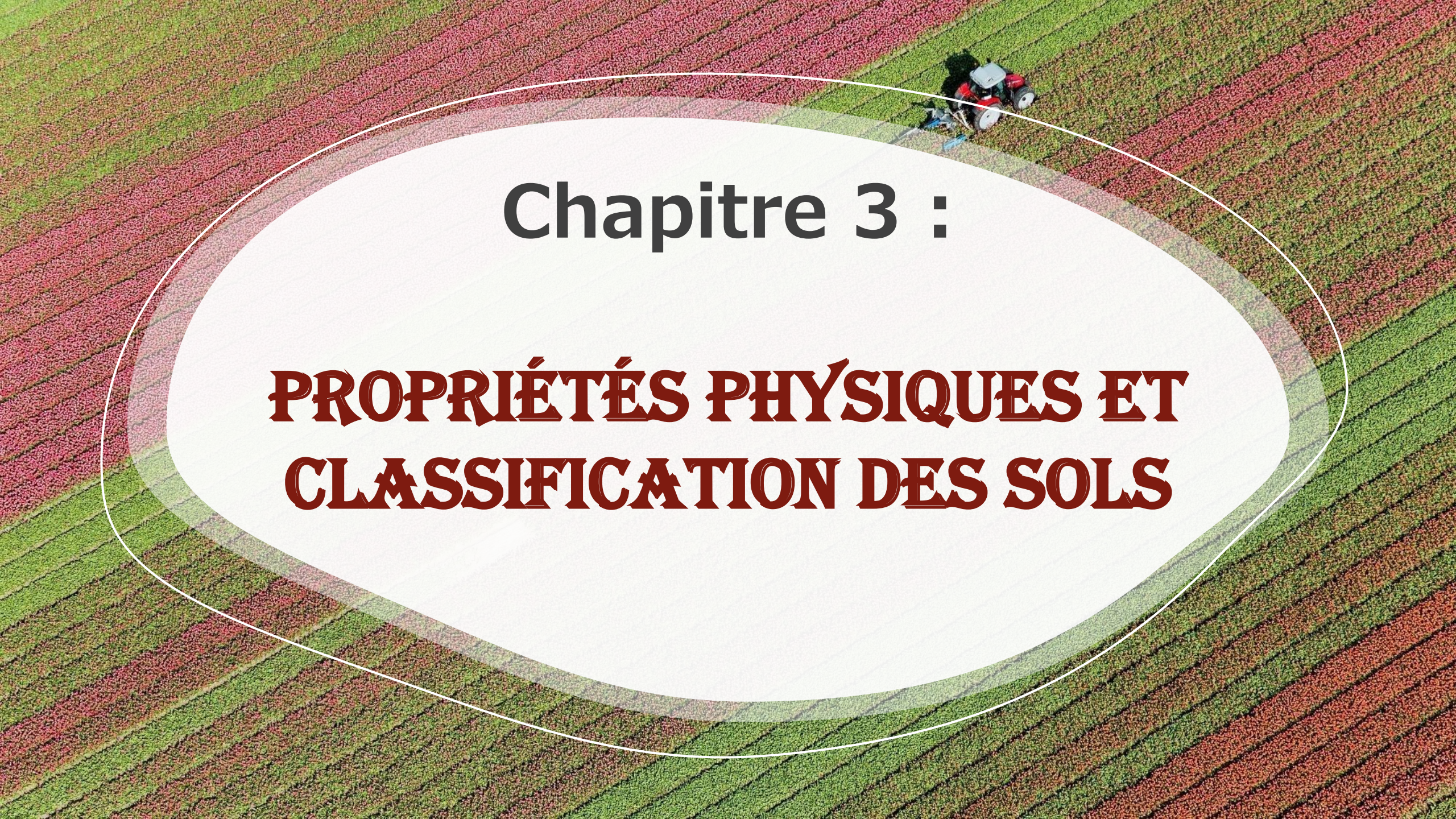


An aerial photograph of a vast agricultural field, likely a tulip field, showing rows of flowers in shades of red, pink, and green. A small tractor is visible in the upper right corner, working in the field. A large, white, rounded rectangular frame is superimposed over the center of the image, containing the chapter title.

Chapitre 3 :

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CLASSIFICATION DES SOLS

Sol / chantier



Définition d'un sol

Le sol est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. Le sol est un matériau meuble, mélange en proportions variables de particules de toutes dimensions. C'est un matériau de comportement complexe.



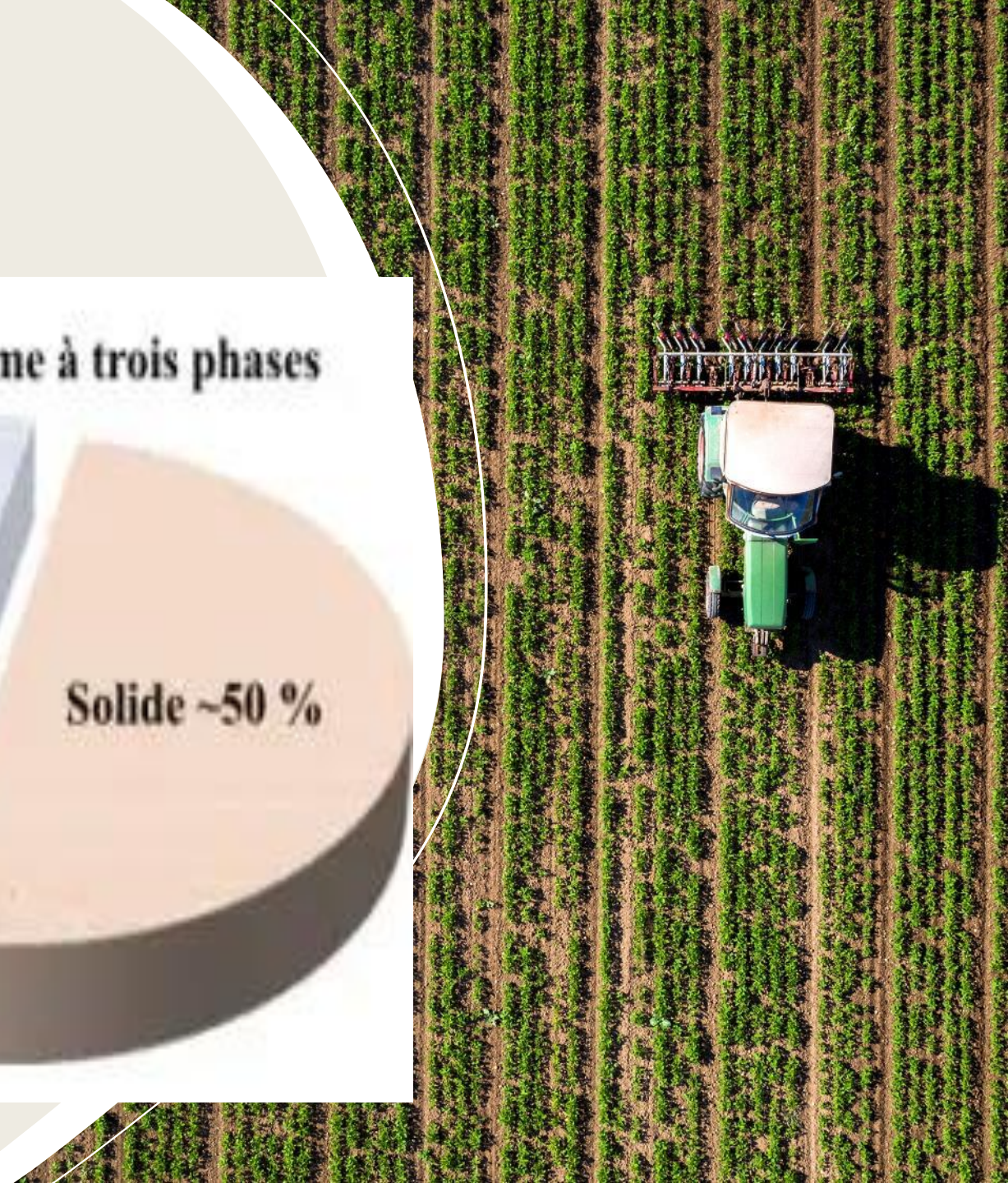
Définition d' un sol géotechnique

La mécanique des sols peut-être définie comme étant la science qui étudie les propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques des sols en vue de leur utilisation comme sol support de fondations, ou de matériaux de construction d'ouvrages. Les propriétés physiques et mécaniques de ces sols pourront être étudiées en laboratoire sur des échantillons remaniés et prélevés dans les zones d'emprunt.

Importance des propriétés du sol pour le génie civil

"Les propriétés physiques déterminent le comportement du sol, donc la réussite du projet."

Composition du sol



Les constituants du sol

PHASE SOLIDE

Fraction minérale
38% en volume

Fraction organique
12% en volume
5% en masse (après séchage)

PHASE LIQUIDE

EAU
A 35 % EN VOLUME

PHASE GAZEUSE

AIR
15 A 35% EN VOLUME

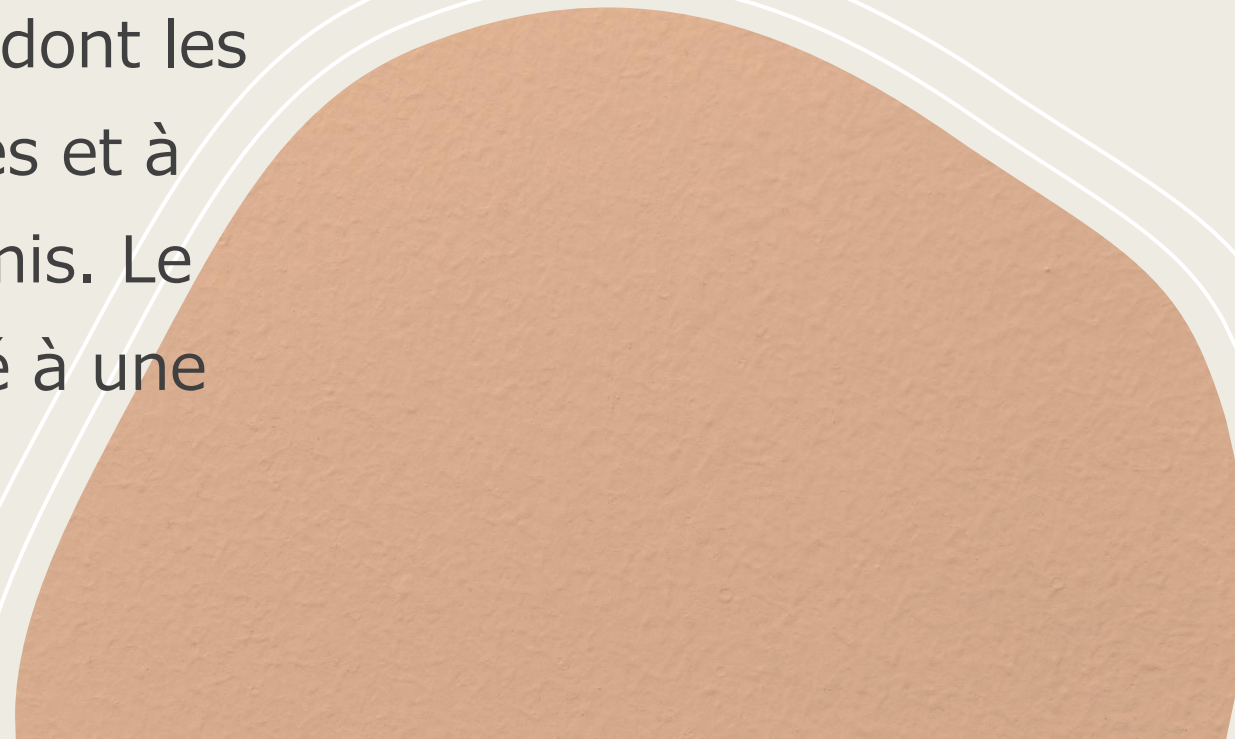


Granulométrie



Définition de la granulométrie

L'analyse granulométrique est une **méthode largement utilisée pour déterminer la distribution granulométrique des matériaux granulaires**. Elle consiste à faire passer un échantillon à travers une série de tamis dont les mailles sont progressivement plus petites et à peser le matériau retenu sur chaque tamis. Le processus est simple, rentable et adapté à une large gamme de tailles de particules, généralement de 125 mm à 20 μm .



Granulométrie par sédimentation

- Permet d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile.
- On peut combiner une analyse granulométrique par tamisage avec une analyse par sédimentation.
- MAIS, la principale donnée obtenue est le % d'argile ($< 0.002\text{mm}$).

Classification des particules solides d'un sol:

Les forces d'attractions intergranulaires (force électrique, force de Van Der Waals, etc.) influencent le comportement des sols pour les grains de dimension très petite.

Dans ce cas, le sol présente de la cohésion.

On distingue deux catégories de sols : Les sols grenus qui sont de dimension supérieure à $20\ \mu$ (0,02 mm), et les sols fins de dimensions inférieures à $20\ \mu$.

Les sols grenus :

- $d > 20 \mu\text{m}$ sans cohésion.
- Ils sont en général pulvérulents et perméables dont les grains sont visibles à l'œil nu. Les sols grenus sont ceux pour lesquels les caractéristiques géotechniques sont déterminées par des forces de volume ou de pesanteur. Ils sont surtout définis granulométriquement.





Les sols grenus :

- On distingue principalement deux sous-familles :
- **Le Sable** : Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail.
- **Le gravier** : il s'agit de fragments de roche minérale dont le diamètre varie entre 0,2 et 7,5 cm. Le gravier est excavé depuis des ballastières.

Les sols fins : $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion



- ➤ **Les Limons (ou Silts)** : La définition la plus admise est celle d'un sol dont la majeure partie des grains est comprise entre 2 et 20 μ (définition purement descriptive). Ils sont en grande partie formés de quartz.
- ➤ **Les Argiles** : ce sont des silicates d'alumine hydratés, de faible perméabilité, ses plaquettes sont invisibles à l'œil nu et soudées par des forces de cohésion, permettant de former une pâte. On appelle également argile l'ensemble des fractions minérales inférieures à 2 μm dans une roche.

Les sols fins : $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion



- ➤ **Les Marnes :** Elles sont composées d'un mélange de carbonate de Calcium (le calcaire) et d'argile comptant pour 35 à 65%. Les marnes ont une composition chimique intermédiaire entre les calcaires marneux (5 à 35%) d'argile et les argiles calcaireuses ou marnes argileuses 65 à 95% d'argile.

Les sols fins : $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion



- ➤ **Tourbe** : Il s'agit d'un sol argileux comportant une importante fraction en matière organiques. Essentiellement d'origine végétale. Elle connue par son odeur très forte les traces noires de matière organique.
- ➤ **Vase** : La vase est un sol argileux saturé très compressible, contenant des fois de la matière organique, en général d'âge géologique récent. Il présente des caractéristiques mécaniques médiocres et une aptitude à des tassements importants.

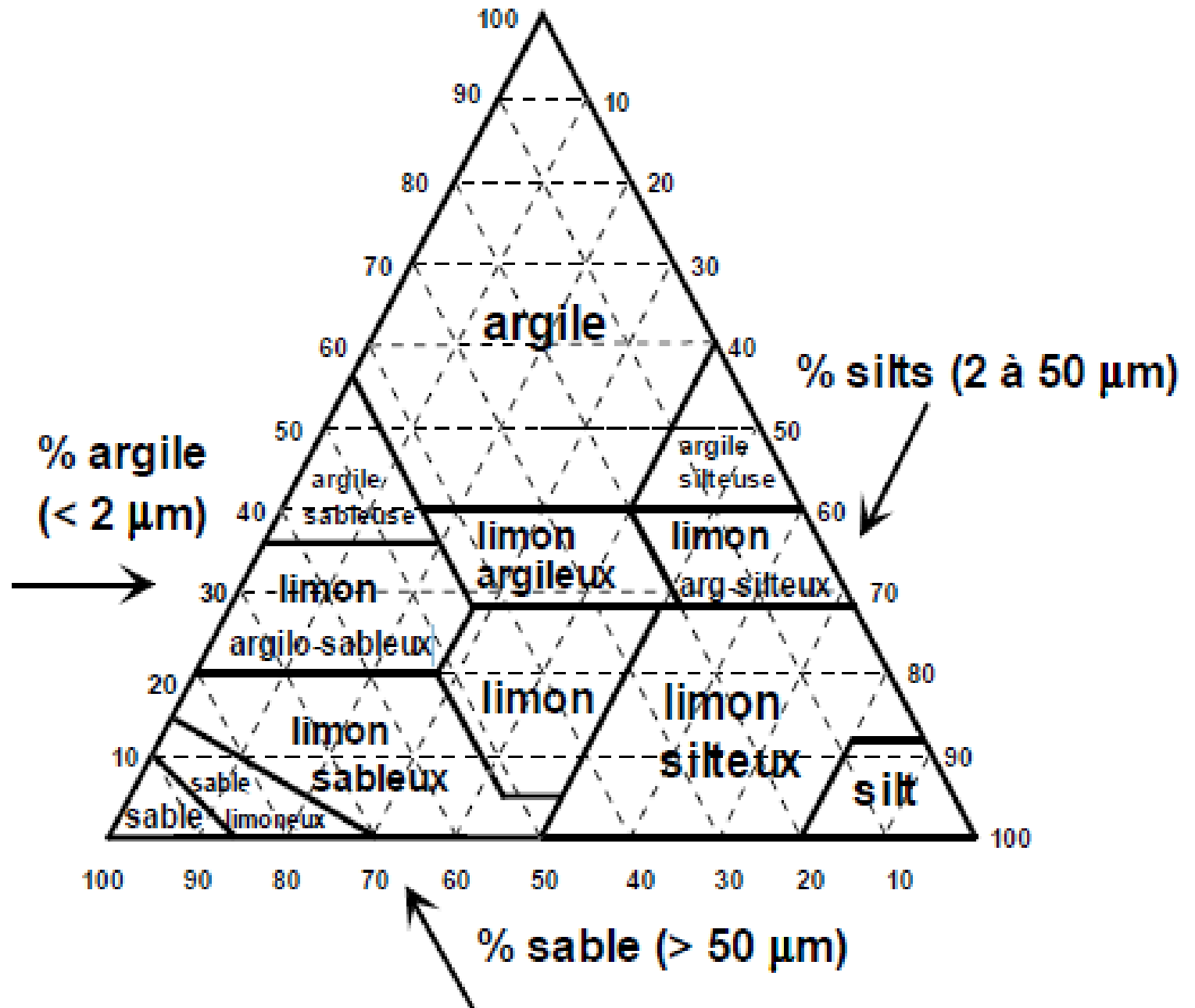
La granulométrie

Définitions et notions de base



La Texture (Granulométrie) du sol :

La texture du sol se définit par ses proportions relatives en argile, limon, sable fin, sable grossier.



Critères de classification



Texture du sol	% de sable	% de limon	% d'argile
Sols sableux	70 et plus	0 à 30	0 à 15
Sols limoneux	0 à 20	80 et plus	0 à 15
Sols argileux	0 à 45	0 à 40	25 et plus
Sols équilibré	40 à 60	30 à 50	15 à 25

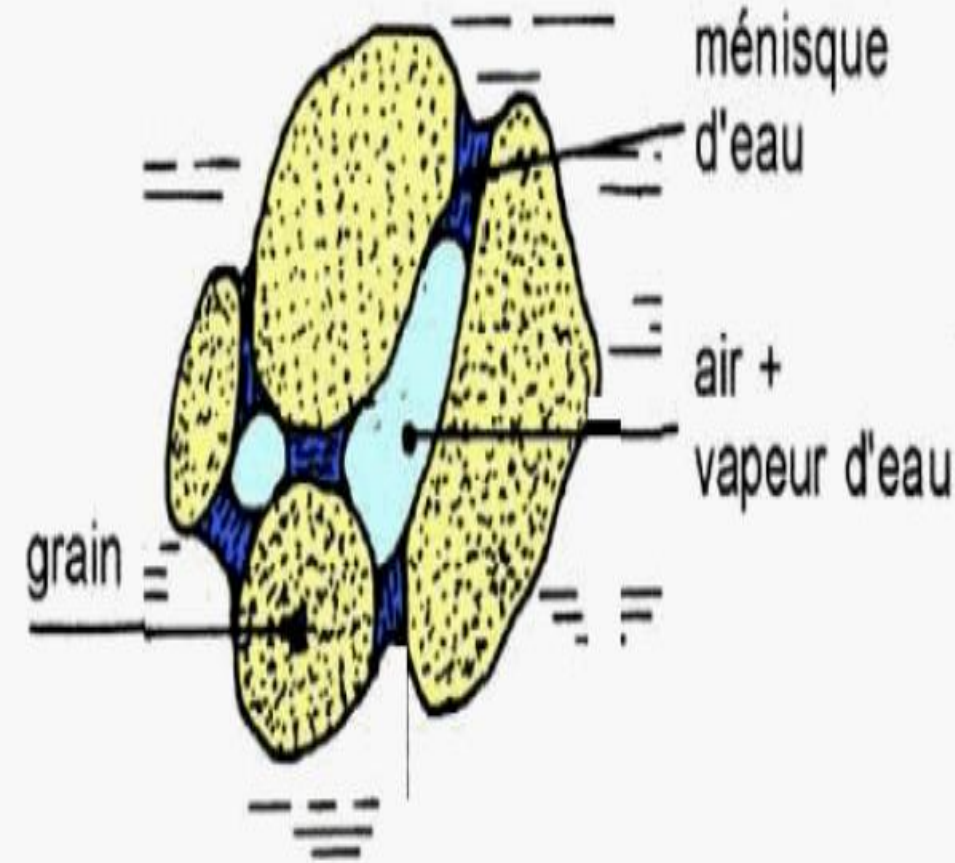
La Structure du sol :



- La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage, à un moment donné, des constituants d'un sol. La structure, contrairement à la texture qui ne change pas, est un état qui évolue dans le temps.

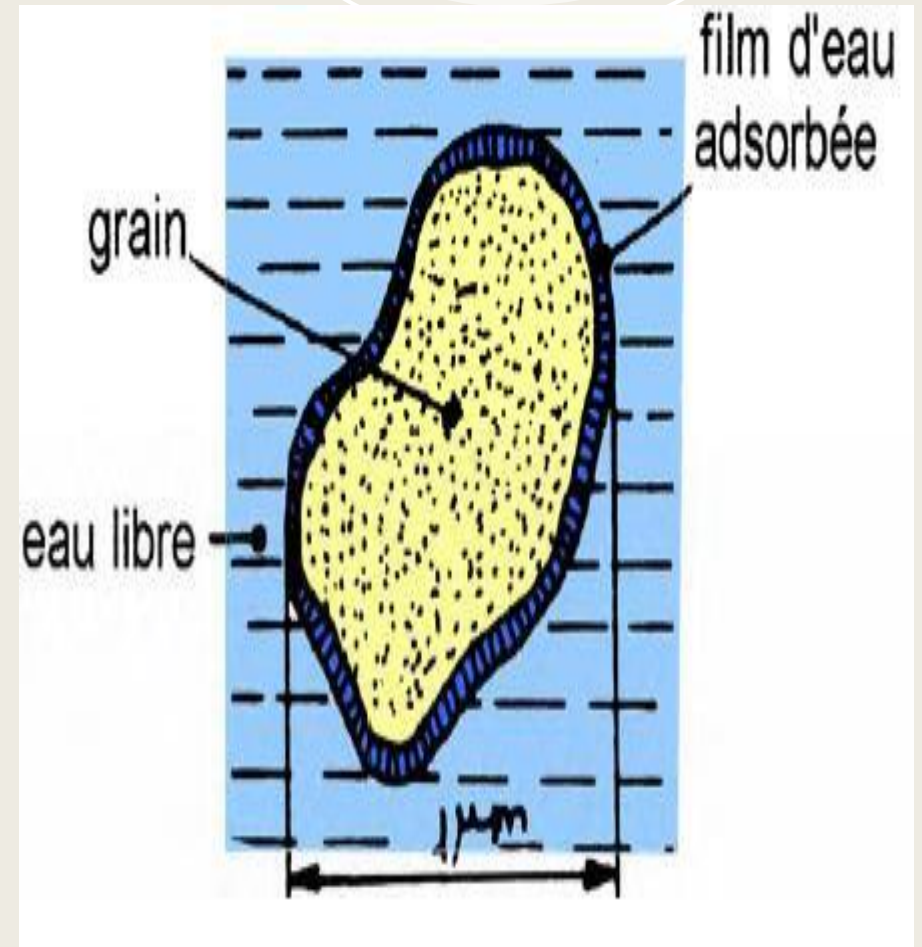
Éléments constitutifs d'un sol

- Du point de vue de ses propriétés physiques et mécaniques, le sol peut être considéré comme un système poreux à trois phases : solide, liquide, gazeuse.
- **La phase Gazeuse :** En Génie Civil, le gaz contenu dans le sol est généralement de l'air pour les sols secs ou un mélange d'air et de vapeur d'eau pour les sols humides. Lorsque tous les vides sont remplis d'eau le sol est dit saturé.



Éléments constitutifs d'un sol

- **La phase Liquide :** Existe sous plusieurs formes (eau de constitution (interfeuillets), eau liée (adsorbée) et l'eau Interstitielle (libre ou capillaire)).
- **La phase Solides :** Provenant de la désagrégation mécanique et/ou chimique d'une roche mère.

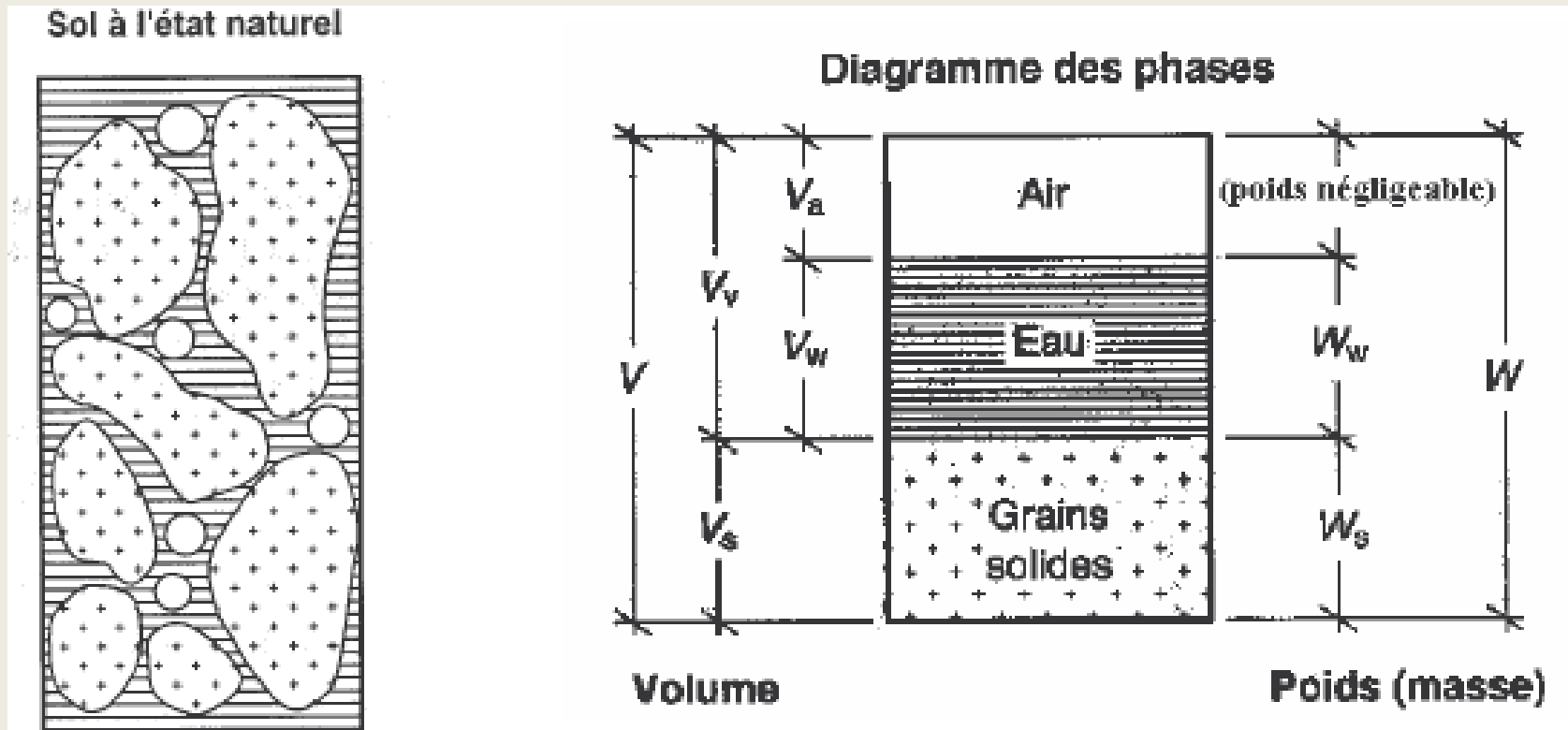


The background features a light beige color with several organic, rounded shapes. These shapes contain different textures: a solid mauve color, a light brown soil with small dark specks, a dark brown soil, and a greenish-brown soil with visible plant matter. The shapes are outlined with thin white lines.

Paramètres de définition des sols

1 Modèle élémentaire d'un sol :

- Le sol étant composé de 3 phases : solide, liquide (eau), gazeuse (air), on définit les volumes et les masses du modèle élémentaire de sol



Définitions et notations :

- V_t : Volume total de l'échantillon de sol.
- V_a : Volume d'air contenu dans l'échantillon de sol.
- V_w : Volume d'eau contenu dans l'échantillon de sol.
- V_s : Volume des grains solides contenus dans l'échantillon de sol.
- $V_v = V_a + V_w$: volume des vides
- W_t : Poids total de l'échantillon de sol.
- W_a : Poids de l'air contenu dans l'échantillon de sol ; il est en général négligeable.
- W_w : Poids d'eau contenu dans l'échantillon de sol.
- W_s : Poids des grains solides contenus dans l'échantillon de sol.



Calculs de Base des Paramètres Physique

Un échantillon de sol prélevé sur un chantier présente les caractéristiques suivantes :

- Volume total de l'échantillon : $V_t = 150 \text{ cm}^3$
- Poids total de l'échantillon : $W_t = 280 \text{ g}$
- Poids après séchage à l'étuve : $W_s = 240 \text{ g}$
- Densité spécifique des grains solides : $G_s = 2.65$

– Questions :

- Calculer le poids de l'eau W_w
- Calculer la teneur en eau w (%)
- Calculer le volume des grains solides V_s
- Calculer le volume des vides V_v
- Calculer la porosité n (%)
- Calculer l'indice des vides e



Pour obtenir les poids volumiques, nous multiplions les masses par l'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Pour simplifier les calculs on prendra généralement $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- On exprimera les forces volumiques en KN/m . Les différents poids volumiques ont les définitions suivantes :

- 1- Le poids volumique (spécifique) total ou humide :

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_t}$$

- 2- Poids volumique apparent du sol sec :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

- 3- Poids volumique absolue (poids volumique des grains solides) :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

- 4- Poids volumique de l'eau :

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 10 \text{ KN} / \text{m}^3 = 1 \text{ t} / \text{m}^3$$

- 5- Poids volumique du sol saturé noté γ_{sat} (lorsque tous les vides sont remplis d'eau) :

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_t}$$

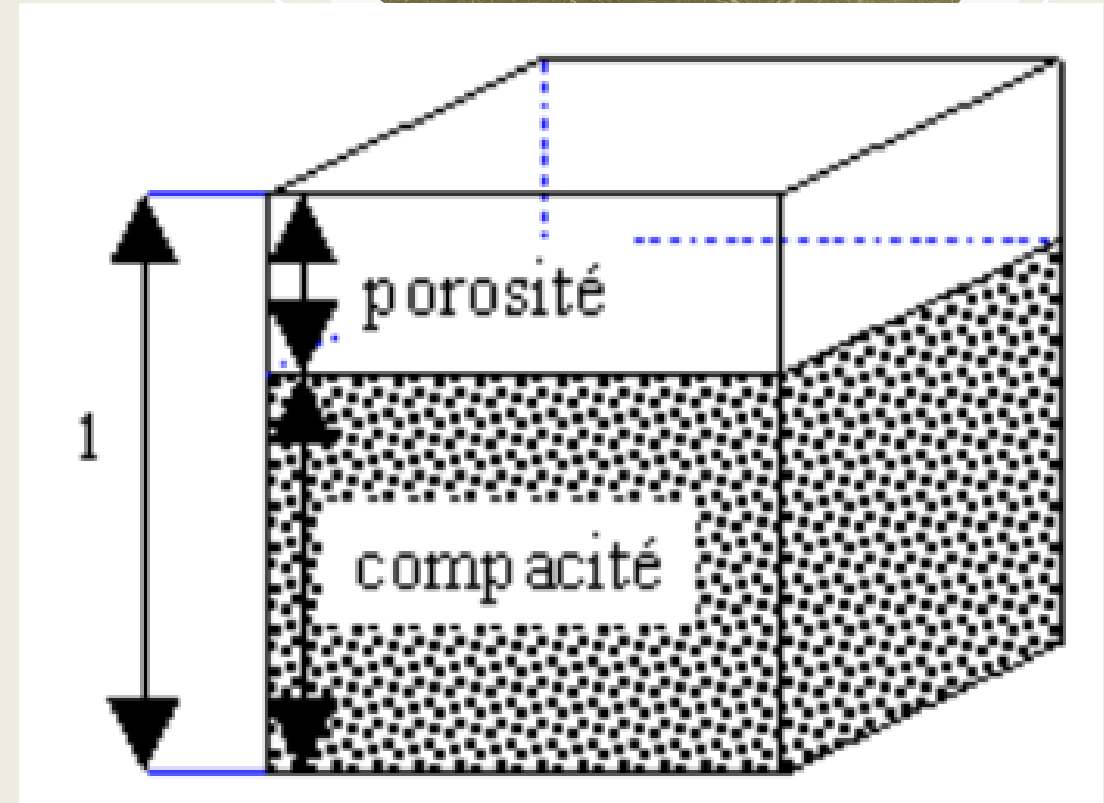
- 6- Poids volumique du sol déjaugé noté γ' : $\gamma' : \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ (Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède).

Rappel

- Enfin les densités sont les rapports d'un poids volumique rapportée à celle de l'eau $\mathbf{D = \gamma / \gamma_w}$, elles s'expriment donc sans unité.
- Les paramètres d'état d'un sol définissent les différents rapports dans lesquels se trouvent les différentes phases d'un sol à un instant donné.



2 Les paramètres d'état :



Volume unitaire

La porosité, compacité et Indice des vides :

➤ **Porosité n** : La porosité est le rapport du volume vide au volume total. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

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

➤ **Compacité C** : La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.

$$C = \frac{V_s}{V_t}$$

. La porosité et la compacité sont liées par relation: $n(\%) + C(\%) = 100\%$

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%.

✓ **Indice des vides e** : résultat du rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$



Teneur en eau :

- Elle est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.
- En général elle est notée '**W**' et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer la teneur en eau d'un matériau quelconque en utilisant la formule suivante:

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$



Degré de Saturation 'Sr' :



- On a remarqué que les matériaux absorbants de l'eau, ont une résistance certainement diminuée. C'est pourquoi on doit déterminer le degré de saturation de matériaux. Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide.
- Le degré de saturation peut se calculer par la formule suivante:

$$S_r (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Exemple de formules :

- Tous ces paramètres ne sont pas indépendants. Ils sont reliés par des relations que l'on peut retrouver à l'aide du modèle élémentaire.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad ; \quad e = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \quad ; \quad S_r = \frac{\omega G_s}{e}$$

$$\gamma_s = (1 + e) \gamma_d \quad ; \quad n = \frac{e}{1 + e} \quad ; \quad \gamma_h = (1 - n) \gamma_s + n \times S_r \times \gamma_w$$



Identification des sols

Les différents paramètres



Paramètres

- Pour caractériser un sol, il faut déterminer :
- ➤ **Les paramètres de nature** indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps (poids volumique des grains solides, granularité, limites d'Atterberg, teneur en matières organiques,...).
- ➤ **Les paramètres d'état** sont fonction de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné (teneur en eau, indice des vides, porosité, Equivalent de sable,...).



1 Paramètres de nature :

1 La masse volumique des particules solides γ_s :

- La détermination de la masse volumique des particules γ_s se fait dans un appareil appelé pycnomètre.
- Une masse connue de sol séché à l'étuve m_s est introduite dans un petit ballon appelé pycnomètre contenant de l'eau distillée. Après avoir éliminé toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides V_s .
- N.B : Pour les sols (à part les sols organiques) :

$$26 \text{ kN/m}_3 \leq \gamma_s \leq 28 \text{ kN/m}^3$$



2 La Granularité :

- Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à $80\mu\text{m}$ et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à $80\mu\text{m}$.

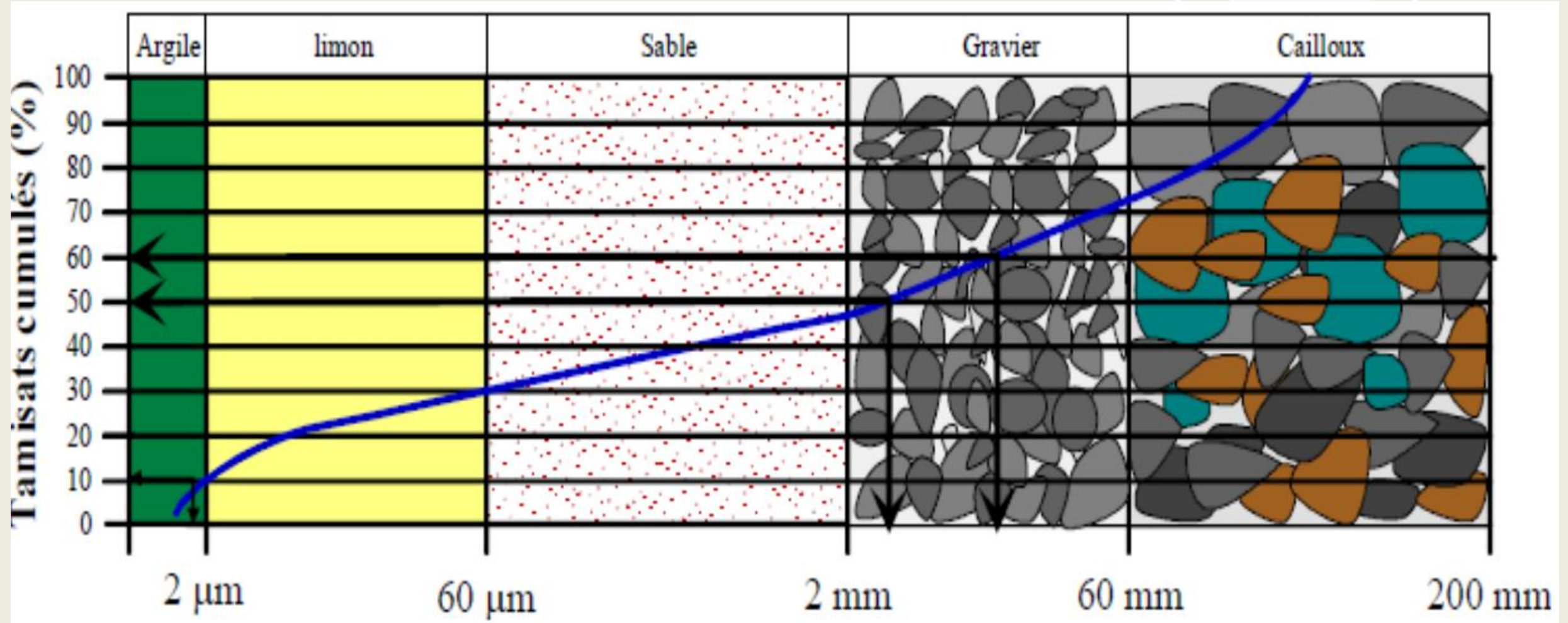


La courbe granulométrique



- La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.
- Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :
 - ✓ En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes ;
 - ✓ En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total, de la fraction du sol dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant).

Les résultats sont traduits sous forme d'une courbe granulométrique,



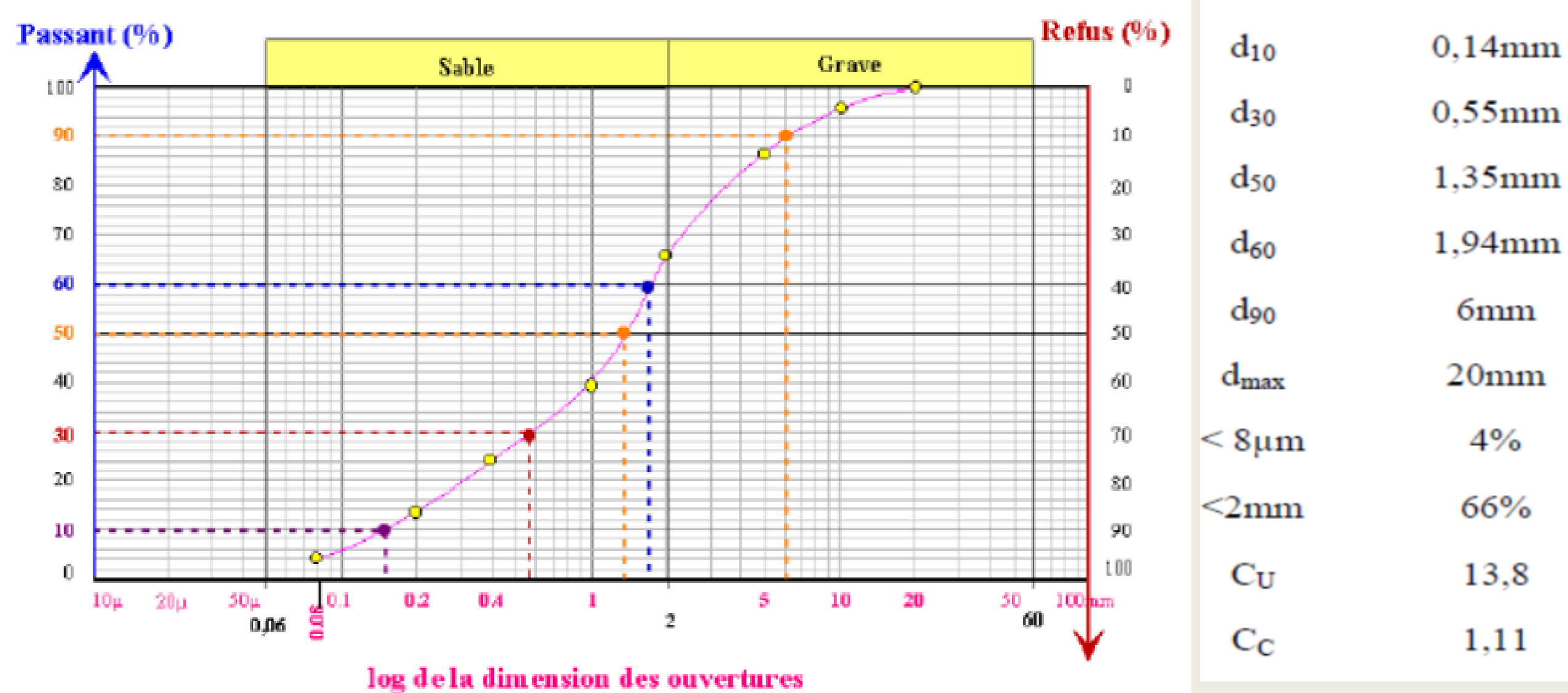
- Les résultats sont traduits sous forme d'une courbe granulométrique, tracée dans des axes semi-logarithmiques, à partir de laquelle on peut déterminer :

- - Le coefficient d'uniformité de Hazen : $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

- - Le coefficient de courbure $C_c = \left[\frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \right]$

- N.B : **di** : diamètre correspondant à i% de pourcentage de tamisat cumulé.

Courbe granulométrique d'un sable (tamisage)



Interprétation

- Pour $C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée,
- Pour $C_u < 2$ la granulométrie est dite uniforme ou serrée.
- Plus la granulométrie est serrée plus la pente de la partie médiane de la courbe est prononcée.
- Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites le, sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière. Quand sa granulométrie est discontinue avec prédominance d'une fraction particulière il, est dit mal gradué.
- Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblai et forment des pentes stables.



3 L'Argilosité

- Pour identifier la fraction argileuse des essais simples ont été développés :
- ➤ **Les limites d'Atterberg** qui caractérisent la consistance des sols fins : solide, plastique, liquide;
- ➤ **L'équivalent de sable ES** qui détermine la proportion de sol fin dans les sables;
- ➤ **L'essai au bleu VBS**, essai nouveau, utilisable pour les sols grenus et les sols fins, mesure l'argilosité globale du sol.



Essais de Consistance : Limites d'Atterberg



- Les argiles forment des pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésion dues à la présence des couches adsorbées. La consistance qui en résulte dépend en grande partie de la teneur en eau du matériau. On distingue alors trois états de la consistance des argiles : états liquide, plastique et solide



- **Limite de liquidité WL** : Elle sépare l'état liquide de l'état plastique.
- **Limite de plasticité WP** : Elle sépare l'état plastique de l'état solide.
- **Limite de retrait WR** : Elle caractérise l'apparition du phénomène de retrait

- Les limites d'Atterberg sont effectuées sur un seul mortier (diamètre des grains inférieur à $400\mu\text{m}$) La limite de liquidité est déterminée soit à la coupelle de Casagrande soit au pénétromètre à cône.
- La limite de liquidité déterminée à la coupelle de Casagrande w_L est par convention la teneur en eau pondérale du sol pour laquelle l'entaille pratiquée dans l'échantillon se referme de 10mm sous 25 coups appliqués à une vitesse normalisée.



	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
Nombre de coups	23	35	18	19
Teneur en eau	35,2	34,05	38,26	37,30

Tableau 1.1 – Détermination de la limite de liquidité : méthode de la coupelle

- La limite de plasticité w_p est par convention la teneur en eau pondérale du sol pour laquelle un rouleau de même sol de 3mm de diamètre et de 100mm de longueur se fissure ou s'émiette.
- L'indice de plasticité I_p : L'étendue du domaine de plasticité est appelée indice de plasticité et désigné par la notation $I_p = W_L - W_p$.

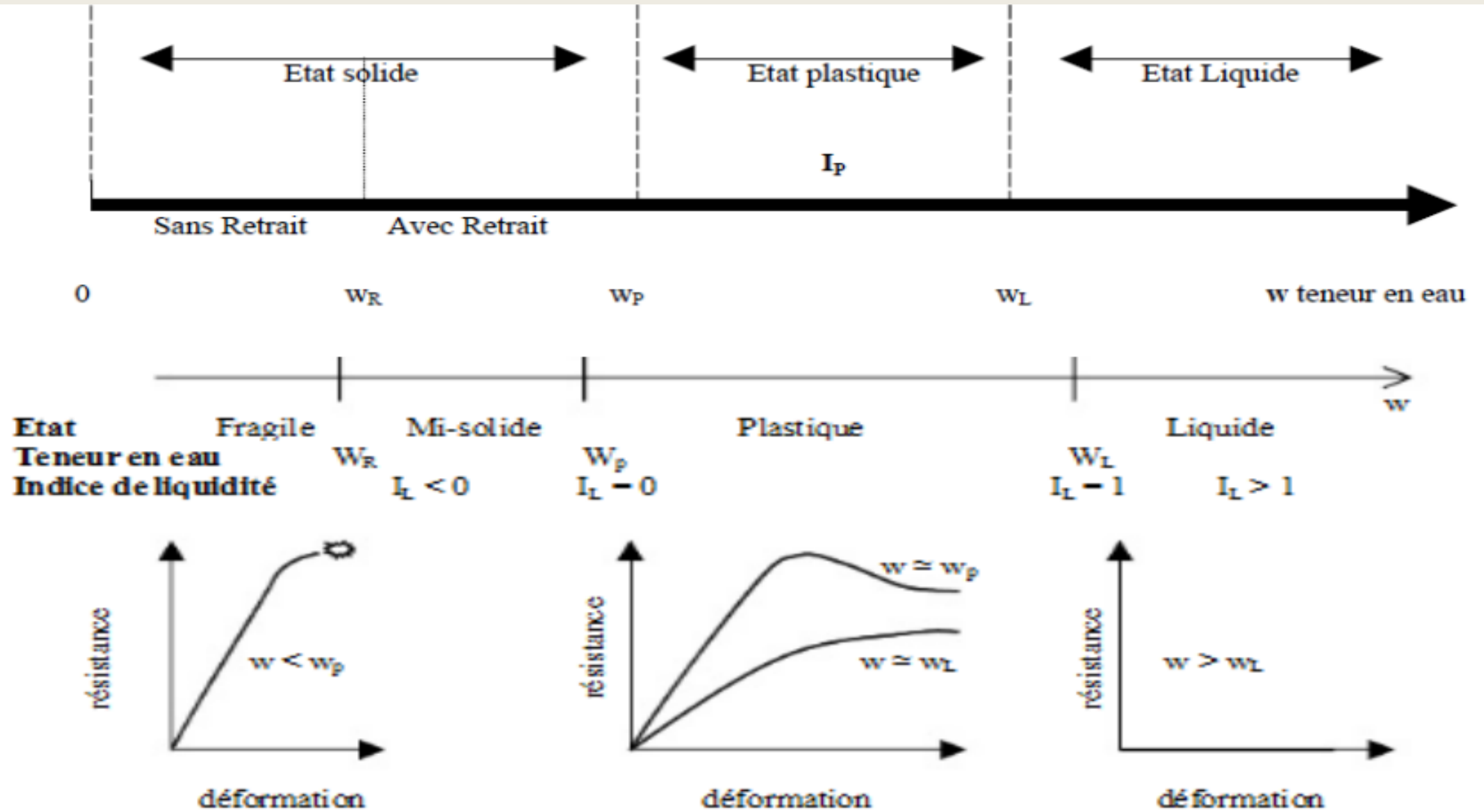


- L'expérience a prouvé que cet indice était extrêmement important pour mesurer le caractère de plus ou moins grande sensibilité à l'eau d'un sol fin. En fonction de la teneur en eau naturelle d'un sol W et pour situer l'état de ce sol par rapport à ses limites d'Atterberg, on utilise souvent un indice de consistance: I_c ; $I_c = (W_L - W) / (W_L - W_P)$.

- Indice de liquidité I_L : Il est défini par

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} = 1 - I_C$$

Relation entre Limites d'Atterberg et comportement mécanique



2 Paramètres d'état

- Ils dépendent de l'état du sol et expriment, à un instant donné, la répartition des 3 phases du sol.
- Il est important de signaler que ces paramètres donnent des indications précieuses sur le comportement du sol soumis aux sollicitations des ouvrages à construire.



1 Détermination de la teneur en eau pondérale w



- La teneur en eau pondérale w se détermine généralement au laboratoire par passage à l'étuve à 105°C . Elle peut se faire aussi bien sur les sols grenus que sur les sols fins, sur des échantillons intacts, remaniés, reconstitués.
- C'est le rapport de la masse d'eau évaporée m_w sur la masse des grains solides m_d ;
- $W (\%) = (\text{masse de l'eau contenue} / \text{masse des particules solides du sol}) \times 100$.
- La teneur en eau naturelle w_{nat} n'est déterminée que sur des « échantillons intacts ».

2 Détermination de la masse volumique totale des sols en laboratoire



- La détermination de la masse volumique totale γ se fait généralement à la balance hydrostatique sur les sols qui ont une cohésion suffisante,

$$\gamma = m / V.$$

6 Classification des sols

- La classification d'un sol consiste à regrouper les sols qui ont une nature, un état, un comportement similaire par rapport à une application géotechnique particulière : géotechnique routière fondations, génie parasismique...



1 La classification géotechnique des sols des LPC



- Elle est adaptée de la classification U.S.C.S (Etats-Unis) est donnée à titre indicatif, elle n'est pas normalisée et n'a pas d'application particulière. Elle est basée d'une part sur l'analyse granulométrique pour les sols à matrice grossière et d'autre part sur les limites d'Atterberg pour les sols à matrice fine ou pour la partie fine des sols grenus.

DIAGRAMME DE CASAGRANDE
(ex. Latérites entre Thiès et Louga au Sénégal)

ligne A :
Horizontalale à $I_p = 4$ à $W_L = 25,5$
ensuite $I_p = 0,73.(W_L - 20)$

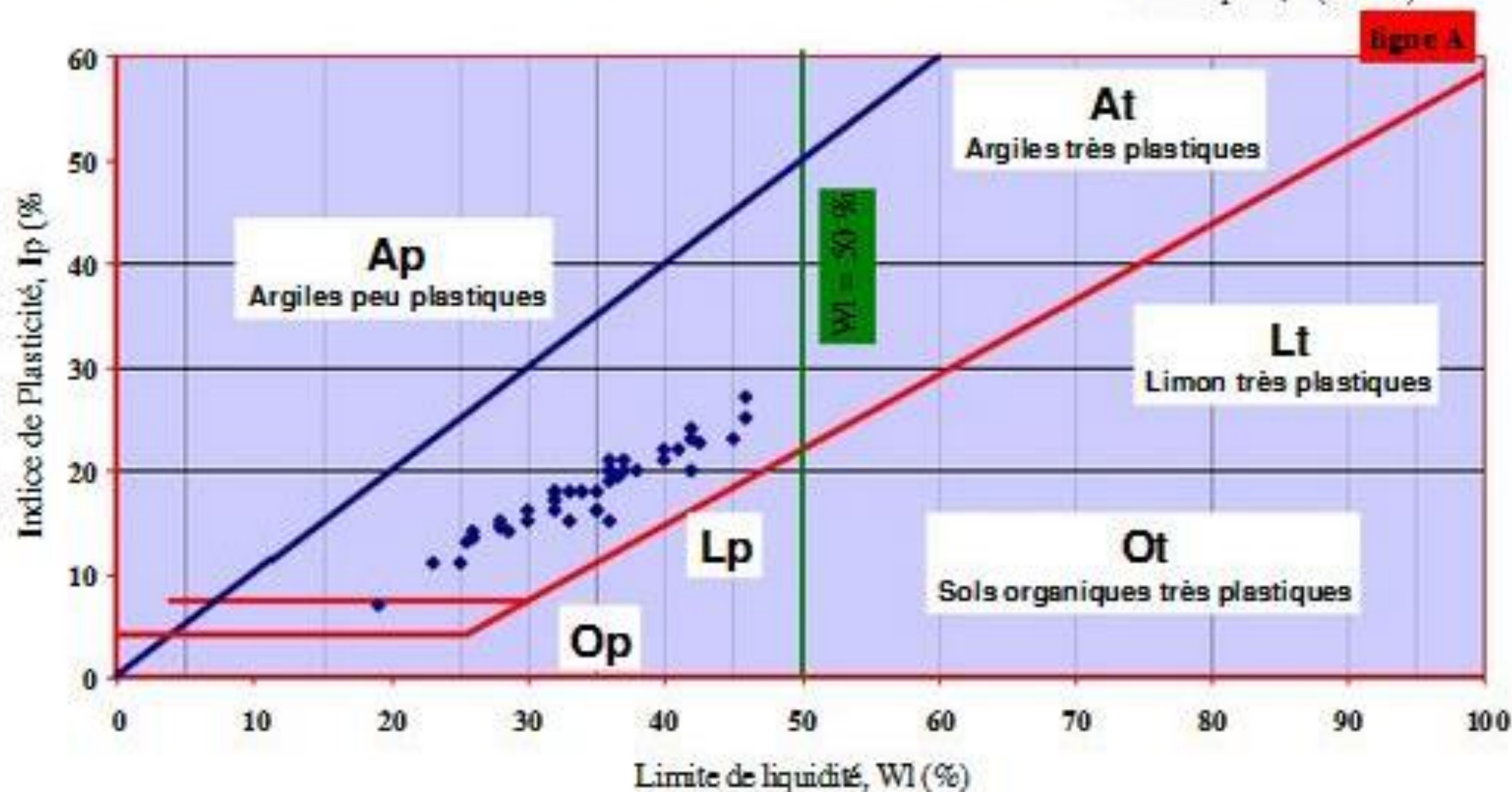


Figure XX. – Diagramme de Casagrande

Classification des sols grenus en laboratoire (plus de 50% des éléments > 80µm)

Définitions			Symboles L.P.C.	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Gb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 4$ et $1 < C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de A	Grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de A	Grave argileuse
Sables	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Sb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $1 < C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de A	Sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de A	Sable argileux
Si 5% d'éléments < 80µm < 12%, on utilise un double symbole					

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$[16] \quad \gamma = (1 + w) \cdot \gamma_d$$

$$[17] \quad \gamma = \gamma_d + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$$

$$[18] \quad \gamma = (1 - n) \cdot \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$$

$$[19] \quad \gamma = \frac{1 + w}{1 + e} \cdot \gamma_s$$

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

$$[21] \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

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

$$[23] \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad *$$

$$[24] \quad \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

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

$$[26] \quad \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$$

Y a-t-il des questions?

Benzian I.F.

imanefazilet.benzian@univ-tlemcen.dz

Institut des **S**ciences et **T**echniques
Appiquées

Université Tlemcen



The background is a light beige color. It features several organic, rounded shapes with white outlines. These shapes contain different textures: a solid mauve color, a brown paper-like texture with small dark specks, a dark brown fibrous texture, a reddish-brown fibrous texture, and a green fibrous texture.

Merci