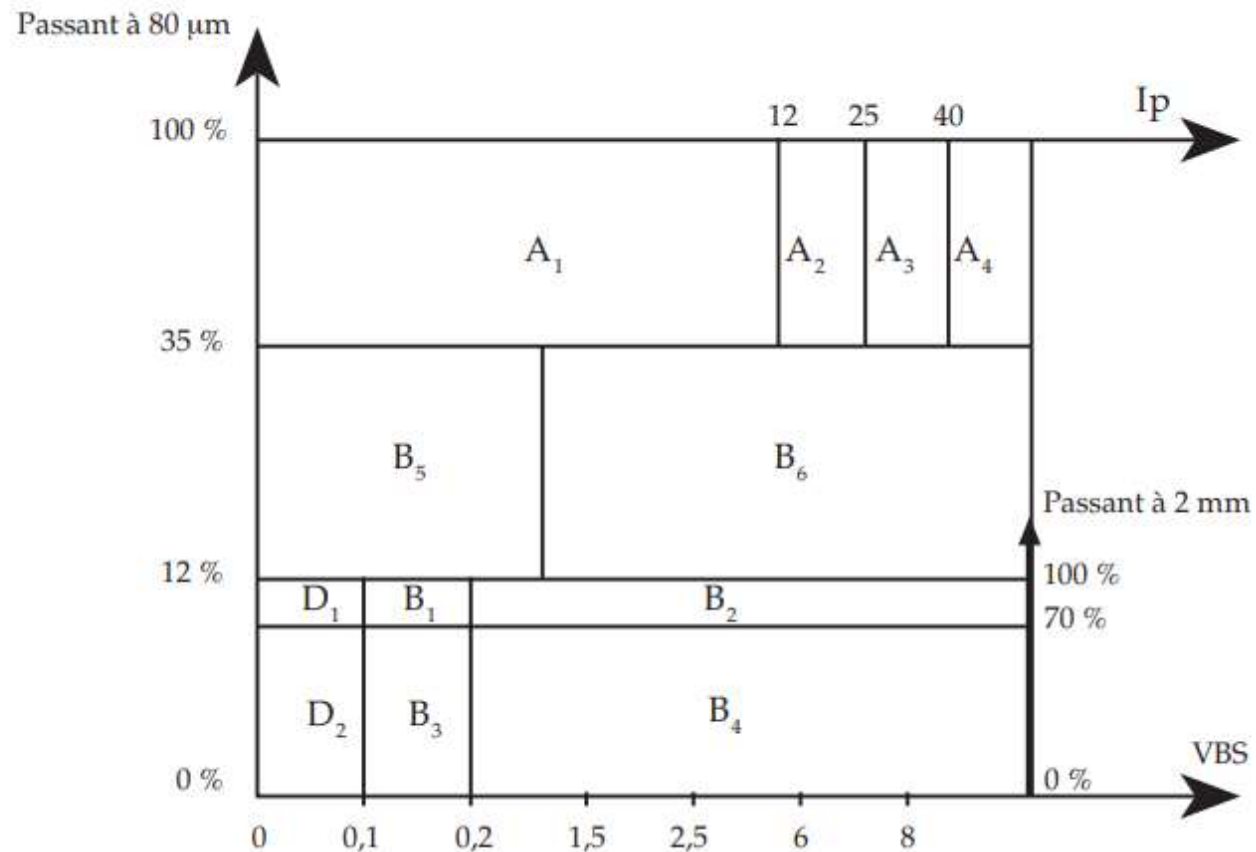
Classification des sols

3- Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers) :

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

Classification des sols

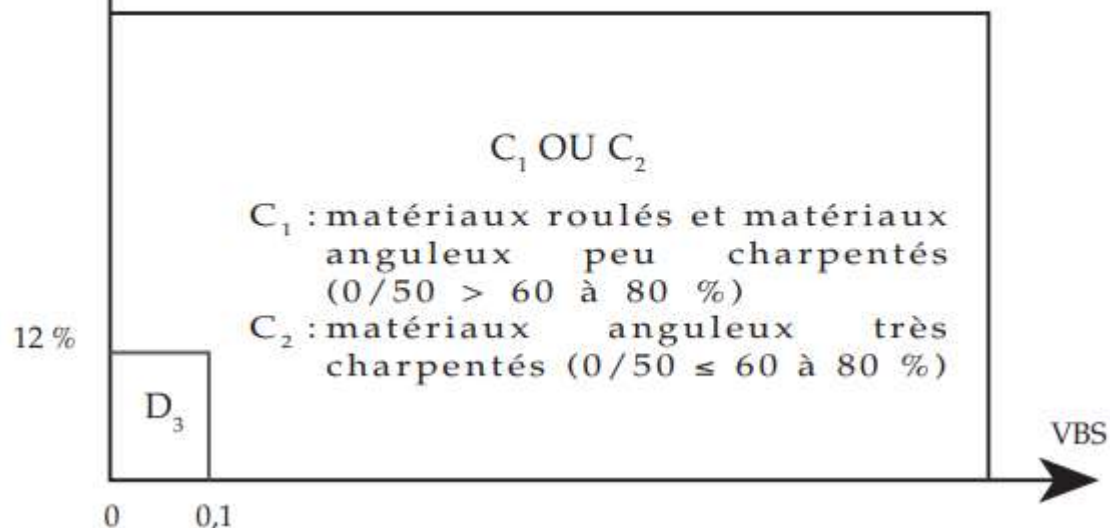
3- Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers) :



Sols
 $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$

Sols
D_{max} > 50 mm

Passant à 80 µm
dans la fraction
0/50 mm



Matériaux
rocheux

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
		Calcaires	R ₂
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆

Matériaux
particuliers

Sols organiques et sous-produits industriels

F

Classification des sols

4- Techniques d'identification des sols sur terrain :

Pendant les visites de chantier et les lieux de construction, les ingénieurs et les géotechniciens essaient d'évaluer le sol par des méthodes empiriques, ce qui permet une première analyse rapide des sols et de détecter d'éventuels problèmes avant de réaliser des études approfondies et des essais techniques au laboratoire.

La reconnaissance des classes de sols sur terrain vient par expérience et maîtrise des différents critères et caractéristiques des types de sols.

L'identification des sols sur terrain est basée sur les paramètres suivants :

- Couleur
- Humidité apparente
- Origine
- Consistance- Compacité
- Matières organiques

Classification des sols

4- Techniques d'identification des sols sur terrain :

- **Couleur :**

C'est un élément couramment utilisé pour reconnaître des formations sur site, du fait qu'il est visible à l'œil. Sauf que, les hypothèses ainsi posées ne correspondent pas réellement à l'état ou à l'identité du sol.

La couleur est liée à la nature, mais peut être également un indicateur d'un état d'altération ou d'un état d'oxydation (par exemple du fer).

Il est peut être également important de regarder la couleur des joints ou des fissures, qui peut être notablement différente de la masse.

- **Humidité apparente :**

On peut utiliser 4 classes pour qualifier l'humidité du sol in-situ : sec, légèrement humide, humide, saturé.

L'estimation de la classe d'humidité se fait par toucher et manipulation (pression à la main) : si le sol se désagrège facilement ⇒ sol sec. S'il se compacte bien et peut être modelé sans fissuration ⇒ Sol humide. Si l'eau apparaît à sa surface lorsqu'on le presse ⇒ Sol saturé.

Classification des sols

4- Techniques d'identification des sols sur terrain :

- **Origine :**

L'origine concerne le mode de formation et l'histoire géologique de la zone étudiée. Ceci possède un rôle important dans la compréhension du comportement des sols.

On distingue deux grandes familles : les dépôts naturels et les dépôts d'origine anthropique (influencé par l'activité humaine : remblai, déchets industriels ou urbains, compactage artificiel par circulation lourde)

La différenciation entre les deux se fait en se référant aux cartes géologiques et topographiques des lieux concernés.

- **Consistance/compacité :**

Même procédé d'identification que celle de l'humidité apparente. Selon l'énergie nécessaire pour la déformation des sols par pression à la main, on peut estimer si le sol est compacte/ lâche ou mou/dur.

Classification des sols

4- Techniques d'identification des sols sur terrain :

- **Matières organiques :**

La présence des matières organiques peut être estimée par couleur (brun foncé ou noire), par texture (légère et fibreuse), ou par odeur (odeur de terre humide ou végétale)