

LES SOLS

1. - GENERALITES

Pour l'ingénieur le sol est constitué d'un assemblage naturel de grains minéraux facilement séparables (l'argile, le sable par exemple). Quant à la roche, la liaison entre les grains minéraux est plus forte (par exemple, le calcaire, le granite, le gabbro, etc.). De plus en plus, il est fait distinction entre les notions de «soft soil» et «hard soil». Ces concepts expliquent tout simplement, la difficulté qu'il y a de trouver une barrière franche entre le sol et la roche. Que dire d'une marne compacte ?

Le sol est donc un complexe constitué de solides et des fluides en circulation. Les fluides en circulation sont l'eau et l'air. Le squelette solide est ensemble formé par les particules solides mais dans leur arrangement naturel.

2. - LES ELEMENTS DU SOL

2.1. Les grains solides/Grains minéraux

Ils proviennent de la désagrégation mécanique ou de la transformation chimique de la roche-parent. Les plus gros éléments ($\varnothing > 2\mu\text{m}$) proviennent de la désagrégation mécanique. Pour les plus petits cette désagrégation mécanique s'accompagne d'une altération chimique. Selon la dimension des particules, on adoptera les dénominations suivantes :

$\varnothing < 2\mu\text{m}$	<i>Argile</i>	Fraction fine
$2\text{ mm} < \varnothing < 20\ \mu\text{m}$	<i>Limon</i>	<i>ou</i>
$20\text{ mm} < \varnothing < 200\ \mu\text{m}$	<i>Sable fin</i>	Filler
-----80 μm -----		
$0,2\text{ mm} < \varnothing < 2\text{ mm}$	<i>Sable grossier</i>	
$2\text{ mm} < \varnothing < 20\text{ mm}$	<i>Gravier</i>	Fraction grossière
$20\text{ mm} < \varnothing < 200\text{ mm}$	<i>Cailloux</i>	
$\varnothing > 200\text{ mm}$	<i>Blocs rocheux</i>	

Tableau 1. - Dénomination établies des particules solides

La limite à $80\mu\text{m}$ correspond aux dimensions limites des mailles d'un tamis normalisé, obéissant à une progression géométrique particulière. Du fait de leur nature, les particules d'argile sont le siège d'importantes forces de liaison qui donnent au sol des propriétés particulières. On distinguera donc parmi les particules solides, celles constituées de minéraux non argileux et les particules argileuses. Cette distinction est d'ailleurs assez simpliste car les processus pédogénétiques, qui sont d'ailleurs très complexes, permettent de passer des uns aux autres. Par exemple, un granite essentiellement constitué de matériaux «dits» inertes peut se transformer dans le temps en une arène granitique qui lui-même évoluera vers un matériau purement argileux. Dans cet exemple, les minéraux tels les pyroxènes, les amphiboles évoluent vers des matériaux à structures argileuses. Tandis que les autres, à structure beaucoup plus grossières restent non argileux. Il s'agit dès lors de définir ou de prévoir l'évolution des matériaux beaucoup plus par leur structure que par nature.

2.1.1. - Structure des matériaux pulvérulents

Ce sont les matériaux essentiellement constitués de solides inertes. On les rencontre rarement dans les particules inférieures à $2\ \mu\text{m}$. Les plus gros éléments sont composés de quartz, de matériaux calcaires ou d'autres corps silicatés. Ces minéraux, même lorsqu'ils sont fins, ont une faible activité et contribuent peu aux propriétés physico-chimiques apportées par les minéraux «dits» argileux telles que la plasticité ou la cohésion. On retrouve dans ce groupe, les sols

pulvérulents, les sables, les graviers, les cailloux, les blocs. Ces matériaux sont ainsi à structure granulaire ce qui a un impact important dans le comportement global du sol. A raison des dimensions surfaciques assez importante des contacts grain-grain, les forces de pesanteur sont prépondérantes vis à vis des forces d'attractions capillaires qui s'exercent sur chaque grain.

2.1.2. - *Structure des argiles*

Les argiles sont les particules fines dont la genèse est un processus plus ou moins accompli en partant de la roche-mère. Le passage de la roche-mère à l'argile est provoqué par un ensemble d'actions mécaniques, chimiques, et cristallographiques complexes connues sous le nom de processus pédogénétique. Les grains argileux sont constitués d'un empilement de feuillets chargés électriquement qui glissent les uns par rapport aux autres. On dit qu'ils ont des propriétés colloïdales. On distingue 3 groupes principaux d'argiles qui se différencient par la distance entre feuillets :

- les **Kaolinites** (distance entre feuillets 7 Å),
- les **Illites** (distance entre feuillets 10 Å) ;
- les **Montmorillonites** :(distance entre feuillets 15 Å à 25 Å).

Les deux premières dont les distances entre feuillets sont faibles ne laissent quasiment pas pénétrer l'eau entre les feuillets. On a des argiles non gonflantes. Par contre les montmorillonites laissent pénétrer l'eau : ce sont des argiles gonflantes (Les marnes de Rufisque, les sols argileux de la Presqu'île de Dakar,...) (smectites, bédellites,...).

Il faut donc bien noter que lorsque nous parlerons de grains, il s'agit en fait d'un empilement de feuillets chargés électriquement. Cette charge constitue ce que l'on appelle l'activité superficielle du minéral. Plus les particules sont petites et plus l'activité est grande, à tel point que les propriétés de ces particules influencent fortement les propriétés de l'agrégat. On dit que la substance est à l'état colloïdal.

2.2. - L'eau

Dans les sols, l'eau existe sous trois (3) formes :

- L'eau de constitution ou l'eau liée aux particules.
- L'eau de l'espace interfoliaire (Celle-ci peut être catégorisée à la première forme). Il s'agit essentiellement de l'eau inter-feuillet. Elle fait partie intégrante de certains minéraux des argiles comme les Montmorillonites.
- L'eau interstitielle composée de l'eau libre et l'eau orientée (encore appelée eau adsorbée). L'eau adsorbée fait partie intégrante du grain solide et dépend des charges électriques des feuillets. Elle joue un rôle sur les propriétés mécaniques des sols et les influences extérieures qu'elles subissent (température, cisaillement, modification de la concentration d'un électrolyte) peuvent modifier les propriétés du sol. C'est la raison pour laquelle on s'efforcera d'effectuer les essais de laboratoire à des températures voisines de celle du sol en place. D'autre part, l'eau adsorbée permet de définir les 3 états du sol :

Etat solide

les grains sont en contact. L'eau adsorbée entoure les paquets de grains.

Etat liquide

chaque grain est entouré d'une pellicule d'eau adsorbée, le tout "nageant" dans l'eau libre.

Etat plastique

c'est un état transitoire entre les 2 premiers. Les grains ne sont quasiment plus en contact. Mais il faut fournir un effort pour les séparer et rompre l'interaction créée par l'eau adsorbée.



2.3. - Les gaz

Le sol est dit saturé lorsque tous les vides entre les particules solides sont remplis d'eau. Dans le cas contraire, l'eau reste concentrée aux points de contact et elle est retenue par des forces de capillarité. Les interstices restants sont remplis de vapeur d'eau, d'air ou de gaz divers résultant de la décomposition de matières organiques (méthane).

3. - RECONNAISSANCE DES SOLS

La reconnaissance des sols a pour but de déterminer les conditions de fondation d'un ouvrage : en particulier avoir une idée de la structure du sol (voir si les prévisions géologiques sont vérifiées). La reconnaissance des sols doit d'abord permettre de localiser les différentes couches de terrain et de préciser la configuration générale de la zone à étudier. Elle doit ensuite donner des informations sur les caractéristiques mécaniques de chaque couche. On établit un programme de reconnaissance des sols qui est fonction des caractéristiques de l'ouvrage à réaliser et de la nature géologique de la zone d'implantation.

- **Principe essentiel :**

Il ne faut jamais procéder par analogie et extrapolation des résultats obtenus sur un chantier voisin. L'hétérogénéité des sols est telle que même dans un terrain bien connu, des anomalies locales peuvent se présenter.

- **Nombre de reconnaissances souhaitable :**

Les contraintes économiques ne permettent pas toujours d'exécuter un très grand nombre de sondages et il faut distinguer les avant-projets des projets définitifs. Sauf pour les terrains anormalement hétérogènes, une campagne de reconnaissance doit comporter un sondage tout les 500 m². Un nombre de trois paraît être le minimum. Dans la construction de bâtiments, il est d'usage de respecter une distance de 15 m entre deux sondages consécutifs et ceci dans deux directions perpendiculaires. Pour les très grands ouvrages on peut la porter à 30 ou 70 m.

- **Profondeur souhaitable :**

Ille est telle que toutes les couches pouvant être influencées par le chargement soient atteintes. Dans la pratique :

- Pour des massifs de fondation isolés : triple largeur des semelles avec un minimum de 6m.
- Pour un radier général ou pour un ensemble d'ouvrages dont les effets se superposent dans les couches profondes : 1,5 fois la largeur de la construction.

En résumé on adopte les profondeurs suivantes :

$D = 4,5 \times B$ si $C < 2 \times B$	L : Longueur des semelles ($L > B$) B : Largeur des semelles C : Distance séparant les côtés les plus proches D : Profondeur minimale de sondage
$D = 3 \times B$ si $2 \times B < C < 4 \times B$	
$D = 1,5 \times B$ si $C > 4 \times B$	

- **Remarque :**

Cette profondeur minimale de sondage ou encore profondeur d'ancrage des ouvrages de fondations sera explicité plus loin car nécessitant un assemble de concepts seulement développés plus haut.

La reconnaissance des sols peut se faire de deux manières :

- Prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés en vue de leur analyse en laboratoire,
- Essais *in situ*.

a. - Prélèvement d'échantillons intacts :

Un échantillon est intact si le prélèvement n'a pas modifié ses propriétés. En fait la difficulté réside dans l'extraction de ces échantillons, d'autant plus qu'il est difficile de juger si un échantillon est intact ou non. Les essais de laboratoire effectués sur ces prélèvements sont censés représenter le comportement du sol en place sollicité par les charges apportées par l'ouvrage étudié. Pourtant, les sollicitations du sol sont parfois différentes de celles auxquelles sont soumis les échantillons et on ne sait pas toujours bien utiliser les caractéristiques données par les essais de laboratoire. Dans ces derniers on distingue les essais d'identification (poids spécifiques, teneur en eau, granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en CaCO₃, teneur en matières organiques, etc.) et les essais mécaniques (essais de cisaillement, de compressibilité, etc.).

b. - Les essais "in situ" :

Ils sont effectués directement dans la masse du sol à étudier. Ils ont l'avantage d'être effectués dans les conditions mêmes où se trouvera le sol lorsqu'il sera sollicité par l'ouvrage considéré.

3.1. - Reconnaissance par sismique réfraction

Un ébranlement mécanique (choc ou explosion) se propage dans le sol avec des vitesses qui diffèrent suivant les terrains traversés. Cette célérité dépend de la compacité des couches considérées. Pour les sols de faible compacité (terre végétale, tourbe, argile molle, graviers) la célérité varie de 0 à 500 m/s. Pour les roches meubles compactes, les argiles compactées, les sables fins, les couches meubles aquifères, elle varie de 500 à 1500 m/s. Elle peut atteindre 1500 à 1700 m/s dans les roches compactes (p.e. les calcaires, les granites, le basalte). L'avantage de ce procédé est de ne pas détruire les terrains ; on peut même mesurer les pentes des couches inférieures ou déceler la présence de blocs isolés. Par contre, l'eau peut perturber les résultats.

3.2.- Reconnaissance électrique :

Cette technique fait appel aux mesures de résistivité et de polarisation. A l'intérieur d'un forage, on crée un champ électrique au moyen d'un générateur extérieur et on mesure les *ddp* (différence de potentiel) entre deux électrodes, dont l'une est placée à la surface du sol et l'autre à différentes profondeurs à l'intérieur du forage. Les résistivités varient suivant les couches rencontrées ce qui permet de les classer. Les appareils sont conçus pour mesurer des résistivités sur des tranches de 20 à 30 m. On dispose ensuite de cartes de résistivité qui permettent de déterminer la nature des sols rencontrés.

3.3.- Sondages mécaniques :

Cette méthode encore très employée, à l'inconvénient d'être destructive. Elle consiste à creuser des trous ou des puits soit à la pelle mécanique soit à l'aide d'outils à main. On utilise entre autre des tarières à main mais la profondeur ne peut excéder 10 m. On emploie aussi des

sondeuses à moteur ou des tarières hélicoïdales continues qui ont l'inconvénient de donner des sols remaniés. D'autres machines telles que les carottiers à piston stationnaire les sondeuses à percussion ou à rotation permettent de prélever des échantillons.

3.4.- Essai pressiométrique

L'essai consiste à charger le sol en place au moyen d'une sonde dilatable disposée au sein du terrain. Le pressiomètre se compose d'une sonde de mesure constituée d'un cylindre métallique creux recouvert d'une membrane gonflable et d'un contrôleur de pression et volume qui demeure à la surface du sol, alors que la sonde est introduite dans un trou de 60 mm exécuté à la tarière ou au carottier. En augmentant progressivement la pression dans la sonde, on aboutit à un changement de volume de celle-ci qui provoque un fluage du sol. L'étude des diagrammes contrainte-déformation permet de déterminer les caractéristiques du sol.

3.5.- Essai pénétrométrique :

On distingue les pénétromètres statique et dynamique constitués d'un train de tubes muni à son extrémité d'un carottier ou d'une pointe. Ils sont enfoncés dans le sol par battage (pénétromètre dynamique) ou par application d'une pression continue (pénétromètre statique). Ces essais permettent de déterminer la compacité des couches de sol, leur nature, la résistance à la rupture du sol et la profondeur du rocher. Ils sont utiles pour le calcul des fondations.

3.6.- Essai scissométrique :

Le scissomètre est un appareil qui sert essentiellement à mesurer la résistance au cisaillement des sols peu consistants (argiles molles, vases, tourbes). L'essai consiste à enfoncer dans le sol, à la profondeur désirée un appareil muni d'une tige dont l'extrémité est constituée de deux palettes orthogonales. On mesure le couple de torsion nécessaire pour faire tourner un cylindre de sol autour de son axe vertical, obtenu après cisaillement circulaire. La contrainte de cisaillement développée en tout point de la surface du cylindre est à l'origine d'un couple résistant égal au moment de torsion appliqué lors du glissement. Les moments résistants étant fonction de la cohésion du sol, il est alors facile de calculer cette dernière connaissant le moment appliqué.