

Chapitre I

Les sols

1. Définitions

Les matériaux constituant la croûte terrestre se divisent en deux grandes catégories :

Les roches : matériaux "durs" constitués de minéraux plus ou moins altérés et agrégés selon des modes très divers. Les grains minéraux sont liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, prolongées même après immersion dans l'eau.

Les sols : mélanges complexes de grains minéraux résultants de l'altération chimique (oxydation), physique (variation de température, gel,...) et mécanique (érosion) des roches. Dans les sols les grains minéraux peuvent être séparés sous l'effet d'actions mécaniques faibles. Les interstices, ou vides entre les grains solides d'un sol peuvent être partiellement ou totalement remplis d'eau. Ainsi un sol, dans le cas général est composé de trois phases : solide, liquide et gazeuse dont les propriétés physiques et mécaniques sont très différentes. Le comportement d'un sol, composé de ces trois phases dans des proportions variables est donc très complexe, les paramètres qui le déterminent sont nombreux et peuvent évoluer dans le temps.

Poids volumiques

Le poids volumique est le poids par unité de volume d'un matériau. Pour les sols ils sont notés avec la lettre grecque γ complétée par un indice et sont exprimés en kN/m^3 . On distingue les poids volumiques spécifiques qui concernent les éléments du sol (grains et eau) et les poids volumiques apparents qui correspondent à l'ensemble des éléments constituant un sol (grains, eau, air).

Les poids volumiques spécifiques (ou absolus) sont :

γ_s : Poids volumique spécifique des grains solides (25 à 28 kN/m^3)

γ_w : Poids volumique spécifique de l'eau (10 kN/m^3)

Les poids volumiques apparents sont :

γ_d : Poids volumique apparent du sol sec

γ_h : Poids volumique apparent du sol humide

γ_{sat} : Poids volumique apparent du sol saturé

Degré de saturation

Le degré de saturation noté S_r est le rapport entre le volume d'eau et le volume des vides dans un sol. C'est un paramètre sans dimension qui est souvent exprimé en pourcentage.

Un sol sec a un degré de saturation de 0 % et un sol saturé en eau a un degré de saturation de 100%.

Teneur en eau

La teneur en eau d'un sol humide, notée w est exprimée en pourcentage, c'est le rapport entre le poids (ou masse) d'eau contenue et le poids (la masse) du sol après séchage. Un sol sec aura donc une teneur en eau nulle.

Attention : un sol saturé n'aura pas une teneur en eau de 100 % .

Porosité

La porosité notée n est un rapport de volumes exprimé en pourcentage. C'est le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un sol, elle exprime le pourcentage de vide dans un sol.

Indice des vides

L'indice des vides noté e est le rapport exprimé en pourcentage entre le volume des vides et le volume solide. L'indice des vides exprime la compacité de l'arrangement granulaire d'un sol : un faible indice des vides correspond à une faible proportion de vide dans un sol, donc à un arrangement granulaire compact.

N.B. Un indice des vides supérieur à 100 % est possible.

Relations entre ces paramètres

Il est possible de trouver des relations entre les paramètres physiques d'un sol, le tableau ci-dessous rassemble les relations les plus fréquemment utilisées.

	Définition	Unité	Avec n	Avec e	Avec γ_h	Avec γ_d
w	$\frac{W_w}{W_s}$	[]			$\frac{\gamma_h - \gamma_d}{\gamma_d}$	
n	$\frac{V_v}{V_t}$	[]		$\frac{e}{1+e}$	$1 - \frac{\gamma_h}{\gamma_s \cdot (1+w)}$	$\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}$
e	$\frac{V_v}{V_s}$	[]	$\frac{n}{1-n}$		$\frac{\gamma_s \cdot (1+w)}{\gamma_h} - 1$	$\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$
γ_h	$\frac{W_s + W_w}{V_t}$	kN.m ⁻³	$\gamma_s \cdot (1-n)(1+w)$			$\gamma_d \cdot (1+w)$
γ_d	$\frac{W_s}{V_t}$	kN.m ⁻³	$\gamma_s \cdot (1-n)$	$\frac{\gamma_s}{1+e}$	$\frac{\gamma_h}{1+w}$	
S_r	$\frac{V_w}{V_v}$	[]	$\frac{w \cdot \gamma_s \cdot (1-n)}{n \cdot \gamma_w}$	$\frac{w \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w}$		$\frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}}$

W_s : Poids de la partie solide d'un échantillon de sol (égal au poids du sol sec)

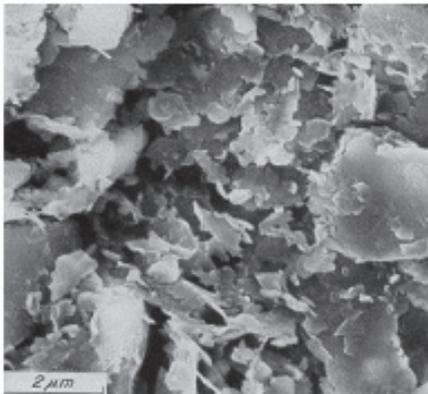
W_w : Poids de la partie liquide (eau) d'un échantillon de sol

- V_s : Volume de la partie solide d'un échantillon de sol
 V_w : Volume de la partie liquide (eau) d'un échantillon de sol
 V_v : Volume des vides dans un échantillon de sol (ce volume est plus ou moins rempli d'eau selon l'état hydrique du sol)
 V_t : Volume total apparent d'un échantillon de sol ($V_t = V_s + V_v$)

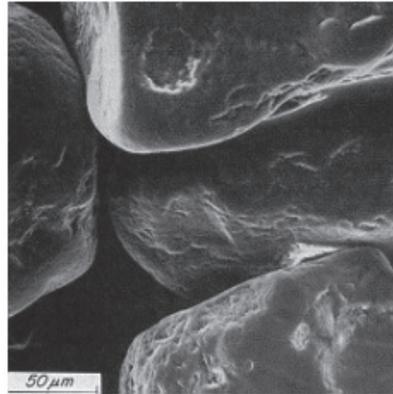
2. Comportements spécifiques des sols

Les terrains sont formés de sols de différentes natures répartis le plus souvent en couches successives plus ou moins continues. Chacune de ces couches de sol, de caractéristiques très variées sont formées en majorité de grains de différentes tailles dont la répartition et les arrangements vont déterminer très largement le comportement global. C'est pourquoi la granulométrie et la compacité des terrains figurent parmi les premières préoccupations du géotechnicien.

Lorsque les sols sont composés en grande partie de particules de taille microscopique, ils sont dits fins ou argileux et présentent une grande sensibilité aux variations hydriques. Lorsque les sols sont composés principalement de grains visibles à l'œil nu, ils sont qualifiés de *grenus* ou *grossiers*. Ces terrains présentent généralement de bonnes caractéristiques mécaniques.



Vue au microscope d'un sol argileux



Vue au microscope d'un sol grenu

Les sols argileux

Un sol contenant de l'argile a une faible perméabilité, une grande plasticité, une forte cohésion, un faible frottement inter-granulaire et est compressible.

La teneur en eau d'un sol argileux détermine sa consistance qui passe, à teneur en eau croissante, de l'état solide à l'état plastique puis de l'état plastique à l'état liquide.

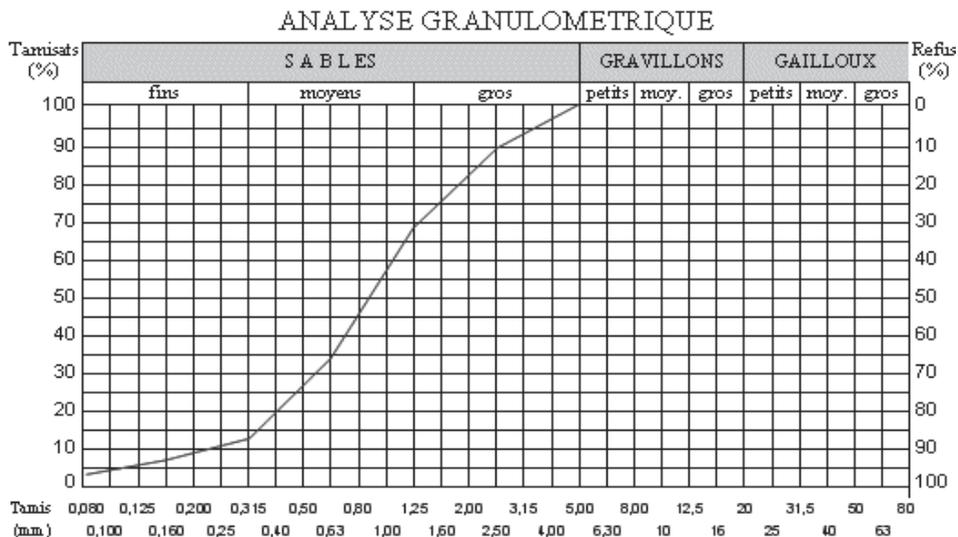
La plupart des caractéristiques des sols argileux sont considérées comme étant plutôt défavorables pour y bâtir des ouvrages. On évite donc dans la mesure du possible de construire sur un terrain argileux. Cependant, dans certains cas l'argile est utilisée pour ses propriétés spécifiques, par exemple pour réaliser des forages, des barrières étanches ou pour décontaminer des terrains.

Les sols grenus

Selon la distribution granulométrique, la forme des grains et l'arrangement granulaire, la gamme des indices des vides d'un sol grenu peut être étendue. On distingue deux états extrêmes : l'état lâche, caractérisé par un indice des vides élevé et l'état dense caractérisé par un faible indice des vides.

L'étude granulométrique consiste à déterminer les proportions relatives pondérales des différentes fractions granulaires, elles est représentée par une courbe appelée courbe granulométrique. Une courbe étalée indique une bonne répartition en taille des grains, ce qui est favorable pour les propriétés mécaniques. En fonction de l'allure de la courbe granulométrique on peut par exemple prédire si un arrangement granulaire « dense » par compactage est possible.

La forme et la rugosité des grains qui composent un sol grenu sont également à considérer, elles vont déterminer l'importance des frottements inter-granulaires et donc les propriétés mécaniques intrinsèques du sol.



Exemple de courbe granulométrique

3. Essais d'identification des sols

Les essais d'identification des sols sont réalisés sur des échantillons remaniés, prélevés lors des sondages de reconnaissance. Ils permettent de déterminer la nature des sols ainsi que leurs caractéristiques physiques, comme les poids volumiques, la granulométrie, les teneurs en eau et la sensibilité aux variations d'état hydrique. Les paramètres déduits des essais d'identification rentrent dans les critères de classification qui permettent d'exprimer en quelques mots les caractéristiques globales d'un sol, ce qui est très utile pour les échanges entre spécialistes.

Mesure des poids volumiques

Pour mesurer les *poids volumiques apparents* on peut utiliser deux méthodes :

- La méthode du moule pour les sols grenus : On remplit complètement un moule préalablement taré dont on connaît le volume, le poids volumique est calculé grâce à la formule suivante :

$$\gamma_h = \frac{\text{Poids du moule plein de sol} - \text{poids du moule vide}}{\text{Volume du moule}}$$

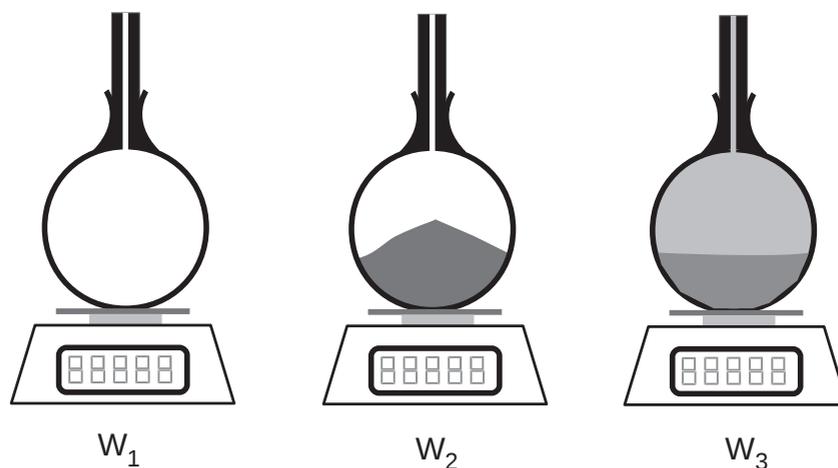
- La méthode de la trousse coupante pour les sols argileux : On effectue un poinçonnement avec une trousse coupante dans l'échantillon. Les faces de la prise d'essai sont soigneusement arasées aux extrémités. Le poids volumique est calculé grâce à la formule suivante :

$$\gamma_h = \frac{\text{Poids de la trousse pleine de sol} - \text{poids de la trousse vide}}{\text{Volume de la trousse}}$$

N.B. Les balances mesurent des masses exprimées en grammes, il est nécessaire de calculer les poids correspondants à chaque mesure de masse pour déterminer les poids volumiques. Une masse de 1 kg correspond à un poids de 10 N environ.

Pour mesurer les *poids volumiques spécifiques* des grains composants un sol on utilise le plus souvent un pycnomètre à eau qui est un récipient en verre muni d'un bouchon rodé à tube capillaire.

Après avoir déterminé avec précision le volume intérieur V du pycnomètre, on pèse le pycnomètre vide W_1 , on introduit ensuite un poids de sol sec dans le pycnomètre qui pèse alors W_2 . Enfin on complète le remplissage du pycnomètre avec de l'eau de poids volumique connu (γ_w) en prenant soin de bien faire échapper toutes les bulles d'air. Le poids du pycnomètre remplis de sol et d'eau est alors noté W_3 .



Le poids volumique spécifique des grains est calculé grâce à la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{W_2 - W_1}{V - \frac{W_3 - W_2}{\gamma_w}}$$

N.B. Il est important de respecter les unités pour appliquer la formule, par exemple les poids en newtons, les volumes en m³ et les poids volumiques en N/m³. Cette méthode n'est pas applicable lorsque le sol contient des particules de taille microscopique.

Attention : Il est courant de confondre les masses volumiques, les poids volumiques et les densités qui expriment la même notion. :

- La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume de celui-ci. C'est une grandeur exprimée pour les sols en kg/m³ ou T/m³.
- Le poids volumique est une grandeur physique qui caractérise le poids d'un matériau par unité de volume de celui-ci. Il est obtenu en multipliant la masse volumique par l'accélération du champ de gravité terrestre ($g = 9,81\text{m.s}^{-2}$). C'est une grandeur notée γ et exprimée pour les sols en kN/m³.
- La densité est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique de l'eau pure à 4°C. C'est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure, par sa définition la densité de l'eau pure à 4°C est 1.

Mesure de la granulométrie

On a vu que la taille des grains détermine le comportement des sols, en particulier la séparation entre les sols dits grenus et les sols dits argileux. L'analyse granulométrique consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol. On adoptera une technique de mesure granulométrique selon la taille des particules à identifier dans un sol :

- Pour les grains de dimension supérieure à 0,08 mm un simple *tamissage à sec* suffit. Cet essai consiste à placer sur une colonne de tamis de dimension décroissante du haut vers le bas une quantité connue de sol sec. Après tamissage, on pèse les refus sur chaque tamis pour tracer la courbe granulométrique (voir page 4).
- Pour des particules plus fines, on a recours à *l'analyse sédimentométrique* : Le principe de l'essai repose sur le fait que des particules en suspension dans un milieu liquide au repos se déposent plus ou moins vite selon leur dimension (loi de Stokes). Ainsi, la densité de la suspension diminue progressivement avec le temps. Le suivi de la densité de la suspension au cours du temps permet donc de déterminer indirectement la répartition en taille des grains de la suspension initiale.
- Pour des particules de taille microscopique (argileuse), on utilise *l'essai au bleu de méthylène*. Le principe de cet essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu (colorant) dans une suspension de sol jusqu'à ce que la surface des particules en soit saturée. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai. La quantité de bleu de méthylène pouvant se fixer sur la surface des particules de la prise d'essai est directement liée à la surface spécifique des

particules constituant le sol. Plus un grain est fin plus sa surface spécifique est grande. La valeur de bleu de méthylène, notée MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de la fraction 0/2 mm d'un sol. Plus la valeur de bleu est élevée plus la proportion d'élément fin est importante.

N.B. La surface spécifique d'un sol est le rapport entre la surface extérieure de l'ensemble des grains la composant et la masse totale des grains. Elle est généralement exprimée en m²/g.

Mesure des teneurs en eau

La mesure de la teneur en eau w d'un sol ou d'un granulat est une action très courante, elle consiste à peser l'échantillon avant et après séchage puis d'appliquer la formule suivante :

$$w = \frac{\text{Masse d'eau évaporée}}{\text{Masse de sol sec}} = \frac{\text{Poids d'eau évaporée}}{\text{Poids de sol sec}}$$

Le mode opératoire de l'essai est fixé par des normes qui prévoient que le séchage s'effectue dans une étuve chauffée à 105°C ou, pour des essais plus rapides au four à micro-ondes ou à la plaque chauffante.

N.B. les balances mesurent des masses en grammes mais il n'est pas nécessaire de calculer les poids correspondants pour déterminer les teneurs en eau en pourcentage.

Limites d'Atterberg

La consistance d'un sol contenant une grande proportion d'éléments argileux varie suivant sa teneur en eau. Plus précisément, à teneur en eau croissante un sol argileux passe de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide. Le passage d'un état à l'autre s'effectue de façon progressive, néanmoins il existe des essais permettant de déterminer pour un sol donné les teneurs en eau limites pour lesquelles ces changements d'état s'observent.

w_l : teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état liquide appelée limite de liquidité.

w_p : teneur en eau qui sépare l'état solide de l'état plastique appelée limite de plasticité.

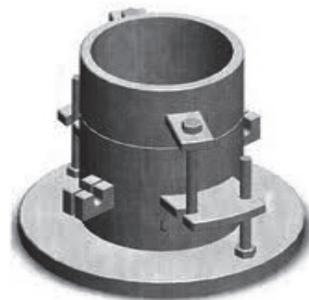
Ces limites sont appelées limites d'Atterberg, ce sont des paramètres utilisés dans les classifications de sol.

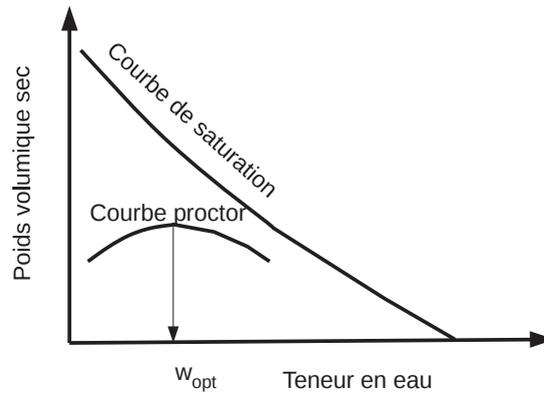
Essai Proctor

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale de compactage conduisant à une force portante maximale pour un sol donné.

L'essai consiste à compacter des échantillons de sol dans un moule normalisé en adoptant diverses valeurs de teneur en eau.

En reportant sur un graphe les poids volumiques apparents secs obtenus en fonction des teneurs en eau, on détermine la teneur en eau optimale de compactage notée w_{opt} .





N.B. Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Le compactage resserre les grains et améliore globalement les propriétés mécaniques d'un sol.

4. Exercices d'application

4.1. Énoncés des exercices

Exercice 1. 1

Un échantillon de sol humide placé dans un récipient en verre a une masse totale de 462 g. L'ensemble après séchage en étuve a une masse de 364 g.

Sachant que la masse du récipient en verre est de 39 g, calculer la teneur en eau du sol.

Exercice 1. 2

Un échantillon de sable sec a un poids volumique apparent de $15,9 \text{ kN/m}^3$.

Calculer son indice des vides et sa porosité. ($\gamma_s = 26,9 \text{ kN/m}^3$).

Exercice 1. 3

Un échantillon cylindrique d'argile complètement saturée a un diamètre de 55 mm et une longueur de 78 mm. Sa masse nette est de 331 g. La masse volumique des particules est de $2,67 \text{ g/cm}^3$.

Déterminer l'indice des vides, la porosité, la teneur en eau et le poids volumique saturé de cet échantillon. Prendre $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Exercice 1. 4

Compléter le tableau ci-dessous.

sols	γ_h kN/m ³	γ_d kN/m ³	e en %	n en %	S_r en %	w en %	γ_s kN/m ³	V_t cm ³	masse _h en g	masse _d en g
1	17,6	?	57	?	?	0	?			
2	?	?	?	48	?	34	26,5			
3	17,3	?	73	?	?	?	27,1			