

MODULE : MDS (2^e année LMD ST)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION A LA MECANIQUE DE SOL

- **DEFINITION DU SOL**
- **DEFINITION DE LA MECANIQUE DE SOL**
- **ORIGINE DES SOLS**
- **STRUCTURE DE SOL**
- **LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA MECANIQUE DE SOL**

1. Introduction :

Les ouvrages utilisent le sol autant qu'un élément de l'infrastructure qui transmet la charge globale de l'ouvrage vers une couche du sol suffisamment stable et résistante. De ce fait, la réussite de l'ouvrage relève de la réussite du projet de fondation. Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage tel que route, tunnel, barrage poids, mur de soutènement, aérodrome, ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement tel que bâtiment, pont, barrage en arc .etc.

2. Définition du sol :

La géotechnique fait appel aux techniques du génie civil, qu'elle applique à l'étude du sol et de la roche, c'est-à-dire aux matériaux naturels qui constituent l'écorce terrestre. Se divisent en deux grandes catégories :

2.1.Roche :

2.1.1. Définition :

En géotechnique, une roche est un agrégat naturel massif de matière minérale. En géologie, on appelle roche tout élément constitutif de l'écorce terrestre. cela recouvre donc les roches au sens géotechnique, mais aussi le sol, le pétrole, l'eau des nappes, etc.

La définition le plus simple, elles sont des matériaux durs qui ne peuvent être pas fragmentés qu'au prix de gros effort mécanique (composent de plusieurs minéraux).



Figure 01 : Type de roche

2.1.2. Les grandes catégories des roches :

Notons qu'un minéral est formé d'une seule substance, alors qu'une roche peut être composée de plusieurs type de minéraux, de même nature ou de nature différente.

A titre d'exemple, le Quartz est un minéral courant, formé de la silice cristallisée, et les minéraux suivants : Quartz, Feldspath et Mica rentrent dans la composition des roches éruptives, telles que le Granite ou le Pegmatite.

Les roches sont en générale classées en trois grandes catégories : les roches métamorphiques et les roches sédimentaires.

- Les roches éruptives :

Elles résultent du refroidissement et de la consolidation de bains silicatés en fusion, appelés magma volcanique. Ce refroidissement peut se faire soit à la surface de la terre (donnant les roches plutoniques). A titre d'exemple, citons le Balaste, le Rhyolite et le Gabbro.

- Les roches métamorphiques :

Elles sont formées à partir du métamorphisme (ou transformation) des roches préexistantes, essentiellement par recristallisation sous de fortes élévations de la température et/ ou de la pression. Le Marbre, le schiste, le quartzite et l'ardoise en sont des exemples.

- Les roches sédimentaires :

Ces roches se forment à partir de l'altération chimique ou désagrégation physique, d'autre roches à la surface de la terre, ou à partir de la précipitation chimique ou biochimique de solutions.

Comme roche sédimentaires, citons les conglomérats, le grès et les gypses. Notons que les sols sont formés essentiellement des roches sédimentaires.

2.2.Sol :

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physicochimiques, etc..., pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles ⇒ Mécanique des sols.

L'autre définition, ils sont des agrégats naturels de grains minéraux qui peuvent séparables sans nécessiter d'un effort considérable.



Figure 02 : Types des sols

2.2.1. Éléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases:

$$Sol = \text{phase solide} + \text{phase liquide} + \text{phase gazeuse}$$

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent). L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec. L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe.

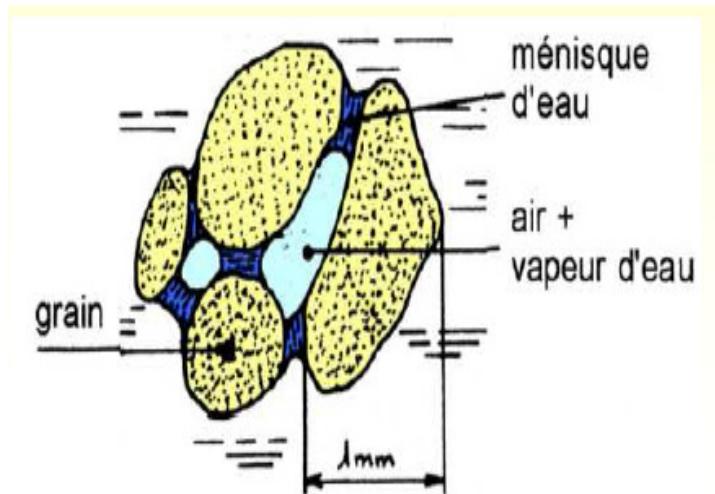


Figure 3 : élément de sol

2.2.2. Remarque :

- Les matériaux de transition entre sols et roches sont nommés SIRT (sols indurés et roches tendres).
- Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes.
- Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

3. Définition de la mécanique de sol (MDS)

3.1. Introduction :

La géotechnique est un domaine essentiellement empirique que l'on pourrait presque considérer comme un art si on la comparait aux autres branches du génie civil. Cette caractéristique tient en grande partie à la nature même des matériaux que sont le sol et la roche. La géotechnique est une science beaucoup plus vaste qui englobe 04 disciplines :

- *Mécanique de Sol (MDS)*
- *Mécanique des Roches (MDR)*
- *Géologie*
- *Étude des matériaux locaux*

3.2. Mécanique de sol « MDS » :

La mécanique des sols est l'étude des propriétés mécaniques, physiques et hydraulique des sols en vue de leur application à la construction.

Le travail d'un mécanicien de sol, ou d'un géotechnicien, se joue en effet sur un ou plusieurs des trois volets :

- *Déformations des sols ;*
- *Résistance au cisaillement des sols ;*
- *Problèmes reliés à l'eau.*

Par certains aspects, la mécanique des sols est proche de la mécanique des milieux continus qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue.

Par d'autres aspects, elle est proche des disciplines qui étudient les milieux minéraux naturels : la géologie, l'hydrogéologie, la mécanique des roches.

- Géologie du terrain : L'étude de la géologie du terrain est d'une grande importance. En effet, elle permet d'identifier les différentes couches du sol, leurs épaisseurs et leurs pendages ainsi que la présence éventuelle de nappe d'eau souterraine. D'autre part, l'étude géologique des couches présentes donne des descriptions qualitatives du sol, répond sur quelques questions relatives à l'histoire du dépôt et permet d'orienter les recherches préliminaires.

- Caractéristiques physico-chimiques : L'étude des caractéristiques physiques et chimiques des sols a montré sa grande utilité pour la prédiction ou l'interprétation du comportement du sol. La majorité de ces propriétés sont déterminées par des essais au laboratoire ou sur site.
- Étude hydraulique : En présence d'eau, l'étude de la perméabilité des différentes couches s'impose pour estimer la résistance du sol dans les conditions les plus défavorables et le risque au glissement. La détermination du niveau de stabilisation et l'étude du régime d'écoulement permet de choisir le matériel de pompage et d'épuisement, comme il permet de parer aux phénomènes des sables bouillant. La détermination de la nature chimique de l'eau souterraine permet de prévoir le mode d'étanchéité des structures enterrées.
- Caractéristiques mécaniques : L'analyse du comportement mécanique des sols repose sur les conclusions des disciplines précédentes ainsi que sur des essais de laboratoire ou sur site. Cette discipline permet de déterminer la résistance du sol et sa capacité portante, et par conséquent le choix du mode de fondation et les dimensions des éléments enterrés. Enfin, elle permet de prévoir de façon quantitative la déformation ou tassement du sol sous la charge de l'ouvrage.

■ Recherche théorique et modélisation numérique : Dans le but de la compréhension des phénomènes physiques complexes, plusieurs théories ont été développées. Elles décrivent les problèmes posés par des modèles mathématiques rigoureux dont la résolution fait recours aux techniques informatiques et numériques de plus en plus avancées et occupe une large partie de la recherche actuelle dans ce domaine.

■ Conception et mise en oeuvre : Ce sont les techniques acquises pour la conception et la réalisation des ouvrages enterrés. Elle prend en compte l'étude des coûts des différentes solutions possibles. Autre que le savoir faire, la réglementation en vigueur doit être suivie pas à pas pour garantir les conditions de sécurité que ce soit pendant la réalisation ou au cours de l'exploitation de l'ouvrage.

La mécanique des sols est une science jeune. Les premiers fondements peuvent être attribués à COULOMB (1773), mais TERZAGHI (1883-1963) a véritablement initié la mécanique des sols moderne (1936).

Ce n'est qu'au 19e siècle que l'étude des terres a reçu un développement plus au moins technique. Glossop divise ce développement en trois périodes: la 1er s'étend de la fin du 19e siècle au début de 20e siècle où les études concernant surtout l'équilibre des massifs des terres; La mécanique des sols classique dont les travaux de Terzaghi sont à l'origine et qui date de la publication de son célèbre livre en 1925; et enfin une nouvelle phase ou une variété de sujets son actuellement développés.

Les premiers fondements peuvent être attribués à COULOMB (1773), Poncelet (1788-1867), Collin (1846), Darcy (1803-1858), Rankine (1820-1872), Bousinesq (1842-1829), Atterberg (1846-1916) et Mohr (1835-1918); mais TERZAGHI (1883-1963) a véritablement initié la mécanique des sols moderne (1936).

Siècle	Auteur	Théorie
18ème	Coulomb	Résistance au cisaillement
19ème	Collin	Rupture dans les talus d'argile
	Darcy	Écoulement de l'eau à l'intérieur du sable
	Rankine	Pression des terres sur les murs de soutènement
	Gregory	Drainage horizontal, remblai compacte avec contrefort pour stabiliser la pente des tranchées de voies ferrées
20ème	Atterberg	Limites de consistance de l'argile
	Terzaghi	Premier manuel moderne de mécanique des sols
	Casagrande	Essais sur la limite de liquidité

Tab.1 : La mécanique des sols à travers ses grandes théories.

3.3. *Mécanique des roches « MDR » :*

Mécanique des roches « MDR » est une science appliquée qui a pour objectifs d'étudier le comportement de la roche et ses propriétés.

3.4. *La géologie*

La géologie étudie les matériaux constituant la partie observable du globe terrestre, ainsi que l'ordre suivant lequel ces matériaux sont réparties dans le temps et dans l'espace. Son but essentiel est l'histoire de la terre et son évolution.

3.5. *La pédologie :*

La pédologie étudie spécialement la couche supérieure de l'écorce terrestre utilisée par les racines des plantes. Elle met en lumière le rôle des constituants du sol fréquemment négligés par les géotechniciens : les matières organiques et la matière vivante (bactéries).

4. Origines des sols :

La formation d'un sol est un processus très lent, appelé pédogénèse qui est la science de l'étude de la formation et de l'évolution des sols sous l'action naturelle.

Les sols proviennent tout simplement des roches, mais ils peuvent contenir aussi des matières organiques. Suivant les types d'altération les sols résultant auront des compositions différentes :

Roche → La désagrégation physique et mécanique des roches consolidées donne des fragments de roche de même composition que la roche mère : « gravier, sable et limon ».

Roche → la décomposition physico-chimique de la roche en place ou des fragments de roche donne : Des nouveaux composés : « Argile et marne ».

Les sols proviennent aussi par la décomposition d'organismes vivants : qui donne végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

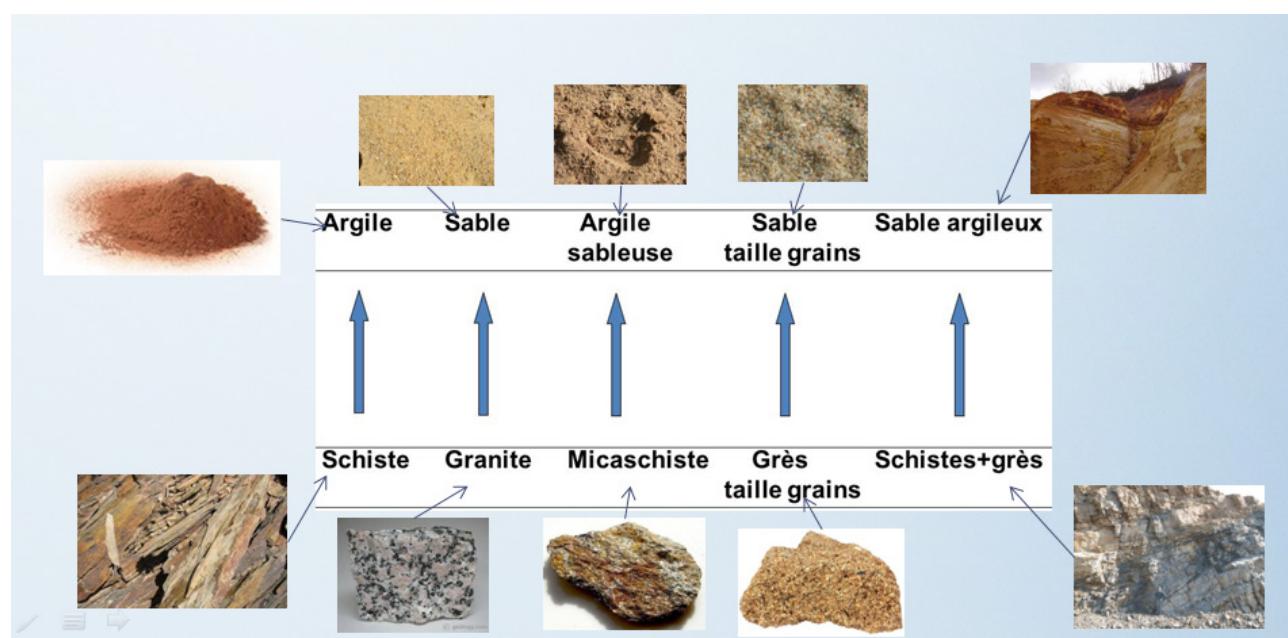


Figure 4 : Exemple sur l'origine des sols

On distingue également :

- *Les sols résiduels résultant de l'altération sur place des roches ;*
- *Les sols transportés provenant du dépôt des produits d'altération préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent au concepteur d'ouvrages les problèmes les plus délicats.*

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

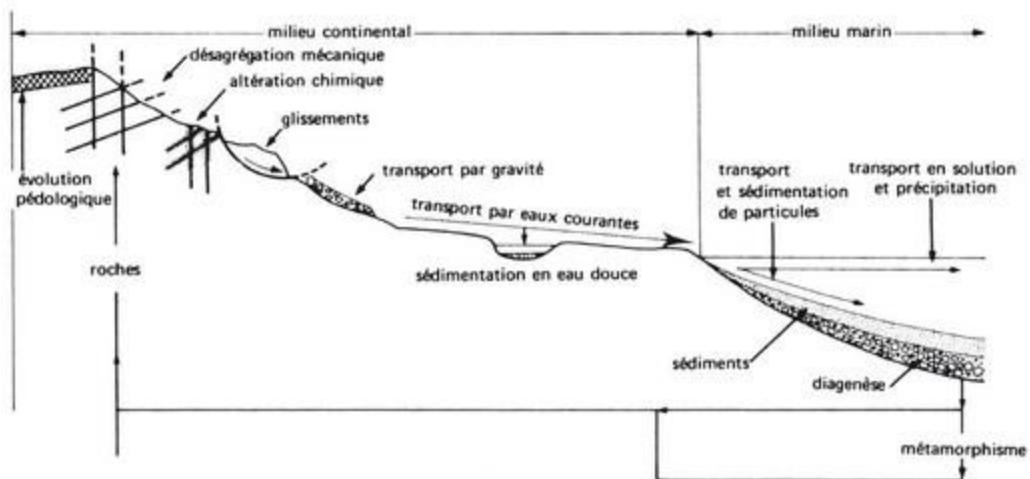


Figure 5 : Origine des sols

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

La plupart des sols rencontrés par les constructeurs sont les sols transportés par l'eau. Dans les hautes vallées ou sur les flancs, les sols sont formés de matériaux de toutes tailles souvent assez instables. Les grains les plus faibles sont lavés par les pluies et emportés, les roches sont disloqués par les agents atmosphérique, ils sont aussi entraînés par les torrents puis, par les rivières d'autant plus loin qu'ils sont petits et qu'ils se roulent. Les matériaux les plus fins se déposent dans les estuaires où la vitesse des courants à suffisamment diminué.

Il apparaît donc un classement des matériaux, qui ont des propriétés très différentes de l'amont à l'aval d'une rivière où les matériaux sont très poreux et saturés.

Les dépôts éoliens ont des caractéristiques très différentes, les matériaux les plus gros que le vent peut transporter sont les sables, qui se déposent en leur lieu en formant des dunes. Les matériaux plus fins peuvent être soulevés dans la haute atmosphère et transportés sur des centaines voir des milliers de Kilomètres puis déposés en formation non stratifiées.

Certains sols peuvent contenir également des résidus de végétaux, ce sont les sols organiques, les tourbes, les vases Etc.

On distingue plusieurs agents de transport pour créer les sols meubles, qui sont :

- Désagrégation : Les variations de température entre le jour et la nuit sont suffisantes pour faire dilater et contracter la roche, ce qui la fissure et la casse.
- Gélification : Semblable à la désagrégation, l'eau joue ici un rôle primordial. Lorsqu'elle est présente dans les fissures, l'eau qui gèle augmente son volume et fait éclater la roche.
- Action des racines : Les racines qui s'insinuent dans les fissures avancent et grossissent au fur et à mesure que la plante croît. Cela élargit les fentes et casse la roche.

- Action du vent : En poussant de la poussière et d'autres débris, le vent arrache des morceaux de roche.
- Hydrolyse : Le CO_2 contenu dans l'eau s'attaque aux roches par réaction chimique ce qui laisse s'échapper des ions qui sont à leur tour rendus solubles dans l'eau.
- Oxydation : L'oxydation est une réaction avec l'air et l'eau qui entraîne une dissociation des cristaux à l'intérieur de la roche.
- Hydratation : Il s'agit d'une réaction avec l'eau qui s'infiltre dans les roches. Cette action s'accompagne toujours d'une augmentation de volume.
- Dissolution : Phénomène souvent observé. Cela arrive lorsqu'une roche se dissout ou se solubilise dans l'eau.
- Carbonatation : Autre réaction avec le CO_2 qui est facilement soluble dans l'eau rend celle-ci acide. Cet acide attaque les roches et rend la dissolution plus facile.
- Glissement
- Éboulement (chute des roches).
- Sédimentation.

Les minéraux le plus abondants dans les sols sont:

- Silicates (90% des sols mondiaux)
- Carbonate
- Phosphates
- Les oxydes
- Les métiers organiques.

5. Structure de sol

5.1. **Texture des sols :**

La texture fait référence à l'apparence extérieure d'un sol ; elle peut varier suivant les dimensions et la forme des particules, ainsi que selon la distribution relative des grosseurs de grains. Par conséquent, les sols à grains grossier comme les sables et les graviers, ont une texture grossière ; les sols à texture fine, tels que les limons (silts) et les argiles, sont constitués essentiellement de grains de minéraux très petits, invisibles à l'œil nu.

La texture d'un sol et, en particulier, celle d'un sol grossier, est directement liée à ses propriétés géotechniques. En réalité, la texture est à la base de certains systèmes de classification utilisés en agronomie plutôt qu'en mécanique de sol. Cependant, certains termes employés pour décrire la texture (gravier, sable, limon et argile) sont utiles en géotechnique. La présence d'eau dans les sols à grains fins influence considérablement le comportement de ces sols ; en fait, elle joue un rôle beaucoup plus important que la grosseur ou la texture des grains. L'eau modifie les forces qui agissent sur les grains et peut influencer leur « plasticité » et leur « cohésion ».

Selon leur texture, les sols peuvent être classés en deux catégories : « Les sols à grains grossiers » et « les sols à grains fins ». La démarcation correspond au diamètre de la plus petite particule visible à l'œil nu, soit environ 0.08 mm. Les sols à grains plus gros comme les sables et les graviers sont dits grossiers alors que les sols à particules plus petites comme les limons et les argiles sont appelés des sols fins. On peut aussi classifier les sols suivant leur plasticité et leur cohésion 'la cohésion est la force par laquelle les molécules homogènes d'un corps adhèrent les unes aux autres. Ainsi, les sables, contrairement aux argiles, ne sont ni plastique ni cohérents ; ils sont pulvérulents. Quant aux limons, il se situent à mi-chemin entre les sables et les argiles : ils ont des grains fins, mais ils ne sont ni plastiques ni

cohérents. Les caractéristiques générales des sols sont résumées au tableau 2. Une longue pratique en laboratoire est nécessaire pour pouvoir identifier facilement les différents types de sols suivant leur texture et certaines caractéristiques telles que la plasticité et la cohésion. On remarquera également que substantif argile désigne aussi bien une catégorie de minéraux appelés minéraux argileux que les sols qui contiennent ces minéraux.

	<i>Gravier, sables</i>	<i>Limons</i>	<i>Argiles</i>
Grosseur des grains	<i>A gros grains visibles à l'œil nu</i>	<i>A grains fins invisibles à l'œil nu</i>	<i>A grains fins invisibles à l'œil nu</i>
Caractéristiques	<i>Pulvérulents</i> <i>Non plastiques</i> <i>Granulaires</i>	<i>Pulvérulents</i> <i>Non plastiques</i> <i>granulaires</i>	<i>Cohérents</i> <i>Plastiques</i> -----
Effets de l'eau sur le comportement du sol	<i>Sans grande importance</i> <i>« exception : matériaux granulaires, lâches, saturés et sous l'effet de charges dynamiques »</i>	<i>Importants</i>	<i>Très importants</i>
Effets de la distribution granulométrique sur le comportement du sol	<i>Importants</i>	<i>Sans grande importance</i>	<i>Sans grande importance</i>

Tableau 2 : Caractéristiques des sols

Il y a plusieurs formes- des grains de sol : Arrondies, sous-arrondies, angulaires et sous-angulaires (voir figure 6).

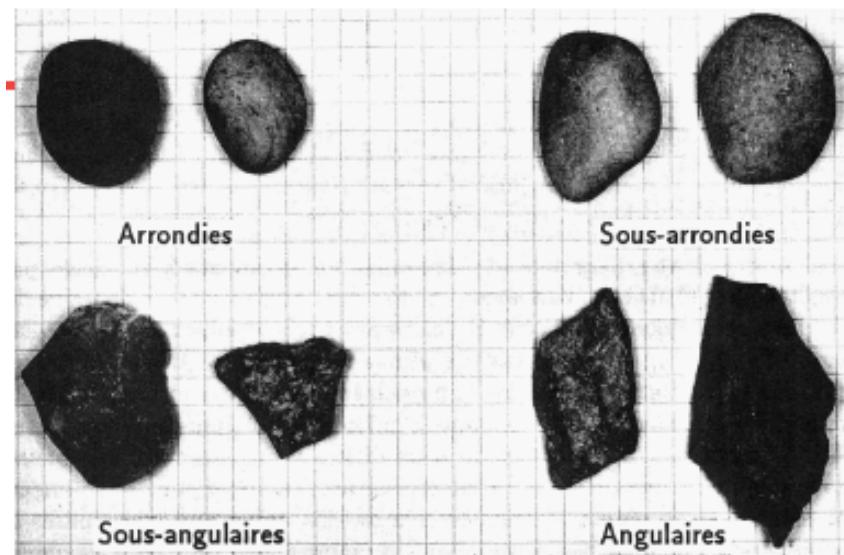


Figure 6 : forme des grains des sols.

La structure de sol dépend plusieurs paramètres : La forme des grains, La disposition des grains, La répartition des particules et la Force inter-granulaire entre les grains des sols.

La structure des sols généralement constitue par : solide (grains, appelé phase solide) et les vides (Eau (phase liquide) + Air (phase gazeuse)) ; voir la figure 7.

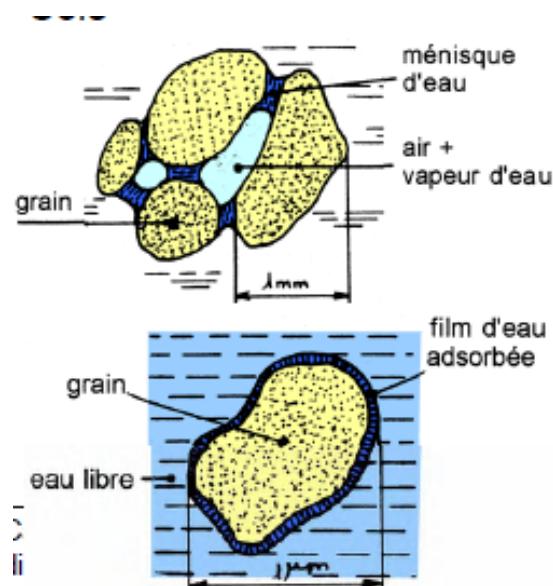


Figure 7 : élément de sol réel

Selon la figure 7 l'eau a plusieurs dispositions par rapport aux grains des sols : l'eau adsorbée par grain, l'eau libre dans le vide et l'eau capillaire qui forme le ménisque d'eau entre les deux grains. Cependant, Il y a plusieurs états de l'élément de sol, si le vide contient

- 100% eau (Sol est totalement Saturé) ;
- < 100 et > 0% eau (Sol non saturé)
- 0% eau (Sol sec)

5.2. Structure des sols pulvérulents (grenus) :

- $D > 80 \mu\text{m}$ (exemple: les cailloux, les graviers et les sables) ;
- Les grains se détachent les uns sur des autres sous leurs poids.
- Les principales forces intervenant dans l'équilibre de la structure sont les forces de pesanteur ; c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister. Cette stabilité sera d'autant meilleure que le nombre de contact sera élevé (sol bien gradué).

Dans le cas de sols humides non saturés (fig.7) : l'eau est retenue sous forme de ménisque au voisinage des points de contacts entre les grains par des forces de capillarité; elle crée entre ces derniers des forces d'attraction. Le matériau présente une cohésion capillaire (châteaux de sable). Les forces capillaires ont négligeables devant les forces de pesanteur.

5.3. Structure des sols fins :

Les particules restent collées les une aux autres. Le sol présente une cohésion: il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées. Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles ont une forme de plaquettes.

La surface des plaquettes étant chargée négativement, les particules sont soumises à des forces d'attraction inter-granulaires diverses: forces électriques forces de Van der Waals. Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente, on admet qu'elles ont négligeables à partir d'une distance de 0,4 μm . Pour qu'elles puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire que les grains de ce sol aient des dimensions très petites.

Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée ou eau liée d'épaisseur à peu près constante (= 0,01 μm) (fig 7). Elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes de celles de l'eau libre:

- elle a une très forte densité: 1,5*
- elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),*
- sa viscosité très élevée qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux: fluage, compression secondaire...,,*
- elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C.).*

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques du sol.

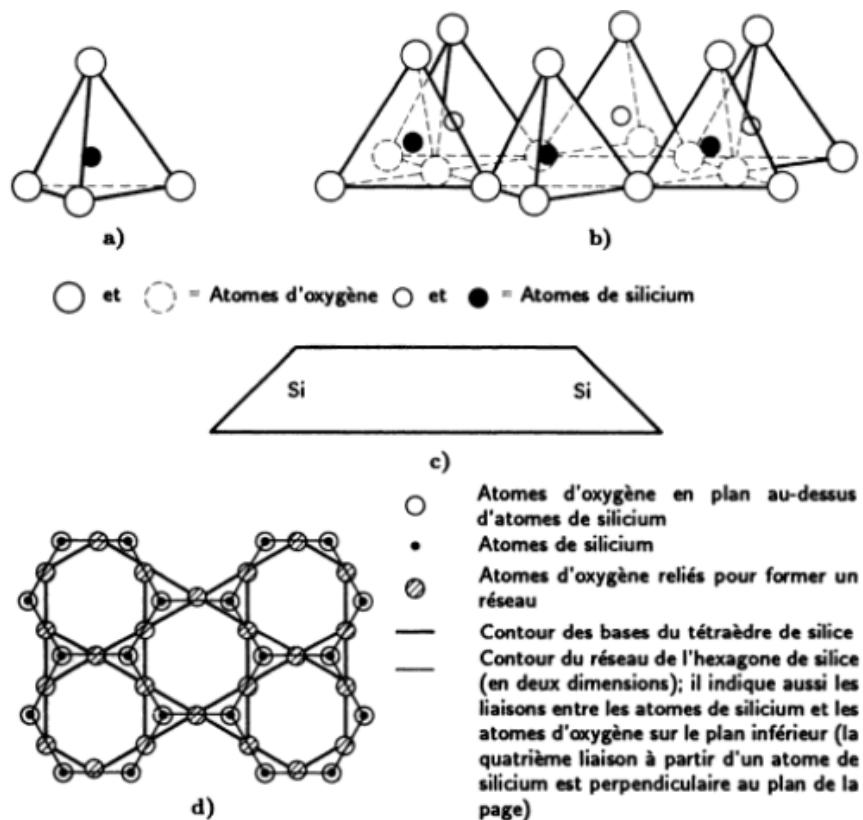
L'étude des propriétés des argiles est beaucoup plus complexe que celle des sols pulvérulents, car elles dépend de la structure chimique du minéral argileux ; pour cela il faut détailler la structure de ce type de sol.

5.4. Caractéristique de l'argile :

5.4.1. Introduction

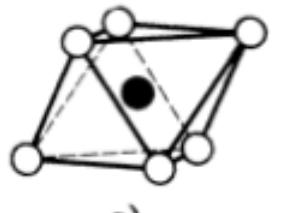
Les particules d'argiles sont généralement très petites $< 2\mu\text{m}$, elles sont composées de silicates hydratés d'aluminium et partiellement de magnésium. Ils ont une organisation complexe, la description suivante va de la structure de base à la texture des argiles et concerne : *Couches, Feuilles, Particules élémentaires et Cristallites*.

⊕ Les couches d'éléments : Les couches d'éléments sont composées de **tétraèdres** de Si^{4+} entourés de quatre anions O^{2-} aux sommets (Fig.8) ou **d'octaèdres** d' Al^{3+} , généralement, entourés de six hydroxydes OH (Fig.9).

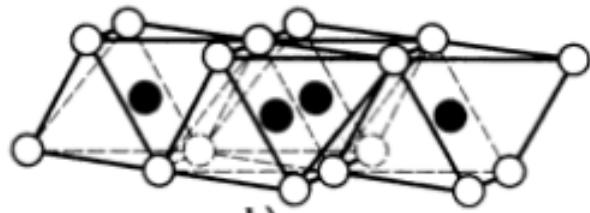


a) Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959); b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim, 1959); c) schéma du feuillet de silice (d'après Lambe, 1953); d) vue en plan du feuillet de silice (d'après Warshaw et Roy, 1961).

Figure 8 : Tétraèdres



a)



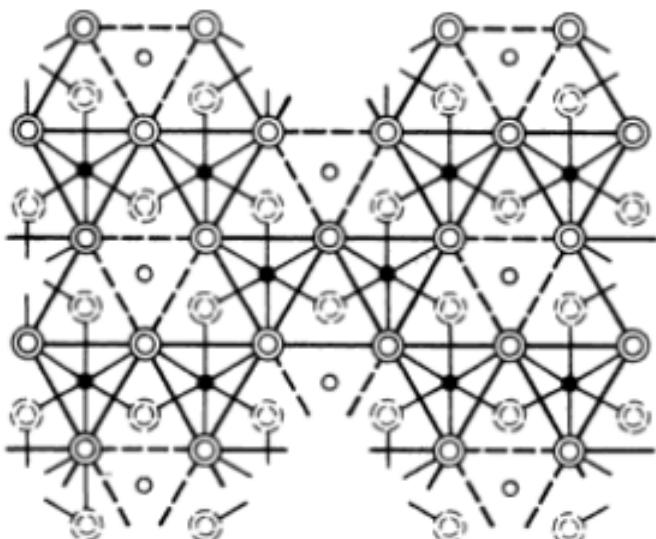
b)

○ et ○ = Hydroxyles ou
atomes d'oxygène

● Atomes d'aluminium, de magnésium, etc.



c)



d)

○ Hydroxyles au plan supérieur

● Atomes d'aluminium

Place des octaèdres vacants
○ (serait comblée dans une bru-
cite)

○ Hydroxyles au plan inférieur

Contour des faces de l'oc-
taèdre d'aluminium paral-
lèles au plan inférieur des
hydroxyles

Contour des faces d'un
octaèdre vacant parallèles
au plan inférieur des hy-
droxyles

Liaisons entre des ato-
mes d'aluminium et des
hydroxyles (six à partir
de chaque atome d'alumi-
nium)

a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim, 1959); b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959); c) schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Lambe, 1953); d) vue en plan du dessus du feuillet en octaèdre (d'après Warshaw et Roy, 1961).

Figure 9 : Octaèdres

Les feuillets élémentaires : On distingue 2 types de feuillets élémentaires

- Les feuillets 1/1 formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (Fig.10) : kaolinite.
- Les feuillets 2/1 formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (Fig.11) : illites, smectites, interstratifiés, chlorite.

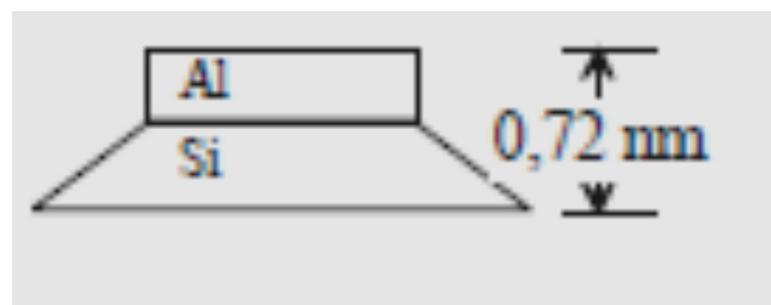


Figure 10 : schéma du feuillet 1/1.

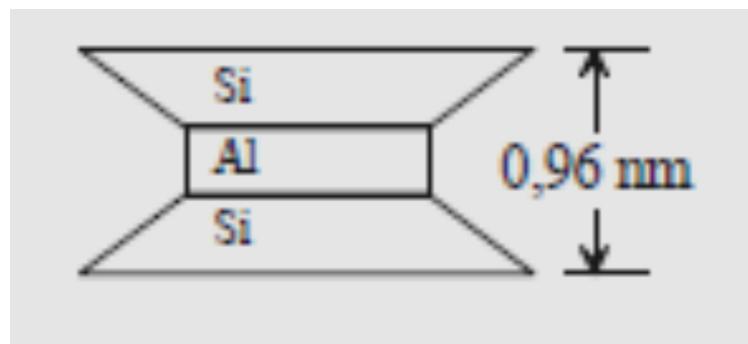


Figure 11 : schéma du feuillet 2/1.

Les liaisons entre les couches composant les feuillets sont très rigides.

- Particules élémentaire : Les particules élémentaires sont constituées par un empilement de feuillets élémentaires
- Cristallite ou tactoïde : Les cristallites ou agrégats ou tactoïdes sont composés de plusieurs particules.

■ Texture: Les cristallites s'organisent en unités morphologiques. On peut distinguer par exemple des structures flokulées, bord-face et des structures dispersées face-face. (Fig 12)

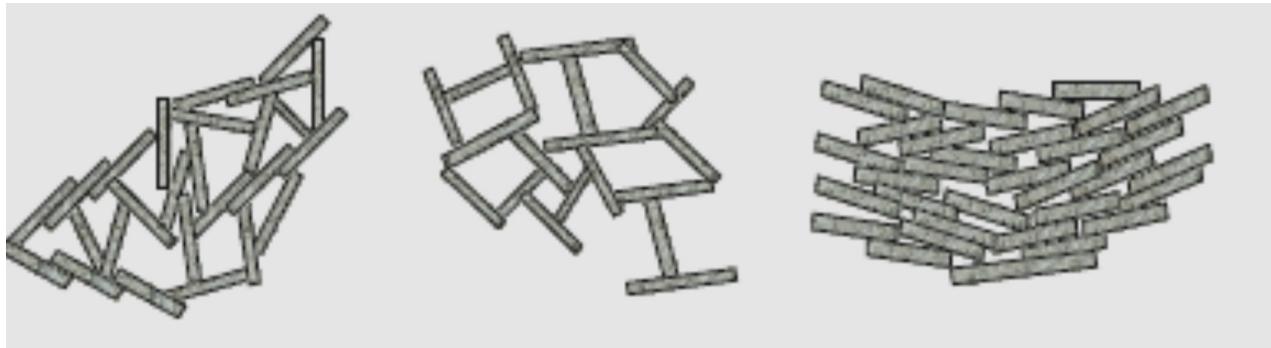


Figure 12 : Texture des argiles.

5.4.2. Physico-chimie des argiles :

Des substitutions iso-morphiques d'ions dans la structure des feuillets de certaines argiles créent des déficits de charges électriques qui doivent être compensées par des cations compensateurs ou cations échangeables situés dans les espaces inter-foliaires.

Les bords et les faces des particules primaires peuvent être chargés positivement ou négativement. Par exemple si on remplace dans les tétraèdres un Si^{4+} , par un Al^{3+} (substitution iso-morphique) des charges négatives vont apparaître sur les faces des particules (Fig 13).

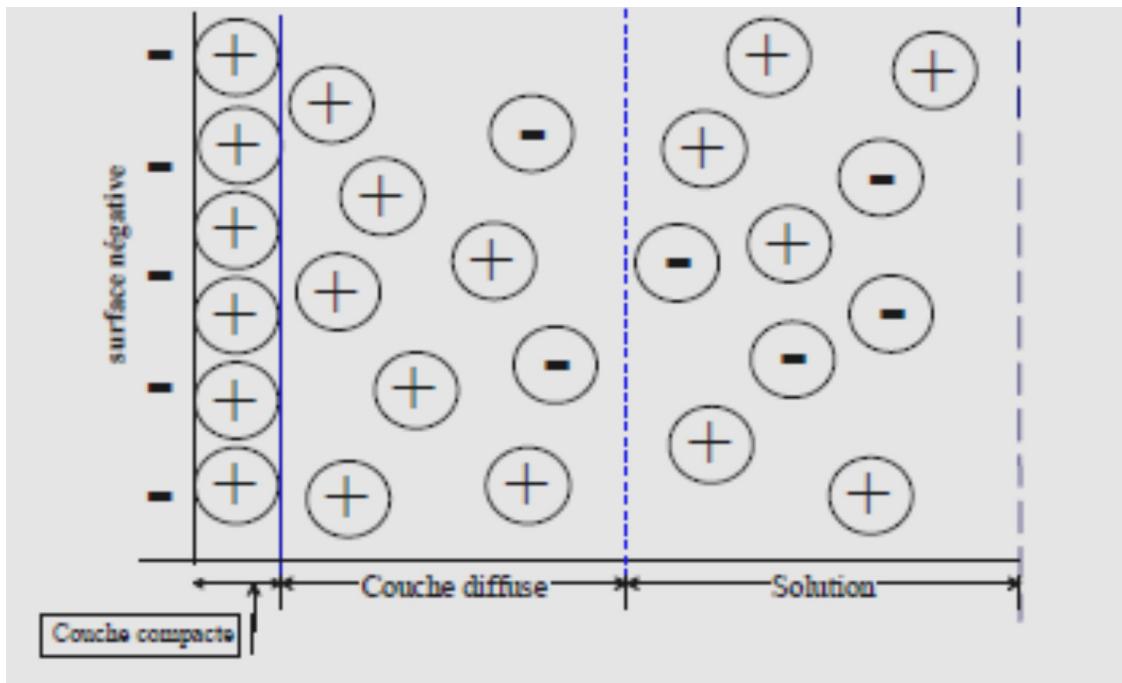


Figure 13: charges des phases de la particule argileuse.

Dans une solution aqueuse, les particules s'entourent d'un certain nombre de cations échangeables pour que le système eau-argile acquière l'électroneutralité par compensation des charges

L'existence des charges électriques sur les surfaces des particules argileuses entraîne une orientation des molécules d'eau polaire au voisinage de la particule. Les ions H^+ et OH^- répartis autour de la particule constituent une double couche électrique caractéristique des colloïdes (Fig.14).

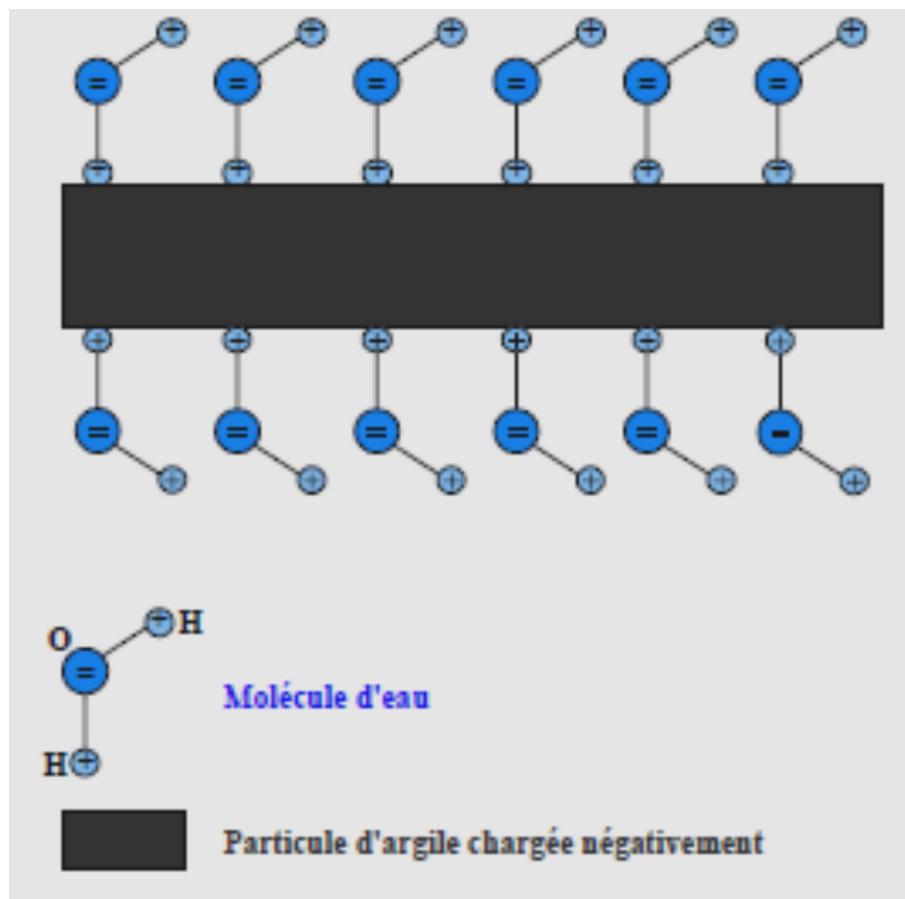


Fig 14 : Dipoles d'eau.

Près de la surface des particules il y a un excès de charges positives par rapport aux charges négatives, loin de la surface on a une concentration égale entre les cations et les anions. On considère une double couche électrique diffuse composée (Fig 15) :

- d'une couche d'eau compacte, adsorbée au solide, de Stern
- d'une couche diffuse de Goüy et Chapman

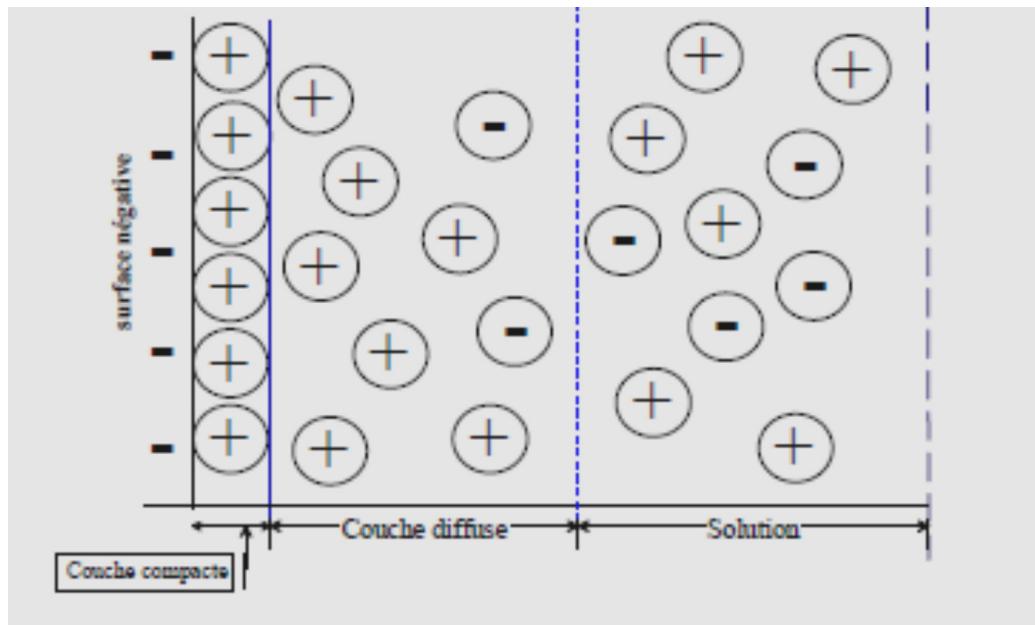


Figure 15 : Double couche électronique

5.4.3. Principaux types d'argile

Parmi les deux cents types d'argile on rencontrera dans les travaux liés à la géotechnique essentiellement les argiles monominérales suivantes : « **la kaolinite, l'illite et la montmorillonite** ».

Kaolinite :

La kaolinite ne présente aucune substitution iso-morphique, les charges disponibles pour la fixation de cations hydratables ne se trouvant qu'en bordure des feuillets élémentaires. Le diamètre de la particule est de l'ordre de $1\mu\text{m}$. Le feuillet élémentaire est 1/1, la particule élémentaire comporte quelques dizaines de feuillets (fig 16). N'ayant pas de substitution iso-morphique les liaisons entre feuillets sont très stables.

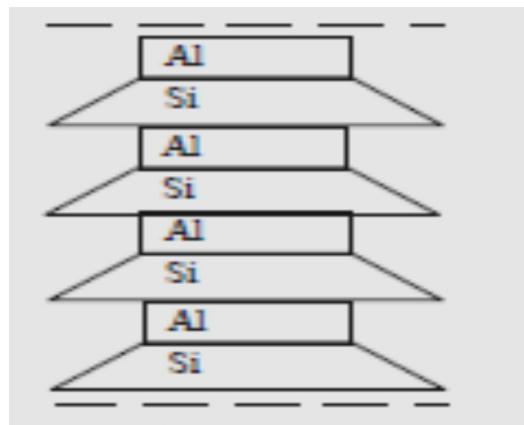


Fig 16 : Kaolin.

■ **Illite**

Le feuillet élémentaire est 2/1. Dans les couches tétraédriques un cation Si^{4+} sur quatre est remplacé par un cation Al^{3+} . Le déficit décharge qui en résulte est compensé par des ions potassiums K^+ anhydres situés entre les feuillets. Le potassium situé entre les feuillets compense les charges internes et bloque toute hydratation et expansion foliaire (Fig 17). La particule primaire d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une largeur de $0,3\mu m$ et une épaisseur de 10 nm .

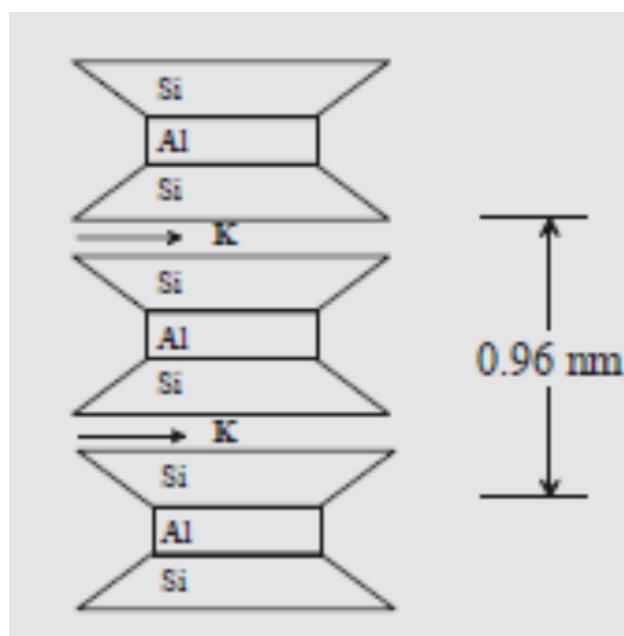


Figure 17 : Illite

Montmorillonite

Le feuillet élémentaire est 2/1. Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{+3} en couche octaédrique par des cations Mg^{+2} . Ce déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables localisés entre les feuillets (Fig. 18). L'épaisseur des feuillets dépendra de l'état d'hydratation.

Le nombre de feuillets dépend des paramètres minéralogiques, la nature des cations échangeables et la concentration en sels de la solution. L'unité morphologique est un assemblage bord à bord de particules primaires qui constituent des rubans plus ou moins chiffonnés.

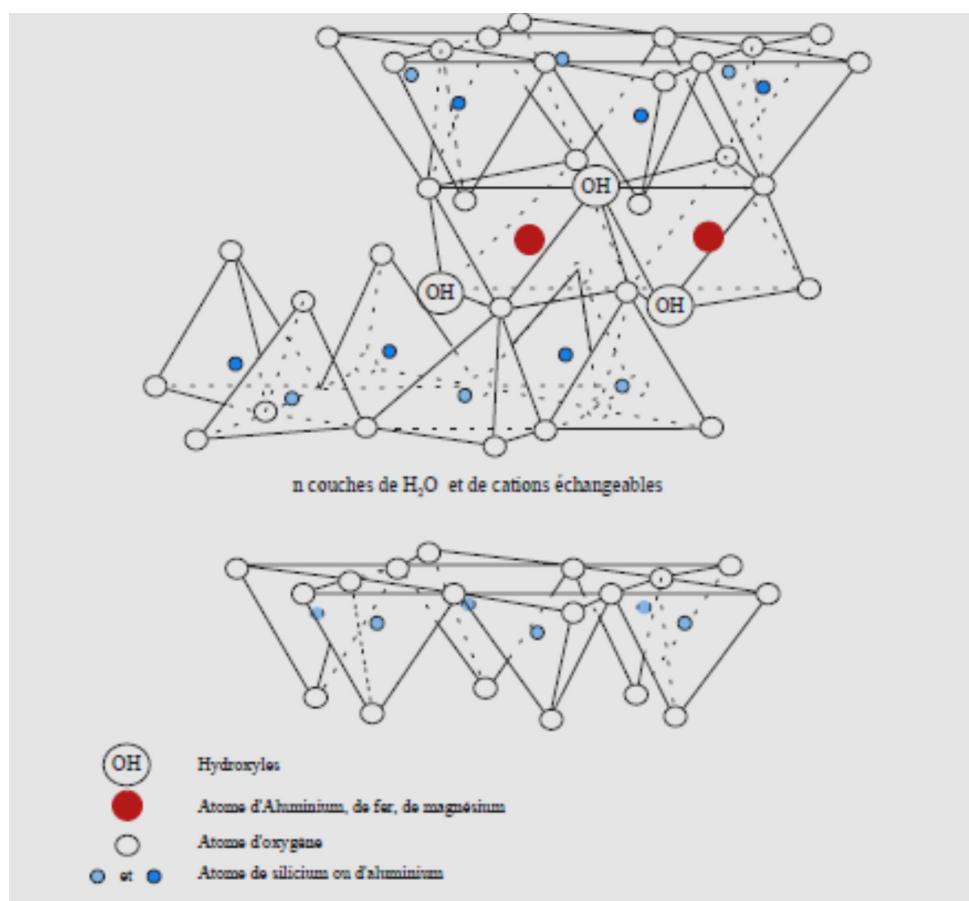


Fig 18 : Montmorillonite.

Sur les chantiers il est très rare d'avoir une argile monominérale, généralement l'argile sera composée de plusieurs types d'argile. Plus généralement encore le sol peut être composé d'argile et de fractions plus grossières, limon, sable, gravier. On considère qu'il faut au moins 40% d'argile dans un sol pour considérer qu'on a un matériau argileux pour lequel l'argile impose ses propriétés à l'ensemble du sol. A taux d'argile comparable la nature des minéraux argileux est d'une importance capitale.

Les montmorillonites ont des propriétés de gonflement, des propriétés d'échanges et d'adsorption aptes à retenir certains polluants.

Type d'argile	Feuilles élémentaires	Nombre de feuilles par particule	Dimensions d'une particule		Surface spécifique en m^2/g	C.E.C en meq/100g
			largeur en μm	épaisseur en μm		
Kaolinite		100-150	1	0,1	20-70	3-15
Illite		10	0,3	0,01	65-180	10-40
Montmorillonite (Na)		1	0,1	0,001	800	100

5.5. Caractéristique des matières organiques

La structure des sols organique est fonction de la teneur en matière organique (MO)

- $MO < 3\% : \text{sol inorganique}$
- $3\% < MO < 10\% : \text{sol faiblement organique}$
- $10\% < MO < 30\% : \text{sol moyennement organique}$

Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques :

- *des matières organiques libres : débris végétaux et résidus animaux ;*
- *des matières organiques liées : colloïdes humiques fixés à la phase minérale.*

- ✿ *Les tourbes : Elles se trouvent à 90% dans les régions tempérées et froides de l'hémisphère nord, est un mélange hétérogène de végétaux plus ou moins décomposés et de matériaux inorganiques qui tend à libérer dans l'atmosphère au moins une partie de son carbone. On distingue deux grandes catégories de tourbières : plates (se formant sur sols calcaires) et Les tourbières littorales (se formant sur des fonds lagunaires)*
- ✿ *Les vases : Les vases sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2mm, dont la matière organique est comprise entre 2 et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques. Elles sont lacustres, et sont en particulier très abondantes dans les estuaires. Elles sont fréquemment thixotropes.*

6. Domaine d'application de la mécanique de sol (MDS) :

Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment.

6.1. Fondations d'ouvrage ou de bâtiment

Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions ; Les mécaniciens des sols distinguent :

- *les fondations superficielles (semelles ou radiers) ;*
- *les fondations profondes (pieux, puits, barrettes).*

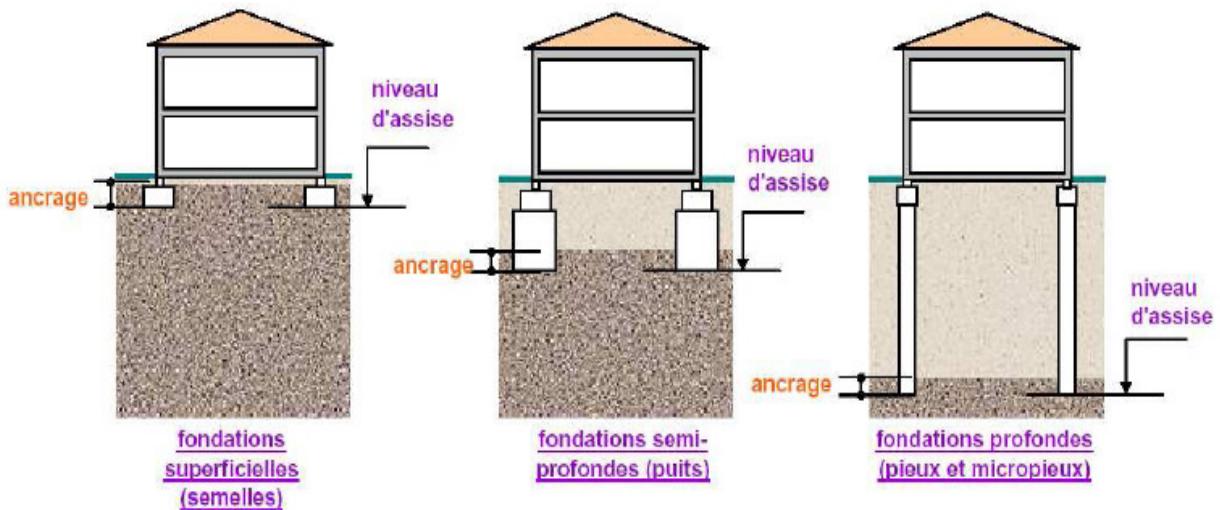


Figure 19 : types des fondations.

6.2. Ouvrages mixtes :

Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que :

- les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...) ;
- les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines... ;
- les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement).

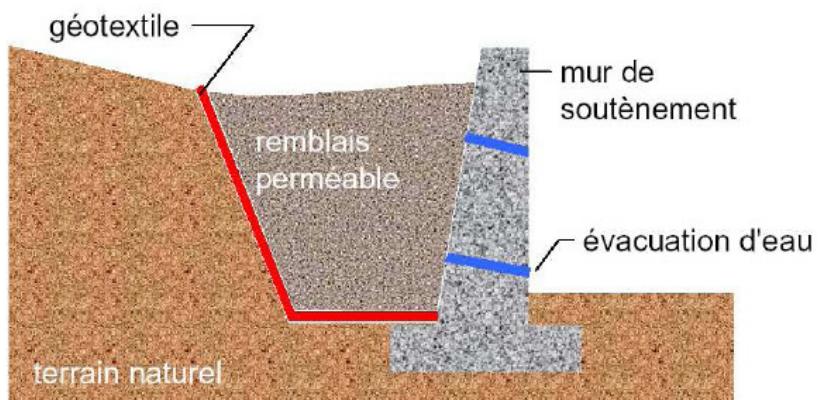


Figure 20 : les murs de soutènement.



Figure 21 : les palplanches.

6.3. Ouvrages en sol :

Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien :

- *les remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...);*
- *des déblais (talus, canaux, bassins...).*



Figure 22 : barrages.

6.4. Milieux naturels :

Le domaine d'application de la mécanique des sols ne se limite pas aux constructions ; il comprend également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues.